Ponašanje neduktilnih armirano-betonskih okvira sa zidanim ispunom na djelovanje potresa

Gazić, Goran

Doctoral thesis / Disertacija

2014

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:133:041735

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-25**

GRAĐEVINSKI I ARHITEKTONSKI FAKULTET OSIJEK
Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek

Repository / Repozitorij:

Repository GrAFOS - Repository of Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
GRAĐEVINSKI FAKULTET OSIJEK

DOKTORSKA DISERTACIJA

Ponašanje neduktilnih armirano-betonskih okvira sa zidanim ispunom na djelovanje potresa

Goran Gazić

Osijek, 2014.

DOKTORSKA DISERTACIJA

PONAŠANJE NEDUKTILNIH ARMIRANO-BETONSKIH OKVIRA SA ZIDANIM ISPUNOM NA DJELOVANJE POTRESA

PODACI O AUTORU

Ime i prezime: **dr. sc. Goran Gazić**, mag.ing.aedif.

Mjesto i godina rođenja: Banja Luka, Bosna i Hercegovina, 1983.

Diplomirao: Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski fakultet Osijek, 2007.,

Zaposlen: Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski fakultet Osijek

PODACI O DOKTORSKOM RADU:

Znanstveno područje: Tehničke znanosti
Znanstveno polje: Građevinarstvo

Mentor: prof. dr. sc. Vladimir Sigmund

POSTUPAK OCJENE I OBRANA:

Prijava teme: rujan 2013.

Povjerenstvo za ocjenu doktorske disertacije:

prof. dr. sc. Dragan Morić, dipl. ing. građ., Građevinski fakultet Osijek, predsjednik
prof. dr. sc. Vladimir Sigmund, dipl. ing. građ., Građevinski fakultet Osijek, član i mentor
prof. dr. sc. Mehmed Čaušević, dipl. ing. građ., Građevinski fakultet Rijeka, član

Povjerenstvo za obranu doktorske disertacije:

prof. dr. sc. Dragan Morić, dipl. ing. građ., Građevinski fakultet Osijek, predsjednik
izv. prof. dr. sc. Ivica Guljaš, dipl. ing. građ., Građevinski fakultet Osijek, član
prof. dr. sc. Mehmed Čaušević, dipl. ing. građ., Građevinski fakultet Rijeka, član

Mjesto i datum obrane: Građevinski fakultet Osijek, 26. lipnja 2014.

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
GRAĐEVINSKI FAKULTET

DOKTORSKA DISERTACIJA

Ponašanje neduktilnih armirano-betonskih okvira sa zidanim ispunom na djelovanje potresa

Goran Gazić

Osijek, 2014.

Mentor rada: Prof. dr. sc. Vladimir Sigmund

Doktorski disertacija ima 385 stranica, 275 prikaza dijagrama i fotografija, 137 tablica i dva dodatka.

ŽIVOTOPIS

Goran Gazić rođen je 29. ožujka 1983. u Banja Luci, Bosna i Hercegovina. Osnovnoškolsko i srednjoškolsko obrazovanje je završio u Osijeku, gdje je i 2007. diplomirao na Građevinskom fakultetu pod mentorstvom Prof. dr. sc. Vladimira Sigmunda.

Od 2008. godine do danas zaposlen je na Građevinskom fakultetu u Osijeku u zvanju asistenta, gdje sudjeluju u izvođenju nastave na predmetima Zavoda za tehničku mehaniku. Osim u nastavi sudjeluje i na domaćim i međunarodnim znanstvenoistraživačkim projektima te polazi seminare usavršavanja u inozemstvu. Do sada je kao autor i koautor objavio nekoliko znanstvenih radova u domaćim časopisima te na domaćim i međunarodnim konferencijama.

Član je Hrvatskog društva za mehaniku (HDM).

ZAHVALA

Istraživanje provedeno u sklopu ove disertacije dio je znanstvenoistraživačkog projekta Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta Republike Hrvatske pod nazivom: „Seizmički proračun okvirnih konstrukcija s ispunom“.

Ovim putem izražavam veliku zahvalnost mentoru i voditelju projekta Prof. dr. sc. Vladimiru Sigmundu na pruženom znanju, potpori, strpljenju i vremenu koje mi je podario. Hvala Vam od srca, bez Vaše potpore ne bi bilo ni ove disertacije.

Zahvaljujem se i svim kolegama suradnicima na projektu i Zavoda za tehničku mehaniku, a posebno kolegama Hrvoju Draganiću i Tihomiru Dokšanoviću na bezuvjetnoj potpori i pomoći tijekom provedbe eksperimentalnih istraživanja, te Ivanu Radiću i Jurku Zovkiću na intelektualno stimulativnim razgovorima.

Na kraju, želim izraziti i iznimnu zahvalnost svojoj obitelji, ocu Mirsadu, majci Snježani i sestri Sanji, bez čije potpore i razumijevanja ovo istraživanje nikada ne bi bilo provedeno. Ova disertacija posvećena je vama.

SAŽETAK DOKTORSKE DISERTACIJE

Ponašanje neduktilnih armirano-betonskih okvira sa zidanim ispunom na djelovanje potresa

Nearmirana zidana ispuna uobičajeno se koristi prilikom ostvarenja arhitektonske forme armirano-betonskih okvirnih konstrukcija. Dobiveni sustav je ekonomičan, arhitektonski privlačan i funkcionalan te je kao takav čest u područjima srednje i visoke seizmičnosti diljem svijeta. Poseban slučaj predstavljaju neduktilne armirano-betonske okvirne konstrukcije sa zidanim ispunom koje svojim svojstvenim nedostacima značajno doprinose povećanju seizmičke oštetljivosti što u konačnici za posljedicu može imati pojavu meke etaže, odnosno rušenje konstrukcije.

Iako prva eksperimentalna istraživanja datiraju iz 50-ih godina prošloga stoljeća, tek je razvojem velikih istraživačkih centara došlo do zamaha u istraživanju ponašanja armirano-betonskih okvira za zidanim ispunom. Međutim, u literaturi se može pronaći relativno mali broj istraživanja kojima su pokriveni svojstveni nedostatci i rubna područja ponašanja neduktilnih armirano-betonskih okvirnih konstrukcija sa zidanim ispunom što je i osnovna motivacija provedbe istraživanja. Neovisno radi li se o duktilnim ili neduktilnim okvirnim konstrukcijama sa zidanim ispunom, njihovo ponašanja tijekom potresa i dalje ostaje kontroverzno pitanje u stručnim i istraživačkim krugovima s obzirom na materijalnu i oblikovnu raznovrsnost te složenost i uobičajenu pojavu višestrukih mehanizama sloma elemenata sustav gdje posebnu ulogu ima interakcija okvira i ispune. Dodatne nesigurnosti, kao što su izostanak pouzdanog modela procjene horizontalne nosivosti i krutosti, gdje se nosivost i krutost ne mogu odrediti na temelju superpozicije doprinosa elemenata sustava, dovele su do izostajanja racionalnih modela procjene kako u praksi tako i u modernim seizmičkim propisima. Iako je u modernim seizmičkim propisima prepoznat utjecaj ispune, ona se i dalje tretira kao nekonstruktivni elementa, a interakcija okvira i ispune se ili u potpunosti zanemaruje ili ostvaruje primjenom modela zamjenske tlačne dijagonale. Većinom su dane smjernice za sprječavanje neželjenih utjecaje ispune, kao što je preuranjena pojava posmičnog sloma stupova okvira.

S obzirom na to da se neduktilni armirano-betonski okviri sa zidanom ispunom ne mogu svrstati u omeđeno ziđe niti u armirano-betonske okvire projektirane prema modernim seizmičkim propisima, a u svrhu razlikovanja, promatrani je konstruktivni sustav definiran terminom uokvireno ziđe.

S ciljem doprinosa razumijevanju složenog ponašanja uokvirenog ziđa, provedena su eksperimentalna i analitička istraživanja. Eksperimentalna istraživanja sastojala su se od izvedbe i ispitivanja 3 uzorka neduktilnih armirano-betonskih okvira i 11 jednorasponskih, jednoetažnih uzoraka

uokvirenog ziđa, Dodatno, provedeno je i ispitivanje osnovnih mehaničkih svojstava primijenjenih materijala. Svi uzorci izvedeni su u mjerilu 1:2 i ispitani pod približno konstantnim vertikalnim i promjenjivim cikličkim horizontalnim opterećenjem. Geometrijski i materijalni parametri ispitanih uzoraka odabrani su s ciljem pokrivanja svojstvenih nedostataka sustava uokvireno ziđe i kategorizacije njihova utjecaja na ponašanje, pri čemu su oni podijeljeni u dvije skupine u ovisnosti o elementu sustava. Prvom skupinom parametara definirana su svojstva okvira u pogledu geometrijskih izmjera elemenata i koeficijenata armiranja. Varijacijom parametara prve skupine odabrana su 4 tipa okvira. Druga skupina parametara definira svojstva ispune gdje je njihova varijacija ostvarena primjenom dviju vrsta zidnih elemenata i morta opće namjene.

Na osnovi formirane baze eksperimentalnih rezultata, izvršena je ocjena postojećih analitičkih modela procjene ponašanja sustava uokvireno ziđe te je predložen vlastiti model. Predloženi model definiran je u odnosu na pretpostavljena granična stanja sustava, a pruža mogućnost procjene horizontalne nosivosti i relativnog međukatnog pomaka pri pojedinim fazama ponašanja. Predloženim modelom ostvarena je zadovoljavajuća točnost procjene navedenih veličina u promatranim područjima ponašanja sustava čime je omogućena njegova primjena i u inženjerskoj praksi.

Osim procjene ponaša, izvršena je i procjena očekivanih nelinearnih pomaka sustava uokvireno ziđe za tri razine seizmičkog intenziteta pomoću postojeće metode. Metoda je razvijena i verificirana na Sveučilištu u Illinoisu u Urbana – Champaignu, USA. Klasifikacija razina oštećenja izvršena je prema dostupnoj literaturi, pri čemu su odvojeno promatrani uzorci praznih okvira i uokvirenog ziđa s ciljem ocjene utjecaja ispune na razinu oštećenja sustava. Rezultati upućuju na značajno smanjenje relativnih međukatnih pomaka sustav, neovisno o razini seizmičkog intenziteta. Smanjenje pomaka pak upućuje na pozitivan utjecaj ispune na ponašanje sustava uokvireno ziđe, pridonoseći osiguranju globalne stabilnosti uslijed čega se ispuna može promatrati kao sredstvo ojačanja neduktilnih armirano-betonskih konstrukcija.

***Ključne riječi*:** uokvireno ziđe, eksperimentalno istraživanje, prijedlog metode procjene ponašanja, razine oštećenja, sredstvo ojačanja.

ABSTRACT OF THE DISERTATION

Seismic behavior of nonductile reinforced concrete frames with masonry infill

Unreinforced masonry infills are often used as exterior and interior partitions in reinforced concrete frame building. Obtained system is economical and architecturally appealing and functional and as such is common in regions of medium and high seismicity world wide. Particular case that needs special attention are nonductile reinforced concrete frames with masonry infill. Their inherent weaknesses significantly contribute to seismic vulnerability and can lead to collapse of buildings during earthquake.

Although first experimental researches dates from the 50-ies of last century, development of major research centers sparked momentum in experimental and numerical research of the seismic behavior if infilled frames. Nevertheless, literature survey reveals relatively small number of researchers that covers inherent weaknesses and characteristics of the behavior of nonductile infilled frames, which vas the main motivation of this study. Without distinguishing designed earthquake resistance, seismic behavior of infilled frames still remains a controversial question in research and structural engineering community due to the variety and complexity of observed failure mechanisms which are highly governed by the frame – infill interaction. Additional uncertainties such as lack of reliable model for assessment of stiffness and strength, where strength and stiffness of sistem can not be determined based od superposition of elements contribution, have lead to absence of rational assessment method in practise and modern seismic codes. Although modern seismic codes recognize influences of masonry infill, it is still treated as non-structural element while the frame – infill interaction is either completely ignored or treated trough application of diagonal strutt model. Only guidelines for a prevention of negative influence, such as premature shear failure of frame columns are given.

To distinguish between designed earthquake resistance, nonductile frames with masonry infill are here in defined as framed masonry.

This dissertation addresses intricate issue of seismic behavior of framed masonry sistem with experimental and analytical studies. The testing programe involved construction and tests of a 3 nonductile reinforced concrete bare frames and 11 one-span, one-storey framed masonry specimens. Additionally, properties of all used materials were also tested. All specimens were one half scaled and tested under nearly constant vertical and cyclic horizontal load. Geometrical and material parameters of test specimens were chosen with the aim to replicate inherent weaknesses of framed masonry systems

and categorization of their influence on seismic behavior. Based on the element of the sistem, parameters are separated into two groups. First gropu of parameters addresses frame properties in terms of geometrical and reinforcement characteristics where total of 4 different frame configurations were chosen. Second group of parameters addresses infill properties where the variation is achieved with the use of two types of masonry elements and mortar.

Obtained experimental data was used for the validation of existing analytical assessment methods and proposal of a new method. The proposed model is defined in terms of selected limit states and gives possibility of the assessment of strengths and drifts in respect to the observed seismic behavior of test specimens. The proposed analytical approach estimates seismic response reasonably well and thus can be used for the seismic assessment of existing framed masonry buildings.

Additionally, estimation of seismic drifts for three levels of seismic hazard is conducted. Applied method was developed and validated at the University of Illinois at Urbana – Champaign, USA. Classification of damage degres was carried out according to the recommendations given in literature were bare frame and framed masonry specimens are considered separately. Obtained results indicated that masonry infill significantly reduces seismic drift regardless of seismic hazard level. Seismic drift reduction greatly contributes to the global stability of the framed masonry buildings. Furthermore, results indicates that masonry infills can be used as a mean of a seismic strengthening.

Keywords: framed masonry, experimental research, proposed analytical method for the seismic assessment, damage degres, mean of a seismic strengthening.

POPIS SLIKA

Poglavlje 1:

Nema slika

Poglavlje 2:

Slika 2.1 Oblici sloma sustava okvir s ispunom prema Mehrabiju i dr.

Slika 2.2 Ciklički model ponašanja zidanog ispuna pri a) tlačnom i b) posmičnom opterećenju.

Slika 2.3 Makro model: a) zamjenske tlačne dijagonale i b) posmična dijagonala.

Slika 2.4 a) Prikaz i b) slom ispitnog uzorka.

Slika 2.5 Prikaz ravniskog dvorasponskog, troetažnog ispitnog uzorka.

Slika 2.6 Prikaz prostorne okvirne konstrukcije sa zidanim ispunom.

Slika 2.7 Konstrukcijski detalji uobičajeni za razdoblje prije donošenja modernih seizmičkih propisa.

Slika 2.8 Oblici sloma zidanog ispuna.

Slika 2.9 Oblici posmičnog sloma ispuna: a) dijagonalni posmik, b) horizontalno klizanje.

Slika 2.10 Oblici tlačnog sloma zidanog ispuna: a) drobljenje uglova, b) slom dijagonale.

Slika 2.11 Savojni slom zidanog ispuna.

Slika 2.12 Oblici sloma armirano betonskog okvira.

Slika 2.13 Savojni slom okvira uzrokovan pojavom plastičnih zglobova u srednjoj polovini visine stupa.

Slika 2.14 Prikaz ovisnosti duljine kontakta okvir – ispuna, *z*, o bezdimenzionalnom koeficijentu *λ*.

Slika 2.15 Faze ponašanja sustava okvir s ispunom.

Poglavlje 3:

Slika 3.1 Detalji armiranja i geometrijskih izmjera ispitnih uzoraka skupine *O1*.

Slika 3.2 Detalji armiranja i geometrijskih izmjera ispitnih uzoraka skupine *O2*.

Slika 3.3 Detalji armiranja i geometrijskih izmjera ispitnih uzoraka skupine *O3*.

Slika 3.4 Detalji armiranja i geometrijskih izmjera ispitnih uzoraka skupine *O4*.

Slika 3.5 Prikaz izvedbe ispitnih uzoraka neduktilnih armirano betonskih okvira.

Slika 3.6 Zidanje ispuna uzorka.

Slika 3.7 Prikaz zidnih elemenata.

Poglavlje 4:

Slika 4.1 a) Uzorkovanje i b) ispitivanje tlačne čvrstoće očvrsnutog betona.

Slika 4.2 a) Prikaz ispitnog uzorka armaturnog čelika, b) radni dijagrami *GΦ3,2mm* uzoraka, c) radni dijagrami *GΦ8mm* uzoraka, d) radni dijagrami *RΦ8mm* uzoraka, e) radni dijagrami *RΦ10mm* uzoraka i f) radni dijagrami *RΦ16mm* uzoraka.

Poglavlje 5:

Slika 5.1 Ispitni uzorak zidanog ispuna.

Slika 5.2 Mehanizmi sloma uzoraka zidanog ispuna pri tlačnom ispitivanju.

Slika 5.3 Početna posmična čvrstoća i kut unutarnjeg trenja (Mohr - Coulombov zakon).

Slika 5.4 Prikaz ispitnih uzoraka, a) šuplji glineni elementi i b) glinena opeka.

Slika 5.5 Prikaz rezultata ispitivanja posmične čvrstoće *bpm* uzoraka zidanog ispuna.

Slika 5.6 Prikaz rezultata ispitivanja posmične čvrstoće *cpm* uzoraka zidanog ispuna.

Slika 5.7 Prikaz rezultata ispitivanja posmične čvrstoće *bvm* uzoraka zidanog ispuna.

Slika 5.8 Prikaz rezultata ispitivanja posmične čvrstoće *cvm* uzoraka zidanog ispuna.

Slika 5.9 Slom *bpm* uzoraka zidanog ispuna pri dijagonalnom tlaku: a) dijagonalni slom i b) drobljenje uglova.

Slika 5.10 Odnos posmično naprezanje - posmična deformacija za *bpm* uzorke zidanog ispuna.

Slika 5.11 Slom *cpm* uzoraka zidanog ispuna pri dijagonalnom tlaku.

Slika 5.12 Odnos posmično naprezanje - posmična deformacija za *cpm* uzorke zidanog ispuna.

Slika 5.13 Slom *bvm* uzoraka zidanog ispuna pri dijagonalnom tlaku.

Slika 5.14 Odnos posmično naprezanje - posmična deformacija za *bvm* uzorke zidanog ispuna.

Slika 5.15 Odnos tlačno naprezanje - relativna deformacija za *bpm* uzorke zidanog ispuna.

Slika 5.16 Odnos tlačno naprezanje - relativna deformacija za *cpm* uzorke zidanog ispuna.

Slika 5.17 Odnos tlačno naprezanje - relativna deformacija za *bvm* uzorke zidanog ispuna.

Slika 5.18 Odnos tlačno naprezanje - relativna deformacija za *cvm* uzorke zidanog ispuna.

Slika 5.19 Odnos opterećenja i deformacija dijagonala za *bpm* uzorke zidanog ispuna.

Slika 5.20 Odnos modula posmika i posmičnog naprezanja za *bpm* uzorke zidanog ispuna.

Slika 5.21 Odnos modula posmika i normaliziranog posmičnog naprezanja za *bpm* uzorke zidanog ispuna.

Slika 5.22 Odnos opterećenja i deformacija dijagonala za *cpm* uzorke zidanog ispuna.

Slika 5.23 Odnos modula posmika i posmičnog naprezanja za *cpm* uzorke zidanog ispuna.

Slika 5.24 Odnos modula posmika i normaliziranog posmičnog naprezanja za *cpm* uzorke zidanog ispuna.

Slika 5.25 Odnos opterećenja i deformacija dijagonala za *cpm* uzorke zidanog ispuna.

Slika 5.26 Odnos modula posmika i posmičnog naprezanja za *bvm* uzorke zidanog ispuna.

Slika 5.27 Odnos modula posmika i normaliziranog posmičnog naprezanja za *bvm* uzorke zidanog ispuna.

Slika 5.28 Usporedba tlačne čvrstoće zidane ispune određene ispitivanjem i preporukama danim u *EC6*.

Slika 5.29 Usporedba modula elastičnosti zidane ispune određenog ispitivanjem i preporukama danim u *EC6*.

Slika 5.30 Usporedba modula posmika zidane ispune određenog ispitivanjem i preporukama danim u *EC6*.

Poglavlje 6:

Slika 6.1 Prikaz opreme i rasporeda mjernih uređaja prilikom provedbe ispitivanja.

Slika 6.2 Prikaz mjernog optičkog sustava *ARAMIS*.

Slika 6.3 Priprema ispitnog uzorka

Slika 6.4 Izgled rastera.

Slika 6.5 Osvjetljenje ispitnog uzorka.

Slika 6.6 Geometrijske veze zahtijevanih izmjera.

Slika 6.7 Prikaz kalibracijskih objekata: a) ploča i b) križ.

Slika 6.8 Primjer faseta veličine 15 x 15 piksela s preklopom od 2 piksela.

Slika 6.9 Prikaz disipirane (E_D) i apsorbirane energije (E_A) u jednom koraku horizontalnog opterećenja.

Slika 6.10 Prikaz horizontalnog i vertikalnog opterećenja ispitnog uzorka *O1*.

Slika 6.11 Prikaz histerezne i primarne krivulje odziva ispitnog uzorka *O1*.

Slika 6.12 Prikaz primarnih krivulja odgovora i sekantne krutosti, u ovisnosti o pomaku, pri pozitivnom i negativnom smjeru opterećenja ispitnog uzorka *O1*.

Slika 6.13 Disipacija energije po jedinici pomaka za ispitni uzorak *O1*.

Slika 6.14 Odnos disipirane i apsorbirane energije za ispitni uzorak *O1*.

Slika 6.15 Prigušenjeispitnog uzorka *O1* u ovisnosti o načinu izračuna apsorbirane energije.

Slika 6.16 Ovisnost prigušenja ispitnog uzorka *O1* u odnosu na horizontalni pomak.

Slika 6.17 Prikaz oštećenja i sloma ispitnog uzorka *O1*.

Slika 6.18 Prikaz horizontalnog i vertikalnog opterećenja ispitnog uzorka *O1_bpm*.

Slika 6.19 Prikaz histerezne i primarne krivulje oddgovora ispitnog uzorka *O1_bpm*.

Slika 6.20 Prikaz primarnih krivulja odgovora i sekantne krutosti, u ovisnosti o pomaku, pri pozitivnom i negativnom smjeru opterećenja ispitnog uzorka *O1_bpm*.

Slika 6.21 Disipacija energije po jedinici pomaka za ispitni uzorak *O1_bpm*.

Slika 6.22 Odnos disipirane i apsorbirane energije za ispitni uzorak *O1_bpm*.

Slika 6.23 Prigušenje ispitnog uzorka *O1_bpm* u ovisnosti o načinu izračuna apsorbirane energije.

Slika 6.24 Ovisnost prigušenja ispitnog uzorka *O1_bpm* o horizontalnom pomaku.

Slika 6.25 Prve značajne pukotine zidane ispune *O1_bpm* ispitnog uzorka.

Slika 6.26 Prikaz oštećenja i pukotina ispitnog uzorka *O1_bpm*.

Slika 6.27 Prikaz horizontalnog i vertikalnog opterećenja ispitnog uzorka *O1_bpm**.

Slika 6.28 Prikaz histerezne i primarne krivulje odgovora ispitnog uzorka *O1_bpm**.

Slika 6.29 Prikaz primarnih krivulja odgovora i sekantne krutosti, u ovisnosti o pomaku, pri pozitivnom i negativnom smjeru opterećenja ispitnog uzorka *O1_bpm**.

Slika 6.30 Usporedba primarnih krivulja odgovora ispitnih uzoraka *O1_bpm* i *O1_bpm**.

Slika 6.31 Prikaz oštećenja i pukotina ispitnog uzorka *O1_bpm**.

Slika 6.32 Prikaz horizontalnog i vertikalnog opterećenja ispitnog uzorka *O1_cpm*.

Slika 6.33 Prikaz histerezne i primarne krivulje odgovora ispitnog uzorka *O1_cpm*.

Slika 6.34 Prikaz primarnih krivulja odgovora i sekantne krutosti, u ovisnosti o pomaku, pri pozitivnom i negativnom smjeru opterećenja ispitnog uzorka *O1_cpm*.

Slika 6.35 Disipacija energije po jedinici pomaka za ispitni uzorak *O1_cpm*.

Slika 6.36 Disipacija energije po jedinici pomaka za ispitni uzorak *O1_cpm*.

Slika 6.37 Prigušenje ispitnog uzorka *O1_cpm* u ovisnosti o načinu izračuna apsorbirane energije.

Slika 6.38 Ovisnost prigušenja ispitnog uzorka *O1_cpm* o horizontalnom pomaku.

Slika 6.39 Oštećenje ispitnog uzorka *O1_cpm*.

Slika 6.40 Prikaz razvoja pukotinskog stanja ispitnog uzorka *O1_cpm*.

Slika 6.41 Prikaz posmičnih pukotina stupova okvira ispitnog uzorka *O1_cpm*.

Slika 6.42 Prikaz horizontalnog i vertikalnog opterećenja ispitnog uzorka *O1_bvm*.

Slika 6.43 Prikaz histerezne i primarne krivulje odgovora ispitnog uzorka *O1_bvm*.

Slika 6.44 Prikaz primarnih krivulja odgovora i sekantne krutosti, u ovisnosti o pomaku, pri pozitivnom i negativnom smjeru opterećenja ispitnog uzorka *O1_bvm*.

Slika 6.45 Disipacija energije po jedinici pomaka za ispitni uzorak *O1_bvm*.

Slika 6.46 Odnos disipirane i apsorbirane energije za ispitni uzorak *O1_bvm*.

Slika 6.47 Prigušenje ispitnog uzorka *O1_bvm* u ovisnosti o načinu izračuna apsorbirane energije.

Slika 6.48 Ovisnost prigušenja ispitnog uzorka *O1_bvm* o horizontalnom pomaku.

Slika 6.49 Prikaz oštećenja i pukotina ispitnog uzorka *O1_bvm*.

Slika 6.50 Prikaz prvih pukotina ispitnog uzorka *O1_bvm*.

Slika 6.51 Prikaz horizontalnog i vertikalnog opterećenja ispitnog uzorka *O1_cvm*.

Slika 6.52 Prikaz histerezne i primarne krivulje odgovora ispitnog uzorka *O1_cvm*.

Slika 6.53 Prikaz primarnih krivulja odgovora i sekantne krutosti, u ovisnosti o pomaku, pri pozitivnom i negativnom smjeru opterećenja ispitnog uzorka *O1_cvm*.

Slika 6.54 Disipacija energije po jedinici pomaka za ispitni uzorak *O1_cvm*.

Slika 6.55 Odnos disipirane i apsorbirane energije za ispitni uzorak *O1_cvm*.

Slika 6.56 Prigušenje ispitnog uzorka *O1_cvm* u ovisnosti o načinu izračuna apsorbirane energije.

Slika 6.57 Ovisnost prigušenjaispitnog uzorka *O1_cvm* o horizontalnom pomaku.

Slika 6.58 Prikaz oštećenja i pukotina ispitnog uzorka *O1_cvm*.

Slika 6.59 Prve značajne pukotine u ispuni ispitnog uzorka *O1_cvm*.

Slika 6.60 Prikaz razvoja pukotinskog stanja ispune ispitnog uzorka *O1_cvm*.

Slika 6.61 Prikaz oštećenja stupova ispitnog uzorka *O1_cvm*.

Slika 6.62 Prikaz horizontalnog i vertikalnog opterećenja ispitnog uzorka *O1_b*.

Slika 6.63 Prikaz histerezne i primarne krivulje odgovora ispitnog uzorka *O1_b*.

Slika 6.64 Prikaz primarnih krivulja odgovora i sekantne krutosti, u ovisnosti o pomaku, pri pozitivnom i negativnom smjeru opterećenja ispitnog uzorka *O1_b*.

Slika 6.65 Disipacija energije po jedinici pomaka za ispitni uzorak *O1_b*.

Slika 6.66 Odnos disipirane i apsorbirane energije za ispitni uzorak *O1_b*.

Slika 6.67 Prigušenje ispitnog uzorka *O1_b* u ovisnosti o načinu izračuna apsorbirane energije.

Slika 6.68 Ovisnost prigušenja ispitnog uzorka *O1_b* o horizontalnom pomaku.

Slika 6.69 Prikaz oštećenja i pukotina ispitnog uzorka *O1_b*.

Slika 6.70 Prikaz aktivacije horizontalnih i vertikalnih dodirnih ploha zidnih elemenata uzorka *O1_b* pri prijenosu horizontalnog opterećenja.

Slika 6.71 Prikaz horizontalnog i vertikalnog opterećenja ispitnog uzorka *O2_cpm*.

Slika 6.72 Prikaz histerezne i primarne krivulje odgovora ispitnog uzorka *O2_cpm*.

Slika 6.73 Prikaz primarnih krivulja odgovora i sekantne krutosti, u ovisnosti o pomaku, pri pozitivnom i negativnom smjeru opterećenja ispitnog uzorka *O2_cpm*.

Slika 6.74 Disipacija energijepo jedinici pomaka za ispitni uzorak *O2_cpm*.

Slika 6.75 Odnos disipirane i apsorbirane energije za ispitni uzorak *O2_cpm*.

Slika 6.76 Prigušenje ispitnog uzorka *O2_cpm* u ovisnosti o izračunu apsorbirane energije.

Slika 6.77 Ovisnost prigušenja ispitnog uzorka *O2_cpm* o pomaku.

Slika 6.78 Prikaz oštećenja i pukotina ispitnog uzorka *O2_cpm*.

Slika 6.79 Slom stupa i oštećenje ispune nakon sloma stupa ispitnog uzorka *O2_cpm*.

Slika 6.80 Prikaz horizontalnog i vertikalnog opterećenja ispitnog uzorka *O3*.

Slika 6.81 Prikaz histerezne i primarne krivulje odgovora ispitnog uzorka *O3*.

Slika 6.82 Prikaz primarnih krivulja odgovora i sekantne krutosti, u ovisnosti o pomaku, pri pozitivnom i negativnom smjeru opterećenja ispitnog uzorka *O3*.

Slika 6.83 Disipacija energije po jedinici pomaka za ispitni uzorak *O3*.

Slika 6.84 Odnos disipirane i apsorbirane energije za ispitni uzorak *O3.*

Slika 6.85 Prigušenje ispitnog uzorka *O3* u ovisnosti o načinu izračuna apsorbirane energije.

Slika 6.86 Ovisnost prigušenja ispitni uzorak *O3* o horizontalnom pomaku.

Slika 6.87 Prikaz oštećenja i pukotina ispitnog uzorka *O3*.

Slika 6.88 Slom i oštećenje stupova ispitnog uzorka *O3*.

Slika 6.89 Prikaz horizontalnog i vertikalnog opterećenja ispitnog uzorka *O3_bpm*.

Slika 6.90 Prikaz histerezne i primarne krivulje odgovora ispitnog uzorka *O3_bpm*.

Slika 6.91 Prikaz primarnih krivulja odgovora i sekantne krutosti, u ovisnosti o pomaku, pri pozitivnom i negativnom smjeru opterećenja ispitnog uzorka *O3_bpm*.

Slika 6.92 Disipacija energije po jedinici pomaka zaispitni uzorak *O3_bpm*.

Slika 6.93 Odnos disipirane i apsorbirane energije za ispitni uzorak *O3_bpm*.

Slika 6.94 Prigušenje ispitnog uzorka *O3_bpm* u ovisnosti o izračunu apsorbirane energije.

Slika 6.95 Ovisnost prigušenja ispitnog uzorka *O3_bpm* o horizontalnom pomaku.

Slika 6.96 Prikaz oštećenja i pukotina ispitnog uzorka *O3_bpm*.

Slika 6.97 Prikaz dominantnog mehanizma sloma ispune ispitnog uzorka *O3_bpm*.

Slika 6.98 Prikaz dominantnih ploha sloma ispune ispitnog uzorka *O3_bpm* pri pojavi horizontalnog klizanja.

Slika 6.99 Prikaz oštećenja elemenata okvira ispitnog uzorka *O3_bpm*.

Slika 6.100 Prikaz horizontalnog i vertikalnog opterećenja ispitnog uzorka *O3_cpm*.

Slika 6.101 Prikaz histerezne i primarne krivulje odgovora ispitnog uzorka *O3_cpm*.

Slika 6.102 Prikaz primarnih krivulja odgovora i sekantne krutosti, u ovisnosti o pomaku, pri pozitivnom i negativnom smjeru opterećenja ispitnog uzorka *O3_cpm*.

Slika 6.103 Disipacija energije po jedinici pomaka za *O3_cpm* ispitni uzorak.

Slika 6.104 Odnos disipirane i apsorbirane energije za ispitni uzorak *O3_cpm*.

Slika 6.105 Prigušenje ispitnog uzorka *O3_cpm* u ovisnosti o načinu izračunu apsorbirane energije.

Slika 6.106 Ovisnost prigušenja ispitnog uzorka *O3_cpm* o horizontalnom pomaku.

Slika 6.107 Prikaz Oštećenja i pukotina ispitnog uzorka *O3_cpm*.

Slika 6.108 Prikaz prvih značajnih pukotina u ispuni ispitnog uzorka *O3_cpm*.

Slika 6.109 Prikaz dominantnog mehanizma sloma ispune (dijagonalni posmični slom) ispitnog uzorka *O3_cpm*.

Slika 6.110 Prikaz horizontalnog klizanja ispune ispitnog uzorka *O3_cpm*.

Slika 6.111 Prikaz horizontalnog i vertikalnog opterećenja ispitnog uzorka *O4*.

Slika 6.112 Prikaz histerezne i primarne krivulje odgovoraispitnog uzorka *O4*.

Slika 6.113 Prikaz primarnih krivulja odgovora i sekantne krutosti, u ovisnosti o pomaku, pri pozitivnom i negativnom smjeru opterećenja ispitnog uzorka *O4*.

Slika 6.114 Disipacija energije po jedinici pomaka za ispitni uzorak *O4*.

Slika 6.115 Odnos disipirane i apsorbirane energije za ispitni uzorak *O4*.

Slika 6.116 Prigušenje ispitnog uzorka *O4* u ovisnosti o načinu izračunu apsorbirane energije.

Slika 6.117 Ovisnost prigušenja ispitnog uzorka *O4* o horizontalnom pomaku.

Slika 6.118 Prikaz oštećenja i pukotina ispitnog uzorka *O4*.

Slika 6.119 Prikaz oštećenja stupova ispitnog uzorka *O4*.

Slika 6.120 Prikaz horizontalnog i vertikalnog opterećenja ispitnog uzorka *O4_bpm*.

Slika 6.121 Prikaz histerezne i primarne krivulje odgovora ispitnog uzorka *O4_bpm*.

Slika 6.122 Prikaz primarnih krivulja odgovora i sekantne krutosti, u ovisnosti o pomaku, pri pozitivnom i negativnom smjeru opterećenja ispitnog uzorka *O4_bpm*.

Slika 6.123 Disipacija energije po jedinici pomaka za ispitni uzorak *O4_bpm*.

Slika 6,124 Odnos disperzirane i apsorbirane energije za ispitni uzorak *O4_bpm*.

Slika 6.125 Prigušenje ispitnog uzorka *O4_bpm* u ovisnosti o načinu izračuna apsorbirane energije.

Slika 6.126 Ovisnost prigušenja ispitnog uzorka *O4_bpm* o horizontalnom pomaku.

Slika 6.127 Prikaz oštećenja i pukotina ispitnog uzorka *O4_bpm*.

Slika 6.128 Prikaz promjene mehanizma sloma ispune ispitnog uzorka *O4_bpm*.

Slika 6.129 Prikaz oštećenja elemenata okvira ispitnog uzorka *O4_bpm*.

Slika 6.130 Prikaz horizontalnog i vertikalnog opterećenja ispitnog uzorka *O4_cpm*.

Slika 6.131 Prikaz histerezne i primarne krivulje odgovora ispitnog uzorka *O4_cpm*.

Slika 6.132 Prikaz primarnih krivulja odgovora i sekantne krutosti, u ovisnosti o pomaku, pri pozitivnom i negativnom smjeru opterećenja ispitnog uzorka *O4_cpm*.

Slika 6.133 Disipacija energije po jedinici pomaka za ispitni uzorak *O4_cpm*.

Slika 6.134 Odnos disperzirane i apsorbirane energije za ispitni uzorak *O4_cpm*.

Slika 6,135 Prigušenje ispitnog uzorka *O4_cpm* u ovisnosti o načinu izračuna apsorbirane energije.

Slika 6.136 Ovisnost prigušenja ispitnog uzorka *O4_cpm* o horizontalnom pomaku.

Slika 6.137 Prikaz oštećenja i pukotina ispitnog uzorka *O4_cpm*.

Slika 6.138 Horizontalno klizanje ispune ispitnog uzorka *O4_cpm*.

Slika 6.139 Prikaz prvih značajnih pukotina ispitnog uzorka *O4_cpm*.

Slika 6.140 Prikaz oštećenja elemenata okvira ispitnog uzorka *O4_cpm*.

Slika 6.141 Prikaz normalizirane nosivosti ispitnih uzoraka skupine *O1*.

Slika 6.142 a) Prikaz područja graničnih stanja ispitnih uzoraka skupine *O1* kod kojih je ispun izveden od morta opće namjene.

Slika 6.142 b) Prikaz područja graničnih stanja ispitnih uzoraka skupine *O1* kod kojih je ispun izveden od vapnenog morta.

Slika 6.143 Prikaz degradacije sekantne krutosti ispitnih uzoraka skupine *O1* u ovisnosti o horizontalnom pomaku.

Slika 6.144 a) Prikaz disipacije energije po jedinici pomaka uzoraka skupine *O1* kod kojih je ispun izveden od morta opće namjene.

Slika 6.144 b) Prikaz disipacije energije po jedinici pomaka uzoraka skupine *O1* kod kojih je ispun izveden od vapnenog morta.

Slika 6.145 Prikaz disipacije energije ispitnog uzorka *O1_b*.

Slika 6.146 Usporedba primarnih krivulja praznog okvira i ispitnog uzorka *O1_b*.

Slika 6.147 Usporedba prigušenja uzoraka skupine *O1*.

Slika 6.148 Usporedba primarnih krivulja odgovora uzoraka *O1_cpm* i *O2_cpm*.

Slika 6.149 Usporedba disipacije energije po jedinici pomaka uzoraka *O1_cpm* i *O2_cpm*.

Slika 6.150 Usporedba ovisnosti prigušenja uzoraka *O1_cpm* i *O2_cpm* o horizontalnom pomaku.

Slika 6.151 Prikaz normalizirane nosivosti ispitnih uzoraka skupine *O3*.

Slika 6.152 Prikaz područja graničnih stanja ispitnih uzoraka skupine *O3*.

Slika 6.153 Prikaz degradacije sekantne krutosti ispitnih uzoraka skupine *O3* u ovisnosti o horizontalnom pomaku.

Slika 6.154 Prikaz disipacije energije po jedinici pomaka uzoraka skupine *O3* u odnosu na područja promatranih graničnih stanja.

Slika 6.155 Usporedba prigušenja uzoraka skupine *O3*.

Slika 6.156 Prikaz normalizirane nosivosti uzoraka skupine *O4*.

Slika 6.157 Prikaz područja graničnih stanja uzoraka skupine *O4*.

Slika 6.158 Prikaz degradacije sekantne krutosti ispitnih uzoraka skupine *O4* u ovisnosti o horizontalnom pomaku.

Slika 6.159 Prikaz disipacije energije po jedinici pomaka uzoraka skupine *O4* u odnosu na područja promatranih graničnih stanja.

Slika 6.160 Usporedba prigušenja ispitnih uzoraka skupine *O4*.

Slika 6.161 Shematski prikaz graničnih stanja ispitnih uzoraka skupine *O1* u ovisnosti o tlačnoj čvrstoći ispuna.

Slika 6.162 Shematski prikaz doprinosa okvira pri pojedinim graničnim stanjima.

Slika 6.163 Shematski prikaz graničnih stanja uzoraka praznih okvira.

Poglavlje 7:

Slika 7.1 Idealizirani četverolinearni odnos sile i pomaka.

Slika 7.2 Odnos *w/d – λH* u ovisnosti o odnosu *H/L* prema Stafford Smithu.

Slika 7.3 Idealizirani četverolinearni odnos sila - pomak prema Stavridisu.

Slika 7.4 Model raspodijele vertikalnog opterećenje prema Fioratu.

Slika 7.5 Mehanizam sloma okvira s ispunom pri graničnom stanju nosivosti prema Žarniću.

Slika 7.6 Prikaz unutarnjih sila za 1. Mehanizam.

Slika 7.7 Prikaz unutarnjih sila za 2. Mehanizam.

Slika 7.8 Prikaz unutarnjih sila za 3. mehanizam sloma.

Slika 7.9 Prikaz unutarnjih sila za 4. mehanizam sloma.

Slika 7.10 Prikaz unutarnjih sila za 5. mehanizam sloma.

Slika 7.11 Model sa zamjenskom tlačnom dijagonalom prema Žarniću.

Slika 7.12 Trolinearni odnos sile i pomaka prema Žarniću.

Slika 7.13 Geometrijska idealizacija sustava uokvireno zide.

Slika 7.14 Slijed mehanizama sloma okvira s ispunom u ovisnosti o tipu zidnog elementa.

Slika 7.15 Idealizirani odnos sile -pomaka prema predloženoj analitičkoj metodi proračuna.

Slika 7.16 Usporedba eksperimentalnih i analitičkih vrijednosti procjene koeficijenta Ψ_{cr}.

Slika 7.17 Usporedba eksperimentalnih i analitičkih rezultata procjene koeficijenta Ψ_{cr} na osnovi geometrijskih karakteristika.

Slika 7.18 Vrijednost koeficijenta *k* u ovisnosti o duktilnosti presjeka elementa.

Slika 7.19 Prikaz usporedbe eksperimentalnih i analitičkih rezultata procjene δ_{cr}.

Slika 7.20 Prikaz usporedbe eksperimentalnih i analitičkih rezultata procjene δ_{cr} na osnovi geometrijskih karakteristika.

Slika 7.21 Usporedba eksperimentalnih i analitičkih rezultata procijene koeficijenta Ψ_{max}.

Slika 7.22 Usporedba eksperimentalnih i analitički procjenjenih vrijednosti koeficijentaΨ_{max} na osnovi geometrijskih karakteristika.

Slika 7.23 Usporedba eksperimentalnih i analitički procjenjenih vrijednosti δ_{max}.

Slika 7.24 Usporedba eksperimentalnih i analitički procjenjenih vrijednosti δ_{Vmax} na osnovi geometrijskih karakteristika.

Slika 7.25 Prikaz histerezne krivulje *O2_cpm* ispitnog uzorka (punom crvenom linijom je naznačeno područje odgovora nakon pojave posmičnog sloma stupa okvira).

Slika 7.26 Usporedba primarnih krivulja.

Slika 7.27 Prikaz geometrijske idealizacije višerasponskih sustava uokvireno zide.

Poglavlje 8:

Slika 8.1 Generalizirani spektar nelinearnih pomaka.

Slika 8.2 Odnos faktora redukcije čvrstoće i omjera perioda.

Slika 8.3 Normalizacija koeficijenta posmika.

Slika 8.5 Usporedba srednjeg elastičnog spektra ubrzanja odabranog seta zapisa potresa s elastičnim spektrom *EC8* za $a_g = 0{,}1g$.

Slika 8.6 Usporedba srednjeg elastičnog spektra ubrzanja odabranog seta zapisa potresa s elastičnim spektrom *EC8* za $a_g = 0{,}2g$.

Slika 8.7 Usporedba srednjeg elastičnog spektra ubrzanja obaranog seta zapisa potresa s elastičnim spektrom *EC8* za $a_g = 0{,}3g$.

Slika 8.8 Shematski prikaz razina oštećenja uzoraka uokvirenog ziđa.

Slika 8.9 Shematski prikaz razina oštećenja uzoraka praznih okvira.

Poglavlje 9:

Nema slika

Dodatak A:

Slika A1.1 Geometrijska idealizacija sustava.

Dodatak B:

Slika B1.1 Prikaz akcelerograma, spektra energije i idealiziranih spektara ubrzanja i pomaka za zapis potresa South Iceland_y.

Slika B1.2 Prikaz akcelerograma, spektra energije i idealiziranih spektara ubrzanja i pomaka za zapis potresa Izmit_y.

Slika B1.3 Prikaz akcelerograma, spektra energije i idealiziranih spektara ubrzanja i pomaka za zapis potresa Alkion_y.

Slika B1.4 Prikaz akcelerograma, spektra energije i idealiziranih spektara ubrzanja i pomaka za zapis potresa Campano Lucano_x.

Slika B1.5 Prikaz akcelerograma, spektra energije i idealiziranih spektara ubrzanja i pomaka za zapis potresa Spitak_y.

Slika B1.6 Prikaz akcelerograma, spektra energije i idealiziranih spektara ubrzanja i pomaka za zapis potresa Lazio Abruzo_x.

Slika B1.7 Prikaz akcelerograma, spektra energije i idealiziranih spektara ubrzanja i pomaka za zapis potresa Campano Lucano_y.

Slika B1.8 Prikaz akcelerograma, spektra energije i idealiziranih spektara ubrzanja i pomaka za zapis potresa Northridge_y.

Slika B1.9 Prikaz akcelerograma, spektra energije i idealiziranih spektara ubrzanja i pomaka za zapis potresa NW Kyushu_x.

Slika B1.10 Prikaz akcelerograma, spektra energije i idealiziranih spektara ubrzanja i pomaka za zapis potresa EMILIA Pianura Padana_x.

Slika B1.11 Prikaz akcelerograma, spektra energije i idealiziranih spektara ubrzanja i pomaka za zapis potresa Christchurch_x.

Slika B1.12 Prikaz akcelerograma, spektra energije i idealiziranih spektara ubrzanja i pomaka za zapis potresa EMILIA Pianura Padana_x1.

Slika B1.13 Prikaz akcelerograma, spektra energije i idealiziranih spektara ubrzanja i pomaka za zapis potresa EMILIA Pianura Padana_y.

Slika B1.14 Prikaz akcelerograma, spektra energije i idealiziranih spektara ubrzanja i pomaka za zapis potresa NW Kyushu_y.

Slika B1.15 Prikaz akcelerograma, spektra energije i idealiziranih spektara ubrzanja i pomaka za zapis potresa Imperial Valley_y.

Slika B1.16 Prikaz akcelerograma, spektra energije i idealiziranih spektara ubrzanja i pomaka za zapis potresa L'Aquila_y.

Slika B1.17 Prikaz akcelerograma, spektra energije i idealiziranih spektara ubrzanja i pomaka za zapis potresa Loma Pieta_x.

Slika B1.18 Prikaz akcelerograma, spektra energije i idealiziranih spektara ubrzanja i pomaka za zapis potresa Friuli_x.

Slika B1.19 Prikaz akcelerograma, spektra energije i idealiziranih spektara ubrzanja i pomaka za zapis potresa NW Kagoshima_x.

Slika B1.20 Prikaz akcelerograma, spektra energije i idealiziranih spektara ubrzanja i pomaka za zapis potresa Darfield_x.

Slika B1.21 Prikaz akcelerograma, spektra energije i idealiziranih spektara ubrzanja i pomaka za zapis potresa Darfield_y.

POPIS TABLICA

Poglavlje 1:

Nema tablica

Poglavlje 2:

Nema tablica

Poglavlje 3:

Tablica 3.1 Odabrani parametri prototipa okvira ispitnih uzoraka.

Tablica 3.2 Oznake zidanog ispuna ispitnih uzoraka.

Tablica 3.3 Skupine ispitnih uzoraka.

Tablica 3.4 Koeficijenti mjerila pri modelskom ispitivanju.

Tablica 3.5 Skupine i pripadni parametri okvira ispitnih uzoraka.

Poglavlje 4:

Tablica 4.1 Rezultati ispitivanja očvrsnutog betona.

Tablica 4.2 Rezultati ispitivanja armaturnog čelika.

Tablica 4.3 Rezultati ispitivanja vlačne i tlačne čvrstoće morta za zidanje.

Tablica 4.4 Zahtjevi za grupiranje zidnih elemenata.

Tablica 4.5 Razredi dopuštenih odstupanja srednjih vrijednosti izmjera zidnog elementa.

Tablica 4.6 Razredi najvećih raspona danih izmjera.

Tablica 4.7 Izmjere odabranih zidnih elemenata.

Tablica 4.8 Grupiranje zidnih elemenata.

Tablica 4.9 Vrijednosti faktora oblika δ^*.

Tablica 4.10 Vrijednosti faktora pretvorbe.

Tablica 4.11 Rezultati ispitivanja morta za izravnavanje.

Tablica 4.12 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće zidnih elemenata.

Poglavlje 5:

Tablica 5.1 Izmjere ispitnih uzoraka za ispitivanje tlačne čvrstoće zidanog ispuna.

Tablica 5.2 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće zidanog ispuna.

Tablica 5.3 Vrijednosti konstante *K* za proračun karakteristične tlačne čvrstoće zidanog ispuna.

Tablica 5.4 Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće *bpm* uzoraka zidanog ispuna.

Tablica 5.5 Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće *cpm* uzoraka zidanog ispuna.

Tablica 5.6 Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće *bvm* uzoraka zidanog ispuna.

Tablica 5.7 Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće *cvm* uzoraka zidanog ispuna.

Tablica 5.8 Rezultati dijagonalno tlačnog ispitivanja *bpm* uzoraka zidanog ispuna.

Tablica 5.9 Rezultati dijagonalno tlačnog ispitivanja *cpm* uzoraka zidanog ispuna.

Tablica 5.10 Rezultati dijagonalno tlačnog ispitivanja *bvm* uzoraka zidanog ispuna.

Tablica 5.11 Vrijednosti modula elastičnosti za *bpm* uzorke zidanog ispuna.

Tablica 5.12 Vrijednosti modula elastičnosti za *cpm* uzorke zidanog ispuna.

Tablica 5.13 Vrijednosti modula elastičnosti za *bvm* uzorke zidanog ispuna.

Tablica 5.14 Vrijednosti modula elastičnosti za *cvm* uzorke zidanog ispuna.

Tablica 5.15 Vrijednosti modula posmika za *bpm* uzorke zidanog ispuna.

Tablica 5.16 Vrijednosti modula posmika za *cpm* uzorke zidanog ispuna.

Tablica 5.17 Vrijednosti modula posmika za *bvm* uzorke zidanog ispuna.

Tablica 5.18 Usporedba mehaničkih i deformacijskih svojstava primijenjenih tipova zidanog ispuna.

Poglavlje 6:

Tablica 6.1 Krutost i nosivost ispitnog uzorka *O1* u odabranim karakterističnim točkama odziva.

Tablica 6.2 Krutost i nosivost ispitnog uzorka *O1_bpm* u odabranim karakterističnim točkama odziva.

Tablica 6.3 Krutost i nosivost ispitnog uzorka *O1_bpm** u odabranim karakterističnim točkama odziva.

Tablica 6.4 Krutost i nosivost ispitnog uzorka *O1_cpm* u odabranim karakterističnim točkama odziva.

Tablica 6.5 Krutost i nosivost ispitnog uzorka *O1_bvm* u odabranim karakterističnim točkama odziva.

Tablica 6.6 Krutost i nosivost ispitnog uzorka *O1_cvm* u odabranim karakterističnim točkama odziva.

Tablica 6.7 Krutost i nosivost ispitnog uzorka *O1_b*u odabranim karakterističnim točkama odziva.

Tablica 6.8 Krutost i nosivost ispitnog uzorka *O2_cpm* u odabranim karakterističnim točkama odziva.

Tablica 6.9 Krutost i nosivost ispitnog uzorka *O3* u odabranim karakterističnim točkama odziva.

Tablica 6.10 Krutost i nosivost ispitnog uzorka *O3_bpm* u odabranim karakterističnim točkama odziva.

Tablica 6.11 Krutost i nosivost ispitnog uzorka*O3_cpm* u odabranim karakterističnim točkama odziva.

Tablica 6.12 Krutost i nosivost ispitnog uzorka *O4* u odabranim karakterističnim točkama odziva.

Tablica 6.13 Krutost i nosivost ispitnog uzorka *O4_bpm* u odabranim karakterističnim točkama odziva.

Tablica 6.14 Krutost i nosivost ispitnog uzorka *O4_cpm* u odabranim karakterističnim točkama odziva.

Tablica 6.15 Prikaz doprinosa konstituenata sustava u promatranim karakterističnim točkama odgovora ispitnih uzoraka skupine *O1* pri pozitivnom smjeru opterećenja.

Tablica 6.16 Prikaz doprinosa konstituenata sustava u promatranim karakterističnim točkama odgovora ispitnih uzoraka skupine *O1* pri negativnom smjeru opterećenja.

Tablica 6.17 Područja graničnih stanja ispitnih uzoraka skupine *O1*.

Tablica 6.18 Prikaz doprinosa konstituenata uzoraka skupine *O1* disipaciji energije po jedinici pomaka.

Tablica 6.18 Usporedba osnovnih perioda osciliranja uzoraka skupine *O1*.

Tablica 6.19 Prikaz doprinosa konstituenata sustava u promatranim karakterističnim točkama odgovora uzoraka skupine *O3* pri pozitivnom smjeru opterećenja.

Tablica 6.20 Prikaz doprinosa konstituenata sustava u promatranim karakterističnim točkama odgovora uzoraka skupine *O3* pri negativnom smjeru opterećenja.

Tablica 6.21 Područja graničnih stanja uzoraka skupine *O3*.

Tablica 6.22 Prikaz doprinosa konstituenata uzoraka skupine *O3* disipaciji energije po jedinici pomaka.

Tablica 6.23 Usporedba osnovnih perioda osciliranja uzoraka skupine *O3*.

Tablica 6.24 Prikaz doprinosa konstituenata sustava u promatranim karakterističnim točkama odgovora uzoraka skupine *O4* pri pozitivnom smjeru opterećenja.

Tablica 6.25 Prikaz doprinosa konstituenata sustava u promatranim karakterističnim točkama odgovora uzoraka skupine *O4* pri negativnom smjeru opterećenja.

Tablica 6.26 Područja graničnih stanja uzoraka skupine *O4*.

Tablica 6.27 Prikaz doprinosa konstituenata uzoraka skupine *O4* disipaciji energije po jedinici pomaka.

Tablica 6.28 Usporedba osnovnih perioda osciliranja ispitnih uzoraka skupine *O4*.

Tablica 6.29 Prikaz područja graničnih stanja u ovisnosti o tlačnoj čvrstoći ispuna.

Tablica 6.30 Prikaz doprinosa okvira horizontalnoj nosivosti sustava u ovisnosti o tlačnoj čvrstoći ispuna.

Tablica 6.31 Područja graničnih stanja uzoraka praznih okvira.

Poglavlje 7:

Tablica 7.1 Usporedba analitički i eksperimentalno određene vrijednosti početne krutosti za pozitivan smjer opterećenja.

Tablica 7.2 Usporedba analitički i eksperimentalno određene vrijednosti početne krutosti za negativni smjer opterećenja.

Tablica 7.3 Usporedba analitički određene vrijednosti početne krutosti u odnosu na srednju eksperimentalnu vrijednost.

Tablica 7.4 Usporedba analitički i eksperimentalno određene vrijednosti horizontalne nosivosti sustava pri pojavi prve značajne pukotine u ispunu za pozitivni smjer opterećenja.

Tablica 7.5 Usporedba analitički i eksperimentalno određene vrijednosti horizontalne nosivosti sustava pri pojavi prve značajne pukotine u ispunu za negativni smjer opterećenja.

Tablica 7.6 Usporedba analitički određene vrijednosti horizontalne nosivosti sustava pri pojavi prve značajne pukotine u odnosu na srednju eksperimentalnu vrijednost.

Tablica 7.7 Usporedba analitički i eksperimentalno određene vrijednosti horizontalne nosivosti sustava pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna za pozitivni smjer opterećenja.

Tablica 7.8 Usporedba analitički i eksperimentalno određene vrijednosti horizontalne nosivosti sustava pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna za negativni smjer opterećenja.

Tablica 7.9 Usporedba analitički određene vrijednosti horizontalne nosivosti sustava pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna u odnosu na srednju eksperimentalnu vrijednost.

Tablica 7.10 Usporedba analitički i eksperimentalno određene vrijednosti relativnog međukatnog pomaka sustava pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna za pozitivni smjer opterećenja.

Tablica 7.11 Usporedba analitički i eksperimentalno određene vrijednosti relativnog međukatnog pomaka sustava pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna za negativni smjer opterećenja.

Tablica 7.12 Usporedba analitički određene vrijednosti relativnog međukatnog pomaka sustava pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna u odnosu na srednju eksperimentalnu vrijednost.

Tablica 7.13 Usporedba analitički i eksperimentalno određene vrijednosti horizontalne nosivosti sustava pri graničnom stanju pred rušenje za pozitivni smjer opterećenja.

Tablica 7.14 Usporedba analitički i eksperimentalno određene vrijednosti horizontalne nosivosti sustava pri graničnom stanju pred rušenje za negativni smjer opterećenja.

Tablica 7.15 Usporedba analitički određene vrijednosti horizontalne nosivosti sustava pri graničnom stanju pred rušenje u odnosu na srednju eksperimentalnu vrijednost.

Tablica 7.16 Usporedba analitički i eksperimentalno određene vrijednosti relativnog međukatnog pomaka sustava pri graničnom stanju pred rušenje.

Tablica 7.17 Usporedba analitički određene vrijednosti relativnog međukatnog pomaka sustava pri graničnom stanju pred rušenje u odnosu na srednju eksperimentalnu vrijednost.

Tablica 7.18 Usporedba analitički i eksperimentalno određene vrijednosti početne krutosti uzoraka za pozitivan smjer opterećenja.

Tablica 7.19 Usporedba analitički i eksperimentalno određene vrijednosti početne krutosti uzoraka za negativan smjer opterećenja.

Tablica 7.20 Usporedba analitički određene vrijednosti početne krutosti uzoraka u odnosu na srednju eksperimentalnu vrijednost.

Tablica 7.21 Usporedba analitički i eksperimentalno određene vrijednosti horizontalne nosivosti sustava pri pojavi prve značajne pukotine u ispuni za pozitivan smjer opterećenja.

Tablica 7.22 Usporedba analitički i eksperimentalno određene vrijednosti horizontalne nosivosti sustava pri pojavi prve značajne pukotine u ispunu za negativan smjer opterećenja.

Tablica 7.23 Usporedba analitički i eksperimentalno određene vrijednosti horizontalne nosivosti sustava pri pojavi prve značajne pukotine u ispunu u odnosu na srednju eksperimentalnu vrijednost.

Tablica 7.24 Usporedba analitički i eksperimentalno određene vrijednosti relativnog međukatnog pomaka okvira s ispunom pri pojavi prve značajne pukotine u ispunu za pozitivan smjer opterećenja.

Tablica 7.25 Usporedba analitički i eksperimentalno određene vrijednosti relativnog međukatnog pomaka okvira s ispunom pri pojavi prve značajne pukotine u ispunu za negativan smjer opterećenja.

Tablica 7.26 Usporedba analitički i eksperimentalno određene vrijednosti relativnog međukatnog pomaka okvira s ispunom pri pojavi prve značajne pukotine u ispunu u odnosu na srednju eksperimentalnu vrijednost.

Tablica 7.27 Usporedba analitički i eksperimentalno određene vrijednosti horizontalne nosivosti okvira s ispunom pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna za pozitivan smjer opterećenja.

Tablica 7.28 Usporedba analitički i eksperimentalno određene vrijednosti horizontalne nosivosti okvira s ispunom pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna za negativan smjer opterećenja.

Tablica 7.29 Usporedba analitički i eksperimentalno određene vrijednosti horizontalne nosivosti okvira s ispunom pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna u odnosu na srednju eksperimentalnu vrijednost.

Tablica 7.30 Usporedba analitički i eksperimentalno određene vrijednosti relativnog međukatnog pomaka okvira s ispunom pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna za pozitivan smjer opterećenja.

Tablica 7.31 Usporedba analitički i eksperimentalno određene vrijednosti relativnog međukatnog pomaka okvira s ispunom pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna za negativan smjer opterećenja.

Tablica 7.32 Usporedba analitički i eksperimentalno određene vrijednosti relativnog međukatnog pomaka okvira s ispunom pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna u odnosu na srednju eksperimentalnu vrijednost.

Tablica 7.33 Usporedba analitički i eksperimentalno određene vrijednosti horizontalne nosivosti okvira s ispunom pri graničnom stanju pred rušenje za pozitivan smjer opterećenja.

Tablica 7.34 Usporedba analitički i eksperimentalno određene vrijednosti horizontalne nosivosti okvira s ispunom pri graničnom stanju pred rušenje za negativan smjer opterećenja.

Tablica 7.35 Usporedba analitički i eksperimentalno određene vrijednosti horizontalne nosivosti okvira s ispunom pri graničnom stanju pred rušenje u odnosu na srednju eksperimentalnu vrijednost.

Tablica 7.36 Usporedba analitički i eksperimentalno određene vrijednosti relativnog međukatnog pomaka okvira s ispunom pri graničnom stanju pred rušenje u ovisnosti o smjeru opterećenja.

Tablica 7.37 Usporedba analitički i eksperimentalno određene vrijednosti relativnog međukatnog pomaka okvira s ispunom pri graničnom stanju pred rušenje u odnosu na srednju eksperimentalnu vrijednost.

Poglavlje 8:

Tablica 8.1 Prikaz osnovni karakteristika seta zapisa potresa kompatibilnih sa spektrom *EC8*, tip 1, tlo C, 2% prigušenja, $a_g = 0{,}1g$.

Tablica 8.2 Prikaz osnovni karakteristika seta zapisa potresa kompatibilnih sa spektrom *EC8*, tip 1, tlo C, 2% prigušenja, $a_g = 0{,}2g$.

Tablica 8.3 Prikaz osnovni karakteristika seta zapisa potresa kompatibilnih sa spektrom *EC8*, tip 1, tlo C, 2% prigušenja, $a_g = 0{,}3g$.

Tablica 8.4 Procijenjene vrijednosti nelinearnih pomaka ispitnih uzoraka za potres South Iceland_y.

Tablica 8.5 Procijenjene vrijednosti nelinearnih pomaka ispitnih uzoraka za potres Izmit_y.

Tablica 8.6 Procijenjene vrijednosti nelinearnih pomaka ispitnih uzoraka za potres Alkion_y.

Tablica 8.7 Procijenjene vrijednosti nelinearnih pomaka ispitnih uzoraka za potres Campano Lucano_x.

Tablica 8.8 Procijenjene vrijednosti nelinearnih pomaka ispitnih uzoraka za potres Spitak_x.

Tablica 8.9 Procijenjene vrijednosti nelinearnih pomaka ispitnih uzoraka za potres Lazio Abruzo_x.

Tablica 8.10 Procijenjene vrijednosti nelinearnih pomaka ispitnih uzoraka za potres Campano Lucano_y.

Tablica 8.11 Procijenjene vrijednosti nelinearnih pomaka ispitnih uzoraka za potres Northridge_y.

Tablica 8.12 Procijenjene vrijednosti nelinearnih pomaka ispitnih uzoraka za potres NW Kyushu_x.

Tablica 8.13 Procijenjene vrijednosti nelinearnih pomaka ispitnih uzoraka za potres EMILIA Pianura Padana_x.

Tablica 8.14 Procijenjene vrijednosti nelinearnih pomaka ispitnih uzoraka za potres Christchurch_x.

Tablica 8.15 Procijenjene vrijednosti nelinearnih pomaka ispitnih uzoraka za potres EMILIA Pianura Padana_x1.

Tablica 8.16 Procijenjene vrijednosti nelinearnih pomaka ispitnih uzoraka za potres EMILIA Pianura Padana_y.

Tablica 8.17 Procijenjene vrijednosti nelinearnih pomaka ispitnih uzoraka za potres NW Kyushu_y.

Tablica 8.18 Procijenjene vrijednosti nelinearnih pomaka ispitnih uzoraka za potres Imperial Valley_y.

Tablica 8.19 Procijenjene vrijednosti nelinearnih pomaka ispitnih uzoraka za potres L'Aquila_y.

Tablica 8.20 Procijenjene vrijednosti nelinearnih pomaka ispitnih uzoraka za potres Loma Pieta_x.

Tablica 8.21 Procijenjene vrijednosti nelinearnih pomaka ispitnih uzoraka za potres Friuli_x.

Tablica 8.22 Procijenjene vrijednosti nelinearnih pomaka ispitnih uzoraka za potres NW Kagoshima_x.

Tablica 8.23 Procijenjene vrijednosti nelinearnih pomaka ispitnih uzoraka za potres Darfield_x.

Tablica 8.24 Procijenjene vrijednosti nelinearnih pomaka ispitnih uzoraka za potres Darfield_x.

Tablica 8.25 Veza između razreda oštetljivosti i ponašanja konstrukcija pri djelovanju potresa prema *EMS-98.*

Tablica 8.26 Razredi oštetljivosti konstrukcijskih sustava prema Schwarzu i dr.

Tablica 8.27 Kvantitativan i kvalitativan opis razina oštećenja armirano betonskih okvira sa zidanom ispunom prema Schwarzu i dr.

Tablica 8.28 Prikaz razina oštećenja i pripadnih vrijednosti relativnog međukatnog pomaka ispitnih uzoraka, u ovisnosti o tlačnoj čvrstoći ispuna.

Tablica 8.29 Prikaz područja oštećenja ispitnih uzoraka, s pripadnim vrijednostima relativnih međukatnih pomaka, u ovisnosti o tlačnoj čvrstoći ispuna.

Tablica 8.30 Prikaz razina oštećenja i pripadnih vrijednosti relativnog međukatnog pomaka uzoraka praznih okvira.

Tablica 8.31 Prikaz razina oštećenja i pripadnih vrijednosti relativnog međukatnog pomaka uzoraka praznih okvira.

Tablica 8.32 Ocjena nivoa oštećenja uzoraka za zapise potresa kompatibilne s *EC8* spektrom za a_g=0,1.

Tablica 8.33 Ocjena nivoa oštećenja ispitnih uzoraka za zapise potresa kompatibilne s *EC8* spektrom za a_g=0,2.

Tablica 8.34 Ocjena nivoa oštećenja ispitnih uzoraka za zapise potresa kompatibilne s *EC8* spektrom za a_g=0,3.

Poglavlje 9:

Nema tablica

Dodatak A:

Nema tablica

Dodatak B:

Nema tablica

POPIS SIMBOLA :

VELIKA LATINIČNA SLOVA

A_c - ploština poprečnog presjeka stupa okvira

A_e - ploština ekvivalentnog poprečnog presjeka uokvirenog ziđa

A_i - ploština poprečnog presjeka ispuna

A_i^* - ploština *i* - tog uzorka ispuna

A_{mc} - ploština zidnog elementa

A_n - ploština poprečnog presjeka uzorka ispuna u smjeru dijagonale

A_s - ploština uzdužne armature

A_{sh} - ploština poprečne armature

A_s'- ploština uzdužne armature u tlačnom području stupa okvira

C_E - koeficijent prianjanja stupova okvira i zidanog ispuna

C_F - koeficijent redukcije nosivosti okvira

C_I - koeficijent interakcije okvir - ispun

C_R - koeficijent redukcije nosivosti ispuna

C_y - koeficijent posmika pri pojavi popuštanja jednostupnjevnog sustava

D_g - karakteristični pomak potresa

D_l - pomak linearnog jednostupnjevnog sustava

D_{max} - maksimalni pomak nelinearnog jednostupnjevnog sustava

DR - omjer pomaka

D_y - pomak pri pojavi tečenja jednostupnjevnog sustava

E_A - apsorbirana energija

E_c - modul elastičnosti betona

$E_{c,i}$ - modul elastičnosti *i* - tog uzorka betona

E_D - disipirana energija

E_D^* - disipirana energija po jedinici pomaka

E_i - modul elastičnosti ispuna

$E_{i,i}$ - modul elastičnosti *i* - tog uzorka ispuna

E_s - modul elastičnosti uzdužne armature

F_a - faktor amplifikacije ubrzanja

F_{cc} - horizontalna nosivost tlačnog stupa okvira

F_{ct} - horizontalna nosivost vlačnog stupa okvira

F_i - sila sloma uzorka ispune pri tlačnom ispitivanju

$F_{i,max}$ - sila sloma *i* - tog uzorka ispuna pri tlačnom ispitivanju

F_m - opterećenje modela

F_m - sila sloma pri tlačnom ispitivanju uzoraka morta

F_{mc} - sila sloma zidnog elementa pri tlačnom ispitivanju

$F_{m,i}$ - sila sloma pri tlačnom ispitivanju *i* - tog uzoraka morta

F_{mt} - sila sloma pri savijanju uzoraka morta

$F_{mt,i}$ - sila sloma pri savijanju *i* - tog uzoraka morta

F_p - opterećenje prototipa

F_{pi} - sila predtlačenja

$F_{v,max}$ - sila sloma uzorka ispuna pri ispitivanju posmične čvrstoće

G_c - modul posmika betona

G_i - modul posmika ispuna

G_m - težina modela

G_p - težina prototipa

I_b - moment tromosti grede okvira

I_e - moment tromosti ekvivalentnog poprečnog presjeka uokvirenog zida

K - konstanta ovisna o tipu zidnog elementa i načinu izvedbe zida

K_{col} - krutost ispitnih uzoraka pri slomu

K_{cr} - krutost ispitnih uzoraka pri pojavi prve značajne pukotine u ispunu

K_i - početna krutost ispitnih uzoraka

K_i^a - analitička vrijednost početne krutosti

K_i^e - eksperimentalna vrijednost početne krutosti

K_m - računska krutost ispuna

K_{max} - krutost ispitnih uzoraka pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna

K_t - krutost zamjenske tlačne dijagonale

L_v - posmični visina stupa okvira

M - tlačna čvrstoća morta

M_u - moment savijanja poprečnog presjeka stupa pri pojavi savojnog sloma

M_{pc} - moment savijanja poprečnog presjeka tlačnog stupa okvira pri savojnom slomu

M_{pct} - moment savijanja poprečnog presjeka vlačnog stupa okvira pri savojnom slomu

N - aksijalno opterećenje stupa okvira

N_c - tlačna uzdužna sila

N_t - vlačna uzdužna sila

P - ukupno gravitacijsko opterećenje

P_i - vertikalno opterećenje ispuna

P_m - ploština na modelu

P_p - ploština na prototipu

R - faktor redukcije sile

Rm - raspon izmjera zidnog elementa deklariran od strane proizvođača

R1, *R1+*, *R2* i *R2+* - razredi raspona izmjera zidnog elementa

S_a - spektralna akceleracija linearnog sustava

S_d - spektralni pomaka linearnog sustava

SR - omjer čvrstoća

S_v - spektralna brzina linearnog sustava

T - osnovni period osciliranja

T_{eff} - efektivni period jednostupnjevnog sustava

T_g - karakteristični period potresa

Tm - odstupanje izmjera zidnog elementa deklarirano od strane proizvođača

TR- omjer perioda

T1, *T1+*, *T2* i *T2+* - razredi odstupanja izmjera zidnog elementa

V^* - koeficijent varijacije

V_c - posmična nosivost betona

V_{col} - horizontalna nosivost pri pojavi sloma ispitnog uzorka

V_{col}^a - analitička vrijednost horizontalne nosivosti pri pojavi sloma sustava okvir s ispunom

V_{col}^e - eksperimentalna vrijednost horizontalne nosivosti pri pojavi sloma sustava okvir s ispunom

V_{cr} - horizontalna nosivost pri pojavi prve značajne pukotine u ispunu

V_{cr}^a - analitička vrijednost horizontalne nosivosti pri pojavi prve značajne pukotine u ispunu

V_{cr}^e - eksperimentalna vrijednost horizontalne nosivosti pri pojavi prve značajne pukotine u ispunu

V_{crash} - horizontalna nosivost pri pojavi drobljenja ispuna

V_f - horizontalna nosivost okvira

$V_{f,res}$ - rezidualna horizontalna nosivost okvira

V_{gu} - bruto obujam zidnog elementa

$V_{i,cr}$ - horizontalna nosivost ispuna pri pojavi prve značajne pukotine

$V_{i,max}$ - horizontalna nosivost ispuna pri pojavi dominantnog mehanizma sloma

$V_{i,res}$ - rezidualna nosivost ispuna pri horizontalnom klizanju

V_{lc} - horizontalna nosivost lijevog stupa okvira

V_m - obujam modela

V_{max} - maksimalna horizontalna nosivost

V_{max} - horizontalna nosivost pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna

V_{max}^a - analitička vrijednost horizontalne nosivosti pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna

V_{max}^e - eksperimentalna vrijednost horizontalne nosivosti pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna

V_p - obujam prototipa

V_{rc} - horizontalna nosivost desnog stupa okvira

V_{res} - rezidualna nosivost ispitnih uzoraka

V_s - nosivost poprečne armature

V_u - posmična nosivost stupa okvira

V_{vu} - obujam šupljina zidnog elementa

V_y - horizontalna nosivost pri pojavi tečenja sustava okvir s ispunom ($V_y = V_{max}$)

W - težina

MALA LATINIČNA SLOVA

a_g - projektno ubrzanje podloge

a_{max} - vršna vrijednost akceleracije

b_c - širina poprečnog presjeka stupa

b_m - širina prizme morta na crti pukotine

c - koeficijent posmika

c_0 – kohezija

d - duljina zamjenske tlačne dijagonale

d - statička visina

d_b- promjer uzdužne armature

f_b - normalizirana tlačna čvrstoća zidnog elementa

f_c - tlačna čvrstoća betona

$f_{c,i}$ - tlačna čvrstoća i - tog uzorka betona

f_i - tlačna čvrstoća ispuna

$f_{i,i}$ - tlačna čvrstoća i - tog uzorka ispuna

$f_{i,i}$ - tlačna čvrstoća i - tog uzorka ispuna

$f_{i,min}$ - najmanja pojedinačna vrijednost tlačne čvrstoće iz grupe ispitnih uzoraka ispuna

f_k - karakteristična tlačna čvrstoća ispuna

f_m - tlačna čvrstoća morta

f_{mc} - srednja tlačna čvrstoća uzoraka zidnih elemenata

$f_{mc,i}$ - tlačna čvrstoća i - tog uzorka zidnog elementa

f_{mt} - vlačna čvrstoća morta pri savijanju

$f_{p,i}$ - naprezanje predtlačenja i - tog uzorka ispuna

f_t - vlačna čvrstoća ispuna

f_u - vlačna čvrstoća armaturnog čelika

f_v - posmična čvrstoća ispuna

$f_{v,i}$ - posmična čvrstoća i - tog uzorka ispuna

f_{v0} - početna posmična čvrstoća ispune

f_{v0k} - karakteristična početna posmična čvrstoća ispuna

f_y - čvrstoća armaturnog čelika na granici popuštanja

$f_{y,i}$ - čvrstoća *i* - tog uzorka armaturnog čelika na granici popuštanja

f_{ys} - čvrstoća poprečne armature na granici popuštanja

f_i' - srednja tlačna čvrstoća ispuna

g- gravitacijsko ubrzanje

*g** - duljina mjerne baze dijagonale uzorka ispuna

h- visina ispune

h_c - visina poprečnog presjeka stupa

h_m - visina prizme morta na crti pukotine

h_s - visina uzoraka ispuna

h_t - pridržana visina stupa okvira

h_u - visina zidnog elementa

k - koeficijent degradacije posmične nosivosti stupa okvira

l - duljina ispuna

l_c - moment tromosti stupa okvira

l_d - duljina ekscentrične zamjenske tlačne dijagonale

l_m - udaljenost između osi ležajnih valjaka

l_m - duljina na modelu

l_p - duljina na prototipu

l_s - duljina uzoraka ispuna

l_u - duljina zidnog elementa

n_c - broj stupova kod višerasponskog sustava uokvireno ziđe

n_i - broj ispuna višerasponskog sustava uokvireno ziđe

n_0 - tlačno naprezanje u stupu okvira

s - razmak poprečne armature

s^* - standardno odstupanje

t - debljina ispuna

t_s - širina uzoraka ispuna

v - Poissonov omjer

z - kontaktna duljina stupa okvira i ispuna

γ - robusnost zidnog elementa

γ^* - koeficijent utjecaja otvora u ispunu na početnu krutost sustava okvir s ispunom

$\gamma_{v,i}$ - posmična deformacija uzorka ispuna u i - tom koraku opterećenja

w - širina zamjenske tlačne dijagonale

w_u - širina zidnog elementa

VELIKA GRČKA SLOVA

Δ - horizontalni pomak

Δ_{col} - horizontalni pomak pri pojavi sloma ispitnog uzorka

Δ_{cr} - horizontalni pomak pri pojavi prve značajne pukotine u ispunu

Δ_{max} - horizontalni pomak pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna

Δ_s - nelinearni spektar pomaka

$\Delta H_{v,i}$ - produljenje dijagonale uzorka ispune pri i - tom koraku opterećenja

$\Delta V_{v,i}$ - skraćenje dijagonale uzorka ispune pri i - tom koraku opterećenja

MALA GRČKA SLOVA

α - odnos visine i raspona okvira

β - odnos momenata tromosti stupa i grede

β^* - koeficijent početne krutosti ovisan o rubnim uvjetima

δ^* - faktor oblika zidnog elementa

δ_{cr} - relativni međukatni pomak pri pojavi prve značajne pukotine u ispunu

δ_{cr}^{a} - analitička vrijednost relativnog međukatnog pomaka pri pojavi prve značajne pukotine u ispunu

δ_{cr}^{e} - eksperimentalna vrijednost relativnog međukatnog pomaka pri pojavi prve značajne pukotine u ispunu

δ_{col} - relativni međukatni pomak pri pojavi sloma ispitnog uzorka

δ_{max} - relativni međukatni pomak pri maksimalnoj horizontalnoj nosivosti

δ_{Vcol}^{a} - analitička vrijednost relativnog međukatnog pomaka pri pojavi sloma sustava okvir s ispunom

δ_{Vcol}^{e} - eksperimentalna vrijednost relativnog međukatnog pomaka pri pojavi sloma sustava okvir s ispunom

δ_{Vmax} - relativni međukatni pomak pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna

δ_{Vmax}^{a} - analitička vrijednost relativnog međukatnog pomaka pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna

δ_{Vmax}^{e} - eksperimentalna vrijednost relativnog međukatnog pomaka pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna

ε_h - horizontalna deformacija ispuna

ε_i - tlačna deformacija ispuna

ε_v - vertikalna deformacija ispuna

ε_y - deformacija armaturnog čelika na granici popuštanja

θ - nagib dijagonale ispune

η - koeficijent redukcije posmične nosivosti stupa okvira

λ - odnos relativne krutosti ispune i stupa okvira

μ - kut unutarnjeg trenja ispune

μ^* - faktor duktilnosti

μ_k - karakteristični kut unutarnjeg trenja ispuna

μ_r - rezidualni kut unutarnjeg trenja ispuna

ξ - ekvivalentno viskozno prigušenje

ρ - gustoća

ρ_g - koeficijent armiranja grede uzdužnom armaturom

ρ_s - koeficijent armiranja stupova uzdužnom armaturom

$\sigma_{o,i}$ - tlačno naprezanje u zidanoj ispuni uzrokovano gravitacijskim opterećenjem

Ψ - koeficijent doprinosa horizontalne nosivost okvira

Ψ_{cr} - koeficijent doprinosa horizontalne nosivost okvira pri pojavi prve značajne pukotine u ispunu

Ψ_{max} - koeficijent doprinosa horizontalne nosivost okvira pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna

ω - kružna frekvencija

SADRŽAJ

PODACI O AUTORU, RADU, OCJENI I OBRANI DOKTORSKOG RADA II
NASLOVNI LIST III
MENTOR I OPSEG DOKTORSKOGA RADA IV
AUTOROV KRATKI ŽIVOTOPIS V
ZAHVALA VI
SAŽETAK DOKTORSKE DISERTACIJE VII
ABSTRACT OF THE DISSERTATION (engleski jezik) IX
POPIS SLIKA XI
POPIS TABLICA XXIV
POPIS SIMBOLA XXXII
SADRŽAJ XLII

1. UVOD 1
1.1. Općenito 1
1.2. Ciljevi istraživanja 3
1.3. Metode, metodologija i plan istraživanja 3

2. STANJE ISTRAŽIVANOG PODRUČJA 5
2.1. Dosadašnja značajna eksperimentalna i numerička istraživanja ponašanja neduktilnih armirano-betonskih okvira sa zidanim ispunom 5
2.2. Svojstva neduktilnih okvira 14
2.3. Ponašanje sustava okvir s ispunom 16
2.4. Karakteristični parametri ponašanja sustava okvir sa zidanim ispunom 23

3. PROGRAM ISPITIVANJA 28
3.1. Odabir istraživanih parametara modela 28
3.2. Odabir ispitnih modela 30
3.3. Izvedba modela 31

4. ISPITIVANJE KONSTITUTIVNIH MATERIJALA 37
4.1. Tlačna čvrstoća betona ugrađenog u ispitne uzorke 37

4.2. Vlačna čvrstoća armaturnog čelika 38
4.3. Svojstva morta za zidanje 41
4.3.1. Vlačna i tlačna čvrstoća morta za zidanje 41
4.4. Svojstva zidnih elemenata....43
4.4.1. Izmjere zidnih elemenata i odstupanja 45
4.4.2. Grupiranje zidnih elemenata 47
4.4.3. Tlačna čvrstoća zidnih elemenata 47

5. ISPITIVANJE SVOJSTAVA ZIDANE ISPUNE 50
5.1. Mehanička svojstva zidanog ispuna....50
5.1.1. Tlačna čvrstoća....50
5.1.2. Početna posmična čvrstoća 55
5.1.3. Dijagonalni tlačni pokus....60
5.2. Deformacijska svojstva 65
5.2.1. Modul elastičnosti....65
5.2.2. Modul posmika....71
5.3. Usporedba rezultata ispitivanja mehaničkih i deformacijskih svojstava....77
5.4. Usporedba rezultata ispitivanja s preporukama danim u Eurokodu 6 78

6. ISPITIVANJE UZORAKA NEDUKTILNIH ARMIRANOBETONSKIH OKVIRA SA ZIDANOM ISPUNOM 80
6.1. Interpretacija rezultata ispitivanja....87
6.2. Rezultati ispitivanja skupine uzoraka *O1*....90
6.2.1. Rezultati ispitivanja uzorka *O1*....90
6.2.2. Rezultati ispitivanja uzorka *O1_bpm*. 96
6.2.3. Rezultati ispitivanja uzorka *O1_bpm**....104
6.2.4. Rezultati ispitivanja uzorka *O1_cpm*. 108
6.2.5 Rezultati ispitivanja uzorka *O1_bvm*. 117
6.2.6 Rezultati ispitivanja uzorka *O1_cvm*. 124
6.2.7 Rezultati ispitivanja uzorka *O1_b*. 132
6.3. Rezultati ispitivanja skupine uzoraka *O2*....138
6.3.1 Rezultati ispitivanja uzorka *O2_cpm*. 138
6.4. Rezultati ispitivanja skupine uzoraka *O3*....145
6.4.1 Rezultati ispitivanja uzoraka *O3*. 145

6.4.2 Rezultati ispitivanja uzorka *O3_bpm*. 151
6.4.3 Rezultati ispitivanja uzorka *O3_cpm*. 160
6.5. Rezultati ispitivanja skupine uzoraka *O4*. 167
6.5.1 Rezultati ispitivanja uzorka *O4*. 167
6.5.2 Rezultati ispitivanja uzorka *O4_bpm*. 174
6.5.3. Rezultati ispitivanja uzorka *O4_cpm* 183
6.6. Usporedba rezultata ispitivanja 192
6.6.1. Skupina uzoraka *O1* 192
6.6.2. Skupina uzoraka *O2* 203
6.6.3. Skupina uzoraka *O3* 205
6.6.4. Skupina uzoraka *O4* 211
6.7. Područja graničnih stanja sustava uokvireno ziđe 217

7. ANALITIČKA PROCJENA PONAŠANJA SUSTAVA UOKVIRENO ZIĐE 226
7.1. Procjena ponašanja sustava prema graničnim stanjima 227
7.2. Granično stanje uporabljivosti 229
7.2.1. Procjena početne krutosti sustava prema postojećim analitičkim modelima 229
7.2.2. Procjena horizontalne nosivosti sustava pri pojavi prve značajne pukotine u ispunu 238
7.3. Granično stanje nosivosti 245
7.3.1. Procjena horizontalne nosivosti sustava pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna prema postojećim analitičkim modelima. 245
7.3.2. Procjena relativnog međukatnog pomaka sustava pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna prema postojećim analitičkim modelima. 255
7.4. Granično stanje pred rušenje sustava 260
7.4.1. Procjena horizontalne nosivosti sustava pri graničnom stanju pred rušenje prema postojećim analitičkim modelima 260
7.4.2. Procjena relativnog međukatnog pomaka sustava pri graničnom stanju pred rušenje prema postojećim analitičkim modelima 265
7.5. Prijedlog metode procjene ponašanja sustava uokvireno ziđe prema graničnim stanjima 267
7.5.1. Procjena početne krutosti sustava 270
7.5.2. Procjena horizontalne nosivosti sustava pri pojavi prve značajne pukotine u ispunu 271
7.5.3. Procjena relativnog međukatnog pomaka sustava pri pojavi prve značajne pukotine u ispunu 275
7.5.4. Procjena horizontalne nosivosti sustava pri pojavi dominantnog mehanizma sloma

ispuna 277
7.5.5. Procjena relativnog međukatnog pomaka sustava pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna 280
7.5.6. Procjena horizontalne nosivosti sustava pri graničnom stanju pred rušenje 282
7.5.7. Procjena relativnog međukatnog pomaka sustava pri graničnom stanju pred rušenje 285
7.6. Usporedba predložene metode procjene ponašanja sustava uokvireno ziđe s rezultatima ispitivanja 285
7.6.1. Usporedba procjene početne krutosti sustava 287
7.6.2. Usporedba procjene horizontalne nosivosti sustava pri pojavi prve značajne pukotine u ispunu 290
7.6.3. Usporedba procjene relativnog međukatnog pomaka sustava pri pojavi prve značajne pukotine u ispunu 293
7.6.4. Usporedba procjene horizontalne nosivosti sustava pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna 296
7.6.5. Usporedba procjene relativnog međukatnog pomaka sustava pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna 300
7.6.6. Usporedba procjene horizontalne nosivosti sustava pri graničnom stanju pred rušenje 302
7.6.7. Usporedba procjene relativnog međukatnog pomaka sustava pri graničnom stanju pred rušenje 305
7.7. Procjena ponašanja u slučaju višerasponskog sustava uokvireno ziđe 307

8. PROCJENA OČEKIVANIH NELINEARNIH POMAKA SUSTAVA UOKVIRENO ZIĐE PRI DJELOVANJU POTRESA....314
8.1. Prikaz metode procjene nelinearnih pomaka pri djelovanju potresa 314
8.1.1. Generalizirani spektar pomaka.... 315
8.2. Odabir mjerodavnih zapisa potresa.... 321
8.3. Idealizirani spektri pomaka za odabrane zapise potresa.... 324
8.4. Procjena nelinearnih pomaka ispitnih uzoraka.... 324
8.5. Klasifikacija oštetljivosti i oštećenja prema *EMS-98* skali.... 332
8.5.1. Klasifikacija razreda oštetljivosti uzoraka 335
8.5.2. Klasifikacija razina oštećenja sustava uokvireno ziđe 336
8.6. Ocjena oštećenja uzoraka u odnosu na odabrane zapise potresa.... 342

9. ZAKLJUČAK I PRIJEDLOZI ZA DALJNJA ISTRAŽIVANJA....344
9.1 Osvrt 344

9.2 Zaključak 347
9.3 Prijedlozi za daljnja istraživanja 352

POPIS LITERATURE: 354

DODATAK A. 360
A1. Prikaz izvoda analitičkog izraza procjene horizontalne nosivosti ispuna pri pojavi prvih značajnih pukotina 360
A2. Prikaz izvoda analitičkog izraza procjene horizontalne nosivosti ispuna pri pojavi dominantnog mehanizma sloma 362

DODATAK B. 364
B1. Prikaz akcelerograma, spektara energije i idealiziranih spektara ubrzanja i pomaka odabranih zapisa potresa 364
B2. Prikaz računalnog algoritma za određivanje karakterističnog perioda potresa 385

1. UVOD

1.1. Općenito

Veza ziđa i armiranog betona vidljiva je od samih početaka primjene armiranog betona kao građevinskog materijala. Tako je već kod službeno prve armiranobetonske zgrade (*Ingalls Building*, Cincinnatti, Ohio, 1902.) vidljiva primjena ziđa, pri ostvarenju arhitektonske forme, iako je korišten samo kao nekonstruktivni element za izradu ukrasne fasade. Razvojem opekarske industrije te naglim porastom gradnje nakon Drugog svjetskog rata, sredinom 50-ih godina prošloga stoljeća, dolazi do široke primjene armirano-betonskih okvirnih konstrukcija sa zidanim ispunom kao nosivog konstruktivnog sustava diljem svijeta. Dobiveni je sustav ekonomičan, arhitektonski privlačan i funkcionalan (vatrootpornost, termalna i akustička izolacija). Ekspanzija primjene nije popraćena spoznajama o ponašanju sustava i međudjelovanju njegovih elemenata. Tako su okviri prvenstveno projektirani za prijenos vertikalnih opterećenja gdje su grede promatrane kao kontinuirani nosači oslonjeni na stupove okvira. Proračun elemenata vršen je prema teoriji dopuštenih naprezanja, a doprinos ispune u potpunosti je zanemaren. Ta se vrsta okvira u literaturi naziva neduktilnim ili neseizmički projektiranim okvirima ili okvirima projektiranim za prijenos gravitacijskog opterećenja, a svojstveno im je oblikovanje armature kojim nije osigurano duktilno ponašanje konstrukcije. Proračun se, prema dopuštenim naprezanjima, dugo zadržao u praksi (sve do 90-ih godina) [1], stoga ne čudi podatak [2] da upravo takav neduktilni tip armirano-betonskih okvira, sa zidanim ispunom, tvori većinu graditeljskog fonda diljem svijeta.

Ponašanje okvirnih konstrukcija sa zidanim ispunom, pri djelovanju potresa, pod izravnim je utjecajem interakcije okvira i ispuna. S obzirom da se radi o kompozitnom sustavu, čiji konstituenti imaju znatno različite mehaničke i deformacijske karakteristike, nosivost i krutost sustava pod izravnim je utjecajem razine oštećenja. Okviri su relativno meke i fleksibilne konstrukcije, u odnosu na zidani ispun, koji je izrazito krut, ali i krt materijal. Dodavanjem zidanog ispuna, s jedne se strane doprinosi horizontalnoj nosivosti i krutosti okvira i smanjenju odgovora (pomaka) konstrukcije dok se s druge strane smanjuje duktilnost, odnosno povećava se oštetljivost. Osim toga, dodatna krutost sustava utječe i na povećanje potresnog opterećenja uslijed smanjenja perioda konstrukcije. Pri slabim i srednje jakim potresima, tj. relativno niskoj razini oštećenja, sustav se ponaša zadovoljavajuće monolitno gdje oba konstituenta (okvir i ispun) sudjeluju u prijenosu horizontalnog opterećenja. Krutost i nosivost pod dominantnim je utjecajem ispuna, a disipacija unesene energije ostvaruje se pojavom pukotina, tj. razvojem mehanizma sloma

ispuna. Pri snažnim potresima, tj. kod visoke razine oštećenja, granična nosivost i deformabilnost sustava pod izravnim je utjecajem odnosa krutosti konstituenta, pri čemu je moguće da u određenim slučajevima ispun ima ili pozitivan ili negativan utjecaj, ovisno o raspodjeli unutarnjih sila u stupu okvira uzrokovano interakcijom okvir - ispun. Tako je, primjerice, moguće da, u slučaju *povoljne* raspodjele unutarnjih sila u stupu, ispun odgodi (posmični) slom stupa i/ili da čak i nakon sloma stupa spriječi razvoj tzv. *meke etaže*, pridonoseći globalnoj stabilnosti konstrukcije. Naravno, doprinos globalnoj stabilnosti nakon sloma okvira moguć je jedino ako je zadovoljena pretpostavka da nije došlo do rušenja ispuna van ravnine okvira. S druge strane, *nepovoljna* raspodjela unutarnjih sila na stupu okvira može dovesti do ranog otkazivanja nosivosti. Ovdje posebnu opasnost predstavlja pojava tzv. *kratkog stupa*. S obzirom da ispun pruža pridržanje stupovima okvira pri horizontalnim pomacima, nakon sloma ispuna dolazi do gubitka pridržanja što uzrokuje pojavu značajnih momenata savijanja u područjima gdje se oni ne očekuju (srednja polovina visine stupa). Termin *kratki stup* odnosi se na nepridržanu visinu stupa. Tako, primjerice, pojava plastičnog zgloba (savojnog sloma) na polovini visine stupa, dovodi do povećanja zahtjevane posmične nosivosti za čak dva puta [3]. No, u slučaju kada nije došlo do pojave plastičnog zgloba, porast vrijednosti poprečne sile može uzrokovati preuranjeni posmični slom.

Unatoč relativno velikom broju istraživanja, još uvijek nije postignut konsenzus o tome je li utjecaj ispuna pozitivan ili negativan. Dodatne nesigurnosti, kao što su izostanak pouzdanog modela procjene nosivost i krutost sustava (nosivost i krutost se ne mogu odrediti na temelju superpozicije doprinosa elemenata) te veliki broj utjecajnih čimbenika, dovele su do daljnjeg izostajanja racionalnih metoda proračuna i/ili procjene ponašanja okvirnih konstrukcija s ispunom pri djelovanju potresa kako u praksi tako i u modernim seizmičkim propisima. Iako je umoderni seizmičkim propisima (od 90-ih godina) [4], [5], [6], prepoznat utjecaj ispuna, gdje oni sadržavaju pojedine smjernice za okvire s ispunom, on se i dalje u većini slučajeva tretira kao nekonstruktivni element, a interakcija se ili u potpunosti zanemaruje ili ostvaruje primjenom modela zamjenske tlačne dijagonale. Većinom su dane smjernice za sprječavanje neželjenih utjecaja ispuna (posmični slom stupova).

Navedeni nedostatci seizmičkih normi i smjernica daju poseban naglasak na potrebu razvoja inženjerski prikladne metode procjene ponašanja i nosivosti, sukladno modernim načelima potresnog inženjerstva što je osnovna motivacija provedenih istraživanja.

1.2. Ciljevi istraživanja

Cilj je istraživanja, na temelju vlastitih i dostupnih rezultata ispitivanja, odrediti relevantne parametre koji utječu na globalno i lokalno ponašanje neduktilnih armirano-betonskih okvirnih konstrukcija sa zidanim ispunom. Poznavanje njihova doprinosa pomoći će pri daljnjem proširenju spoznaja o ponašanju sustava, ali i za nadopunu budućih *EN* propisa. S obzirom da se navedeni sustav ne može uvrstiti u omeđeno ziđe, niti u armiranobetonske okvire projektirane prema modernim seizmičkim propisima, nastojat će ga se utvrditi kao zaseban konstruktivni sustav. Na osnovi formirane baze eksperimentalnih rezultata, izvršit će se ocjena postojećih te predložiti vlastita analitičkih metoda procjene horizontalne nosivosti sustava kako bi se dobio siguran i relativno pouzdan model primjenjiv u svakodnevnoj praksi. Definiranom metodom procjene nosivosti osigurat će se i mogućnost procjene seizmičke oštetljivosti kao i podloga za izbor metode ojačanja postojećih građevina. Provedenim istraživanjima, nastojat će se sagledati i mogućnost primjene zidanog ispuna kao sredstva ojačanja postojećih građevina na temelju postojeće metode procjene očekivanih nelinearnih pomaka.

1.3. Metode, metodologija i plan istraživanja

Tijekom istraživanja koristit će se dvije metode: (1) eksperimentalno i (2) analitičko istraživanje. Eksperimentalni dio istraživanja proveden je u *Laboratoriju za tehničku mehaniku* pri *GFOS*-u dok je analitičkim istraživanjem ocjenjena mogućnost primjene postojećih modela procjene te je predložen vlastiti model temeljen na graničnim stanjima ponašanja. Procjenom očekivanih nelinearnih pomaka, pomoću postojeće metode, omogućena je klasifikacija oštećenja sustav na osnovi definiranih graničnih stanja te ocjena doprinosa ispuna globalnoj stabilnosti. U nastavku teksta, dan je kratki prikaz metodologije istraživanja:

1. Izrada modela okvira u mjerilu 1:2
2. Ispitivanje svojstava materijala zidanog ispuna: dvije vrste zidnih elemenata, dvije vrste morta, četiri vrste žiđa i ispitivanje svojstava materijala okvira: beton i armatura
3. Ispitivanje armirano-betonskih okvira bez i s četiri vrste ispuna. Ukupno je ispitano četrnaest modela pri približno konstantnom vertikalnom i promjenjivom horizontalnom cikličkom opterećenju do sloma, u svrhu određivanja globalnih i lokalnih parametara ponašanja.

4. Obrada rezultata ispitivanja s ciljem analize mehanizma sloma, histereznog ponašanja, primarnih krivulja odgovora, disipacije energije, prigušenja sustava i graničnih stanja
5. Analitički se dio sastoji od:
    5.1. Pregleda i ocjene postojećih metoda procjene horizontalne nosivosti
    5.2. Prijedloga nove metode procjene nosivosti sukladno graničnim stanjima ponašanja
    5.3. Procjene očekivanih nelinearnih pomaka pri različitim projektnim ubrzanjima tla
6. Klasifikacija razine oštećenja i ocjena mogućnosti primjene zidanog ispuna kao sredstva ojačanja neduktilnih armirano-betonskih okvira
7. Diskusija rezultata
8. Zaključci i preporuke

2. STANJE ISTRAŽIVANOG PODRUČJA

Interakcija armirano-betonskih okvira i zidanog ispuna predmet je brojnih eksperimentalnih i numeričkih istraživanja. Iako prva eksperimentalna istraživanja datiraju iz 50-ih godina prošloga stoljeća (Thomas, 1953 i Ockleston, 1956.) [7], tek je posljednjih tridesetak godina, razvojem velikih istraživačkih centara, došlo do zamaha u ispitivanju neduktilnih i duktilnih okvira (armirano-betonskih i čeličnih) sa zidanim ispunom. Unatoč tome, ponašanje tih konstrukcija tijekom snažnih potresa i dalje ostaje kontraverzno pitanje u stručnim i istraživačkim krugovima. Dok s jedne strane imamo zadovoljavajuće ponašanje konstrukcija, kao što je u slučaju potresa Northridge (1994.) [2] i Christchurch (2010.) [3], s druge pak strane imamo katastrofalne posljedice rušenja tijekom Sichuan (2008.) [10] i Abruzzo (2009.) [11] potresa. Iako je doprinos ispuna u oba slučaja generalno okarakteriziran kao pozitivan, izvještaji upućuju na presudnu ulogu duktilnog ponašanja armirano-betonskih okvira pri interakciji s ispunom.

Iako je prepoznata opasnost koju predstavljaju navedene konstrukcije, u literaturi se može pronaći relativno mali broj istraživanja kojima su pokriveni svojstveni nedostatci neduktilnih okvira s ispunom. Većina ispitivanja provedena je na okvirima koji su projektirani na način da se izbjegne posmični slom stupova okvira, čime se zanemaruje moguć utjecaj ispuna na graničnu nosivosti sustava.

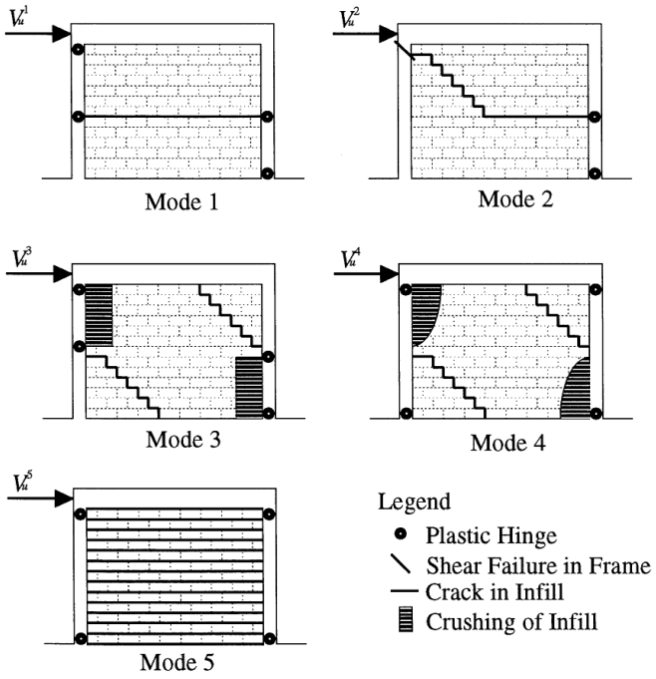
U kronološkom pregledu literature, prikazana su neka od provedenih istraživanja na neduktilnim armirano-betonskim okvirima sa zidanim ispunom.

2.1. Dosadašnja značajna eksperimentalna i numerička istraživanja ponašanja neduktilnih armirano-betonskih okvira sa zidanim ispunom

Fiorato i dr. (1970.) [7] proveli su ispitivanja na ukupno 27 uzoraka armirano-betonskih okvira s i bez zidanog ispuna. Uzorci su izvedeni u mjerilu 1:8 i ispitani pod horizontalnim opterećenjem u ravnini do sloma. Promatrani su parametri sljedeći: (1) visina/broj etaža, (2) širina/broj raspona, (3) količina i raspored uzdužne armature u stupovima okvira, (4) razina vertikalnog opterećenja te (5) veličina, oblik i položaj otvora u ispunu. Ispitano je osam jednorasponskih, jednoetažnih, trinaest jednorasponskih, peteroetažnih i šest trorasponskih, dvoetažnih uzoraka. Ispun je izvedena od glinene opeke i morta tipa *N*, a okviri uzoraka izvedeni su bez poprečne armature u stupovima. Promatrana je nosivost i krutost sustava te je dan osvrt na oblik sloma ispuna uzoraka. Iako je neovisno o promatranom parametru uočen značajan doprinos ispuna nosivosti i krutosti, duktilnost sustava okvir s

ispunom smanjenja je u odnosu na prazan okvir (posljedica nedostatka poprečne armature). Mehanizam otpora sustava ovisio je o individualnim karakteristikama elemenata i razini vertikalnog opterećenja. Otvori u ispunu pridonijeli su fleksibilnosti, pri čemu smanjenje nosivosti sustava nije bilo proporcionalno smanjenju tlocrtne površine ispuna. Slom svih uzoraka uzrokovan je posmičnim ili kombinacijom posmičnog i savojnog sloma stupova okvira. Mehanizam sloma ispuna okarakteriziran je kao hibridni slom, tj. kombinacija dijagonalnog tlačnog i posmičnog sloma. Na temelju uočene pojave i raspodjele pukotina, autori su predložili tzv. *knee-braced* model koji se sastoji od dva kruta tijela (definirana tlačnim dijagonalama) povezana s mehanizmom kojim se ostvaruje trenje na kontaktu tijela dok se tlačne dijagonale oslanjaju približno na polovini visine stupova. Osim toga, predložili su i metodu procjene krutosti sustava primjenom tzv. *shearbeam* modela gdje je ukupna krutost definirana kao zbroj savojne i posmične krutosti okvira i ispuna primjenom metode ekvivalentnog poprečnog presjeka.

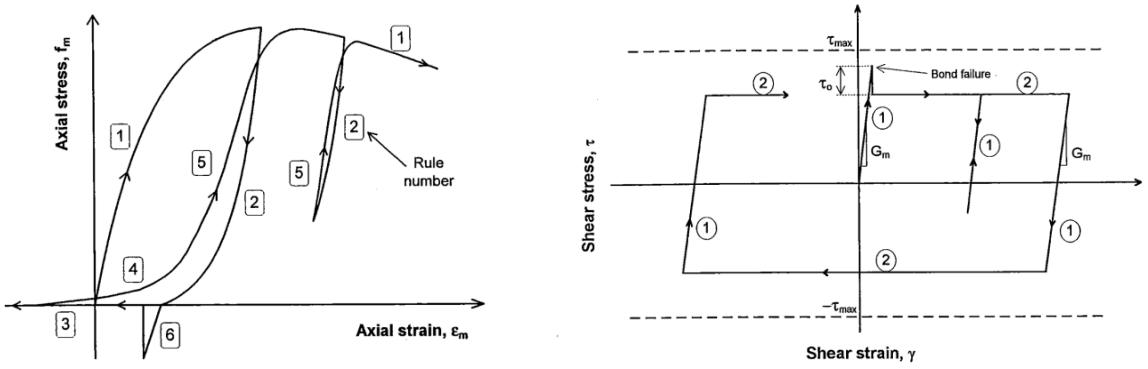
Mehrabi i dr. (1996.) [12] proveli su ispitivanja na četrnaest uzoraka armirano-betonskih okvira s ispunom izvedenih u mjerilu 1:2. Promatrani parametri sustava podijeljeni su u četiri skupine: (1) parametri okvira - duktilni i neduktilni okviri, (2) parametri ispune - jaka i slaba ispune, (3) vrsta opterećenja - monotono i cikličko opterećenje i (4) broj raspona okvira (jedan i dva). Neduktilni okviri projektirani su za prijenos vertikalnog (gravitacijskog) i horizontalnog opterećenja uzrokovanog vjetrom (osnovna brzina vjetra u iznosu od 44 m/s) dok su duktilni okviri projektirani prema preporukama danim u *UBC 1991* za četvrtu seizmičku *US* zonu. Parametri ispuna varirani su u odnosu na tlačnu čvrstoću, primjenom šupljih i punih betonskih zidnih elemenata povezanih mortom tipa *S*. Neovisno o tipu okvira i ispuna te vrsti opterećenja, uočen je značajan doprinos ispuna nosivosti, krutosti te disipaciji energije, posebice kod uzoraka sa seizmički projektiranim okvirima. Sukladno vlastitim opažanjima i dostupnoj literaturi, autori izdvajaju pet mogućih (najvjerojatnijih) oblika sloma sustava okvir s ispunom prikazanih Slikom 2.1. Na temelju izdvojenih oblika sloma sustava, predloženi su analitički modeli proračuna nosivosti prema graničnim stanjima. Općenito, slom slabog ispuna nastaje razvojem pukotina u smjeru horizontalnih reški dok kod jakog ispuna slom nastaje razvojem dijagonalnih pukotina. U slučaju neduktilnih okvira s jakim ispunom, slom sustava uzrokovan je posmičnim slomom stupa okvira iako je to uvjetovano relativno velikim horizontalnim pomakom. Dvorasponski uzorci ostvarili su 87% veću nosivst u odnosu na jednorasponski uzorak s time da imaju izražajniju degradaciju nosivosti i krutosti nakon dosezanja maksimalne nosivosti. Prilikom numeričkog modeliranja, autori primjenjuju metodu konačnih elemenata, pri čemu razvijaju dvije vrste kontaktnih elemenata kojima se simulira proklizavanje uzdužne armature u stupovima i stanje naprezanja na kontaktu zidni element-mort. Naknadnim numeričkim analizama, ustanovljeno je da proklizavanje uzdužne armature u stupovima ima značajan utjecaj na odgovor praznog okvira dok je u slučaju okvira s ispunom taj utjecaj zanemariv.



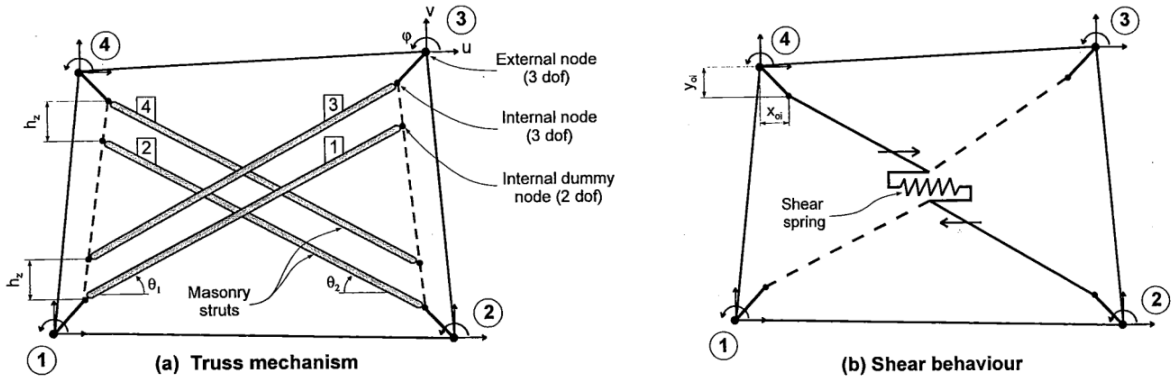
Slika 2.1 *Oblici sloma sustava okvir s ispunom prema Mehrabiju i dr.* [12]

Crisafulli je (1997.) [13] proveo opsežna analitička i eksperimentalna ispitivanja ponašanja zidanog ispuna i sustava okvir s ispunom pri različitim uvjetima i vrstama opterećenja. U sklopu istraživanja razvijeni su modeli ponašanja zidanog ispuna pri cikličkom tlačnom (Slika 2.2 a)) i cikličkom posmičnom opterećenju (Slika 2.2 b)) koji su naknadno poslužili za razvoj makro modela. Predloženim makro modelom omogućena je simulacija tlačnog i posmičnog sloma ispune što predstavlja značajan doprinos u odnosu na uobičajeni koncept modeliranja zamjenskom tlačnom dijagonalom kojom je omogućena jedino simulacija dijagonalnog tlačnog sloma. Makro model sastoji se od dvije tlačne (Slika 2.3 a)) i jedne posmične dijagonale (Slika 2.3 b)) kojima je omogućeno simuliranje cikličkog ponašanja sustava okvir s ispunom. Broj tlačnih dijagonala modela određen je na temelju usporedbe veličina unutarnjih sila na elementima okvira određenih pomoću metode konačnih elemenata i zamjenskim tlačnim dijagonalama. Autor je istaknuo prednosti primjene jedne zamjenske tlačne dijagonale kao što su jednostavnost i brzina modeliranja te zadovoljavajuća točnost rezultata po pitanju početne krutosti sustava. Nemogućnost simuliranja interakcije okvira i ispune te degradacije nosivost i krutosti nakon dosezanja maksimalne nosivosti nameću primjenu modela s više zamjenskih tlačnih dijagonala. U odnosu na vrijednosti unutarnjih sila određenih metodom konačnih elemenata, najbolje podudaranje rezultata ostvareno je primjenom modela s trima zamjenskim dijagonalama, međutim, radi jednostavnosti modela, odabrane su dvije dijagonale. Iako modelom s dvijema zamjenskim tlačnim dijagonalama nije ostvarena jednaka raspodjela unutarnjih sila po elementima okvira, uočeno je

zadovoljavajuće podudaranje s rezultatima metode konačnih elemenata u područjima najvećih vrijednosti. U eksperimentalnom dijelu istraživanja, autor je proveo ispitivanja na dvama uzorcima armirano-betonskih okvira s ispunom gdje je jedan uzorak izveden s posebno oblikovanim spojem stupova i grede. Posebno izvedenim spojem izbjegnuto je lokalno oštećenje ispune pri relativno malim pomacima u obliku drobljenja uglova.



Slika 2.2 *Ciklički model ponašanja zidanog ispuna pri a) tlačnom* i *b) posmičnom opterećenju* [13]



Slika 2.3 *Makro model: a) zamjenske tlačne dijagonale i b) posmična dijagonala* [13]

Al-Chaar je (1998.) [14] objedinio analitičke metode temeljene na konceptu zamjenske tlačne dijagonale prema nizu autora (Holmes, 1961., Smith, 1962., 1969., Mainstone, 1971., Liuwan i Kwan, 1982., Durrani, 1994.) te dao pregled razvoja modeliranja primjenom metode konačnih elemenata. Osim toga, dao je i ocjenu postojećih analitičkih izraza prema vlastitim rezultatima ispitivanja te predložio korekciju parametara kojima se uzima u obzir širina zamjenske tlačne dijagonale i duljina kontakta između okvira i ispuna. Ispitni uzorci projektirani su prema preporukama danim u *ACI 318-1951* i izvedeni u mjerilu 1:2. Provedeno je ispitivanje na ukupno pet uzoraka i to: jedan

jednorasponski, jednoetažni prazni okvir; dva jednorasponska jednoetažna okvira s ispunom od šupljih glinenih i betonskih zidnih elemenata povezanih mortom tipa *N*; jedan dvorasponski, jednoetažni uzorak ispunjen šupljim betonskim zidnim elementima i jedan trorasponski, jednoetažni uzorak ispunjen šupljim glinenim zidnim elementima. Uzorci su opterećeni monotonim horizontalnim opterećenjem u ravnini do sloma. Neovisno o čvrstoći ispuna, evidentan je doprinos krutosti i nosivosti sustava. Na temelju rezultata, zaključeno je da porast horizontalne nosivosti sustava nije linearno ovisan o broju raspona okvira. Najveće povećanje horizontalne nosivosti uočeno je u slučaju dvorasponskog uzorka, pri čemu je nosivost 1,4 puta veća u odnosu na nosivosti jednorasponskog uzorka. Daljnjim povećanjem broja raspona nije ostvaren jednak trend doprinosa povećanja horizontalne nosivosti. Slom ispitnih uzoraka nastao je uslijed pojave posmičnog sloma stupa okvira, pri čemu je kod uzoraka, gdje je ispun izvedena od šuplje betonske opeke, uočena pojava efekta kratkog stupa što je uzrokovalo slom na približno polovini visine stupa.

Buonopane i White (1999.) [3] proveli su pseudo-dinamička ispitivanja na jednom trorasponskom, dvoetažnom uzorku izvedenom u mjerilu 1:2. Armirano-betonski okvir uzorka projektiran je samo za prijenos gravitacijskih opterećenja. Pri izvedbi ispuna, korišteni su šuplji betonski blokovi i mort tipa *N*. Prva etaža uzorka sadržava puni ispun, a druga ispun s otvorima. Tijekom izvedbe uzorka provedena su ispitivanja vlastitih vibracija praznog i ispunjenog okvira. Rezultati ukazuju na značajno povećanje prigušenja i frekvencije okvir s ispunom u odnosu na prazan okvir (povećanje prigušenja do dva puta i povećanje frekvencije za približno četiri puta). Za dinamičko opterećenje uzorka korišten je stvarni zapis potresa Taft koji je skaliran u odnosu na vršno ubrzanje. Ukupno su provedena četiri dinamička ispitivanja, pri čemu je vršna vrijednost ubrzanja iznosila 0,1; 0,35; 0,55 i 0,8 *g*. Oštećenje zidanog ispuna započelo je pri ubrzanju od 0,35 *g* odvajanjem od okvira i pojavom neznatnih pukotina na kontaktu okvira i ispuna. Razlike u krutosti prve i druge etaže (uzrokovane otvorima u ispunu) uzrokovale su nejednoliko oštećenje po pojedinim fazama opterećenja. Tako je znatno oštećenje ispuna druge etaže uočeno pri ubrzanju jednakom 0,55 *g*, a prve pri ubrzanju od 0,8 *g*. Slom ispuna druge etaže može se okarakterizirati kao dijagonalni tlačni slom uzrokovan pojavom dijagonalnih pukotina koje spajaju uglove otvora ispuna i okvira dok se slom ispuna prve etaže može okarakterizirati kao horizontalni posmični slom. Ukupna disipacija energije značajno je povećana uslijed povećanja vršnog ubrzanja, pri čemu je posebno vidljiv skok pri ubrzanju s vršnom vrijednošću od 0,55 *g*. Navedeni skok može se pripisati pojavi značajnog oštećenja ispuna. Osim povećanja disipacije energije, pri vršnom ubrzanju od 0,8 *g*, uočen je i značaj skok u prigušenju sustava (27 %).

Colangelo (2003.) [15] proveo je također pseudo-dinamička ispitivanja na šest uzoraka armirano-betonskih okvira s i bez zidanog ispuna. Uzorci su izvedeni u mjerilu 1:2 i podijeljeni u dvije

skupine. Prvu skupinu od četiri uzorka predstavljaju okviri projektirani prema Eurokodu 8 za srednju razinu duktilnosti ispunjeni glinenim zidnim elementima s vertikalnim šupljinama. Drugu skupinu od, dva uzorka, čine okviri projektirani prema teoriji dopuštenih naprezanja uz horizontalno opterećenje u iznosu od 7% težine konstrukcije ispunjeni glinenim zidnim elementima s horizontalnim šupljinama. U prvoj skupini uzoraka promatrana su dva parametra: (1) odnos visine i raspona okvira, pri čemu su promatrane dvije vrijednosti (0,8 i 0,6) i (2) postotak armiranja uzdužnom armaturom u stupovima okvira dok je kod druge skupine uzoraka promatran samo jedan parametar i to postotak armiranja uzdužnom armaturom u gredi okvira. Odnos visine i raspona uzoraka druge skupine jednak je za oba uzorka i iznosi 0,6. Svi uzorci podvrgnuti su dinamičkim opterećenju u dva ciklusa u obliku stvarnog zapisa potresa (Tolmezzo, Italija, 0,32 *g*) kako bi se sagledao utjecaj oštećenja ispuna na odziv promatranog sustava. Neovisno o skupini, nakon prvog ciklusa opterećenja, uočen je slom ispuna uzoraka kod kojih je odnos visine i raspona jednak 0,6 dok je kod uzoraka s omjerom visine i raspona od 0,8 uočeno manje oštećenje u središnjem dijelu ispuna. Navedeno upućuje na značajnu ulogu promatranog parametra na mehanizam sloma ispuna. Neovisno o skupini uzoraka, uočen je značajan doprinos ispuna nosivosti, krutosti i disipacije energije. Okviri uzoraka, neovisno o proračunskom pristupu, zadržali su stabilnost i nosivost nakon provedenih ispitivanja, a uočene pukotine ukazuju na savojni mehanizam prijenosa sila.

Colangelo (2005.) [16] proširio je provedena ispitivanja s dodatnih sedam jednorasponskih, jednoetažnih uzoraka. Okviri svih uzoraka projektirani su samo za prijenos vertikalnog opterećenja, a oblikovanje armature izvedeno je u skladu s praksom 70-ih godina prošloga stoljeća u Italiji. Uzorci okvira ispunjeni su glinenim zidnim elementima s horizontalnim šupljinama i opterećeni pseudo-dinamičkim i statičkim cikličkim opterećenjem. Odnos visine i raspona okvira jednak je za sve uzorke i iznosi 0,6, a promatrani je parametar postotak armiranja uzdužnom armaturom u gredama okvira. Prilikom pseudo-dinamičkih ispitivanja, uzorci su izloženi dinamičkom opterećenju u obliku zapisa stvarnog potresa (Tolmezzo, Italija, 0,32 *g*). Utjecaj ispuna sagledan je u odnosu na povećanje nosivosti, krutosti i disipacije energije. Autor je naglasio pozitivan utjecaj ispuna u područjima malih deformacija gdje bilježi dvostruko povećanje krutosti te trostruko povećanje nosivosti. U području nakon dosezanja maksimalne nosivosti, uočena je izražena degradacija nosivosti i krutosti uslijed pojave značajnog oštećenja ispuna. U usporedbi s prijašnjim ispitivanjima, a neovisno o odnosu visine i raspona okvira, ponašanje uzoraka približno je jednako u pogledu maksimalne nosivosti i disipirane energije. Autor je ukazao kako pri relativno velikim međukatnim pomacima ispun uzrokuje koncentraciju deformacija na okviru uzoraka.

Hashemi i Mosalam (2006.) [17] proveli su dinamička ispitivanja na jednom uzorku izvedenom u mjerilu 3:4. Uzorak je predstavljao srednji raspon zamišljene peteroetažne zgrade, a sastojao se od triju paralelnih armirano-betonskih okvira povezanih gredama (Slika 2.4 a)). Srednji okvir uzorka ispunjen je glinenom opekom povezanom mortom tipa *N*. Uzorak je podvrgnut nizu od osam dinamičkih ispitivanja u obliku modificiranih zapisa stvarnih potresa, pri čemu su korišteni zapisi potresa Northridge i Duzce. Modifikacija zapisa potresa izvršena je promjenom frekventnog sastava i vršne vrijednosti ubrzanja. Opterećenje uzorka izvršeno je u ravnini, tj. u smjeru pružanja zidanog ispuna postupnim povećanjem intenziteta ubrzanja. Slom ispuna nastao je spajanjem dijagonalnih pukotina koje su se pružale iz uglova uzorka ukazujuću na razvoj ekscentričnih tlačnih dijagonala. Prve značajne pukotine nastale su u području kontakta okvira i ispuna pri ubrzanju jednakom 0,9 *g*. Dodatno povećanje ubrzanja na približnih 1,2 *g* dovelo je do pojave dijagonalnih pukotina u ispunu, pri čemu je zabilježeni nagib pukotina, u iznosu od 45º i 60º, ovisio o položaju u ispunu. Nagib pukotina od 45º uočen je u donjim uglovima, a nagib od 60º u gornjim uglovima ispuna što upućuje na utjecaj krutosti čvora. Iako je ispun zadržao stabilnost, i pri ubrzanju od 1,5 *g* pri ponovljenom ispitivanju s ubrzanjem od 1,2 *g*, dolazi do sloma ispuna van ravnine uzorka (Slika 2.4 b)). Naknadnim pregledom nije uočeno značajno oštećenje okvira niti negativni lokalni utjecaji ispuna. Autori su naglasili značajan utjecaj zidanog ispuna na povećanje nosivosti i duktilnost okvirnih konstrukcija te globalne krutosti i prigušenja.

a) b)

Slika 2.4 *a) Prikaz* i *b) slom ispitnog uzorka* [17]

Centeno je (2009.) [18] proveo ispitivanja na trima jednorasponskim, jednoetažnim uzorcima izvedenim u mjerilu 1:2. Armirano-betonski okviri uzoraka projektirani su samo za prijenos gravitacijskog opterećenja prema preporukama danim u *ACI 318-1963*, a ispuna je izvedena od šupljih betonskih zidnih elemenata. Dva su uzorka izvedena s punim kontaktom između okvira i ispuna gdje je veza ostvarena mortom dok je treći uzorak izveden bez kontakta. Širina slobodnog prostora, između okvira i ispuna, iznosila je 19 *mm* uslijed čega se uzorak može promatrati kao prazan okvir. Ispitivanje uzoraka izvršeno je na dva načina i to: (1) jedan je uzorak s punim kontaktom okvira i ispuna podvrgnut

monotonom opterećenju do sloma dok su (2) dva uzorka, jedan s i jedan bez kontakta okvira i ispuna, podvrgnut dinamičkim ispitivanjima simulacijom na potresnoj platformi. Ponašanje uzorka prilikom monotonog opterećenja izrazito je nelinearnog karaktera, pri čemu se cjelokupno ponašanje sustava može opisati pomoću triju područja ponašanja. U prvom području, području linearnog odgovora uzorka, prijenosa sila u ispunu osigurana je pojavom dijagonalnog tlačnog mehanizma sloma, na što upućuje pojava dijagonalnih pukotina koje se pružaju u smjeru kontakta zidni element – mort. U drugom području, nakon pojave tečenja sustava, dolazi do pojave tzv. *horizontalnog posmičnog mehanizma sloma ispuna* kod kojeg se prijenos sila ostvaruje trenjem na kontaktu elemenata ispuna u smjeru horizontalnih pukotina. Treće područje ponašanja određeno je pojavom slom sustava, a uzrokovano je proklizavanjem uzdužne armature u stupovima okvira uslijed nedovoljne duljine sidrenja. Prilikom dinamičkih ispitivanja, uzorci su podvrgnuti nizu dinamičkih opterećenje u obliku sintetičkih i stvarnih zapisa potresa. Odabranim zapisima pokriven je široki spektar frekvencija, a maksimalno je ubrzanje u intervalu između 0,25 i 2 *g*. Na praznom okviru izvedeno je osam ispitivanja (ograničeno slobodnim prostorom između okvira i ispuna), a na okviru s ispunom trideset i tri ispitivanja. Uočeno je znatno fleksibilnije ponašanje praznog okvira u odnosu na okvir s ispunom. Ponašanje okvira s ispunom prilikom ispitivanja, može se također opisati pomoću triju područja gdje su prva dva identična kao i kod monotonog opterećenja dok je slom sustava uzrokovan vanravninskim slomom ispuna. Iako okviri nisu projektirani za prijenos potresnog opterećenja, sustav okvir s ispunom zadržao je stabilnost pri vršnoj vrijednosti ubrzanja od1,5 *g* bez vidljivih lokalnih štetnih utjecaja ispuna.

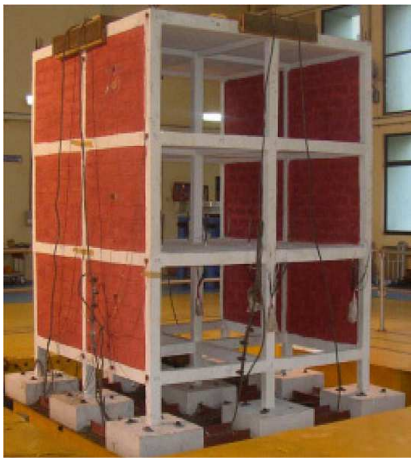
Stavridis (2009.) [19] nadopunjuje eksperimentalna istraživanja Mehrabija s dodatnih pet jednorasponskih, jednoetažnih uzoraka neduktilnih armirano-betonskih okvira sa zidanim ispunom. Uzorci su podijeljeni u dvije skupine u ovisnosti o mjerilu. Prvu skupinu čini jedan uzorak s punim ispunom izveden u mjerilu 1:5, a drugu jedan s punim i četiri s ispunom s otvorima izvedenih u mjerilu 1:1,5. Prilikom izvedbe uzoraka, obje skupine primijenjeni su isti materijalii konstrukcijska načela, pri čemu je ispun izveden od pune glinene opeke i morta tipa *N*. Usporedbom pukotinskog stanja ispuna, uočeno je značajno odstupanje u obliku sloma uzoraka u ovisnosti o skupini. Uočene razlike posljedica su nepoštivanja načela zakona sličnosti prilikom izvedbe uzoraka. Naime, ispun uzoraka (zidni elementi i reške morta), neovisno o mjerilu, nije skalirana što dovodi do značajnog odstupanja u broju horizontalnih reški ispuna koje u pravilu predstavljaju ravnine slabosti. Slom ispuna uzoraka izvedenih u mjerilu 1:1,5 približno je jednak, neovisno o tipu ispuna (s i bez otvora), a može se definirati kao kombinacija horizontalnog posmičnog i dijagonalno tlačnog sloma dok je slom ispuna kod uzorka izvedenog u mjerilu 1:5 definiran kao horizontalno posmični slom. Slom okvira uzoraka izvedenih u mjerilu 1:1,5 nastao je uslijed posmičnog sloma stupova dok kod uzorka izvedenog u mjerilu 1:5 nije

došlo do sloma stupova iako je zabilježen relativno veliki međukatni pomak u iznosu od 3%. Uz eksperimentalno istraživanje, autor je proveo i detaljnu analizu mogućnosti primjene metode konačnih elemenata, pri čemu predlaže posebnu strategiju modeliranja pomoću koje je omogućeno simuliranje diskretnih posmičnih pukotina u elementima okvira i ispuna. Osim toga, autor predlaže i pojednostavljenu metodu procjene ponašanja sustava okvir s ispunom prema graničnim stanjima na temelju četverolinearne aproksimacije odgovora. Predložena strategija modeliranja metodom konačnih elemenata i pojednostavljena metoda procjene ponašanja, naknadno su ocjenjene na temelju dinamičkih ispitivanja ravninskog dvorasponskog, troetažnog uzorka (Slika 2.5). Uzorak predstavlja neduktilnu okvirnu konstrukciju projektiranu za prijenos gravitacijskih i horizontalnih opterećenja od vjetra ispunjenu punim glinenim zidnim elementima povezanih mortom tipa *N*. Dinamičko opterećenje simulirano je pomoću zapisa stvarnih potresa (Loma Prieta, 1989. i El Centro, 1940.) na potresnoj platformi, pri čemu su provedena ukupno 44 ispitivanja. Unatoč nepovoljnom oblikovanju armature okvira, uzorak je zadržao nosivost i stabilnost tijekom svih ispitivanja s obzirom na značajna oštećenja. Rezultati predloženih modela u zadovoljavajućoj mjeri podudaraju se s rezultatima ispitivanja prilikom čega je primjenom metode konačnih elemenata omogućeno točno simuliranje oblika sloma ispuna i okvira uzorka.

Slika 2.5 *Prikaz ravniskog dvorasponskog, troetažnog ispitnog uzorka* [19]

Sharma i dr. (2012.) [20] proveli su dinamička ispitivanja prostorne okvirne konstrukcije sa zidanim ispunom na potresnoj platformi. Konstrukcija se sastojala od dvaju raspona u međusobno okomitim smjerovima i tri etaže, a izvedena je u mjerilu 1:3 (Slika 2.6). Okvir je projektiran na način da predstavlja postojeće neduktilne konstrukcije. Zidani je ispun, uslijed ograničenja potresne platforme, izveden samo na obodu konstrukcije u jednom smjeru od punih glinenih zidnih elemenata povezanih mortom opće namjene. Program ispitivanja podijeljen je u tri faze. U prvoj je fazi provedeno ispitivanje

konstrukcije sa zidanim ispunom gdje je dinamičko opterećenje simulirano pomoću sinusne funkcije (eng. *sine sweep*) s postepenim povećanjem vršnog ubrzanja u koracima od 0,075, 0,1 i 0,125 *g* zasebno za sva tri globalna smjera gibanja. U drugoj je fazi ispun odstranjen i zamijenjen s ekvivalentnom masom, a ispitivanja su dalje provedena na praznoj okvirnoj konstrukciji s i bez sustava pasivnog prigušenja. Dinamičko je opterećenje također simulirano pomoću sinusne funkcije s postepeni povećanjem vršne vrijednosti ubrzanja u koracima od 0,075, 0,1 i 0,15 *g*. U trećoj je fazi provedeno dinamičko ispitivanje prazne okvirne konstrukcije pri istovremenom djelovanju opterećenja u oba horizontalna smjera. Potrebno je napomenuti da je primarni cilj ispitivanja ocjena utjecaja zidanog ispuna i sustava pasivnog prigušenja na vrijednosti vlastitih oblika osciliranja. Neovisno o vrijednosti vršnog ubrzanja, sva su ispitivanja provedena u frekvencijskom rasponu od 1 do 50 *Hz*. Prilikom ispitivanja konstrukcije, u smjeru paralelnom s ispunom, otkriven je samo prvi vlastiti oblik osciliranja, pri čemu je uočeno smanjenje vrijednosti frekvencije u ovisnosti o povećanju vršne vrijednosti ubrzanja, odnosno u ovisnosti o pojavi oštećenja ispuna. Prve pukotine u ispunu prve etaže uočene su pri vršnoj vrijednosti ubrzanja od 0,1 *g*, a druge etaže pri vrijednosti od 0,125 *g*. Pukotine su lokalizirane u uglovima ispuna u obliku gubitka veze okvir-ispun. Ispitivanja u smjeru okomitom na ispun otkrivaju daljnje povećanje oštećenja veze okvir-ispun, upućujući na veliku vjerojatnost pojave vanravninskog sloma ispuna pri istovremenom djelovanju opterećenja u oba horizontalna smjera što je i slučaj u stvarnim uvjetima opterećenja pri djelovanju potresa. Ispitivanjem konstrukcije bez ispuna, uočeno je znatno smanjenje vrijednosti frekvencije prvog vlastitog oblika osciliranja (reda veličine 2,6 puta) što upućuje na znatan doprinos ispuna globalnoj krutosti konstrukcije.

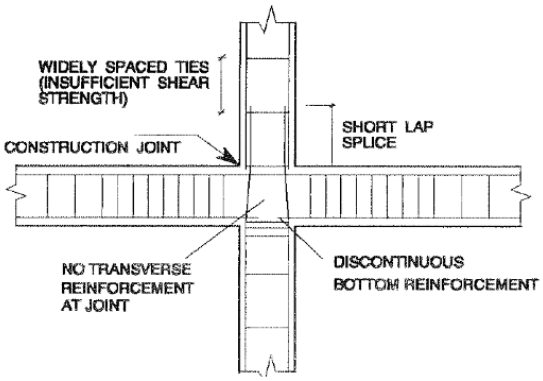


Slika 2.6 *Prikaz ispitane prostorne okvirne konstrukcije sa zidanim ispunom* [20]

2.2. Svojstva neduktilnih okvira

Projektiranje i izvođenje armirano-betonskih konstrukcijaj značajno je napredovalo u prošlom stoljeću u pogledu razumijevanja ponašanja, proračuna i oblikovanja konstrukcija i konstrukcijskih detalja. Iako su početkom prošloga stoljeća metode proračuna i izvođenja armirano-betonskih konstrukcija tretirane kao poslovna tajna, nakon katastrofalnog potresa u San Franciscu 1904. godine dolazi do razvoja prve, normama prihvaćene metoda proračuna, tzv. *metode proračuna prema dopuštenim naprezanjima* (Taylor, 1907.). Uslijed tehnološkog razvoja i ekspanzije primjene armiranog betona kao građevinskog materijala te povećanog interesa istraživačkih krugova diljem svijeta, dolazi do razvoja niza metoda proračuna armirano-betonskih konstrukcija. Nažalost, seizmički propisi nisu u dovoljnoj mjeri pratili istraživačke spoznaje, posebice u područjima niske i srednje seizmičnosti gdje su se načela projektiranja prema dopuštenim naprezanjima zadržala sve do sredine 90-ih godina prošlog stoljeća, a konstrukcije su projektirane prvenstveno za prijenos gravitacijskih opterećenja [21], [11], [20].

Moderni seizmički propisi zahtijevaju da konstrukcija posjeduje određenu razinu duktilnosti, primjenom načela projektiranja sukladno kapacitetu nosivosti kako bi se osigurao siguran prijenos vertikalnih i horizontalnih sila tijekom djelovanja potresa bez ugrožavanja globalne stabilnosti konstrukcije. Konstrukcijama, koje nisu projektirane sukladno kapacitetu nosivosti, svojstveni su određeni nedostatci koji su prvenstveno vezani uz oblikovanje armature nosivih elemenata (Slika 2.7). Prikazanim oblikovanjem armature, sa stajališta modernih propisa, nije moguće osigurati zahtjevanu razinu duktilnosti konstrukcije, čime se značajno doprinosi povećanju oštećenja prilikom djelovanja potresa što u konačnici za posljedicu može imati i rušenje konstrukcije. Osim potencijalne opasnosti od rušenja, postavlja se i pitanje isplativosti sanacije konstrukcije uslijed značajnog prekoračenja dozvoljenih veličina prema graničnom stanju uporabljivosti.



Slika 2.7 *Konstrukcijski detalji uobičajeni u razdoblju prije donošenja modernih seizmičkih propisa* [18]

Uobičajni nedostatci konstrukcija projektiranih prije donošenja modernih seizmičkih propisa, s naglaskom na oblikovanje armature, mogu se definirati kao:

- Nedostatna duljina preklopa uzdužne armature u stupovima te nepovoljan položaj izvedbe preklopa (područja najvećih momenata savijanja)
- Nedostatna količina/razmak poprečne armature u elementima okvira (većinom su korištene šipke promjera 6-8 *mm*, postavljene na razmaku od 10-20 *cm*)
- Nedostatna duljina sidrenja i nepovoljno oblikovanje armature priliko sidrenja
- Nedostatna količina poprečne armature u području čvorova okvira
- Diskontinuitet uzdužne armature greda u području čvorova okvira

Osim nepovoljnog oblikovanja armature, svojstvena je promatranom razdoblju i primjena betona niske tlačne čvrstoće te glatkog armaturnog čelika. Okvirne su konstrukcije, kod kojih je za armaturu korišten glatki čelik, posebno osjetljive na pojavu proklizavanja armature u elementima prilikom djelovanja potresnog opterećenja. Proklizavanje armature nastaje uslijed nedostatne veze između betona i armature, čime je onemogućen razvoj punog kapaciteta nosivosti elemenata što za posljedicu ima pojavu velikih lokalnih deformacija u konstrukciji. Nedostatna debljina zaštitnog sloja betona u kombinaciji sa široko postavljenom poprečnom armaturom može uzrokovati pojavu izvijanja uzdužne armature u tlačnom području prije dosezanja granice tečenja armature u vlačnom području, čime se narušava stabilnost i nosivost elemenata i same konstrukcije.

Prije donošenja modernih seizmičkih propisa okvirne su konstrukcije prvenstveno projektirane za prijenos vertikalnih (gravitacijskih) opterećenja dok je horizontalno opterećenje, ukoliko ga se uzme u obzir, uobičajeno određivano kao postotak ukupne težine objekta (7-10%). Proračunskom idealizacijom okvira, kod koje su grede prilikom projektiranja promatrane kao kontinuirani nosači oslonjeni na stupove, ostvaren je sustav jakih greda i slabih stupova koji je krajnje nepoželjan u seizmički aktivnim područjima. Naime, mehanizam sloma okvira, projektiranih prvenstveno za prijenos vertikalnih opterećenja, značajno se razlikuje od mehanizma sloma seizmički projektiranih okvira. Mehanizam sloma okvira projektiranih za prijenos gravitacijskog opterećenja nastaje razvojem plastičnih zglobova u gredama okvira što je prihvatljivo s obzirom na lokalizirani slom preopterećenih greda, uslijed čega nije narušena globalna stabilnost konstrukcije. Međutim, prilikom djelovanja horizontalnih opterećenja, mijenja se mehanizam sloma, tj. položaj plastičnih zglobova prilikom čega dolazi do njihovog formiranjana stupovima okvira. Pojavom plastičnih zglobova na stupovima okvira gubi se sposobnost prijenosa horizontalnog opterećenja što za posljedicu može imati pojavu meke etaže i rušenje konstrukcije. S obzirom na male vrijednosti momenata savijanja u stupovima okvira, prilikom određivanja količine uzdužne armature, uobičajeno se nije provodio proračun, a vrijednosti su

koeficijenta armiranja odabirane u intervalu od 0,5-1% bruto ploštine poprečnog presjeka stupa. U slučaju okvira sa zidanim ispunom, širine elemenata okvira, većinom su određene širinom ispuna kojeg omeđuju dok su visine određivane ovisno o zahtijevanoj aksijalnoj nosivost.

2.3. Ponašanje sustava okvir s ispunom

Okviri sa zidanim ispunom najzastupljeniji su oblik nosivog sustava pri oblikovanju građevina. Međutim, njihovo je ponašanje pri djelovanju horizontalnog opterećenja najmanje istraživano i shvaćeno u odnosu na druge nosive sustave. Dugo su vremena te konstrukcije izvođene i projektirane bez prikladnog znanja o njihovom ponašanju što je za posljedicu imalo katastrofalne socijalne i ekonomske gubitke. Općenito različite vrste opterećenja mogu djelovati na konstrukciju, pri čemu se one uobičajeno dijele na vanravninska i ravninska opterećenja.Vertikalno opterećenje iznimno rijetko može dovesti do pojave sloma sustava okvir s ispunom. U provedenom istraživanju nisu sagledani utjecaji vanravniskih sila iako je njihovo uzimanje u obzir neizbježno prilikom projektiranja kako bi se osigurala globalna stabilnost konstrukcije te spriječio vanravninski slom ispuna. Pažnja je usmjerena k ponašanju okvira s ispunom pri djelovanju horizontalnih sila u ravnini sustava.

Okviri s ispunom kompozitne su konstrukcije čije je ponašanje pod djelovanjem horizontalnog opterećenja izrazito nelinearno, pri čemu naglašenu ulogu ima interakcija okvira i ispuna. Navedeno je posljedica krtog i duktilno-nelinearnog ponašanje ispuna i okvira, različitih mehaničkih i deformacijskih svojstava konstituenata i stanja, tj. uvjeta veze okvir-ispun. Ispun svojom prisutnošću sprječava deformacije okvira, čime se doprinosi nosivosti i krutosti sustava, pri čemu je ukupna nosivost uobičajeno veća od sume nosivosti pojedinih komponenata.

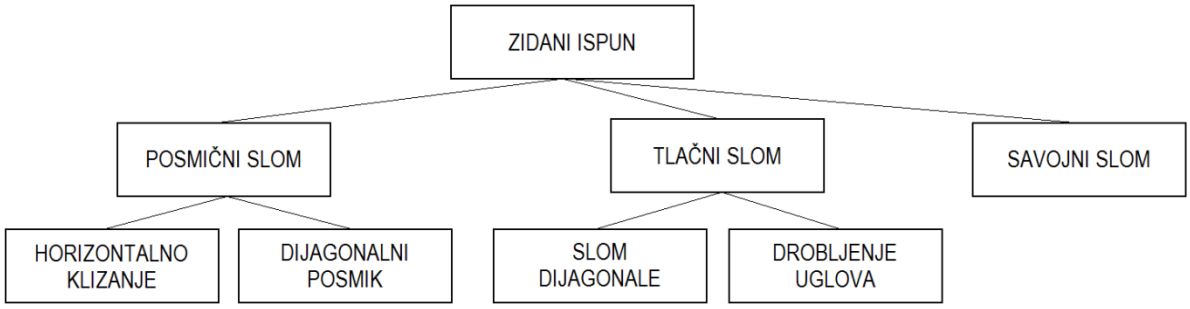
Karakteristike odgovora, tj. odnosa horizontalna sila-pomak, ovise o obliku sloma zidanog ispuna posebno u području nakon dosezanja maksimalne nosivosti. Postojeća eksperimentalna istraživanja upućuju na manju degradaciju krutosti nakon dosezanja maksimalne nosivosti sustava u slučaju kada je ispun znatno slabiji od okvira koji ga uokviruje, pod pretpostavkom seizmički projektiranih okvira [22] ili, što je i uočeno, u slučaju kada je okvir ispunjen jakim ispunom. Međutim, potrebno je napomenuti da se termin jaki i slabi ispun, u pogledu tlačne čvrstoće, prilikom opisivanja ponašanja sustava čini neprikladnim. Naime, kod ispuna izvedenog od šupljih i punih glinenih zidnih elemenata, povezanih mortom, opće namjene provedenim ispitivanjima dobivene su približno jednake vrijednosti tlačne čvrstoće u smjeru okomitom na horizontalne reške morta. Međutim, na uzorcima ispuna izvedenog od šupljih glinenih zidnih elemenata, dobivene su znatno veće vrijednosti modula elastičnosti dok je sam slom uzoraka nastao naglo i izrazito krto. Stoga, čini se prikladnijim ispun

definirati ili u odnosu na modul elastičnosti, tj. krutost, ili u odnosu na robusnost element. Potreba za navedenom podijelom proizlazi iz vlastitih rezultata ispitivanja ponašanja gdje je kod uzoraka, kod kojih je ispun izveden od šupljih glinenih zidnih elemenata, uočena značajna degradacija nosivosti uzoraka nakon maksimalne dosegnute vrijednosti gdje u pravilu uslijed daljnjeg nanošenja opterećenja doprinos ispuna u potpunosti iščezava. Navedeno nije uočeno kod uzoraka kod kojih je ispun izveden od punih glinenih zidnih elemenata. Međutim, tamo su uočeni negativni lokalni utjecaji ispuna kod uzorka s nedostatnom poprečnom armaturom u stupovima u obliku preuranjene pojave posmičnog sloma. Osim potrebe jasnijeg definiranja karakteristika ispuna, nameće se i pitanje definiranja maksimalne nosivosti sustava. S obzirom da je pri početnim koracima horizontalnog opterećenja ponašanje sustava pod dominantnim utjecajem ispune, čini se prikladnim definirati maksimalnu nosivost kao nosivost pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispune. Naime, maksimalna nosivost uzoraka, kod kojih je ispuna izvedena od šupljih glinenih zidnih elemenata, u većini je slučajeva istovjetna nosivosti pri pojavi dominantnog mehanizma sloma. Međutim, u literaturi se ne može pronaći niti jedan matematički ili iskustveni model kojim bi se, u ovisnosti o parametrima elemenata sustava, mogla odrediti pojava dominantnog mehanizma sloma ispuna. Na temelju vlastitih ispitivanja, uočeno je da pojava pojedinih dominantnih mehanizama sloma ispuna ovisi o geometrijskim odnosima elemenata okvira i odnosu tlačne i posmične čvrstoće ispuna. Definiranjem dominantnog mehanizma sloma ispuna, omogućila bi se točnija analitička procjena horizontalne nosivosti s obzirom da se u literaturi mogu pronaći izrazi kojim se opisuju pojedini mehanizmi sloma iako je ispunu svojstvena pojava višestrukih mehanizama sloma. Različiti mehanizmi sloma komponenata sustava okvir s ispunom opisani su, u poopćenom smislu, kao oblici sloma. Međutim, u većini slučajeva slom jedne od komponenata ne uzrokuje pojavu sloma cijelog sustava. Navedeno je prednost s obzirom da preostali element osigurava rezidualnu horizontalnu nosivost.

Zaključno, mogu se razlikovati četiri područja ponašanja sustava okvir s ispunom. U prvom području konstrukcija se ponaša monolitno i gotovo linearno sve do pojave prvih značajnih pukotina u ispunu nakon čega dolazi do smanjenja krutosti. Pojava prvih značajnih pukotina u ispunu također može biti uzrokovana različitim mehanizmima sloma. S obzirom na hijerarhiju, čvrstoća ispuna čini se prikladnim definirati pojavu prvih značajnih pukotina u ispunu uslijed prekoračenja vlačne čvrstoće. Navedeno se područje može definirati graničnim stanjem pojave prvih značajnih pukotina u ispunu. Nakon pojave prvih značajnih pukotina, a prije pojave dominantnog mehanizma sloma ispuna, definirano je drugo područje ponašanja sustava okvir s ispunom. U navedenom je području ponašanje okarakterizirano interakcijom između okvira i ispuna iako su elementi većinom neoštećeni. Ostvareno stanje naprezanja u ispunu uzrokuje pojavu različitih pukotina uzrokovanih promjenom mehanizma

sloma uz pojavu povećanog oštećenja ispuna sve do pojave dominantnog mehanizma sloma. Navedeno se područje može definirati graničnim stanjem pojave dominantnog mehanizma sloma ispuna. U trećem je području ponašanje sustava pod dominantnim utjecajem interakcije okvira i ispuna, uslijed čega dolazi do pojave znatnog oštećenja ispuna. Uočeno je da ponašanje sustava u navedenom području, u pogledu degradacije nosivosti i krutosti, ovisi o vrsti ispuna, tj. o vrsti zidnog elementa. Četvrto područje ponašanja definirano je pojavom sloma jednog od elemenata sustava okvir s ispunom te se može definirati graničnim stanjem pred rušenje. Granično stanje pred rušenje sustava uobičajeno uključuje pojavu jednog ili više mehanizama sloma koji se mogu pojaviti u ispunu i okviru. S obzirom na znatan broj mehanizama sloma konstituenata sustava, u nastavku teksta je taj sistematički prikaz i opis istih u ovisnosti o elementu.

Pojava određenog mehanizma sloma ispuna u izravnoj je vezi s mehaničkim karakteristikama i naponskim stanjem u ispunu. Slika 2.8 prikazuje različite mehanizme sloma zidanog ispuna prema dostupnoj literaturi.



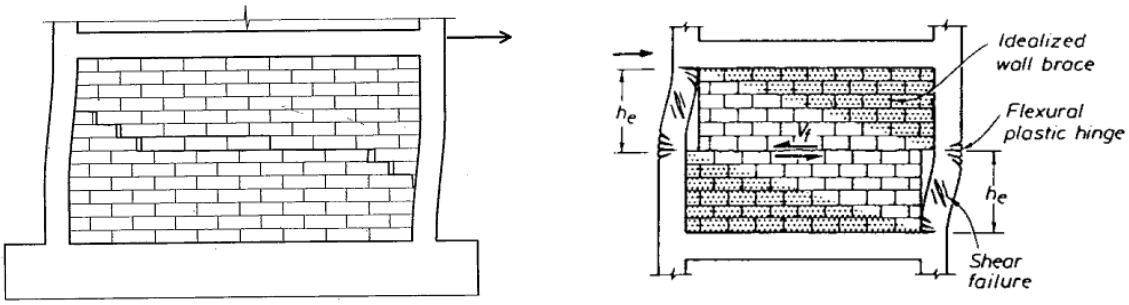
Slika 2.8 *Oblici sloma zidanog ispuna*

Posmični slom ispuna najzastupljeniji je oblik sloma koji se pronalazi u literaturi. Taj je tip sloma uobičajeno kontroliran posmičnom čvrstoćom morta, odnosno čvrstoćom veze zidni element-mort, vlačnom čvrstoćom zidnih elemenata i relativnim odnosom normalnih i posmičnih naprezanja. Ovisno o navedenim parametrima, odnos posmičnog i normalnog naprezanja može uzrokovati pojavu pukotina ili u zidnim elementima ili u reškama morta. Razlikuju se dva oblika posmičnog sloma kod kojih je nosivost ispuna pod izravnim utjecajem trenja na osnovnim plohama sloma, pri čemu je potrebno istaknuti naglašenu degradaciju nosivosti pri cikličkom opterećenju [24]:

- *Horizontalno klizanje* (eng. *sliding shear*) nastaje uslijed pojave dominantnih ploha sloma u smjeru horizontalnih reški morta, prilikom čega dolazi do podjele ispuna na dva ili više dijela (Slika 2.9b)). Nakon pojave horizontalnog klizanja u ispunu postoji opasnost od pojave tzv. *knee-braced* [7] mehanizma prijenosa sila, čime se utječe na slobodnu visinu stupa

(mogućnost pojave plastičnog zgloba u srednjoj polovini visine). Navedena opasnost posebno je izražena u slučaju kada je ispun izvedena od robusnih elemenata (puni zidni elementi), a uzrokuje promjenu vrijednosti unutarnjih sila u elementima okvira. Posebno je izražen nepovoljan utjecaj na povećanje poprečne sile i momenta savijanja. Provedenim istraživanjima ustanovljeno je da u slučaju šupljih zidnih elemenata ne postoji opasnost od pojave tzv. *knee-braced* mehanizma, uslijed pojave drobljenja ispuna na kontaktu s okvirom. Horizontalno klizanje uobičajeno se povezuje s jakim okvirima i ispunom izvedenom od morta niske čvrstoće, a uzrokovano je gubitkom kohezivne veze zidni element – mort. Međutim, tijekom provedenih ispitivanja uočena je pojava promatranog mehanizma sloma i kod uzoraka sa slabim okvirima što upućuje na dominantnu ulogu čvrstoće morta. Promjena položaja tlačnog polja naprezanja ukazuje da se horizontalna sila više ne prenosi putem jedne dijagonale nego formiranjem više njih što posljedično mijenja mehanizam prijenosa sila [13].

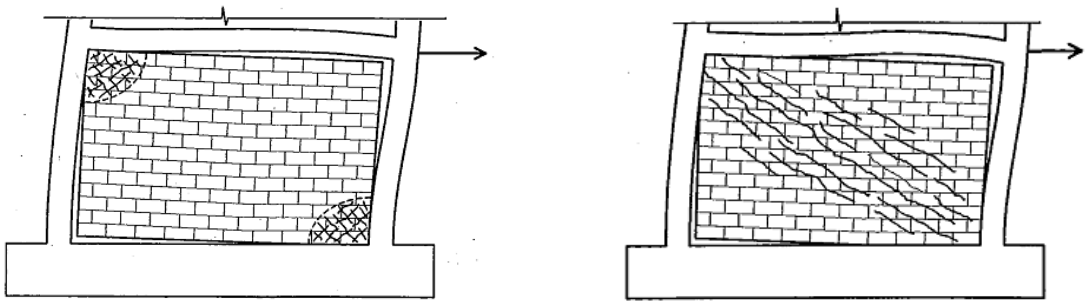
- *Dijagonalni posmik* (eng. *shear-friction*) nastaje u slučaju kada je čvrstoća morta mala u odnosu na čvrstoću zidnih elemenata ili kada je ispun dominantno pod utjecajem posmičnog naprezanja (niska do srednja vrijednost odnosa visine i raspona). Navedeni mehanizam sloma uobičajeno karakterizira pojave dijagonalnih pukotina, iz smjera opterećenih uglova, spojenih horizontalnim pukotinama koje se većinom formiraju na polovini visine ispune. Pukotine uobičajeno nastaju uslijed prekoračenja čvrstoće veze zidni element – mort (Slika 2.9 a)). Taj tip sloma čest je kod eksperimentalnih istraživanja, kao i kod okvira s ispunom, izloženim stvarnom potresnom opterećenju i može se smatrati najzastupljenijim oblikom sloma ispuna. Ispitivanja [12] su pokazala značajnu ulogu tipa zidnog elemenata na broj formiranih pukotina gdje je u slučaju šupljih zidnih elemenata uočena pojava većeg broja horizontalnih pukotina, suprotno punim zidnim elementima gdje je dominantna jedna pukotina na približno pola visine ispuna. Osobna ispitivanja upućuju na suprotno. Međutim, navedeni mehanizam sloma uobičajeno uzrokuje pojavu drugih mehanizama, ovisno o tipu zidnih elemenata ispuna, što je mogući razlog suprotnih opažanja.



Slika 2.9 *Oblici posmičnog sloma ispuna a) dijagonalni posmik* [13], *b) horizontalno klizanje* [38]

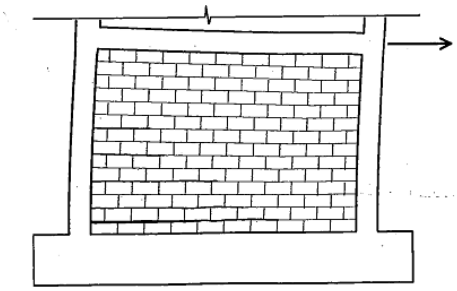
Slom zidanog ispuna uslijed tlačnog naprezanja može se definirati pomoću dvaju oblika, ovisno o stanju naprezanja u uglovima ispuna i u smjeru dijagonale:

- *Drobljenje uglova* (eng. *corner crushing*) označava pojavu drobljenja ispuna u najmanje jednom opterećenom uglu uslijed prekoračenja tlačne čvrstoće istog. Analitička istraživanja [13] upućuju na pojavu dvoosnog tlačnog stanja naprezanja u uglovima uzrokovanog odvajanjem ispuna od nasuprotnih uglova (Slika 2.10 a)). Ta vrsta sloma povezuje se s slabim ispunom uokvirenim jakim okvirom sa slabim čvorovima [25] i fleksibilnim okvirima koji uzrokuju smanjenje kontaktne duljine između okvira i ispuna te povećanje tlačnog naprezanja [26], [27]. Provedena ispitivanja također upućuju na utjecaj robusnosti elementa na pojavu navedenog mehanizma sloma. Navedeni slom karakterizira pojava naglog smanjenja horizontalne nosivosti.
- *Slom dijagonale* (eng. *diagonal cracking*) povezan je s pojavom pukotina koje povezuju nasuprotno opterećene uglove ispuna pri prekoračenju vlačne čvrstoće istog [13] (Slika 2.10 b)). Međutim, provedena ispitivanja upućuju na formiranje tlačnih dijagonala van osnovne dijagonale uzoraka, pod kutom od približnih 60º u odnosu na horizontalu iz smjera opterećenih uglova. Navedeno je posebno izraženo kod ispuna izvedenog od punih glinenih zidnih elemenata gdje pukotine većim dijelom prolaze kroz zidne elemente. Taj je oblik sloma povezan sa slabim ili jakim okvirima ispunjenim robusnim ispunom, a karakterizira ga postepena degradacija nosivosti i krutosti.



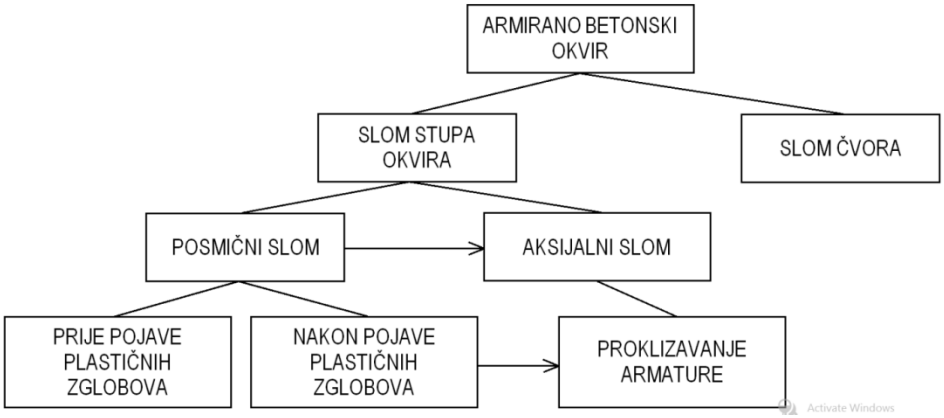
Slika 2.10 *Tlačni slom zidanog ispuna a) drobljenje uglova*, b) *slom dijagonale* [13]

Savojni slom (eng. *flexular cracking*) zidanog ispuna nastaje u slučaju dominantnog utjecaja momenta savijanja, pri čemu dolazi do pojave pukotina s vlačne strane ispuna uzrokovanih nedostatnom vlačnom čvrstoćom veze zidni element – mort [28] (Slika 2.11). Taj tip sloma posebno je naglašen kod fleksibilnih okvira s velikim odnosom visine i raspona



Slika 2.11 *Savojni slom zidanog ispuna* [13]

Oblik sloma okvira kojim se uokviruje zidani ispun ovisi o karakteristikama elemenata okvira i efektima interakcije okvir-ispun. Istraživanja i izvještaji s terena upućuju da je osnovni razlog rušenja okvirnih konstrukcija s ispunom otkazivanje nosivosti stupa ili čvora okvira (Slika 2.12). Mehanizam nastanka sloma složene je prirode i uključuje interakciju na razini koja nije u potpunosti shvaćena.



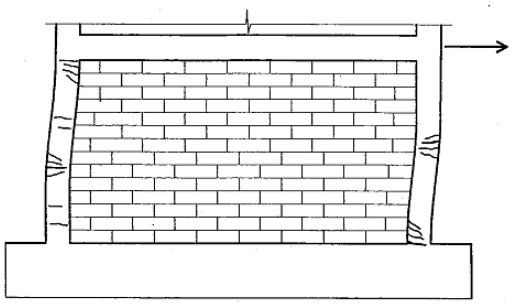
Slika 2.12 *Oblici sloma armirano betonskog okvira kojim se uokviruje zidani ispun*

Oštećenje stupa uobičajeno nastaje formiranjem plastičnih zglobova na njegovim krajevima uslijed pojave savojnih pukotina. Iako formiranjem plastičnih zglobova nastaje savojni slom, koji je poželjan oblik iz razloga što omogućuje duktilno ponašanje, otvaranjem pukotina dolazi do postupnog smanjenje posmične nosivosti elementa uslijed gubitka veza u betonu i veze beton – armatura. Izazvano smanjenje krutosti može dovesti do pojave prijevremenog posmičnog sloma prije razvoja punog savojnog kapaciteta nosivosti. Posmični slom u osnovi nastaje prekoračenjem vlačne čvrstoće betona, pojavom naglog i krtog loma što ga čini izrazito nepoželjnim. Količina i razmak poprečne armature u stupu izravno utječu na posmičnu čvrstoću, ali i na ponašanje nakon pojave posmičnih pukotina sprječavajući klizanje po plohi sloma. Uzdužna sila u stupovima također doprinosi posmičnoj čvrstoći.

Iako se uobičajeno smatra da stup okvira nakon posmičnog sloma gubi sposobnost prijenosa vertikalnog opterećenja, istraživanja su pokazala da uslijed preraspodjele opterećenja i djelovanja sile

trenja na plohi sloma stup posjeduje određenu razinu preostale nosivosti [29]. Vrijednost preostale horizontalne nosivosti je izrazito osjetljiva na povećanje oštećenja, posebno pri cikličkom opterećenju. Osim toga, ostaje upitan i utjecaj preraspodjele opterećenja na globalnu nosivost i stabilnost konstrukcije. Istraživanja rubnih područja ponašanja, koja uključuju potpuno rušenje ispitnih uzoraka, iznimno su rijetka.

Kod pojave sloma ispuna u obliku horizontalnog klizanja, pogotovo u slučaju jakog ispuna, dolazi do promjene raspodjele i veličine unutarnjih sila u okviru, uzrokovane pojavom efekta kratkog stupa (smanjenje slobodne vise stupa). Navedeno može uzrokovati naglu pojavu posmičnog sloma (*knee-braced* model) [7], [28] (Slika 2.13) što za posljedicu može imati formiranje meke etaže i rušenje konstrukcije. Osim kod horizontalnog klizanja, otvori u ispuni koji općenito mijenjaju mehanizam prijenosa sila u sustavu, također mogu dovesti do pojave efekta kratkog stopa, posebno u slučaju jake ispune [19].



Slika 2.13 *Savojni slom okvira uzrokovan pojavom plastičnih zglobova u srednjoj polovini visine stupa* [13]

Sposobnost čvora da prenosi vertikalna opterećenja tijekom potresa od presudne je važnosti za globalnu stabilnost konstrukcije. Nosivost čvora definirana je tlačnom čvrstoćom betona i količinom poprečne armature. Svojstveni nedostatci izvedbe neduktilnih okvira, kao što su izostanak poprečne armature i sidrenje uzdužne armature stupova i greda u području čvora, mogu značajno utjecati na lokalno i globalno ponašanje konstrukcije. Nedostatak poprečne armature u području čvora može dovesti do pojave prijevremenog posmičnog sloma. Nastale pukotine u betonu, koje se pružaju u smjeru glavnog tlačnog naprezanja, uzrokuju velike posmične deformacije čvora čime se značajno ugrožava sposobnost prijenosa gravitacijskog opterećenja i globalna stabilnost [30]. Uslijed interakcije okvira s ispunom, u čvor se unose dodatne sile koje prema istraživanju [31] doprinose nosivosti čvora. S druge pak strane, istraživanja [13] na provedenim ispitivanjima [32], upućuju na negativne utjecaje ispuna na ponašanje čvora u vidu sile cijepanja koja se javlja na unutarnjem uglu čvora. Navedeni efekt uočen je kod okvira s jakim ispunom.

2.4. Karakteristični parametri ponašanja sustava okvir sa zidanim ispunom

Ponašanje okvirnih konstrukcija sa zidanim ispunom tijekom djelovanja potresnog opterećenja, pod izravnim je utjecajem velikog broja parametara. Kvantificiranje utjecaja pojedinog parametara na ponašanje sustava okvir s ispunom složen je zadatak s obzirom na veliku varijaciju geometrijskih i materijalnih karakteristika konstituenata sustava, konstrukcijskog oblikovanja elemenata okvira i tehnologije izvedbe. Utjecaj pojedinih parametara uobičajeno se klasificira kao pozitivan i negativan, a doprinos se ocjenjuje u odnosu na konstrukcijske karakteristike (početna krutost i maksimalna nosivost), dinamičke karakteristike (disipacija energije, prigušenje i period) te oblik odgovora sustava. Odgovor sustava, koji je definiran odnosom *V-Δ* (horizontalna sila-horizontalni pomak), može se podijeliti na četiri područja kao što je opisano u prethodnom poglavlju.

Parametri koji utječu na ponašanje okvira s ispunom mogu se općenito podijeliti u ovisnosti o elementu sustava na: (1) parametre okvira i ispuna, (2) interakciju okvir-ispun i (3) ostalo.

Prva skupina parametara odnosi se na mehaničke karakteristike primijenjenih materijala. Dodavanjem ispuna u okvire, koji su pretežno fleksibilne konstrukcije, mijenjaju se njegove konstrukcijske i dinamičke karakteristike. Krutost ispuna doprinosi smanjenju osnovnog perioda osciliranja sustava i povećanju potresnog opterećenja. U području elastičnog ponašanja, pri malim amplitudama vibracija, sustav se ponaša monolitno, a potresno se opterećenje dominantno prenosi zidanim ispunom s obzirom da je doprinos fleksibilnih okvira pri malim horizontalnim pomacima zanemariv. Povećanjem horizontalnih pomaka, dolazi do pojave pukotina u ispunu, a maksimalna nosivost sustava uobičajeno je definirana pojavom dominantnog mehanizma sloma ispune. Kao što je navedeno u prethodnom poglavlju, oblik sloma ispuna, a samim time i nosivost sustava, ovisan je o čvrstoći primijenjenih materijala i geometrijskim karakteristikama okvira. Geometrijske su karakteristike, točnije odnos visine i raspona (*H/L*) okvira, većinom povezane interakcijom okvir-ispun, a uobičajena idealizacija ispuna tlačnom dijagonalom izravno opisuje odnos tlačnih i posmičnih naprezanja u ovisnosti o nagibu dijagonale. Prema tome, u slučaju velikog odnosa *H/L* u ispunu, mogu se očekivati dominantno tlačna naprezanja, a u slučaju malog odnosa *H/L* dominantno posmična naprezanja. Iz navedenog, može se zaključiti da se, povećanjem čvrstoće ispuna i odnosa *H/L,* doprinosi povećanju maksimalne nosivosti sustava i obrnuto.

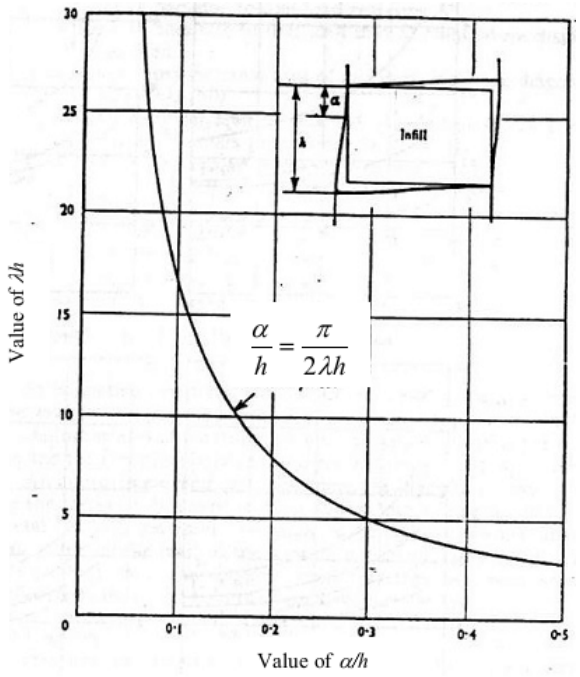
Interakcija okvir-ispun ovisna je o kontaktnoj duljini okvira i ispuna pri horizontalnom opterećenju. Već je prilikom prvih [33] ispitivanja ponašanja okvira s ispunom uočena promjena mehanizma prijenosa sila u odnosu na prazan okvir. Prilikom horizontalnog opterećenja dolazi do pojave odvajanja ispuna od okvira u neopterećenim uglovima što ukazuje da ispun pri relativno malim

horizontalnim pomacima prenosi isključivo tlačna naprezanja u smjeru dijagonale, pri čemu se isti može prikazati pomoću ekvivalentne zamjenske tlačne dijagonale [34]. Osnovne karakteristike zamjenske tlačne dijagonale, kao što su krutost i nosivost, određuju se na temelju empirijskih izraza. Uobičajeno se prilikom određivanja krutosti zamjenske dijagonale pretpostavlja da su modul elastičnosti i debljina dijagonale jednaki modulu elastičnosti i debljini ispune dok je jedina nepoznanica širina dijagonale. Eksperimentalna i numerička istraživanja [35] upućuju na međusobnu ovisnost krutosti okvira i širine zamjenske tlačne dijagonale gdje je u slučaju jačih okvira uočena veća duljina kontakta okvir-ispun, a samim time i veća efektivna krutost zamjenske tlačne dijagonale. Potrebno je naglasiti da autor definira krutost zamjenske tlačne dijagonale isključivo u ovisnosti o krutosti okvira koja je određena iz odnosa (*H/L*). Naknadna istraživanja [36], [37] pokazala su da je odnos širine i duljine (*w/d*) zamjenske tlačne dijagonale ovisan o kontaktnoj duljini između stupa okvira i ispuna (*z*) i bezdimenzionalnom parametru λ koji je definiran kao odnos relativne krutosti ispuna i stupa okvira, izraz 2.1. Kontaktna duljina ispuna i stupa okvira ovisna je o bezdimenzionalnom parametru λ (Slika 2.14), a određuje se pomoću izraza 2.2. Nosivost zamjenske dijagonale određuje se u ovisnosti o očekivanom obliku sloma ispuna na temelju izraza danih u [31]:

$$\lambda = \left[\frac{E_i \cdot t \cdot \sin 2\theta}{4 \cdot E_c \cdot I_c \cdot h} \right]^{\frac{1}{4}} \tag{2.1}$$

$$z = \frac{\pi}{2 \cdot \lambda} \tag{2.2}$$

gdje su E_c i E_i moduli elastičnosti betona i ispuna, t je debljina ispuna, θ nagib dijagonale u odnosu na horizontalu, I_c moment tromosti stupa i h visina ispuna.



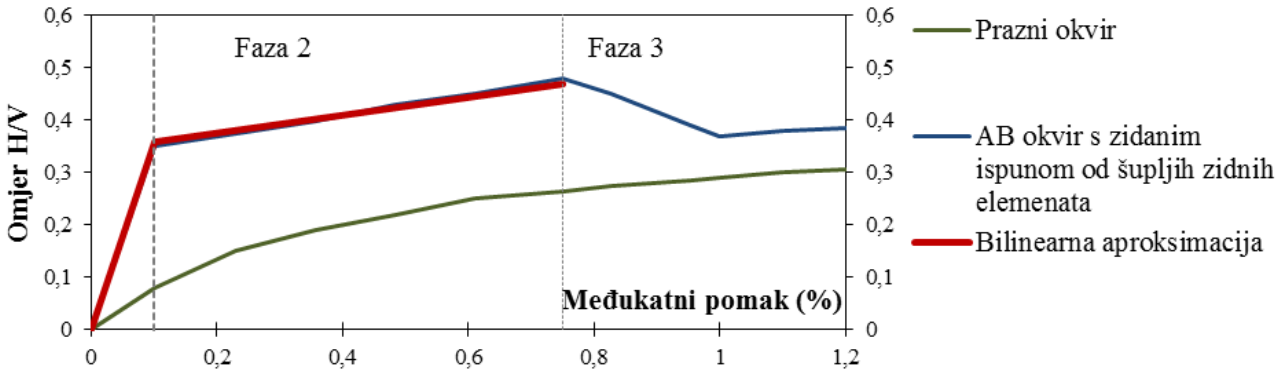
Slika 2.14 *Prikaz duljine kontakta z u ovisnosti o bezdimenzionalnom koeficijentu λ* [38]

Analizom izraza 2.1 i 2.2 može se utvrditi da smanjenje vrijednosti koeficijenta *λ* označava povećanje krutosti okvira u odnosu na ispun što doprinosi povećanju vrijednosti kontaktne duljine *z*, a samim time i povećanju nosivosti sustava. Analizirani izrazi izvedeni su na temelju rezultata ispitivanja čeličnih okvira s ispunom, kod kojih, za razliku od armirano-betonskih okvira, vrijednost momenta tromosti stupa ne ovisi o stanju deformacija poprečnog presjeka (pojava pukotina).

Treća skupina parametara odnosi se na vrstu horizontalnog opterećenja, razinu vertikalnog opterećenja, prisutnost otvora u ispunu te obliku veze okvir-ispun. Utjecaj vrste horizontalnog opterećenja (monotono ili ciklički) očit je u trećem području ponašanja sustava gdje do izražaja dolazi utjecaj degradacije nosivosti i krutosti. Provedena ispitivanja i dostupni rezultati [12], [15] ukazuju na dominantan utjecaj vrste zidnog elementa na razinu degradacije nosivosti i krutosti sustava nakon dosezanja maksimalne nosivosti. Povećanje oštećenja ispuna povezano je s povećanjem disipacije energije i prigušenja sustava. Rezultati u dostupnoj literaturi ukazuju da je u slučaju monotonog opterećenja ostvarena veća vrijednost horizontalne nosivosti, a degradacija ne dolazi do izražaja. Povećanje vertikalnog opterećenja općenito je povezano uz povećanje horizontalne nosivosti i smanjenje pomaka pri slomu. Otvori u ispunu, ovisno o veličini i položaju, dovode do smanjenja početne krutosti i nosivosti, međutim, smanjenje navedenih karakteristika nije proporcionalno smanjenju horizontalne površine ispune [7]. Mehanička veza okvira i ispun, neovisno o obliku, dovodi do povećanja početne krutosti i disipacije energije.

Detaljna sistematizacija utjecaja pojedinih parametara konstituenata sustava provedena je od strane [39] opsežnom analizom uz primjenu neuralne mreže. Promatrane su dvije grupe podataka. Prvu grupu, izlazne podatke, predstavljaju parametri odziva konstrukcije i mehanizam sloma sustava. Idealizacija odgovora konstrukcije definirana je omjerom horizontalne i vertikalne sile *H/V* (koeficijent posmika) i relativnog međukatnog pomaka, a ponašanje sustava podijeljeno je na tri područja (Slika 2.15):

- Područje 1 – do nastanka prve značajne pukotine (V_{cr}, δ_{cr})
- Područje 2 – do maksimalne nosivosti (V_{max},δ_{max})
- Područje 3 – do granice rušenja (izostavljeno)



Slika 2.15 *Faze ponašanja sustava okvir s ispunom* [39]

Drugu grupu podataka, ulazne podatke, predstavljaju geometrijske i mehaničke karakteristike okvira i ispuna. Baza ulaznih podataka formirana je na rezultatima ispitivanja provedenih na 113 uzoraka jednorasponskih, jednoetažnih okvira s ispunom. Na temelju provedene analize, može se zaključiti sljedeće: Manja vrijednost bezdimenzionalnog parametra odnosa visine i raspona (α) povezana je s većom vrijednosti relativnog međukatnog pomaka pri popuštanju sustava (δ_{cr}). Relativni međukatni pomak pri popuštanju (δ_{cr}) imat će veće vrijednosti za manje vrijednosti čvrstoće materijala (f_c, f_y, f_i) i manju debljinu zidanog ispuna (t). Granična vrijednost relativnog međukatnog pomaka (δ_{max}) bit će veća za manje vrijednosti odnosa *H/L* (α) i više vrijednosti materijalnih karakteristika komponenata sustava okvir-zidani ispun (f_c, f_i). Povećanje tlačne čvrstoće betona (f_c) i ispuna (f_i) značajno doprinosi povećanju nosivosti i u području popuštanja (V_{cr}) i u području maksimalne nosivosti (V_{max}) [39].

3. PROGRAM ISPITIVANJA

Program ispitivanja u sklopu provedenih eksperimentalnih istraživanja sastoji se od odabira, izvedbe i ispitivanja uzoraka jednorasponskih, jednoetažnih modela nedukltilniharmirano-betonskih okvira s i bez zidanog ispuna. Cjelokupni program ispitivanjapodijeljen je u dvije faze. Prva faza ispitivanja odnosi se na određivanje mehaničkih karakteristika primijenjenih materijala i zidanog ispuna. Uzorkovanje materijala i ispitivanje provedeno je prema preporukama danim u normama niza *EC* (*Eurokod*) i *ASTM* (*American Standards for Testingof Materials*). U drugoj fazi provedeno je ispitivanje modelaneduktilniharmirano-betonskih okvira s i bez zidanog ispuna izvedenih u mjerilu 1:2. Modeli su ispitani pod približno konstantnim vertikalnim i promjenjivim cikličkim horizontalnim opterećenjem u ravnini do sloma. Broj uzorakaodređen je kombinacijom odabranih parametara promatranog sustava s ciljem kvantifikacije njihovog doprinosa. Promatrani parametri podijeljeni su u dvije skupine, a ispitivanja su provedena na ukupno 14 uzoraka. S ciljem osiguranja konstantne kvalitete i nadzora izvedbe, svi uzorci u prvoj i drugoj fazi ispitivanja izvedeni su od strane istog osoblja. Sva ispitivanja provedena su u laboratorijima Zavoda za tehničku mehaniku Građevinskog fakulteta u Osijeku.

3.1. Odabir istraživanih parametara modela

Kao što je navedeno u prošlom poglavlju, ponašanje okvira s ispunom, pri djelovanju potresnog opterećenja, pod izravnim je utjecajem niza parametara. Kompozitni karakter i složena priroda interakcije konstituenata sustava zahtijeva sistematizaciju parametara s ciljem utvrđivanja utjecaja istih na lokalno i globalno ponašanje neduktilniharmirano-betonskih okvira sa zidanim ispunom. Istraživani parametri podijeljeni su u dvije osnovne skupine, u ovisnosti o elementu sustava, na:

(1) parametre neduktilniharmirano-betonski okvira i
(2) parametre zidanog ispuna.

Ispitivanje utjecaja svih svojstvenih nedostataka neduktilniharmirano-betonskih okvira na ponašanje sustava okvir s ispunom zahtijevalo bi velik broj ispitnih uzoraka i velika financijska sredstva. Osim toga, utjecaji pojedinih nedostataka neduktilnih okvira, koji nepovoljno utječu na ponašanje praznih okvira, mogu se zanemariti u slučaju okvira s ispunom (proklizavanje armature, nosivost čvora okvira). S obzirom na ograničenja, a sukladno dostupnoj literatura, odabrani su parametri koji imaju izražen utjecaj na globalno i lokalno ponašanje te graničnu nosivost sustava. Globalno i lokalno ponašanje okvira određeno je geometrijskim karakteristikama i odnosom geometrijskih karakteristika

elemenata, količinom uzdužne i poprečne armature i mehaničkim karakteristikama primijenjenih materijala. Prema tomu, odabrane su tri skupine parametara neduktilnih okvira:

1. dimenzije elemenata okvira kojima je definiran odnos momenata tromosti stupa i gredeβ
2. koeficijenti armiranja elemenata okvira uzdužnom armaturom ρ_s (za stup) i ρ_g (za gredu)
3. količina/raspored poprečne armature stupova

S ciljem utvrđivanja utjecaja parametara pojedine skupine na ponašanje sustava, izvršena je varijacija vrijednosti odabranih parametara. Vrijednosti pojedinih parametara, i njihova varijacija unutar odabranih skupina, određene su na temelju najčešće susretanih veličina u praksi razdoblja prije donošenja modernih seizmičkih propisa. Odabrane su sljedeće vrijednosti promatranih veličina:

1. širina stupova i greda definirana je širinom zidanog ispuna kojeg omeđuju. Širina zidanog ispuna u provedenom ispitivanju određena je na temelju minimalno zahtijevane širine nosivog zida koja iznosi 25 *cm*.
2. odabrane su dvije visine stupova okvira: 30 i 50 *cm* i dvije visine greda: 40 i 50 *cm*
3. količina uzdužne armature stupova odabrana je u iznosu od 1 i 1,3% bruto površine poprečnog presjeka
4. količina uzdužne armature u gredama okvira odabrana je u iznosu od 3 i 3,8% bruto površine poprečnog presjeka
5. za poprečnu armaturu odabrane su šipke promjera 6 *mm* postavljene na razmaku od 10 i 15 *cm*

Odabranim vrijednosti parametara pojedinih skupina te njihovom varijacijom, definirana su četiri tipa okvira. Oznake okvira i vrijednosti pripadnih parametara prikazane su Tablicom 3.1.

Tablica 3.1*Oznake i pripadni parametri okvira*

Oznaka (tip) okvira	*O1*	*O2*	*O3*	*O4*
Dimenzije stupova, *b/h* [*cm*]	25/30	25/30	25/50	25/50
Dimenzija grede, *b/h* [*cm*]	25/40	25/40	25/40	25/50
α	0,7	0,7	0,7	0,7
β	0,42	0,42	1,95	1,0
ρ_s [%]	1,0	1,0	1,0	1,3
ρ_g [%]	3,8	3,8	3,8	3
Količina/razmak poprečne armature [*mm/cm*]	Φ6/10	Φ6/15	Φ6/10	Φ6/10

Druga skupina parametara odnosi se na karakteristike zidanog ispuna koje su promatrane u odnosu na nosivost i krutost. Varijacija parametara druge skupine izvršena je primjenom materijala

različitih mehaničkih karakteristika. Osnovni kriterij prilikom odabira materijala učestalost je primjene u građevinskoj praksi. Tradicionalno u Hrvatskoj, a i u ostalim zemljama svijeta, izvodi se monolitno ziđe tehničkih svojstava koja ispunjavaju opće zahtjeve bilo da se radi o zidanim konstrukcijama ili ispunima okvira, pri čemu se uobičajeno koriste glineni zidni elementi i mort opće namjene. S ciljem varijacije odabranih parametara, a sukladno kriteriju odabira, za izvedbu ispuna primijenjeno je sljedeće:

- dva tipa morta opće namjene: (1) cementno-vapneni (produžni) i (2) vapneni mort
- dvije vrste zidnih elemenata: (1) glineni blok s vertikalnim šupljinama i (2) glinena opeka

Varijacijom odabranih materijala izvedena su četiri tipa ispuna (Tablica 3.2) koji se prema tlačnoj čvrstoći smjeru okomitom na horizontalne reške može klasificirati kao jaki i slabi. Iako je uobičajena podjela ispuna u literaturi pomoću navedene karakteristike, nedostaje konsenzus o graničnoj vrijednosti. Klasifikacija ispuna u provedenom istraživanju izvršena je u odnosu na vlastite rezultate ispitivanja, pri čemu se smatra da je jakiispun zidan cementno-vapnenim, a slabi vapnenim mortom.

Tablica 3.2 *Oznake ispuna*

Oznaka (tip) ispuna	Varijacija materijala
bpm	glineni blok s vertikalnim šupljinama + cementno-vapneni mort
cpm	glinena opeka + cementno-vapneni mort
bvm	glineni blok s vertikalnim šupljinama + vapneni mort
cvm	glinena opeka + vapneni mort

3.2. Odabir ispitnih modela

Za prototip modela odabran je srednji raspon prve etaže više etažne zgrade gdje se javljaju maksimalna vertikalna (gravitacijska) i horizontalna opterećenja uslijed djelovanja potresa. Raspon i visina prototipa te mjerilo modela određeni su na temelju geometrijskog kapaciteta reaktivnog čeličnog okvira. Prototip je raspona od 4 *m* i visine od 3 *m*, a modeli su skalirani u mjerilu 1:2. Za odabrane dimenzije odnos visine i raspona prototipa (α) iznosi 0,7 i predstavlja zajednički parametar svih ispitnih uzoraka. Ukupno je izvedeno i ispitano 14 uzoraka koji su određeni na temelju varijacije promatranih skupina parametara. Ispitni uzorci podijeljeni suu ovisnosti o tipu okvira čime su definirane četiri skupine ispitnih uzoraka, a varijacija parametara unutar definiranih skupina izvršena je u odnosu na parametre ispuna (Tablica 3.3).

Tablica 3.3 *Karakteristike ispitnih uzoraka*

Grupa okvira	Grupa ispuna
O1	-
	bpm
	*bpm**
	cpm
	bvm
	cvm
	b
O2	*cpm*
O3	-
	bpm
	cpm
O4	-
	bpm
	cpm

Prva skupina *O1* sadrži ukupno sedam uzoraka kod kojih su prilikom izvedbe korištena sva četiri tipa zidanog ispuna. Uzorak kod kojega je tip ispuna označen s *b* odabran je kao granični slučaj, a predstavlja ispunizvedenu od glinenih zidnih elemenata s vertikalnim šupljinama bez povezivanja mortom. Na ovaj način nastojao se sagledati utjecaj zidnih elemenata na ponašanje sustava, ali i na mehanizam prijenosa sila unutar ispuna. Uzorci *O1_bpm* i *O1_bpm** identični su po svim karakteristikama. Ispitivanje dvaju identična uzorka uzrokovano je greškom pri nanošenju opterećenja uzorka *bpm**. Potrebno je istaknuti da su okviri uzoraka *O1_bpm* i *O1_bpm** korišteni i prilikom ispitivanja uzorka *O1_cvm* i praznog okvira. Okviri navedenih uzoraka prije su ponovljenih ispitivanja popravljeni mortom za saniranje deklarirane tlačne čvrstoće u iznosu od 35 N/mm^2.Kod druge skupine, skupine *O2*, izveden je samo jedan uzorak ispunjen jakim ispunom. Cilj je odabira sagledati utjecaj razmaka poprečne armature u stupovima okvira na graničnu nosivost, a tip je ispuneodabrana iz razloga što je pregledom literature uočen negativan utjecaj interakcije jakog ispuna i okvira s nedostatnom poprečnom armaturom u obliku prijevremenog posmičnog sloma stupa. Treća i četvrta skupina uzoraka izvedena je s tipom ispuna koji se prema prihvaćenoj klasifikaciji definira kao jaki ispun.

3.3. Izvedba modela

Kako bi se obuhvatio utjecaj skaliranja na ponašanje modela, prilikom izvedbe armirano-betonskih okvira, poštovani su uvjeti zakona sličnosti. Zakon sličnosti temeljen je na osnovi deformacije gdje se podudarnost dvaju tijela različitih dimenzija ostvaruje ispunjavanjem uvjeta geometrijske i materijalne sličnosti. Geometrijska sličnost prototipa i modela ostvarena je ako su omjeri izmjera jednaki odabranom koeficijentu mjerila *S*, tj:

$$S = \frac{l_p}{l_m} \tag{7.9}$$

Odabrani koeficijent mjerila odnosi se na osnovnu veličinu-duljinu. Odnosi drugih veličina, bitnih pri modelskom ispitivanju, određuju se u ovisnosti o odabranom koeficijentu mjerila *S,* prema vrijednostima danim u Tablici 3.4 gdje se indeksi *p* i *m* odnose na prototip i model. Uvjet materijalne sličnost zadovoljen je ako su prototip i model izvedeni od materijala jednakih ili sličnih radnih dijagrama, pri čemu se razlikuje potpuna, opća i jednostavna (ili stroga) materijalna sličnost [40].

Tablica 3.4 *Koeficijenti mjerila pri modelskom ispitivanju*

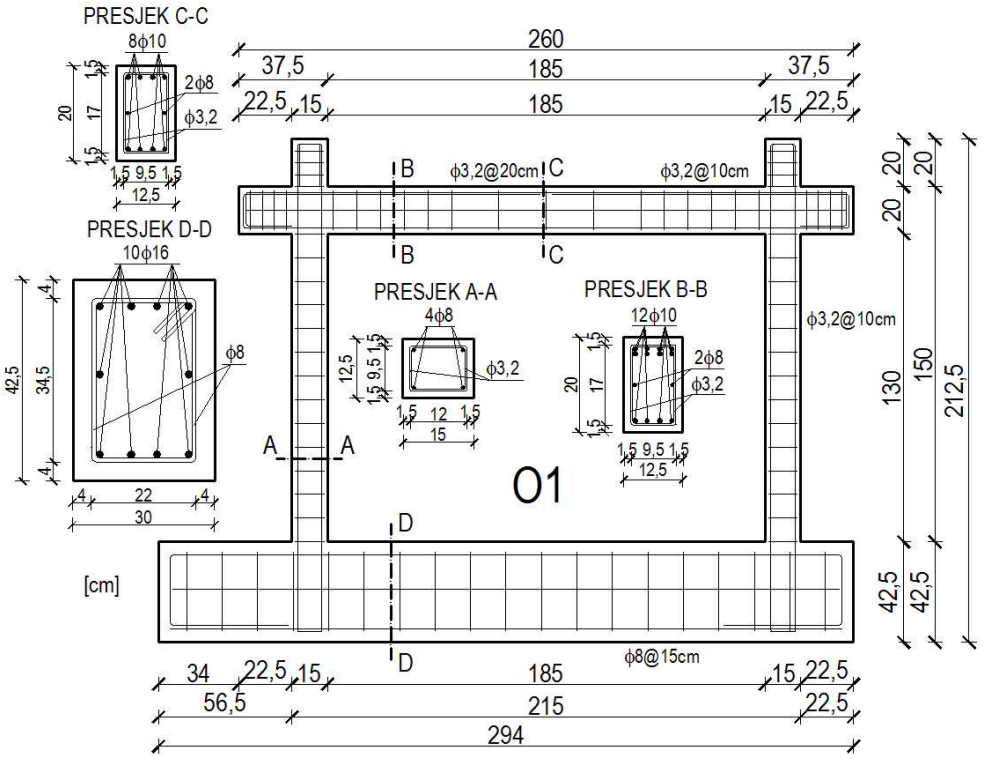
Veličina	Odnos prototip/model	Koeficijent skaliranja
Duljina	l_p/l_m	S
Ploština	P_p/P_m	S^2
Obujam	V_p/V_m	S^3
Koncentrirana sila	F_p/F_m	S^2
Težina	G_p/G_m	S^3

Skalirane vrijednosti izmjera ispitnih uzoraka prikazane su Tablicom 3.5. Odnosi momenata tromosti β određeni su bez uzimanja u obzir uzdužne armature elemenata. U svrhu zadovoljenja uvjeta materijalne sličnosti, odabrana je stroga sličnost kod koje su radni dijagrami materijala prototipa i ispitnog uzorka jednaki.

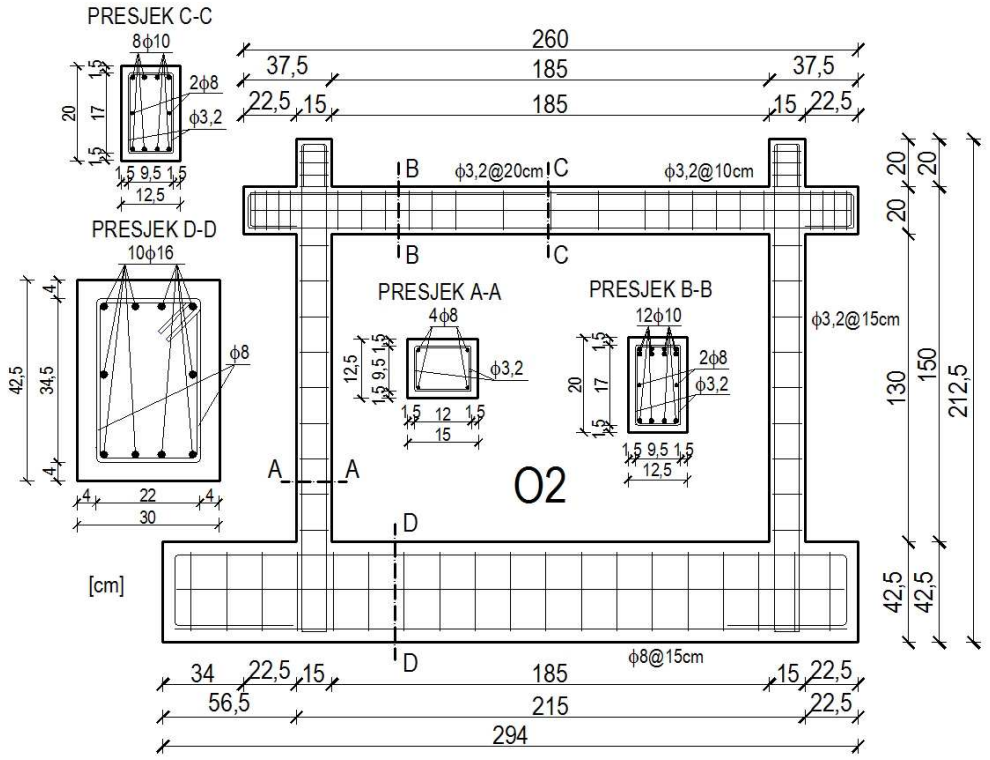
Tablica 3.5 *Skupine i pripadni parametri okvira*

Skupina okvira	*O1*	*O2*	*O3*	*O4*
Dimenzije stupova, *b/h* [*cm*]	12,5/15	12,5/15	12,5/25	12,5/25
Dimenzija grede, *b/h* [*cm*]	12,5/20	12,5/20	12,5/20	12,5/25
a	0,75	0,75	0,75	0,75
β	2,4	2,4	0,5	1
ρ_s [%]	1	1	1	1,3
ρ_g [%]	3,8	3,8	3,8	3
Količina/razmak poprečne armature [*mm/cm*]	Φ3,2/10	Φ3,2/15	Φ3,2/10	Φ3,2/10

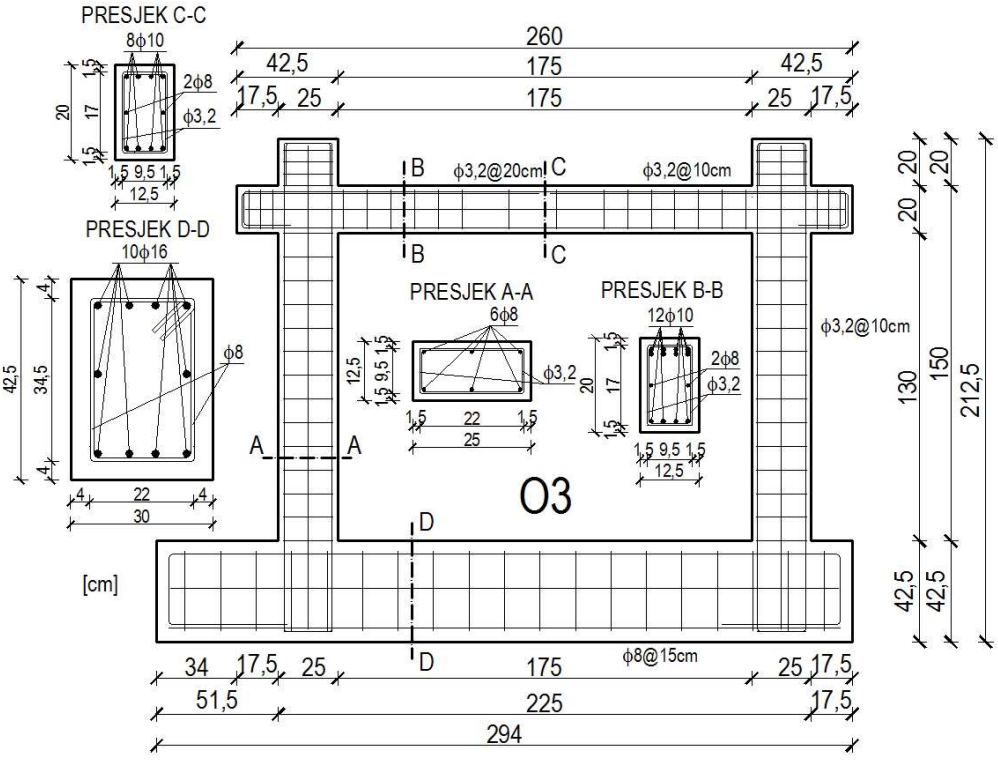
Svi modeli betonirani su u horizontalnom položaju i izvedeni s krutom temeljnom gredom preko koje je ostvareno učvršćenje modela u reaktivni okvir i sidrenje uzdužne armature stupova. Projektirana tlačna čvrstoća betona svih uzoraka iznosi 20 *N/mm²*. Pri izvedbi armaturnog koša za nosivu uzdužnu armaturu korištene su rebraste, a za konstruktivnu glatke armaturne šipke. Sidrenje uzdužne armature stupova i greda izvršeno je u nastavcima elemenata predviđenim za unos opterećenja. Poprečna armatura elemenata izvedena je od glatkog armaturnog čelika. S obzirom na ograničeni asortiman, za poprečnu je armaturu odabrana glatka žica promjera 3,2 *mm* (u mjerilu 3 *mm*). Poprečna armatura u nastavcima elemenata postavljena je na razmaku od 5 *cm*, kako bi se tijekom ispitivanja osigurao prijenos opterećenja bez pojave znatnog oštećenja nastavaka. Čvorovi okvira ispitnih uzoraka armirani su jednim stremenom postavljenom na polovini visine. Detalji armiranja i izmjera uzoraka okvira prikazani su Slikama 3.1-3.4. Izvedba uzorka prikazana je Slikom 3.5.



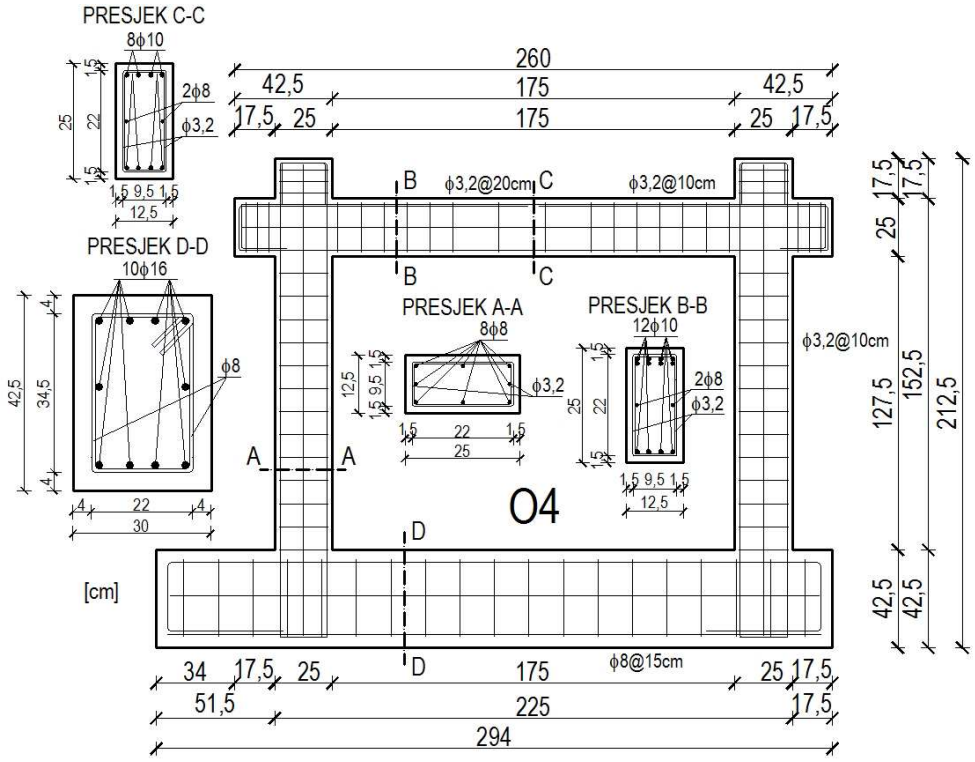
Slika 3.1 *Detalji armiranja i geometrijskih izmjera ispitnih uzoraka skupine O1*



Slika 3.2 *Detalji armiranja i geometrijskih izmjera ispitnih uzoraka skupine O2*



Slika 3.3 *Detalji armiranja i geometrijskih izmjera ispitnih uzoraka skupine O3*



Slika 3.4 *Detalji armiranja i geometrijskih izmjera ispitnih uzoraka skupine O4*

Slika 3.5 *Prikaz izvedbe ispitnih uzoraka neduktilniharmirano-betonskih okvira*

Prilikom odabira izmjera zidnih elemenata i naknadnim skaliranjem, nastojao sezadovoljiti kriterij sličnosti mehanizma sloma [28]. Tako je odabrana širina zidnih elemenata približno jednaka širini ispunogispuna (12,5 *cm*), a glineni zidni elementi s vertikalnim šupljinama skalirani suprema visini odabranoj mjerilom. Na taj je način zadržan isti broj horizontalnih reški u odnosu na prototip, a skaliranjem su izbjegnuti negativni utjecaji vitkosti stijenkišupljih zidnih elemenata na tlačnu čvrstoću i ponašanje ispuna[13]. Skaliranje glinene opeke nije izvršeno iz praktičnih razloga. Osim toga, prema

[41], skaliranje glinene opeke kod modela mjerila većih ili jednakih od 1:3 nema značajnog utjecaja na odgovor (nosivost i krutost) i mehanizam sloma ispuna. Horizontalne i vertikalne reške ispuna također nisu skalirane, a iznose približno 1 *cm*. Veza između ispuna i okviraostvarena je bez mehaničkih spajala pomoću vertikalne reške od morta kojim je izveden i ispun. Zidanje ispuna uzoraka prikazano je Slikom 3.6, a zidni elementi Slikom 3.7.

Slika 3.6 *Zidanje ispuna uzorka*

Slika 3.7 *Prikaz zidnih elemenata*

Sastav morta određen je u odnosu na volumni udio pojedinih komponenti čime jeprema [42] određen razred tlačne čvrstoće. Razredi tlačnih čvrstoća morta označavaju se slovom *M* nakon čega slijedi broj koji predstavlja tlačnu čvrstoću u N/mm^2. Ciljana je tlačna čvrstoća cementno-vapnenog morta *M5* s omjerima 1:1:5 (cement:vapno:pijesak), a vapnenog morta *M2,5* s omjerom komponenata 1:3 (vapno:pijesak). Omjer komponenata vapnenog morta određen je prema dostupnoj literaturi [43], [44]. Kao agregat za spravljanje mortova, korišten je riječni pijesak frakcije 0-4 *mm*.

4. ISPITIVANJE KONSTITUTIVNIH MATERIJALA

4.1. Tlačna čvrstoća betona ugrađenog u ispitne uzorke

Tlačna čvrstoća očvrsnutog betona određena je uzorkovanjem nakon ispitivanja modela prema preporukama danim u normi *EN 12504-1:2000* [45]. Svi su uzorci, u obliku valjka promjera 50 *mm*, izvađeni iz temeljnih greda modela na način da je izbjegnut sadržaj armaturnog čelika. Odabirom odnosa promjera i visine valjka 1:1, rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće usporedivi su s tlačnom čvrstoćom kocke brida 15 *cm*. Površine za prijenos opterećenja obrađene su brušenjem, a nanošenje opterećenja izvršeno je kontrolom sile pomoću kidalice marke *Shimadzu Trapezium AG-X* kapaciteta 250 *kN*. Tlačna čvrstoća određena je na način da je maksimalno dosegnuta sila podijeljena s površinom presjeka i pomnožena s koeficijentom 0,83 kako bi se dobile vrijednosti koje odgovaraju čvrstoći valjka. Dobivene vrijednosti zaokružene su na najbližih 0,5 N/mm^2 za pojedine uzorke. Na Slici 4.1 a) prikazano je uzorkovanje očvrsnutog betona, a na Slici 4.1 b) ispitivanje uzoraka. Rezultati ispitivanja prikazani su u Tablici 4.1 gdje su vrijednosti tlačne čvrstoće skupine uzoraka također zaokružene na najbližih 0,5 N/mm^2. Modul elastičnosti određen je analitički primjenom izraza 4.1, a dobivene vrijednosti zaokružene su na najbližih 100 N/mm^2.

$$E_{c,i} = 9500 \cdot \sqrt[3]{f_{c,i} + 8} \tag{4.1}$$

a) b)

Slika 4.1 *a) Uzorkovanje* i *b) ispitivanje tlačne čvrstoće očvrsnutog betona*

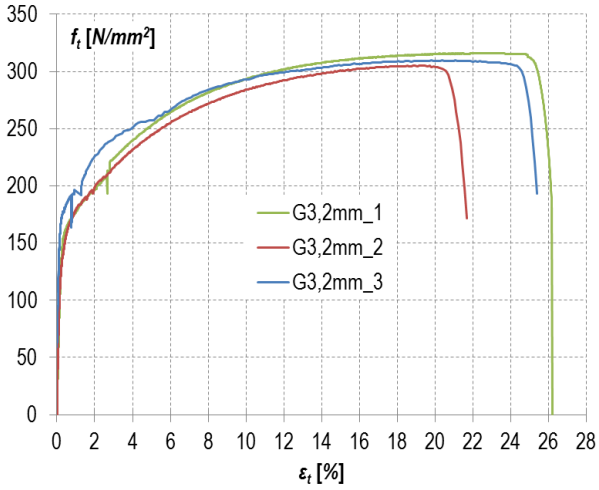
Tablica 4.1 *Rezultati ispitivanja očvrsnutog betona*

Ispitni uzorak	Tlačna čvrstoća, $f_{c,i}$ [N/mm²]	Karakteristična vrijednost, f_c[N/mm²]	Standardno odstupanje, s^*		Koeficijent varijacije, V^*	Modul elastičnosti, $E_{c,i}$ [N/mm²]	Srednja vrijednost, E_c [N/mm²]
O1_1	21,5*	23,0*	1,5*	2,3*	10,1*	29400*	29800*
O1_2	21,5*		1,5*			29400*	
O1_3	25,5*		2,5*			30700*	
O1_bpm_1	21,5	23,0	1,5	2,3	10,1	29400	29800
O1_bpm_2	21,5		1,5			29400	
O1_bpm_3	25,5		2,5			30700	
*O1*_bpm_1*	25,5	26,5	1,0	2,4	8,9	30700	30900
*O1*_bpm_2*	24,5		2,0			30300	
*O1*_bpm_3*	29,0		2,5			31700	
O1_cpm_1	20,5	22,5	2,0	1,9	8,5	28900	29700
O1_cpm_2	24,0		1,5			30200	
O1_cpm_3	23,5		1,0			30000	
O1_bvm_1	25,0	25,5	0,5	0,9	3,4	30400	30600
O1_bvm_2	26,5		1,0			30900	
O1_bvm_3	25,0		0,5			30400	
O1_cvm_1	25,5*	26,5*	1,0*	2,4*	8,9*	30700*	30900*
O1_cvm_2	24,5*		2,0*			30300*	
O1_cvm_3	29,0*		2,5*			31700*	
O1_b_1	24,0	25,0	1,0	0,9	3,5	30200	30500
O1_b_2	25,5		0,5			30600	
O1_b_3	25,5		0,5			30700	
O2_cpm_1	21,5	21,0	0,5	0,9	4,1	29400	29200
O2_cpm_2	21,5		0,5			29400	
O2_cpm_3	20,0		1,0			28900	
O3_1	20,0	20,5	0,5	1,2	5,7	28900	29000
O3_2	20,0		0,5			28900	
O3_3	21,5		1,5			29400	
O3_bpm_1	23,5	23,0	0,5	1,8	7,8	30000	30000
O3_bpm_2	25,0		2,0			30400	
O3_bpm_3	21,5		1,5			29400	
O3_cpm_1	23,5	26,0	3,5	3,8	14,7	29600	30700
O3_cpm_2	25,0		4,0			31900	
O3_cpm_3	21,5		1,0			30400	
O4_1	19,0	20,5	1,5	1,3	6,2	28500	29000
O4_2	21,5		1,0			29400	
O4_3	20,5		0,0			29000	
O4_bpm_1	23,0	24,0	1,0	1,5	6,1	29900	30200
O4_bpm_2	23,0		1,0			29900	
O4_bpm_3	25,5		1,5			30700	
O4_cpm_1	25,5	25,0	0,5	1,3	5,3	30700	30500
O4_cpm_2	26,0		1,0			30800	
O4_cpm_3	23,5		1,5			30000	

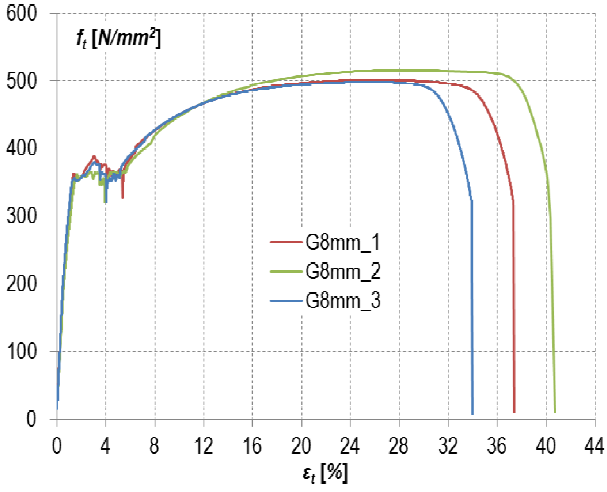
4.2. Vlačna čvrstoća armaturnog čelika

Vlačna čvrstoća armaturnog čelika ispitana je u skladu s preporukama danim u *ISO 6892-1* [46]. Ispitni su uzorci strojno neobrađeni, a ispitivanje je izvršeno kontrolom deformacija. Modul elastičnosti određen je pomoću mjerenja ostvarenih ekstenzometrom postavljenim na srednjoj trećini visine ispitnog uzorka koji je nakon dosezanja granice popuštanja uklonjen. Zbog jednostavnosti raspoznavanja vrste armaturnog čelika, uvedene su oznake kod kojih prvo slovo označava vrstu armature (**G**latka ili **R**ebrasta) nakon čega slijedi promjer te broj uzorka. Na Slici 4.2 prikazani su radni dijagrami i ispitni uzorak tijekom ispitivanja. Prikazani radni dijagrami, s obzirom da je relativna deformacija određena na udaljenosti koja predstavlja razmak čeljusti kidalice, daju kvantitativan opis odnosa vlačno naprezanje-relativna deformacija. Rezultati ispitivanja prikazani su u Tablici 4.2. Vrijednost dobivene ispitivanjem zaokružene su do najbližih 1000N/mm^2.

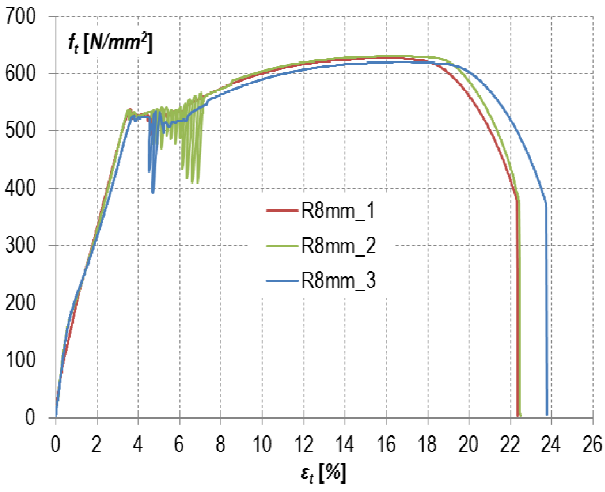
a)



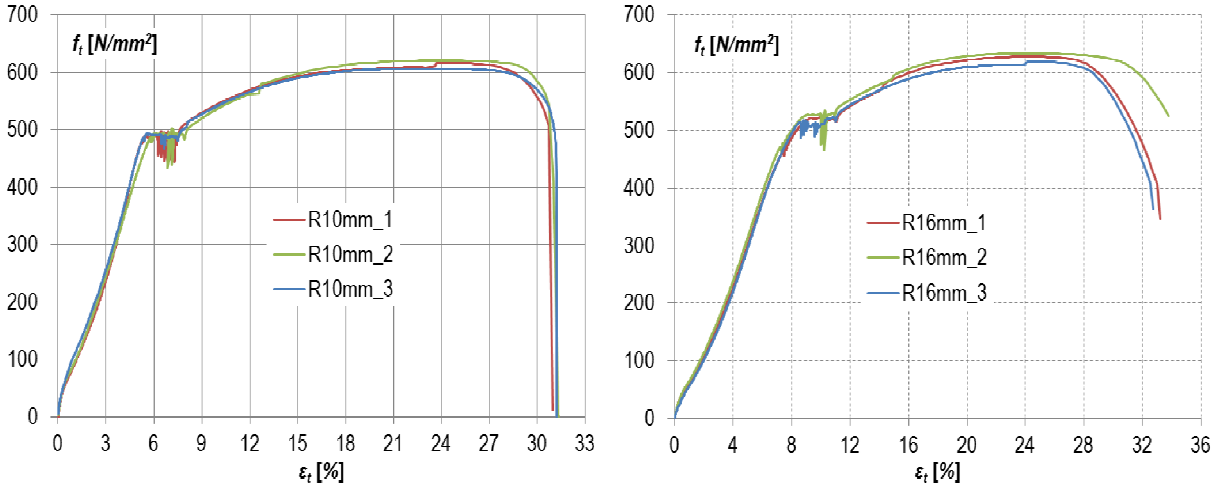
b)



c)



d)



Slika 4.2 *a) Prikaz ispitnog uzorka, b) radni dijagrami uzorakaGΦ3,2mm, c) radni dijagrami uzorakaGΦ8mm, d) radni dijagrami uzorakaRΦ8mm, e) radni dijagrami uzorakaRΦ10mm* i *f) radni dijagrami uzorakaRΦ16mm*

Tablica 4.2 *Rezultati ispitivanja armaturnog čelika*

Ispitni uzorak	Granica popuštanja, f_y [N/mm²]	Deformacija na granici popuštanja, ε_y [%]	Modul elastičnosti, E_s [N/mm²]·10³	Vlačna čvrstoća, f_u [N/mm²]
GΦ3,2mm_1	170	-	-	305
GΦ3,2mm_2	159	-	-	316
GΦ3,2mm_3	171	-	-	310
Srednja vrijednost	167	-	-	310
GΦ8mm_1	363	0,16	200	501
GΦ8mm_2	361	0,12	197	515
GΦ8mm_3	356	0,16	199	498
Srednja vrijednost	360	0,15	199	505
RΦ8mm_1	537	0,26	198	627
RΦ8mm_2	534	0,26	199	631
RΦ8mm_3	527	0,30	196	620
Srednja vrijednost	533	0,27	198	626
RΦ10mm_1	479	0,27	200	616
RΦ10mm_2	486	0,30	195	621
RΦ10mm_3	488	0,26	192	607
Srednja vrijednost	484	0,28	196	615
RΦ16mm_1	465	0,28	203	628
RΦ16mm_2	472	0,26	195	634
RΦ16mm_3	515	0,32	196	619
Srednja vrijednost	484	0,29	198	627

4.3. Svojstva morta za zidanje

Zahtijevana svojstva morta za zidanje ovisna su o njegovoj uporabi i trebaju biti usklađena s predviđenom namjenom, a razmatraju se u dvije skupine:

1. Svojstva koja se odnose na svježi neočvrsnuti mort:
   - vrijeme ugradnje
   - sadržaj klorida
   - sadržaj zraka (udio pora)
   - vrijeme obradivosti (za tankoslojne mortove)
   - veličina agregata (za tankoslojne mortove)
2. Svojstva koja se odnose na očvrsnuti mort:
   - vlačna čvrstoća pri savijanju
   - tlačna čvrstoća
   - čvrstoća prianjanja
   - vodoupojnost
   - paropropusnost
   - obujamska masa
   - toplinska provodljivost
   - reakcija na požar (za mortove s > 1% organskih materijala)
   - trajnost

Svojstva morta za zidanje određuju se na osnovi ispitnih rezultata dobivenih na temelju ispitivanja provedenih u skladu s normom niza *HRN EN 1015:2000* [47]. Istraživanjem nije predviđeno ispitivanje svih svojstva morta, pri čemu su ispitana samo osnovna svojstva u očvrsnutom stanju i to: (1) vlačna čvrstoća pri savijanju i (2) tlačna čvrstoća. Određivanje čvrstoće prianjanja morta također je izostavljeno u ovom dijelu ispitivanja. Naime, čvrstoća prianjanja morta određuje se u kombinaciji sa zidnim elementima te se definira kao početna posmična čvrstoća ziđa što je obrađeno u *Poglavlju 5*.

4.3.1. Vlačna i tlačna čvrstoća morta za zidanje

Vlačna čvrstoća morta pri savijanju, f_{mt}, određuje se opterećenjem u trima točkama uzoraka do sloma na očvrsnutim, u kalupu izrađenim prizmama morta, u skladu s normom *HRN EN 1015-11* [48]. Proračun vlačne čvrstoće morta pri savijanju vrši se pomoću izraza (4.2):

$$f_{mt} = \frac{3F_{mt}l_m}{2b_m h_m^{\,2}} \tag{4.2}$$

gdje je F_{mt} - najveća koncentrirana sila u polovini raspona [*N*]

l_m - udaljenost između osi ležajnih valjaka [*mm*]

b_m - širina prizme na crti pukotine [*mm*]

h_m - visina prizme na crti pukotine [*mm*]

Vrijednost vlačne čvrstoće zaokružuje se do najbliže vrijednosti od 0,05 *N/mm²* za pojedinačne uzorke te 0,1 *N/mm²* za srednju vrijednost.

Tlačna čvrstoća morta, f_m, određuje se ispitivanjem na komadima koji se dobiju nakon ispitivanja vlačne čvrstoće pri savijanju u skladu s normom *HRN EN 1015-11* [49]. Vrijednost tlačne čvrstoće morta određuje se iz omjera najveće sile koju je izdržao uzorak i ploštine ispitnog uzorka u dodiru s tlačnom pločom. Tlačna čvrstoća zaokružuje se do najbliže vrijednosti od 0,05 *N/mm²* za pojedinačne uzorke te 0,1 *N/mm²* za srednju vrijednost.

Ispitivanja su provedena u skladu s normama, a rezultati su prikazani u Tablici 4.3. Zbog jednostavnosti raspoznavanja vrste morta, uvedene su sljedeće oznake: (1) *pm* – produžni, tj. cementno-vapneni mort i (2) *vm* – vapneni mort.

Tablica 4.3 *Rezultati ispitivanja vlačne i tlačne čvrstoće morta za zidanje*

Ispitni uzorak	Vlačno ispitivanje			Tlačno ispitivanje					
	Sila sloma $F_{mt,i}$ [*N*]·10³	Vlačna čvrstoća $f_{mt,i}$ [*N/mm²*]	Srednja vlačna čvrstoća f_{mt} [*N/mm²*]	Sila sloma $F_{m,i}$ [*N*]·10³	Tlačna čvrstoća $f_{m,i}$ [*N/mm²*]	Srednja tlačna čvrstoća f_m [*N/mm²*]	Standardno odstupanje *s**		Koeficijent varijacije *V* [%]*
pm_1	0,57	1,35	1,3	8,30	5,20	5,1	0,1	0,14	2,72
				8,15	5,10		0		
pm_2	0,55	1,30		8,23	5,15		0,05		
				7,95	4,95		0,15		
pm_3	0,55	1,30		8,53	5,35		0,25		
				8,12	5,10		0		
vm_1	0,10	0,4	0,3	0,75	0,50	0,5	0	0,08	15,75
				0,84	0,50		0		
vm_2	0,06	0,3		0,74	0,45		0,05		
				0,84	0,50		0		
vm_3	0,05	0,3		0,70	0,45		0,05		
				0,85	0,55		0,05		

Odabranim volumnim omjerima cementno-vapnenog morta postignut je ciljani razred tlačne čvrstoće *M5* dok odabranim volumnim omjerom vapnenog morta nije postignut ciljani razred čvrstoće *M2,5*. Iako se prema preporukama proizvođača i [43] odabranim volumnim omjerom očekuje ciljani razred čvrstoće morta, u istraživanjima je [54], [44] također dobivena znatno manja vrijednost tlačne čvrstoće uz primjenu istih volumnih omjera. Objavljene vrijednosti tlačne čvrstoće u intervalu su od 0,78 i 1,29 N/mm^2. Ispitivanjima provedenim u [44] na uzorcima vapnenog morta starosti 28, 90 i 850 dana, ciljana tlačna čvrstoća od 2,5 N/mm^2, približno je dobivena ispitivanjem uzoraka starosti 850 dana (3,54 N/mm^2). Naknadnom kemijskom analizom utvrđeno je da se tek manji dio vapna vezao o čemu govori 75% $Ca(OH)_2$ i samo 25% $CaCO_3$ u vezivnoj fazi što ukazuje da je proces karbonatizacije vapnenog morta u prirodnim uvjetima spor i dugotrajan proces.

4.4. Svojstva zidnih elemenata

Zidni elementi dijele se u više različitih skupina, pri čemu su najznačajnije podjele prema:

1. Vrsti materijala od kojeg su izrađeni gdje razlikujemo:
   - opečni (glineni) zidni element
   - vapneno-silikatni zidni element
   - betonski zidni element
   - zidni element od porastog betona
   - zidni element od umjetnog kamena
   - zidni element od prirodnog kamena
2. Kontroli proizvodnje gdje razlikujemo:
   - kategoriju 1: to su oni zidni elementi za koje je proizvođač osigurao stalnu kontrolu kakvoće i koji u pošiljci imaju deklariranu tlačnu čvrstoću s 5% fraktila
   - kategoriju 2: to su oni zidni elementi koji imaju srednju vrijednost tlačne čvrstoće jednaku deklariranoj i zidni elementi od prirodnog kamena
3. Postotku šupljina izraženim omjerom obujma šupljina i bruto obujma zidnog elementa gdje razlikujemo:
   - Grupu 1
   - Grupu 2a
   - Grupu 2b
   - Grupu 3

Zahtjevi koje grupe zidnih elemenata moraju ispuniti, prikazani su Tablicom 4.4 [42].

Tablica 4.4 *Zahtjevi za grupiranje zidnih elemenata*

	Grupe zidnih elemenata			
	1	2a	2b	3
Obujam šupljina (% bruto obujma)[1]	≤ 25	25 - 45 za opečne zidne elemente 25 - 50 za betonske zidne elemente	45 - 55 za opečne zidne elementa 50 - 60 za betonske zidne elemente[2]	≤ 70
Obujam bilo koje šupljine (% bruto obujma)	≤ 12,5	≤ 12,5 za opečne zidne elemente ≤ 25 za betonske zidne elemente	≤ 12,5 za opečne zidne elemente ≤ 25 za betonske zidne elemente	Ograničena ploštinom (vidi dolje)
Ploština bilo koje šupljine	Ograničena obujmom (vidi gore)	Ograničena obujmom (vidi gore)	Ograničena obujmom (vidi gore)	≤ 2800 mm^2, osim za zidne elemente s jednom šupljinom kada je šupljina ≤ 1800 mm^2
Kombinirana debljina (% ukupne širine)[3]	≥ 37,5	≥ 30	≥ 20	Nema zahtjeva

[1] Šupljine mogu biti vertikalne kroz zidni element, utor ili niše.
[2] Ako iskustvo na razini države, utemeljeno na ispitivanjima, potvrđuje da sigurnost ziđa nije neprihvatljivo smanjena kad postoji veći postotak šupljina, ograničenje od 55% za opečne i 60% za betonske zidne elementa može se povećati za zidne elementa koji se rabe u zemlji koja ima takvo iskustvo.
[3] Kombinirana debljina je debljina unutarnje i vanjske stijenke mjerena horizontalno na zidnom elementu pod pravim kutom na lice zida.

Razmještaj šupljina u zidnim elementima treba biti takav da nema rizika od stvaranja pukotina u stjenkama prilikom proizvodnje, rukovanja ili uporabe, pri čemu debljina vanjske stjenke ne bi smjela biti manja od 15 *mm* [50].

Tehnička svojstva zidnih elemenata određuju se prema normama specifikacija ili na temelju normiranih ispitivanja za svaki tip proizvoda zasebno, različito za pojedine zidne elemente. Međutim, kako tehnička svojstva ovise o konačnoj namjeni elementa u samoj građevini, uglavnom se ista tehnička svojstva moraju definirati za sve zidne elemente i to:

- izmjere i odstupanja
- oblici zidnih elemenata
- obujamska masa, bruto i neto

- čvrstoća: tlačna čvrstoća, vlačna čvrstoća pri savijanju, čvrstoća prionjivosti
- toplinska svojstva
- trajnost – preko otpornosti na zamrzavanje/odmrzavanje
- vodoupojnost
- sadržaj topljivih soli
- kretanje vlage
- reakcija na požar
- paropropusnost

Specifikacije svojstava zidanih elemenata ovise o zahtijevanim svojstvima samog ziđa. Tehnička svojstva i zahtjevi za zidane elementa navedeni su u odgovarajućoj normi za proizvod, a određuju se u skladu s ispitnim metodama ili drugim postupcima, uglavnom pozivajući se na određenu normu koja to definira. Iako su normirane, ispitne metode nisu obično primjenljive na posebno oblikovane elemente. Ispitivanja zidnih elemenata provode se prema normama niza *HRN EN 772:2004* [51].

4.4.1. Izmjere zidnih elemenata i odstupanja

Izmjere zidnih elemenata daju se kao radne veličine u *mm* za duljinu, širinu i visinu upravo tim redom. Uz svaku vrstu zidnih elemenata daje se i razred dopuštenih odstupanja srednjih vrijednosti i dodatno, ukoliko je potrebno, raspon razreda za zidane elemente pojedine pošiljke. Odstupanja se definiraju u odgovarajućoj normi kao srednja vrijednost i raspon dane izmjere. Razlika svih izmjera objavljene vrijednosti i srednje vrijednosti dobivene iz mjerenja ispitnih uzoraka ne smije biti veća od objavljene vrijednosti za određene razrede odstupanja. Vrijednosti se zaokružuju na cijeli *mm*, a definirane su u razrede kao mjera izmjere radne veličine i apsolutna vrijednost (Tablica 4.5). Kao kriterij, uzima se veća vrijednost.

Tablica 4.5 *Razredi dopuštenih odstupanja srednjih vrijednosti izmjera zidnog elementa* [52]

Razred odstupanja	Dopušteno odstupanje srednjih vrijednosti izmjera
T1	± 0,40·√(radne izmjere) mm ili 3 mm, ovisno o tome što je veće
T1+	± 0,40·√(radne izmjere) mm ili 3 mm za duljinu i širinu, ovisno o tome što je veće ± 0,05·√(radne izmjere) mm ili 1 mm za visinu, ovisno o tome što je veće
T2	± 0,25·√(radne izmjere) mm ili 2 mm, ovisno o tome što je veće
T2+	± 0,25·√(radne izmjere) mm ili 2 mm za duljinu i širinu, ovisno o tome što je veće ± 0,05·√(radne izmjere) mm ili 1 mm za visinu, ovisno o tome što je veće

Odstupanje u *mm* (*Tm*), koje objavi proizvođač, može biti veće ili manje od drugih razreda. Najveći raspon dane izmjere, razlika je između najveće i najmanje određene izmjere na pojedinom elementu (Tablica 4.6). Raspon (*Rm*) u *mm,* koji objavi proizvođač, može biti veći ili manji od drugih razreda.

Tablica 4.6 *Razredi najvećih raspona danih izmjera* [52]

Razred raspona	Najveći raspon izmjere
R1	0,6·√(radne izmjere) mm
R1+	0,6·√(radne izmjere) mm za duljinu i širinu i 1,0 *mm* za visinu
R2	0,3·√(radne izmjere) mm
R2+	0,3·√(radne izmjere) mm za duljinu i širinu i 1,0 mm za visinu

Odabir uzoraka, određivanje izmjera i odstupanja provedeno je u skladu s normom, a rezultati su prikazani u Tablici 4.7. Zbog jednostavnosti raspoznavanja vrste zidnih elemenata, uvedene su sljedeće oznake: (1) *b* – glineni blok s vertikalnim šupljinama i (2) *o* – glinena opeka.

Tablica 4.7 *Izmjere odabranih zidnih elemenata*

Ispitni uzorak	l_u [*mm*]	w_u [*mm*]	h_u [*mm*]	Razred odstupanja	Razred raspona	Stijenka [*mm*]	Rebro [*mm*]	Šupljina [*mm*]
b_1	250,0	117,0	91,5	*T1*	*R1*	11,4	6,8	90,0
b_2	249,0	117,0	93,5	*T1*	*R1+*	11,6	7,0	92,5
b_3	249,5	116,5	92,5	*T1*	*R1*	11,4	7,0	91,5
b_4	249,0	117,5	92,0	*T1*	*R2+*	11,4	7,0	91,5
b_5	250,5	117,5	91,5	*T1*	*R1*	11,6	7,0	91,0
b_6	250,0	117,0	92,0	*T1*	*R1*	11,8	7,2	90,5
b_7	249,0	117,5	92,0	*T1*	*R2*	11,6	7,0	90,0
b_8	250,0	116,0	91,5	*T1*	*R1*	11,2	6,8	89,5
b_9	249,0	117,0	94,0	*T1+*	*R2+*	11,4	7,0	92,5
b_10	250,5	116,5	92,5	*T1*	*R1*	11,4	7,2	91,0
Srednja vrijednost	249,5	117,0	92,0	*T1*	*R1*	11,5	7,0	91,0
o_1	247,5	123,0	63,0	*T2*	*R2*	-	-	-
o_2	248,5	123,5	62,5	*T1*	*R1*			
o_3	248,0	123,0	62,5	*T1*	*R1*			
o_4	247,0	122,0	63,0	*T1*	*R2*			
o_5	247,5	123,0	62,5	*T1*	*R2*			
o_6	248,5	123,5	63,0	*T2*	*R1*			
o_7	247,0	123,5	63,0	*T2*	*R1*			
o_8	248,0	123,0	62,5	*T1*	*R1*			
o_9	247,5	122,5	63,0	*T2*	*R1*			
o_10	247,5	123,0	63,0	*T1*	*R2*			
Srednja vrijednost	247,5	123,0	63,0	*T1*	*R1*	-	-	-

4.4.2. Grupiranje zidnih elemenata

Zidni elementi svrstavaju se u grupe ovisno o postotku šupljina izraženim omjerom bruto šupljina i bruto obujma zidnog elementa. Grupe su definirane normom *HRN ENV 1996-1-1* [42], a određivanje pripadne grupe zidnih elemenata određeno je na istim uzorcima na kojima su određene i izmjere. Svrstavanje u pripadnu grupu izvršeno je prema zahtjevima danim u Tablici 4.2. Glinena opeka svrstana je u Grupu 1, a glineni blok s vertikalnim šupljinama u Grupu 2b (Tablica 4.8).

Tablica 4.8 *Grupiranje zidnih elemenata*

Ispitni uzorak	l_u [*mm*]	w_u [*mm*]	h_u [*mm*]	Bruto obujam V_{gu} [mm^3]·10^4	Obujam šupljina V_{vu} [mm^3]·10^4	Postotak šupljina (V_{vu}/V_{gu})·100 [%]
b_1	250,0	117,0	91,5	268	135	50
b_2	249,0	117,0	93,5	272	136	50
b_3	249,5	116,5	92,5	269	135	50
b_4	249,0	117,5	92,0	269	135	50
b_5	250,5	117,5	91,5	269	135	50
b_6	250,0	117,0	92,0	269	136	51
b_7	249,0	117,5	92,0	269	135	50
b_8	250,0	116,0	91,5	265	134	51
b_9	249,0	117,0	94,0	274	139	51
b_10	250,5	116,5	92,5	270	138	51
Srednja vrijednost	249,5	117,0	92,0	269	136	50
Grupa elemenata	2b					

4.4.3. Tlačna čvrstoća zidnih elemenata

Tlačna čvrstoća zidnih elemenata određuje se u skladu s normom *HRN EN 772-1* [53], a prilikom proračuna koristi se tzv. *normalizirana tlačna čvrstoća* f_b. To je tlačna čvrstoća zidnog elementa prevedena na tlačnu čvrstoću na zraku sušenog zidnog elementa širine i visine od 100 *mm*. Određuje se na način da se srednja tlačna čvrstoća pomnoži s faktorom oblika δ^* i faktorom pretvorbe. Faktor oblika δ^* ovisi o širini i visini zidnog elementa (Tablica 4.9) dok faktor pretvorbe ovisi o načinu njege uzoraka (Tablica 4.10).

Zidni elementi trebaju imati minimalnu srednju tlačnu čvrstoću u iznosu od 4,0 N/mm^2 u smjeru okomitom na naliježuću površinu i 2,0 N/mm^2 u horizontalnom smjeru.

Tablica 4.9 *Vrijednosti faktora oblika δ** [53]

Visina zidnog elementa [*mm*]	Najmanja horizontalna dimenzija zidnog elementa [*mm*]											
	50	75	90	100	115	125	140	150	200	215	225	>250
40	0,80	0,75	0,72	0,70	-	-	-	-	-	-	-	-
50	0,85	0,80	0,77	0,75	0,74	0,73	0,71	0,70	-	-	-	-
65	0,95	0,90	0,87	0,85	0,82	0,80	0,77	0,75	0,70	0,69	0,68	0,65
100	1,15	1,08	1,03	1,00	0,97	0,95	0,92	0,90	0,80	0,79	0,78	0,75
140	1,27	1,22	1,18	1,16	1,13	1,11	1,08	1,06	0,96	0,95	0,94	0,91
150	1,30	1,25	1,22	1,20	1,17	1,15	1,12	1,10	1,00	0,99	0,98	0,95
190	1,42	1,37	1,34	1,32	1,29	1,27	1,24	1,22	1,12	1,11	1,10	1,07
200	1,45	1,40	1,37	1,35	1,32	1,30	1,27	1,25	1,15	1,14	1,13	1,10
215	1,48	1,43	1,40	1,38	1,35	1,33	1,30	1,28	1,18	1,16	1,15	1,12
>250	1,55	1,50	1,47	1,45	1,42	1,40	1,37	1,35	1,25	1,22	1,20	1,15

Tablica 4.10 *Vrijednosti faktora pretvorbe* [53]

Njegovanje uzorka	Faktor pretvorbe
Sušenje na zraku	1,0
Sušenje u sušioniku	1,0
Do 6% sadržaja vlage	0,8
Uranjanjem u vodu	1,2

Nakon određivanja izmjera i grupa zidnih elemenata, nasumično je odabrano šest uzoraka od oba tipa zidnih elemenata predviđenih za određivanje tlačne čvrstoće. Naliježuće površine uzoraka obrađene su cementnim mortom volumnih omjera komponenata 1:3 (cement:pijesak), a uzorci su njegovani uranjanjem u vodu 15 sati prije ispitivanja. S obzirom na dimenzije i njegu uzoraka, usvojene su sljedeće vrijednost koeficijenta oblika i faktora pretvorbe:

- za glinenu opeku usvojen je koeficijent oblika u iznosi od 0,80 i faktor pretvorbe u iznosu od 1,2,
- za glineni blok s vertikalnim šupljinama usvojen je koeficijent oblika u iznosi od 0,94 i faktor pretvorbe u iznosu od 1,2.

Vrijednosti čvrstoća morta za izravnavanje prikazane su Tablicom 4.11 dok su rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće zidnih elemenata i pripadna normalizirana tlačna čvrstoća prikazani Tablicom 4.12.

Tablica 4.11 *Rezultati ispitivanja morta za izravnavanje*

Ispitni uzorak	Vlačno ispitivanje			Tlačno ispitivanje					
	Sila sloma $F_{mt,i}$ $[N]\cdot10^3$	Vlačna čvrstoća $f_{mt,i}$ $[N/mm^2]$	Srednja vlačna čvrstoća f_{mt} $[N/mm^2]$	Sila sloma $F_{m,i}$ $[N]\cdot10^3$	Tlačna čvrstoća $f_{m,i}$ $[N/mm^2]$	Srednja tlačna čvrstoća f_m $[N/mm^2]$	Standardno odstupanje s^*		Koeficijent varijacije V^* [%]
cm_1	1,3	3,05	3,3	80	50,00	49,7	0,3	2,74	5,51
				85	53,15		3,45		
cm_2	1,4	3,30		78	48,75		0,95		
				72	45,00		4,7		
cm_3	1,5	3,50		80	50,00		0,3		
				82	51,25		1,55		

Tablica 4.12 *Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće zidnih elemenata*

Ispitni uzorak	Sila sloma F_{mc} $[N]$	Ploština A_{mc} $[mm^2]$	Tlačna čvrstoća $f_{mc,i}$ $[N/mm^2]$	Srednja vrijednost f_{mc} $[N/mm^2]$	Standardno odstupanje s^*		Koeficijent varijacije V^* [%]
b_2	540000	29133	18,5	18,8	0,3	1,57	8,35
b_3	480000	29067	16,5		2,3		
b_5	520000	29434	17,7		1,1		
b_7	580000	29257	19,8		1		
b_8	600000	29000	20,7		1,9		
b_10	580000	29183	19,9		1,1		
Normalizirana tlačna čvrstoća f_b $[N/mm^2]$				21,1			
o_3	510000	30504	16,7	20,4	3,7	3,01	14,75
o_4	620000	30134	20,6		0,2		
o_6	590000	30690	19,2		1,2		
o_7	750000	30505	24,6		4,2		
o_9	700000	30319	23,1		2,7		
o_10	570000	30443	18,7		2,3		
Normalizirana tlačna čvrstoća f_b $[N/mm^2]$				19,6			

5. ISPITIVANJE SVOJSTAVA ZIDANOG ISPUNA

5.1. Mehanička svojstva zidanog ispuna

Mehanička svojstva zidanog ispuna pod izravnim su utjecajem svojstava zidnih elemenata i morta, a važna su pri zadovoljavanju 1. bitnog zahtjeva, mehaničke otpornosti i stabilnosti građevine u skladu s Direktivom za građevne proizvode. Mogu se odrediti analitički ili ispitivanjima na uzorcima u skladu s normom niza *HRN EN 1052:2004* [55], a ona su sljedeće:

- tlačna čvrstoća,
- čvrstoća na savijanje,
- početna posmična čvrstoća.

Iako norma *HRN EN 1052:2004* ne propisuje metodu određivanje vlačne čvrstoće uzoraka zidanog ispuna, ista se može odrediti iz tzv. *dijagonalnog tlačnog ispitivanja* prema preporukama danim u *ASTM E519-E519M-10* propisu [56]. Preporučenom metodom moguće je odrediti i posmičnu čvrstoću te modul posmika uzoraka zidanog ispuna.

5.1.1. Tlačna čvrstoća

Tlačna čvrstoća uzoraka zidanog ispuna određuje se ispitivanjem u skladu s normom *HRN EN 1052-1* [57], a prilikom proračuna koristi se tzv. *karakteristična tlačna čvrstoća* f_k. Karakteristična tlačna čvrstoća definira se na temelju srednje tlačne čvrstoće ispitnih uzoraka f_i' ili kao najmanja pojedinačna vrijednost tlačne čvrstoće iz grupe ispitnih uzoraka $f_{i,min}$, prema (5.1) ili (5.2). Mjerodavna je manja vrijednost i zaokružuje se na najbližih 0,1 N/mm^2:

$$f_k = \frac{f_i'}{1{,}2} \tag{5.1}$$

$$f_k = f_{i,\min} \tag{5.2}$$

Srednja tlačna čvrstoća f_i' određuje se na temelju pojedinačnih tlačnih čvrstoća ispitnih uzoraka definiranih izrazom (5.3):

$$f_i = \frac{F_{i,\max}}{A_i^*} \tag{5.3}$$

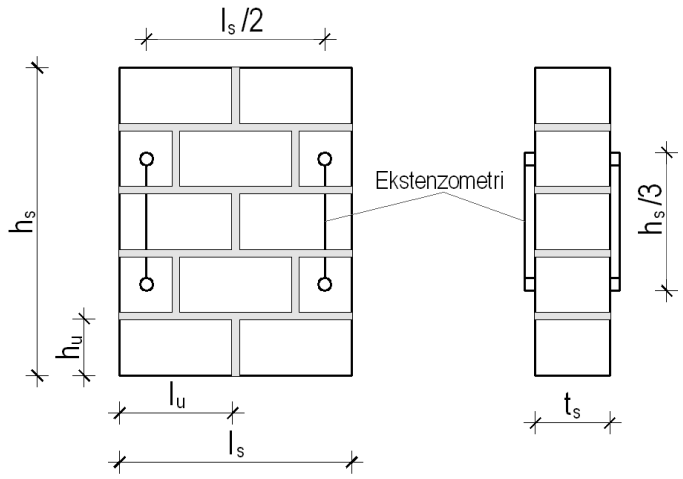
gdje je $F_{i,max}$ - najveće opterećenje pojedinog ispitnog uzorka [*N*]

A_i^* - opterećena bruto ploština pojedinog uzorka [mm^2]

Prilikom izrade uzoraka za ispitivanje potrebno je osigurati određene izmjere. Vrijednosti i međusobne ovisnosti izmjera prikazane su Tablicom 5.1, a izgled uzorka Slikom 5.1.

Tablica 5.1 *Izmjere ispitnih uzoraka za ispitivanje tlačne čvrstoće zidanog ispuna* [57]

Izmjera lica zidnog elementa		Izmjera ispitnog uzoraka			
		Duljina	Visina		Debljina
l_u[*mm*]	h_u [*mm*]	l_s	h_s		t_s
< 300	< 150	≥ $(2 \cdot l_u)$	≥ $5 \cdot h_u$	≥ $3 \cdot t_s$ i ≤$15 \cdot t_s$ i ≥ l_s	≥ t_u
	> 150		≥ $3 \cdot h_u$		
>300	< 150	≥ $(1{,}5 \cdot l_u)$	≥ $5 \cdot h_u$		
	> 150		≥ $3 \cdot h_u$		



Slika 5.1 *Ispitni uzorak zidanog ispuna* [58]

Od svakog tipa zidanog ispuna napravljena su i ispitana po četiri uzorka. Debljine horizontalnih reški u uzorcima su približno jednake i iznose oko 1 *cm*. Uzorci su izvedeni s potpuno popunjenim vertikalnim reškama i njegovani na zraku 28 dana. Opteretne plohe uzoraka obrađene su istim mortom kojim su i zidani uzorci. Ispitivanje je provedeno postepenim povećanjem tlačne sile do maksimalnog iznosa uz kontinuirano mjerenje vrijednosti sile i pomaka u mjernim točkama na oplošju uzoraka. Opterećenje *bpm* i *cpm* uzoraka zidanog ispuna nanošeno je ručno pomoću hidrauličke preše marke *Yale* kapaciteta 350 kN, uz vizualnu kontrolu unosa opterećenja, dok je opterećenje uzoraka *bvm* i *cvm* nanošeno kontrolom pomaka pomoću kidalice marke *Shimadzu* (*Trapezium AG-X*) kapaciteta 250 *kN.* Mjerenje pomaka u mjernim točkam izvršeno je pomoću četiriju linearnih varijabilnih diferencijalnih

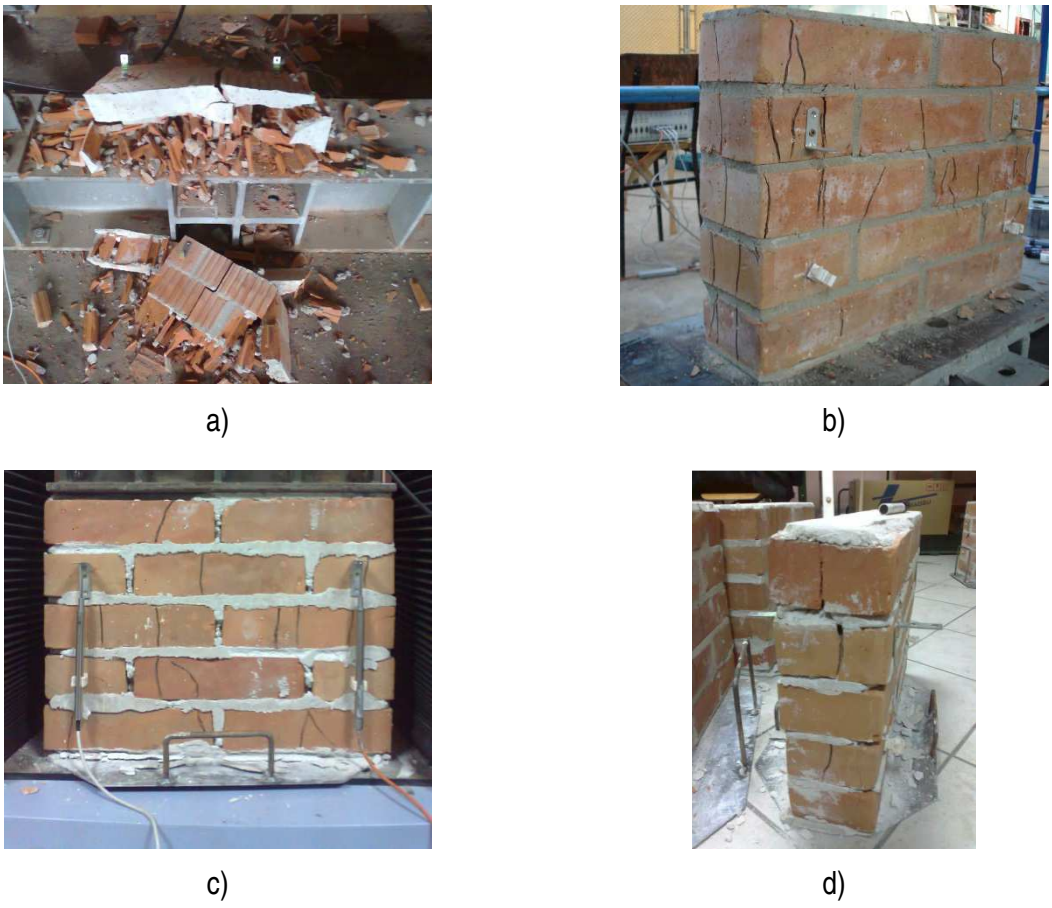
pretvarača marke *Waycom* s mjernom duljinom u iznosu od 50 *mm*. Vrijednosti tlačne čvrstoće pojedinih ispitnih uzoraka određeni su pomoću izraza (5.3) i prikazani u Tablici 5.2.

Tablica 5.2 *Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće uzoraka zidanog ispuna*

Ispitni uzorak	Sila sloma F_i [N]	Ploština A_i* [mm^2]	Tlačna čvrstoća $f_{i,i}$ [N/mm^2]	Srednja vrijednost f_i' [N/mm^2]	Standardno odstupanje s*		Koeficijent varijacije V* [%]
bpm_1	296211	59670	5,0	4,6	0,4	0,53	11,62
bpm_2	262638		4,4		0,2		
bpm_3	230233		3,9		0,7		
bpm_4	300889		5,0		0,2		
Karakteristična tlačna čvrstoća f_k [N/mm^2]				3,8			
cpm_1	288116	61500	4,7	5,2	0,5	0,51	9,07
cpm_2	297524		5,0		0,2		
cpm_3	304850		5,1		0,1		
cpm_4	361938		5,9		0,7		
Karakteristična tlačna čvrstoća f_k [N/mm^2]				4,3			
bvm_1	564332	59670	0,95	0,81	0,14	0,10	12,38
bvm_2	484992		0,81		0		
bvm_3	454576		0,76		0,05		
bvm_4	432793		0,72		0,09		
Karakteristična tlačna čvrstoća f_k [N/mm^2]				0,68			
cvm_1	238377	61500	3,9	3,5	0,4	0,94	27,05
cvm_2	260016		4,2		1,3		
cvm_3	191573		3,1		0,4		
cvm_4	169048		2,7		0,8		
Karakteristična tlačna čvrstoća f_k [N/mm^2]				2,9			

Mehanizam sloma uzoraka znatno se razlikovao ovisno o vrsti zidanog ispuna. Prilikom ispitivanja uzorka *bpm_1* došlo je do naglog eksplozivnog otkazivanja tlačne nosivosti bez pojave vidljivih pukotina. Neposredno prije otkazivanja nosivosti čuo se specifičan pucketav zvuk. Ostali *bpm* uzorci ispitivani su do pojave pucketavog zvuka nakon čega je otpuštena tlačna sila kako bi se spriječilo eventualno oštećenje mjernih instrumenata i ozljede osoblja uslijed eksplozije uzoraka. Mehanizam sloma *cpm* serije uzoraka jednak je za sve pojedine uzorke. Pri dosezanju približno 50% maksimalnog tlačnog opterećenja, došlo je do pojave prvih vidljivih pukotina koje su se pružale u smjeru kontakta zidnih elemenata i morta, horizontalno i vertikalno. Nakon prvih pukotina dolazi do pojave vertikalnih pukotina u zidnim elementima koje su većinom produžetak pukotina na kontaktu zidnih elemenata i morta. Pri dosezanju približno 80% maksimalnog tlačnog opterećenja dolazi do pojave vertikalnih pukotina na bočnim strana uzoraka i otpadanja površinskih slojeva zidnih elemenata na oba lica

uzorka, čime je određena i sama nosivost uzorka. Prilikom ispitivanja *bvm* i *cvp* uzoraka uočen je identičan trend ponašanja u ovisnosti o vrsti zidnih elemenata.



a) b)

c) d)

Slika 5.2 *Mehanizmi sloma uzoraka zidane ispune pri tlačnom opterećenju*

Ukoliko nije moguće eksperimentalno odrediti karakterističnu tlačnu čvrstoću zidanog ispuna, norma *HRN ENV 1996:2007* [42] definira izraze u ovisnosti o vrsti morta, grupi i vrsti zidnih elemenata, temeljene na tlačnim čvrstoćama navedenih konstituenata zidanog ispuna. U slučaju ispuna zidanog u mortu opće namjene, karakteristična tlačna čvrstoća određuje se pomoću izraza (5.4):

$$f_k = K \cdot f_b^{0,7} \cdot f_m^{0,3} \tag{5.4}$$

gdje je K – konstanta koja ovisi o tipu zidnih elemenata i načinu izvedbe ziđa (Tablica 5.3)

f_b –normalizirana tlačna čvrstoća zidnih elemenata u N/mm^2

f_m – tlačna čvrstoća morta za opću namjenu u N/mm^2

Karakteristična tlačna čvrstoća ispuna zidanog u tankoslojnom mortu s glinenim zidnim elementima Grupe 1 i 4, vapnenosilikatnim zidnim elementima ili zidnim elementima od porastog betona određuje se prema izrazu (5.5):

$$f_k = K \cdot f_b^{0,85} \tag{5.5}$$

Karakteristična tlačna čvrstoća ispuna zidanog u tankoslojnom mortu sa zidnim elementima Grupe 2 i 3 određuje se prema izrazu (5.6):

$$f_k = K \cdot f_b^{0,7} \tag{5.6}$$

Tablica 5.3 *Vrijednosti konstante K za proračun karakteristične tlačne čvrstoće zidanog ispuna*

Zidni elementi		Mort opće namjene	Tankoslojni mort	Lakoagregatni mort	
				600 <ρ< 800 *kg/m³*	800 <ρ< 1300 *kg/m³*
Glineni	Grupa 1	0,55	0,75	0,3	0,4
	Grupa 2	0,45	0,7	0,25	0,3
	Grupa 3	0,35	0,5	0,2	0,25
	Grupa 4	0,35	0,35	0,2	0,25
Vapnenosilikatni	Grupa 1	0,55	0,8	X	X
	Grupa 2	0,45	0,65	X	X
Betonski	Grupa 1	0,55	0,8	0,45	0,45
	Grupa 2	0,45	0,65	0,45	0,45
	Grupa 3	0,4	0,5	X	X
	Grupa 4	0,35	X	X	X
Porobetonski	Grupa 1	0,55	0,8	0,45	0,45
X - Kombinacija mort/zidni element se ne koristi					

Prema [42] vrijednost konstante *K,* svaka se država može prilagoditi svojim uvjetima, a izrazi od (5.4) do (5.6) mogu se primijeniti ako su zadovoljeni sljedeći uvjeti:

- normalizirana tlačna čvrstoća zidnih elemenata f_b nije veća od 75 *N/mm²* pri izvedbi ispuna s mortom opće namjene,
- normalizirana tlačna čvrstoća zidnih elemenata f_b nije veća od 50 *N/mm²* pri izvedbi ispuna s tankoslojnim mortom,
- srednja vrijednost tlačne čvrstoće morta nije veća od 20 *N/mm²*, niti veća od $2 \cdot f_b$ u ispunu zidanom mortom opće namjene,
- srednja vrijednost tlačne čvrstoće morta nije veća od 10 *N/mm²* u ispunu zidanomtankoslojnim mortom,

- debljina ispune jednaka je duljini ili širini zidnog elementa tako da u ispunu nema reški morta koje su paralelne s licem zida,
- reške u ispunu izvedenom s mortom opće namjene i lakoagregatnim mortom nemaju debljinu manju od 6 *mm*, niti veću od 15 *mm*,
- reške u ispunu izvedenom s tankoslojnim mortom nemaju debljinu manju od 0,5 *mm*, niti veću od 3 *mm* i
- zadovoljeni uvjeti iz *Poglavlja 8 HRN EN 1996* kojima se definiraju detalji izvedbe ziđa.

5.1.2. Početna posmična čvrstoća

Početna posmična čvrstoća zidanog ispuna određuje se iz čvrstoće ispitnih uzoraka opterećenjem do sloma. Ispitni se uzorci ispituju na posmik opterećenjem u četirima točkama s predtlačenjem okomito na reške, sukladno s normom *HRN EN 1052-3:2004* [59], prilikom čega se razmatraju četiri načina sloma uzoraka koja daju valjane rezultate. Početna posmična čvrstoća određuje se linearnom krivuljom interpolacije u odnosu na nulto normalno naprezanje. Za svaki ispitni uzorak proračunava se posmična čvrstoća i naprezanje predtlačenja do najbližih 0,01 N/mm^2 primjenom izraza (5.7) i (5.8). Iznos sile predtlačenja ovisan je o tlačnoj čvrstoći zidnih elemenata:

$$f_{v,i} = \frac{F_{v,\max}}{2A_i} \tag{5.7}$$

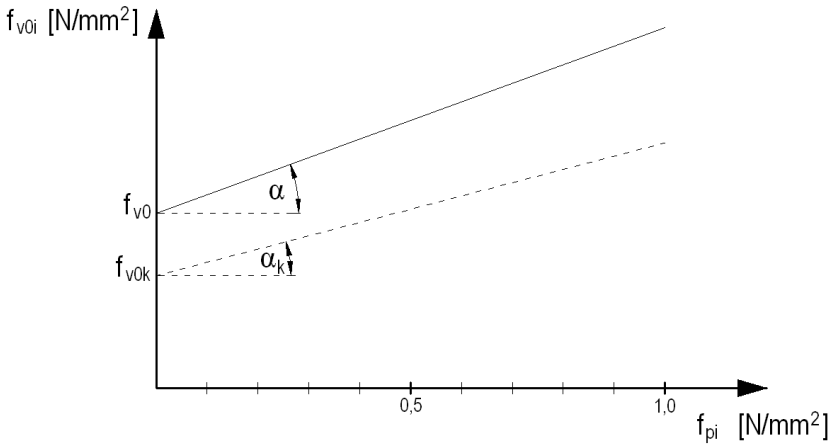
$$f_{pi} = \frac{F_{pi}}{A_i} \tag{5.8}$$

gdje je $F_{v,max}$ – maksimalna posmična sila [N]

F_{pi} – sila predtlačenja [N]

A_i – ploština poprečnog presjeka ispitnog uzorka paralelno s reškama [mm^2]

Nakon što se nacrtaju točke definirane parovima vrijednosti pojedinih posmičnih čvrstoća $f_{v,i}$ i pripadnih tlačnih naprezanja $f_{p,i}$, određuje se pravac iz linearne regresije točaka prema Slici 5.3 (Mohr-Coulombov zakon). Početna posmična čvrstoća f_{v0}, pri nultom normalnom naprezanju, određena je sjecištem linearne interpolacije definiranog pravca i vertikalne osi (apscise). Kut unutarnjeg trenja μ određen je nagibom pravca u odnosu na horizontalnu os. Vrijednost početne posmične čvrstoće zaokružuje se na 0,01 N/mm^2, a kut unutarnjeg trenja μ do najbližeg cijelog stupnja.



Slika 5.3 *Posmična čvrstoća i kut unutarnjeg trenja (Mohr-Coulombov zakon)*

Karakteristična vrijednost početne posmične čvrstoće f_{v0k} i kuta unutarnjeg trenja $\tan\mu_k$ određuje se pomoću izraza (5.9) i (5.10):

$$f_{v0k} = 0{,}8 \cdot f_{v0} \tag{5.9}$$

$$\tan\mu_k = 0{,}8 \cdot \tan\mu \tag{5.10}$$

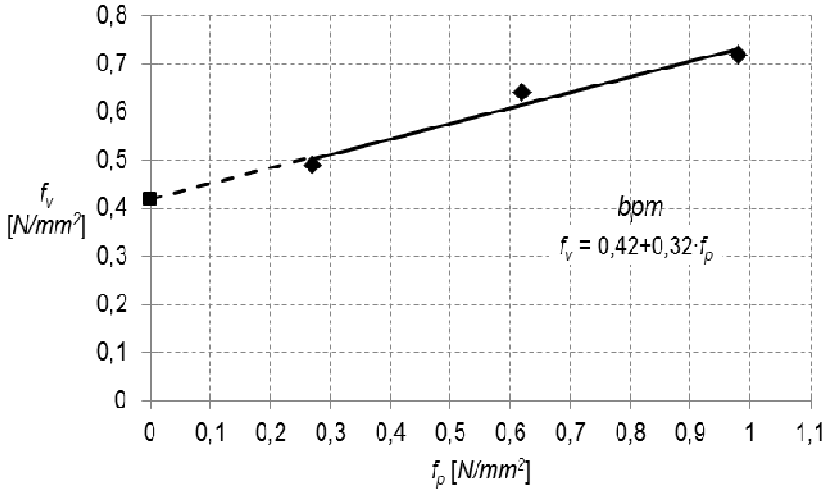
Izvedba i ispitivanje uzoraka provedeno je prema preporukama danim u [59]. Za svaku razinu predtlačenja izvedena su po tri uzorka, a opterećenje je nanošeno ručno pomoću hidrauličkih preša marke *Yale* kapaciteta 350 *kN*. Prikaz ispitnih uzoraka dan je Slikom 5.4 a) za uzorke sa šupljim glinenim zidnim elementima i b) za uzorke od glinene opeke. Vrijednost sile predtlačenja nije bilo moguće zadržati konstantnom tijekom cijelog ispitivanja. Rezultati ispitivanja prikazani su Tablicama 5.4-5.7, ovisno o tipu zidane ispune gdje je vrijednost naprezanja predtlačenja određena za svaki pojedinačni uzorak zasebno. Linearna regresija i interpolacija rezultata ispitivanja prikazana je Slikama 5.5-5.8.

a) b)

Slika 5.4 *Prikaz ispitnih uzoraka, a) šuplji glineni elementi* i *b) glinena opeka*

Tablica 5.4 *Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće bpm uzoraka zidanog ispuna*

Ispitni uzorak	Sila predtlačenja F_{pi} $[N]\cdot10^3$	Posmična sila pri slomu $F_{i,max}$ $[N]\cdot10^3$	Ploština poprečnog presjeka A_i $[mm^2]$	Normalno naprezanje $f_{p,i}$ $[N/mm^2]$	Posmično naprezanje $f_{v,i}$ $[N/mm^2]$
bpm_1	9,73	31,73	29191	0,33	0,54
bpm_2	5,81	28,41		0,20	0,49
bpm_3	8,15	24,91		0,28	0,43
Srednja vrijednost				0,27	0,49
bpm_1	17,08	36,54	29191	0,59	0,63
bpm_2	17,75	29,47		0,61	0,50
bpm_3	19,77	45,26		0,68	0,78
Srednja vrijednost				0,63	0,64
bpm_1	28,75	39,91	29191	0,98	0,68
bpm_2	28,91	46,89		0,99	0,80
bpm_3	28,52	40,90		0,98	0,70
Srednja vrijednost				0,98	0,73
Srednja vrijednost početne posmične čvrstoće f_{v0} $[N/mm^2]$				0,42	
Karakteristična vrijednost početne posmične čvrstoće f_{v0k} $[N/mm^2]$				0,34	
Srednja vrijednost kuta unutarnjeg trenja $tg\mu$ [°]				0,32	
Karakteristična vrijednost kuta unutarnjeg trenja $tg\mu_k$ [°]				0,26	

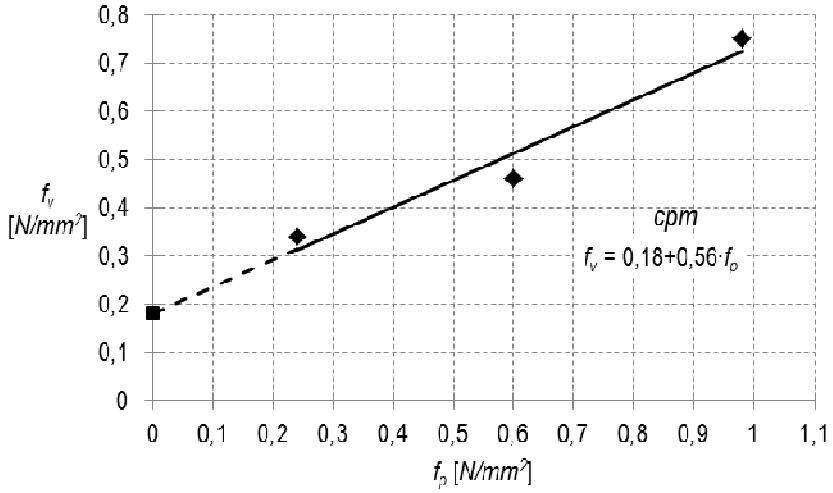


Slika 5.5 *Prikaz rezultata ispitivanja posmične čvrstoće bpm uzoraka zidanog ispuna*

Tablica 5.5 *Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće cpm uzoraka zidanog ispuna*

Ispitni uzorak	Sila predtlačenja F_{pi} $[N]\cdot10^3$	Posmična sila pri slomu $F_{i,max}$ $[N]\cdot10^3$	Ploština poprečnog presjeka A_i $[mm^2]$	Normalno naprezanje $f_{p,i}$ $[N/mm^2]$	Posmično naprezanje $f_{v,i}$ $[N/mm^2]$
cpm_1	6,48	18,32	30442	0,21	0,30
cpm_2	6,81	20,87		0,22	0,34

cpm_3	8,58	23,67		0,28	0,39
Srednja vrijednost				0,24	0,34
cpm_1	17,50	26,28	30442	0,57	0,43
cpm_2	18,19	20,79		0,60	0,34
cpm_3	19,53	37,76		0,64	0,62
Srednja vrijednost				0,60	0,46
cpm_1	32,02	51,28	30442	1,05	0,84
cpm_2	28,82	42,77		0,95	0,70
cpm_3	29,00	42,24		0,95	0,69
Srednja vrijednost				0,98	0,75
Srednja vrijednost početne posmične čvrstoće f_{v0} [N/mm^2]				0,18	
Karakteristična vrijednost početne posmične čvrstoće f_{v0k} [N/mm^2]				0,14	
Srednja vrijednost kuta unutarnjeg trenja $tg\mu$ [°]				0,56	
Karakteristična vrijednost kuta unutarnjeg trenja $tg\mu_k$ [°]				0,43	

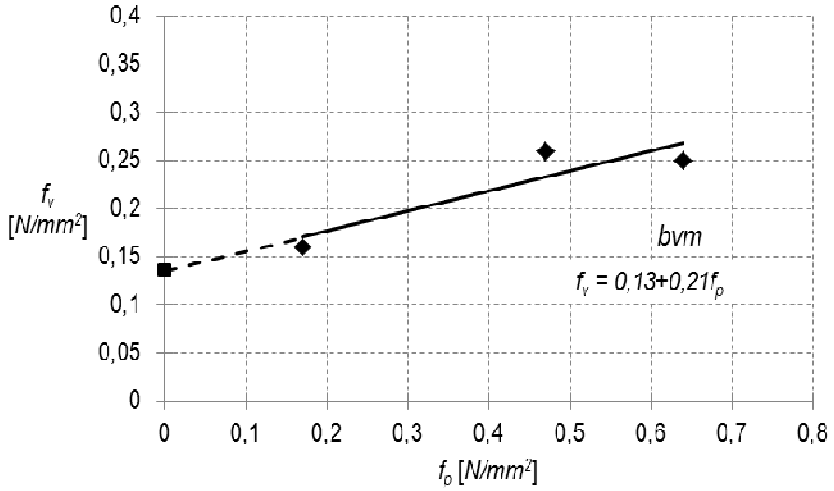


Slika 5.6 *Prikaz rezultata ispitivanja posmične čvrstoće cpm uzoraka zidanog ispuna*

Tablica 5.6 *Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće bvm uzoraka zidanog ispuna*

Ispitni uzorak	Sila predtlačenja F_{pi} [N]·10^3	Posmična sila pri slomu $F_{i,max}$ [N]·10^3	Ploština poprečnog presjeka A_i [mm^2]	Normalno naprezanje $f_{p,i}$ [N/mm^2]	Posmično naprezanje $f_{v,i}$ [N/mm^2]
bvm_1	5,17	9,21	29191	0,18	0,16
bvm_2	4,48	8,37		0,15	0,14
bvm_3	4,97	10,29		0,17	0,18
Srednja vrijednost				0,17	0,16
bvm_1	15,19	13,87	29191	0,52	0,24
bvm_2	12,70	15,09		0,44	0,26
bvm_3	12,96	16,54		0,44	0,28
Srednja vrijednost				0,47	0,26
bvm_1	15,06	14,61	29191	0,52	0,22
bvm_2	20,77	19,52		0,71	0,27

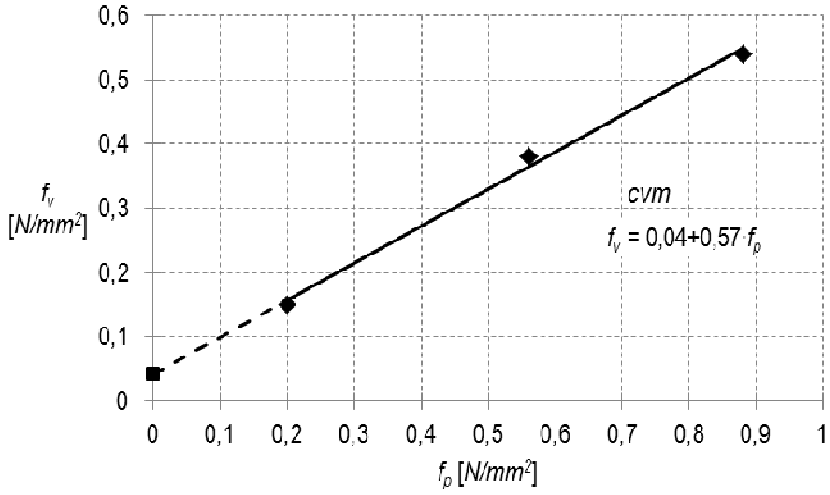
bvm_3	20,29	17,64		0,70	0,27
Srednja vrijednost				0,64	0,25
Srednja vrijednost početne posmične čvrstoće f_{v0} [N/mm^2]				0,13	
Karakteristična vrijednost početne posmične čvrstoće f_{v0k} [N/mm^2]				0,10	
Srednja vrijednost kuta unutarnjeg trenja $tg\mu$ [°]				0,21	
Karakteristična vrijednost kuta unutarnjeg trenja $tg\mu_k$ [°]				0,17	



Slika 5.7 *Prikaz rezultata ispitivanja posmične čvrstoće bvm uzoraka zidanog ispuna*

Tablica 5.7 *Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće cvm uzoraka zidanog ispuna*

Ispitni uzorak	Sila predtlačenja F_{pi} [N]·10^3	Posmična sila pri slomu $F_{i,max}$ [N]·10^3	Ploština poprečnog presjeka A_i [mm^2]	Normalno naprezanje $f_{p,i}$ [N/mm^2]	Posmično naprezanje $f_{v,i}$ [N/mm^2]
cvm_1	6,40	11,33	30442	0,21	0,19
cvm_2	6,01	8,04		0,20	0,13
cvm_3	6,13	8,94		0,20	0,15
Srednja vrijednost				0,20	0,15
cvm_1	18,21	25,12	30442	0,60	0,41
cvm_2	17,48	22,02		0,57	0,36
cvm_3	15,63	21,62		0,51	0,36
Srednja vrijednost				0,56	0,38
cvm_1	26,55	30,74	30442	0,87	0,50
cvm_2	24,99	32,58		0,82	0,54
cvm_3	28,54	35,37		0,94	0,58
Srednja vrijednost				0,88	0,54
Srednja vrijednost početne posmične čvrstoće f_{v0} [N/mm^2]				0,04	
Karakteristična vrijednost početne posmične čvrstoće f_{v0k} [N/mm^2]				0,03	
Srednja vrijednost kuta unutarnjeg trenja $tg\mu$ [°]				0,57	
Karakteristična vrijednost kuta unutarnjeg trenja $tg\mu_k$ [°]				0,46	



Slika 5.8 *Prikaz rezultata ispitivanja posmične čvrstoće cvm uzoraka zidanog ispuna*

5.1.3. Dijagonalni tlačni pokus

Dijagonalnim se tlačnim pokusom prema *ASTM E519/E519M-10* [56] određuje vlačna i posmična čvrstoća te modul posmika zidanog ispuna. Uzorci se ispituju opterećenjem u smjeru jedne dijagonale do sloma. Veličina stranica uzorka propisana je u iznosu od 1,2/1,2 *m* (*h/l*), a ukoliko kapacitet ispitnog postrojenja nije dovoljan da prihvati uzorak, dozvoljena je izvedba uzoraka manjih dimenzija, premda se ističe kako nije poznat utjecaj veličine uzoraka na rezultate ispitivanja. Dimenzije uzoraka zidanog ispuna tipa *bpm* i *cpm* određene su iz geometrijskog kapaciteta ispitnog okvira i iznose 1,0/1,0 *m* (*h/l*). Uzorci zidanog ispuna *bvm* i *cvm* izvedeni su s omjerima stranica 0,5/0,5 *m*. Navedeni omjer odabran je iz razloga što su prilikom određivanja posmične čvrstoće zidanog ispuna zabilježene male vrijednosti iste, uslijed čega je postojala opasnost od sloma uzorka pri manipulaciji. Od svakog tipa zidanog ispuna, napravljena su po četiri uzoraka.Opterećenje uzoraka nanošeno je ručno pomoću hidrauličke preše marke *Yale* kapaciteta 350 *kN* (*bpm* i *cpm* uzorci zidanog ispuna) preko posebno izvedenog čeličnog elementa kojim je ostvareno pridržanje i opterećenje uzoraka i kidalice marke *Shimadzu* (*Trapezium AG-X*) kapaciteta 250 *kN* (*bvm* uzorci zidanog ispuna) kontrolom pomaka. Deformacija uzoraka je mjerena u smjeru dijagonala pomoću dvaju linearno varijabilnih diferencijalnih pretvarača. Vlačna i posmična čvrstoća uzoraka određuje se pomoću izraza (5.11) [50] i (5.12) dok se modul posmika određuje pomoću izraza (5.13):

$$f_t = 0{,}45 \cdot \frac{F_{i,\max}}{A_n} \tag{5.11}$$

$$f_{v0} = 0,71 \cdot \frac{F_{i,\max}}{A_n} \tag{5.12}$$

gdje je $F_{i,max}$ sila pri slomu uzorka, a A_n ploština poprečnog presjeka uzorka u smjeru opterećene dijagonale.

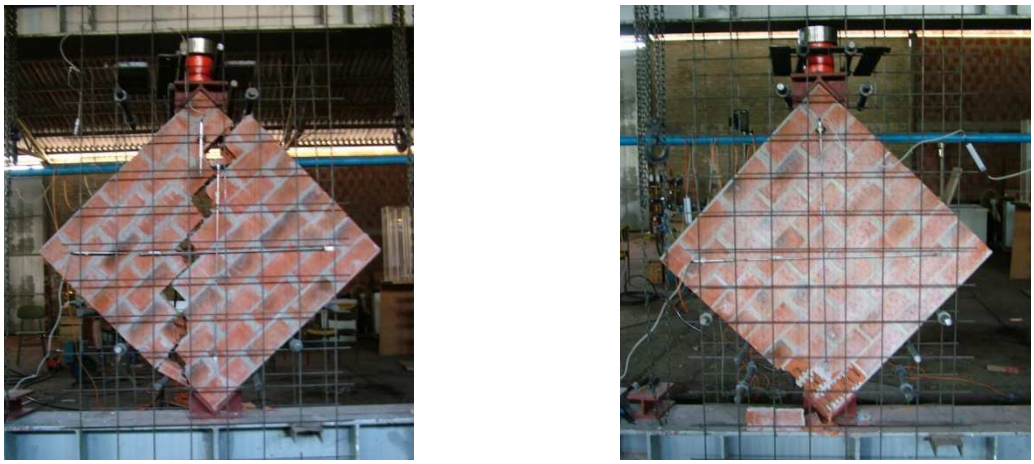
$$G = \frac{f_{v,i}}{\gamma_{v,i}} \tag{5.13}$$

Gdje je $f_{v,i}$ posmično naprezanje, a $\gamma_{v,i}$ posmična deformacija pri određenom koraku opterećenja, pri čemu se $\gamma_{v,i}$ određuje pomoću izraza (5.14):

$$\gamma_{v,i} = \frac{\Delta V_{v,i} + \Delta H_{v,i}}{g^*} \tag{5.14}$$

gdje su $\Delta V_{v,i}$ i $\Delta H_{v,i}$ skraćenje i produljenje dijagonala uzorka pri određenom koraku opterećenja, a g^* je duljina mjerne baze dijagonale.

Prilikom ispitivanja uzoraka *bpm* zidane ispune uočena su dva oblika sloma koji se mogu klasificirati kao dijagonalni slom i drobljenje uglova (Slika 5.6). Drobljenje uglova uočeno je kod triju ispitnih uzoraka te se može definirati kao dominantan oblik sloma. Provedenim ispitivanjem simulira se čisto dvoosno stanje naprezanja gdje se očekuje slom u smjeru glavnih vlačnih naprezanja, odnosno u smjer opterećene dijagonale. Na osnovi rezultati dobivenih na uzorcima, kod kojih je zabilježeno drobljenje uglova, nije moguće odrediti vlačnu i posmičnu čvrstoću zidane ispune s obzirom na razliku u odnosu na pretpostavke ispitne metode. Vlačna i posmična čvrstoća određene su samo za uzorak kod kojeg je zabilježen dijagonalni slom primjenom izraza (5.11) i (5.12) (Tablica 5.8).

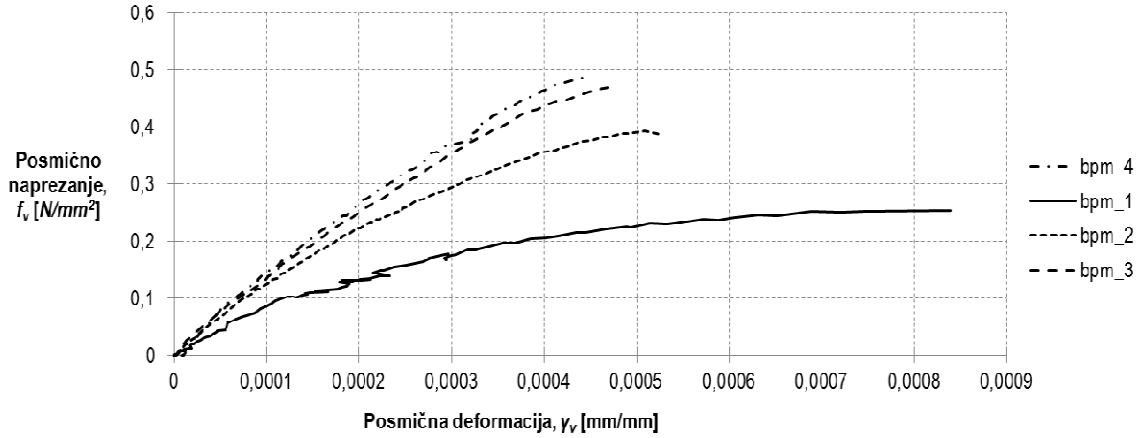


Slika 5.6 *Slom bpm uzoraka zidanog ispuna pri dijagonalnom tlaku: a) dijagonalni slom* i *b) drobljenje uglova*

Tablica 5.8 *Rezultati dijagonalno tlačnog ispitivanja bpm uzoraka zidanog ispuna*

Ispitni uzorak	Sila pri slomu, $F_{i,max}$ [*N*]	Vlačna čvrstoća, f_t [*N/mm²*]	Posmična čvrstoća, f_v [*N/mm²*]
bpm_1	41938	0,16	0,25

Ovisnost posmičnog naprezanja i posmične deformacije prikazana je na Slici 5.7 na sve ispitne uzorke *bpm* zidanog ispuna. Analizom rezultata vidljivo je duktilnije ponašanje uzorka kod koje je zabilježen dijagonalni slom. Uočene razlike nameću pitanje opravdanosti primjene navedene metode ispitivanja prilikom određivanja mehaničkih i deformacijskih karakteristika zidanog ispuna s obzirom na vidljiv utjecaj oblika sloma uzorka na rezultate ispitivanja.



Slika 5.7 *Odnos posmično naprezanje-posmična deformacija za bpm uzorke zidanog ispuna*

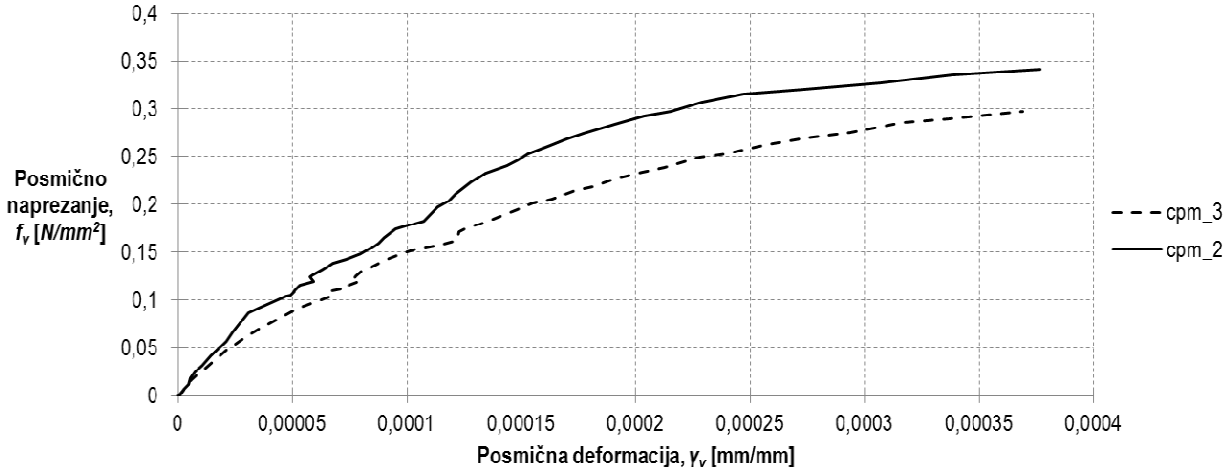
Ispitivanje *cpm* tipa zidanog ispuna provedeno je na dvama uzorcima iz razloga što je tijekom manipulacije došlo do sloma dvaju uzoraka. Slom ispitanih uzoraka *cmp* zidanog ispuna prikazan je Slikom 5.8 i može se definirati kao dijagonalni slom. Pukotine uzoraka većim se dijelom pružaju kroz reške morta što ukazuje na naglašenu ulogu čvrstoće spoja zidni element-mort na nosivost uzorka. Vlačna i posmična čvrstoća određene su za oba uzorak primjenom izraza (5.11) i (5.12), a rezultati su prikazani Tablicom 5.9.

Slika 5.8 *Slom cpm uzoraka zidanog ispuna pri dijagonalnom tlaku*

Tablica 5.9 *Rezultati dijagonalno tlačnog ispitivanja cpm uzoraka zidanog ispuna*

Ispitni uzorak	Sila pri slomu, $F_{i,max}$ [*N*]	Vlačna čvrstoća, f_t [*N/mm²*]	Posmična čvrstoća, f_v [*N/mm²*]
cpm_2	59426	0,22	0,34
cpm_3	51847	0,19	0,30

Ovisnost posmičnog naprezanja i posmične deformacije za *cpm* uzorke zidanog ispuna prikazana je Slikom 5.9. Vidljivo je približno jednako ponašanje uzoraka.



Slika 5.9 *Odnos posmično naprezanje-posmična deformacija za cpm uzorke zidanog ispuna*

Ispitivanje zidanog ispuna tipa *bvm* je provedeno na sva četiri uzorka. Slom uzoraka prikazan je Slikom 5.10, a može se definirati kao posmično-klizni slom ostvaren preko jedne ili dvije horizontalne reške morta, bez uočenih pukotina u zidnim elementima, uslijed otkazivanja čvrstoće veze zidni

element-mort. Vlačna i posmična čvrstoća uzorak određene su primjenom izraza (5.11) i (5.12), a rezultati su prikazani u Tablici 5.10.

a) *bvm_1*

b) *bvm_2*

c) *bvm_3*

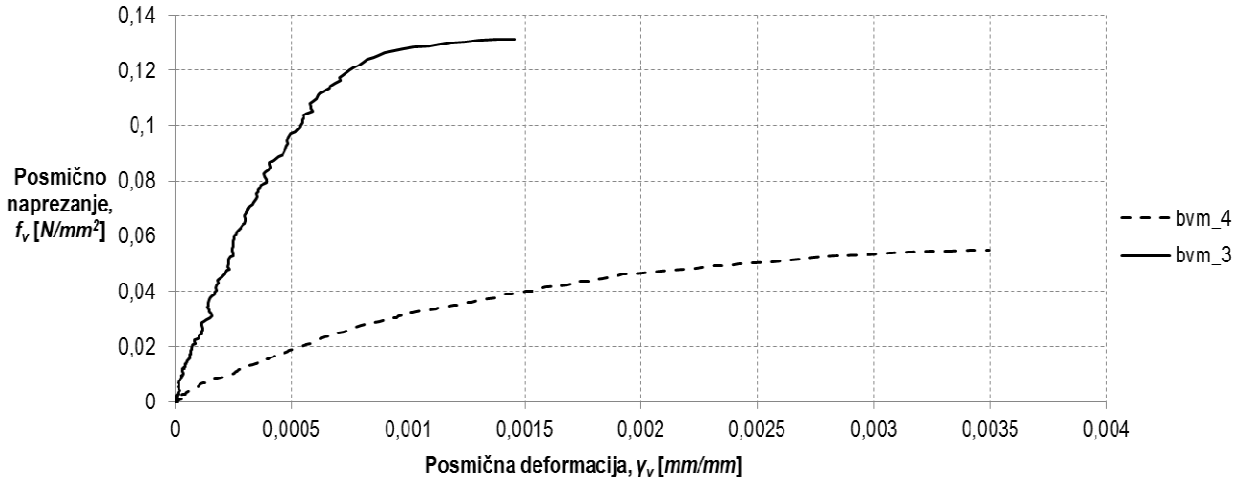
d) *bvm_4*

Slika 5.10 *Slom bvm uzoraka zidanog ispuna pri dijagonalnom tlaku*

Tablica 5.10 *Rezultati dijagonalno tlačnog ispitivanja bvm uzoraka zidane ispune*

Ispitni uzorak	Sila pri slomu, $F_{i,max}$ [*N*]	Vlačna čvrstoća, f_t [N/mm^2]	Posmična čvrstoća, f_v [N/mm^2]
bvm_1	7116	0,05	0,11
bvm_2	6835	0,05	0,10
bvm_3	10880	0,08	0,13
bvm_4	4561	0,03	0,05

Ovisnost posmičnog naprezanja i posmične deformacije prikazana je za dva uzorka *bvm* tipa zidanog ispuna pomoću Slike 5.11. Tijekom ispitivanja prvog i drugog uzorka došlo je do programske pogreške prilikom spremanja rezultata čime je onemogućena njihova interpretacija. Usporedba valjanih rezultata ukazuje na značajna odstupanja u ponašanju uzoraka.



Slika 5.11 *Odnos posmično naprezanje-posmična deformacija za bvm uzorke zidanog ispuna*

Tijekom manipulacije uzoraka zidanog ispuna tipa *cvm* došlo je do sloma svih ispitnih uzoraka, bez obzira na smanjenje stranica (manja vlastita težina) čime je onemogućeno provođenje ispitivanja. Slom svih uzoraka uzrokovan je gubitkom čvrstoće veze zidni element-mort u obliku klizanja kao na Slici 5.10 a).

5.2. Deformacijska svojstva

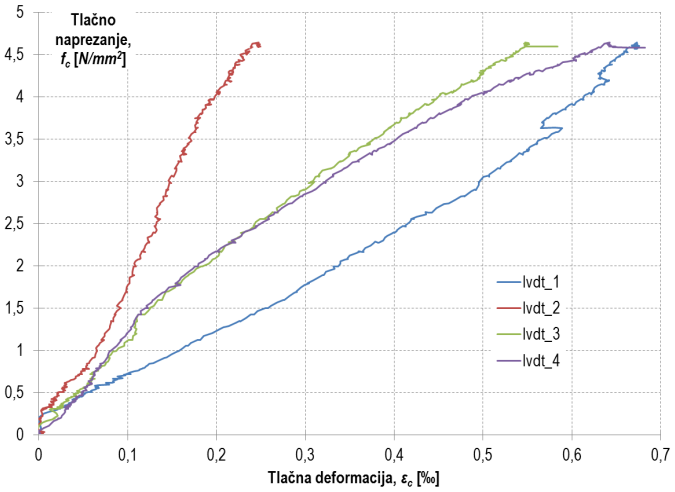
5.2.1. Modul elastičnosti

Modul elastičnosti E_i predstavlja osnovno deformacijsko svojstvo zidanog ispuna. Može se odrediti eksperimentalno tako što će se na uzorcima provoditi ispitivanje tlačne čvrstoće opreme mjernim uređajima, sukladno preporukama danim u normi HRN EN 1052-1 (Slika 5.1). Vrijednost modula elastičnosti pojedinog uzorka zidanog ispuna E_i određuje se kao sekantni modul iz srednje vrijednosti relativne deformacije ε_i na sva četiri mjerna mjesta pri naprezanju jednakom jednoj trećini tlačne čvrstoće uzoraka prema izrazu 5.15. Modul elastičnosti određuje se kao srednja vrijednost rezultata svih ispitnih uzoraka, a vrijednost se zaokružuje na najbližih 100 N/mm^2.

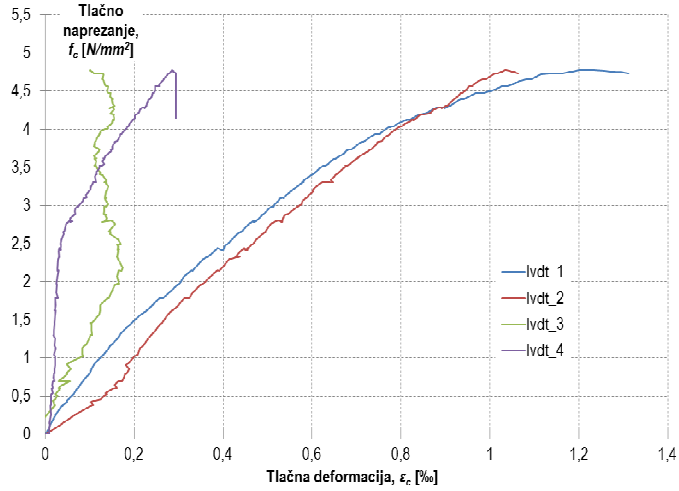
$$E_i = \frac{f_i}{3\varepsilon_i} \tag{5.15}$$

Sukladno preporukama danim u [57], ispitni uzorci opremljeni su s četirima linearno varijabilnim diferencijalnim pretvaračima postavljenim na pravilnim razmacima po obodu uzoraka. Opterećenje uzoraka nanošeno je na način kako je opisano u *Potpoglavlju 5.1.1*. Odnos tlačno naprezanje-relativna deformacija za sve je ispitne uzorke prikazan Slikom 5.12-5.15. Vrijednosti modula elastičnosti za

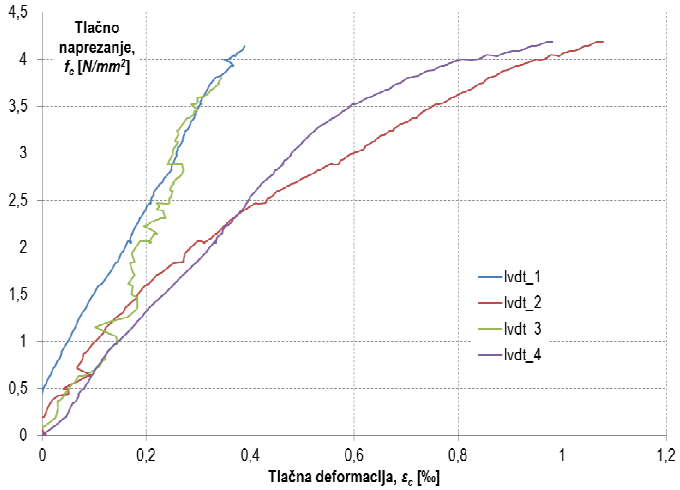
pojedine uzorke zidanog ispuna određene su prema izrazu 5.15, a rezultati su, u ovisnosti o tipu ispuna, prikazani u Tablici 5.11-5.14.



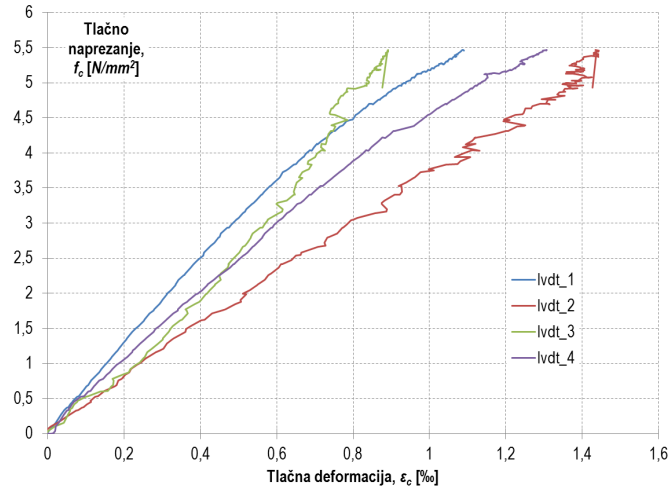
a) *bpm_1*



b) *bpm_2*



c) *bpm_3*



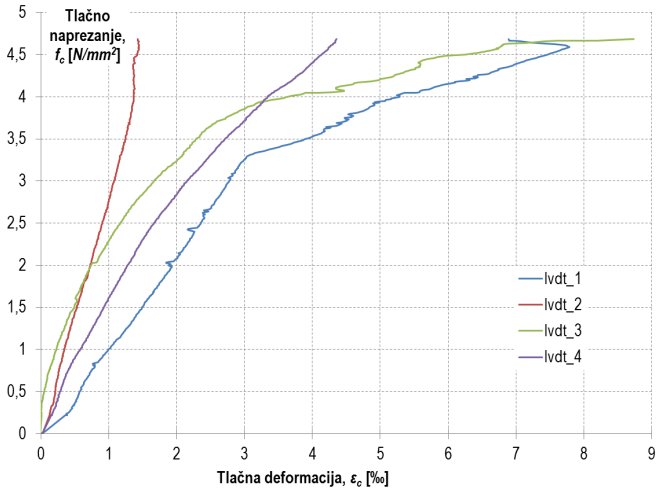
d) *bpm_4*

Slika 5.12 *Odnos tlačno naprezanje-relativna deformacija za bpm uzorke zidanog ispuna*

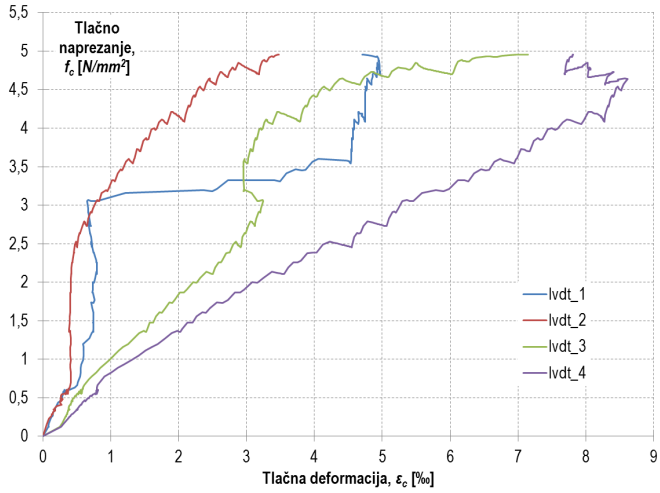
Tablica 5.11 *Vrijednosti modula elastičnosti za bpm ispitne uzorke zidanog ispuna*

Ispitni uzorak	*bpm_1*	*bpm_2*	*bpm_3*	*bpm_4*
Tlačna čvrstoća, f_c [N/mm²]	5,0	4,4	3,9	5,0
Pripadna relativna deformacija, ε_c [‰]	-	0,67	0,70	1,10
Srednja vrijednost $\varepsilon_{c,sr}$ [‰]	0,82			
Standardno odstupanje, *s**	-	0,15	0,12	0,28
	0,24			
Koeficijent varijacije, *V** [%]	29,27			
30% tlačne čvrstoće, $f_{c30\%}$ [N/mm²]	1,5	1,3	1,2	1,5
Srednja vrijednost $f_{c30\%,sr}$ [N/mm2]	1,4			

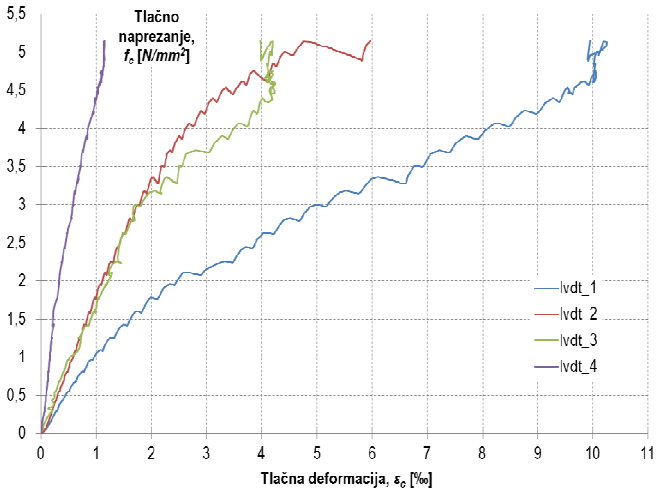
Standardno odstupanje, *s**	0,1	0,1	0,2	0,1
	0,15			
Koeficijent varijacije, *V** [%]	10,71			
Pripadna relativna deformacija, $\varepsilon_{c30\%}$ [‰]	0,13	0,15	0,15	0,33
Srednja vrijednost $\varepsilon_{c30\%,sr}$ [‰]	0,19			
Standardno odstupanje, *s**	0,06	0,04	0,04	0,14
	0,09			
Koeficijent varijacije, *V** [%]	47,37			
Modul elastičnosti, *E* [*N/mm²*]	11500	8800	7700	4600
Srednja vrijednost E_{sr} [*N/mm²*]	8100			
Standardno odstupanje, *s**	3400	700	400	3500
	2855,40			
Koeficijent varijacije, *V** [%]	35,25			



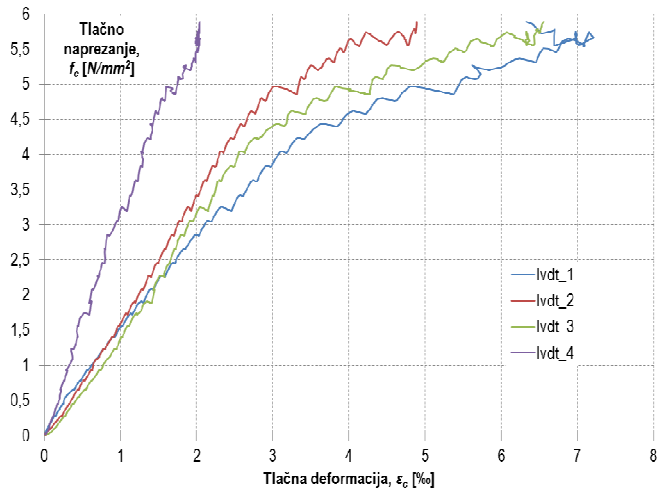
a) *cpm_1*



b) *cpm_2*



c) *cpm_3*

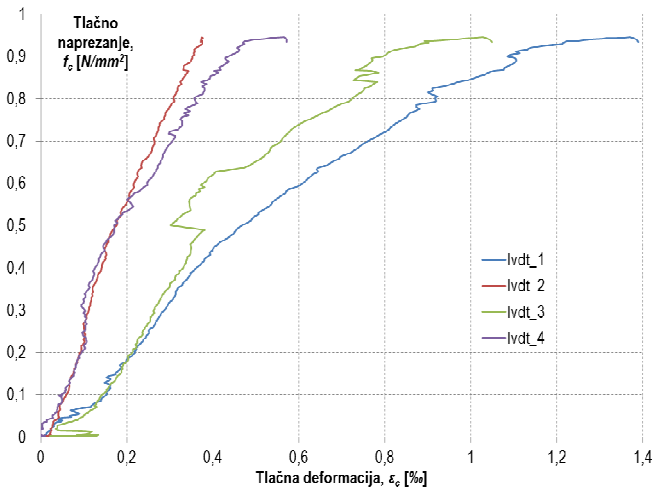


d) *cpm_4*

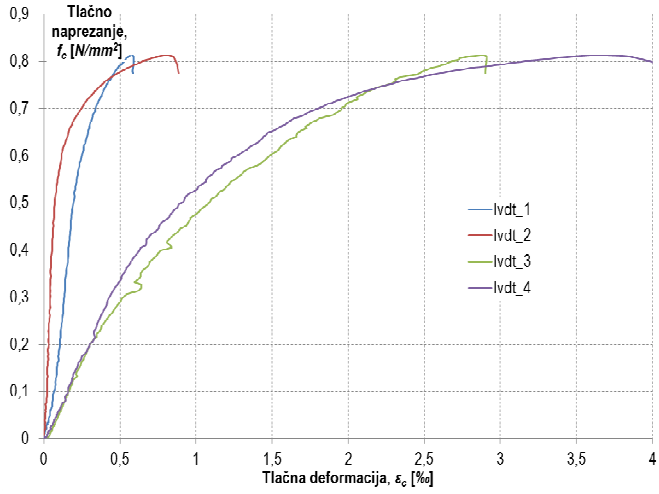
Slika 5.13 *Odnos tlačno naprezanje-relativna deformacija za cpm uzorke zidanog ispuna*

Tablica 5.12 *Vrijednosti modula elastičnosti za cpm ispitne uzorke zidanog ispuna*

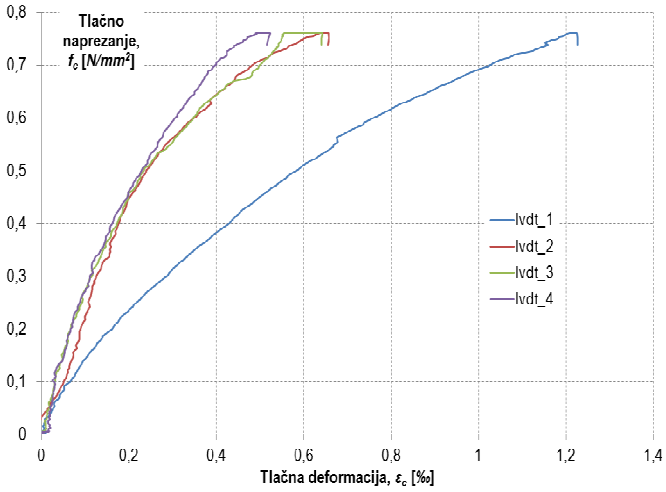
Ispitni uzorak	*cpm_1*	*cpm_2*	*cpm_3*	*cpm_4*
Tlačna čvrstoća, f_c [*N/mm²*]	4,7	5,0	5,1	5,9
Pripadna relativna deformacija, ε_c [‰]	2,81	5,93	4,97	5,61
Srednja vrijednost $\varepsilon_{c.sr}$ [‰]	4,83			
Standardno odstupanje, *s*	2,02	1,10	0,14	0,78
	1,40			
Koeficijent varijacije, *V*	28,99			
30% tlačne čvrstoće, $f_{c30\%}$ [N/mm²]	1,4	1,5	1,5	1,8
Srednja vrijednost $f_{c30\%,sr}$ [N/mm2]	1,5			
Standardno odstupanje, *s**	0,1	0	0	0,1
	0,18			
Koeficijent varijacije, *V** [%]	12,00			
Pripadna relativna deformacija, $\varepsilon_{c30\%}$ [‰]	0,68	0,88	1,18	1,14
Srednja vrijednost $\varepsilon_{c30\%,sr}$ [‰]	0,97			
Standardno odstupanje, *s**	0,29	0,09	0,21	0,17
	0,23			
Koeficijent varijacije, *V** [%]	23,71			
Modul elastičnosti, *E* [*N/mm²*]	2100	1700	1300	1600
Srednja vrijednost E_{sr} [*N/mm²*]	1700			
Standardno odstupanje, *s**	400	0	400	100
	331,66			
Koeficijent varijacije, *V** [%]	19,51			



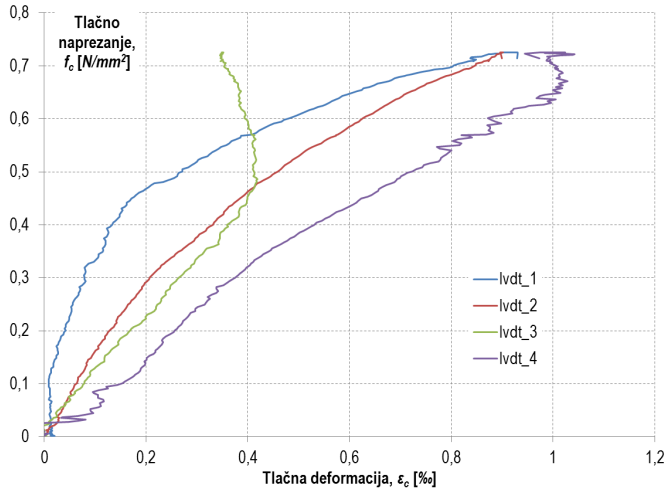
a) *bvm_1*



b) *bvm_2*



c) *bvm_3*

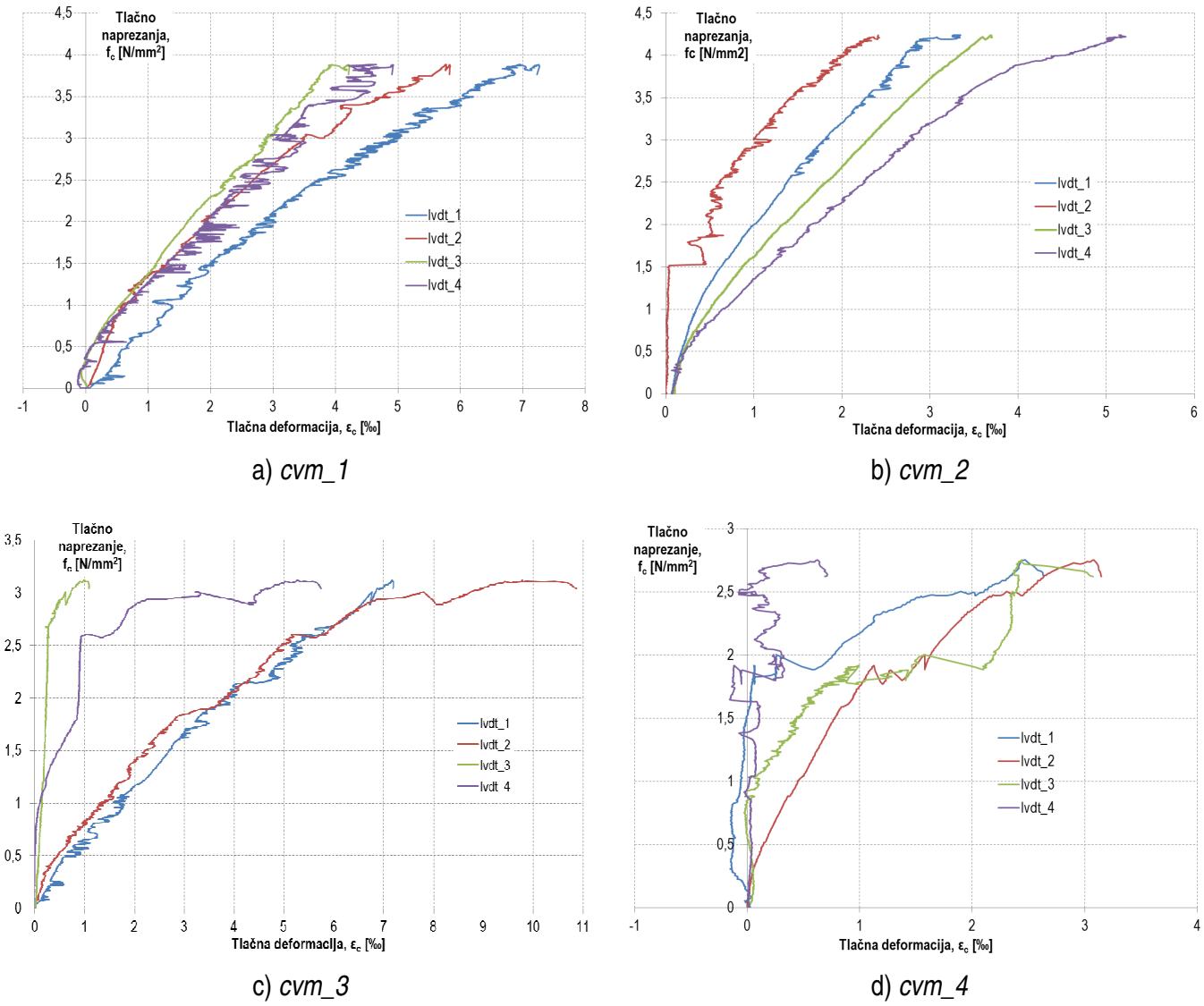


d) *bvm_4*

Slika 5.14 *Odnos tlačno naprezanje-relativna deformacija za bvm uzorke zidanog ispuna*

Tablica 5.13 *Vrijednosti modula elastičnosti za bvm ispitne uzorke zidanog ispuna*

Ispitni uzorak	*bvm_1*	*bvm_2*	*bvm_3*	*bvm_4*
Tlačna čvrstoća, f_c [N/mm²]	0,95	0,81	0,76	0,72
Pripadna relativna deformacija, ε_c [‰]	0,80	1,17	0,62	0,62
Srednja vrijednost $\varepsilon_{c.sr}$ [‰]	0,80			
Standardno odstupanje, *s**	0,0	0,37	0,18	0,18
	0,26			
Koeficijent varijacije, *V** [%]	32,40			
30% tlačne čvrstoće, $f_{c30\%}$ [N/mm²]	0,95	0,81	0,76	0,72
Srednja vrijednost $f_{c30\%,sr}$ [N/mm2]	0,81			
Standardno odstupanje, *s**	0,14	0	0,05	0,09
	0,10			
Koeficijent varijacije, *V** [%]	12,32			
Pripadna relativna deformacija, $\varepsilon_{c30\%}$ [‰]	0,18	0,25	0,09	0,17
Srednja vrijednost $\varepsilon_{c30\%,sr}$ [‰]	0,17			
Standardno odstupanje, *s**	0,01	0,08	0,08	0,0
	0,07			
Koeficijent varijacije, *V** [%]	40,58			
Modul elastičnosti, *E* [N/mm²]	1600	1000	2600	1300
Srednja vrijednost E_{sr} [N/mm²]	1600			
Standardno odstupanje, *s**	0	600	1000	300
	659,22			
Koeficijent varijacije, *V** [%]	43,45			



Slika 5.15 *Odnos tlačno naprezanje-relativna deformacija za cvm uzorke zidanog ispuna*

Tablica 5.14 *Vrijednosti modula elastičnosti za cvm ispitne uzorke zidanog ispuna*

Ispitni uzorak	*cvm_1*	*cvm_2*	*cvm_3*	*cvm_4*
Tlačna čvrstoća, f_c [*N/mm^2*]	3,9	4,2	3,1	2,7
Pripadna relativna deformacija, ε_c [‰]	5,20	3,52	5,38	-
Srednja vrijednost $\varepsilon_{c.sr}$ [‰]	4,70			
Standardno odstupanje, *s**	0,5	1,18	0,68	-
	1,03			
Koeficijent varijacije, *V** [%]	21,91			
30% tlačne čvrstoće, $f_{c30\%}$ [N/mm^2]	1,20	1,27	0,94	0,81
Srednja vrijednost $f_{c30\%,sr}$ [N/mm2]	1,06			
Standardno odstupanje, *s**	0,14	0,21	0,12	0,25
	0,22			
Koeficijent varijacije, *V** [%]	20,75			

Pripadna relativna deformacija, $\varepsilon_{c30\%}$ [‰]	0,80	0,59	0,70	-
Srednja vrijednost $\varepsilon_{c30\%,sr}$ [‰]	0,70			
Standardno odstupanje, s^*	0,1	0,11	0,0	-
	0,1			
Koeficijent varijacije, V^* [%]	14,29			
Modul elastičnosti, E [N/mm^2]	1500	2200	1300	-
Srednja vrijednost E_{sr} [N/mm^2]	1700			
Standardno odstupanje, s^*	200	500	400	-
	474,34			
Koeficijent varijacije, V^* [%]	27,90			

U nedostatku eksperimentalnih rezultata modul elastičnosti zidanog ispuna može se odrediti i analitički. U literaturi se mogu pronaći dva različita pristupa: (1) temeljen na deformacijskim svojstvima zidnih elemenata i morta i (2) temeljen na tlačnoj čvrstoći ispuna. Kod prvog pristupa analitički izraz izveden je pod pretpostavkom linearnog ponašanja ispuna na način da je tlačna deformacija uzorka definirana kao suma deformacija zidnih elemenata i morta pomoću izraz (5.16) [60]:

$$E = E_b \cdot \left(\frac{b}{j} + 1 \right) / \left(\frac{b}{j} + \frac{E_b}{E_j} \right) \tag{5.16}$$

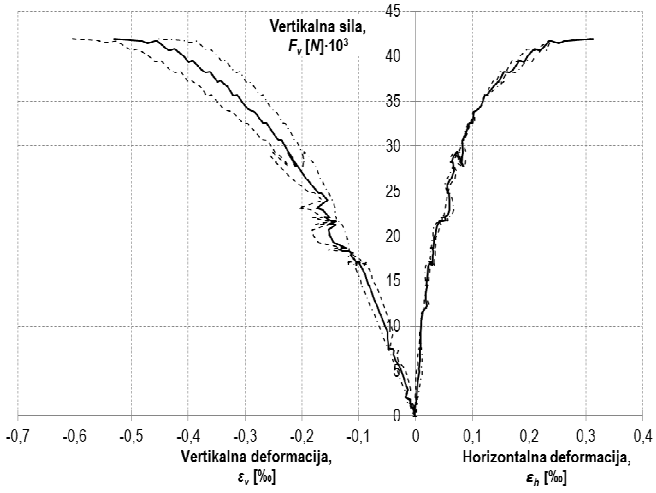
Prema izrazu (5.16) modul elastičnosti zidanog ispuna uvijek je manji od modula elastičnosti zidnih elemenata u slučaju kada je mort „mekši“ element ispuna što je i uobičajeno u praksi. Pored toga, prema izrazu (5.16), modul elastičnosti ispuna povećava se povećanjem čvrstoće morta ili smanjenjem debljine reške.

Kod drugog je pristupa modul elastičnosti zidanog ispuna empirijski povezan s tlačnom čvrstoćom izrazom koji nema fizikalno značenje, ali može imati praktičnu primjenu. U literaturi se može pronaći niz izraza kod kojih se vrijednost modula elastičnosti procjenjuje u intervalu između $400 \cdot f_k \leq E \leq 1000 \cdot f_k$. Norma EC6 [42] predlaže vrijednost jednaku $1000 \cdot f_k$. Eksperimentalna istraživanja [28] upućuju na veći raspon vrijednosti modula elastičnosti gdje se iznos nalazi u intervalu između $200 \cdot f_k \leq E \leq 2000 \cdot f_k$.

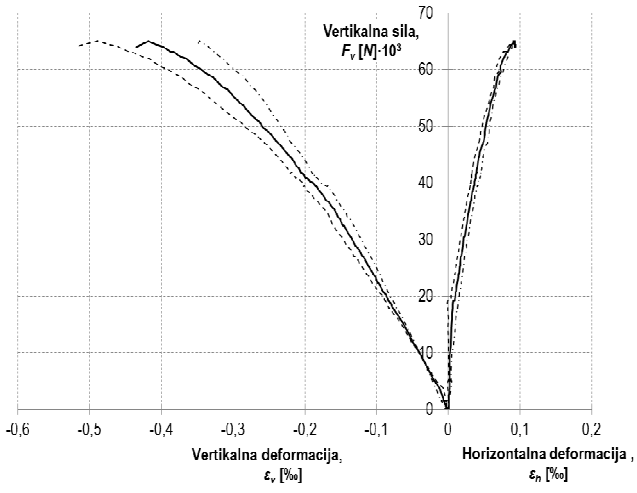
5.2.2. Modul posmika

Modul posmika G_i određen je pomoću dijagonalnog tlačnog pokusa opisanog u *Potpoglavlju 5.1.3.* primjenom izraza (5.13) i (5.14). Za sve ispitne uzorke, kod kojih su dobiveni rezultati upotrebljivi, određeni su dijagrami ovisnosti vertikalnog opterećenja i pripadnih deformacija dijagonala, a prikazani su Slikama 5.16, 5.19 i 5.22. U nedostatku normom propisane vrijednosti posmičnog naprezanja, pri

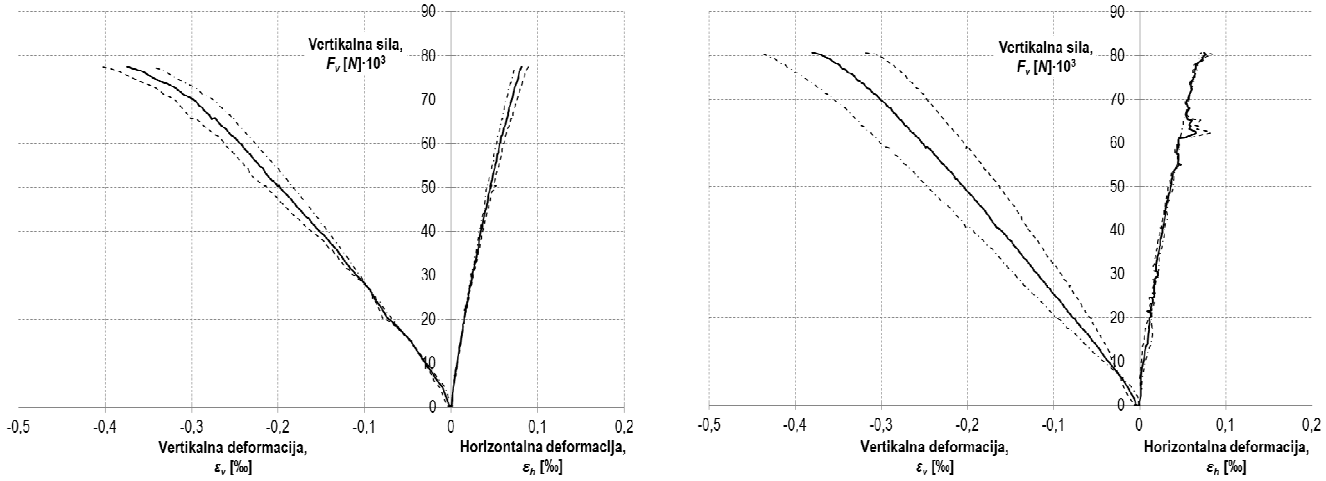
kojoj se određuje modul posmika G_i, odabrano je pet parova vrijednosti posmično naprezanje-modul posmika kako bi se sagledao utjecaj razine posmičnog naprezanja na vrijednost modula G_i. Parovi vrijednosti definirani su za razinu posmičnog naprezanja jednaku 0,1; 0,35; 0,5; 0,7 i 1,0 maksimalno zabilježenog naprezanja te prikazani Slikama 5.17, 5.20 i 5.23. Prema pretpostavkama metode ispitivanja u središnjem se dijelu uzorka očekuje jednolika raspodjela naprezanja čime bi se trebala dobiti jednaka vrijednost modula posmika za odabrane razine posmičnog naprezanja. S obzirom na varijacije rezultata ispitivanja, posmično je naprezanje normalizirano u odnosu na maksimalnu vrijednost čime je omogućen jasniji uvid ovisnosti modula posmika i posmičnog naprezanja. Dijagrami ovisnosti modula posmika i normaliziranog posmičnog naprezanja prikazani su Slikama 5.18, 5.21 i 5.24. Analizom rezultata vidljiv je identičan trend odnosa modula posmika i normaliziranog posmičnog naprezanja neovisno o tipu zidane ispuna, pri čemu je uočena približno jednaku vrijednost modula posmika u području posmičnog naprezanja u iznosu od 0,35 do 0,7 maksimalno zabilježene vrijednosti. Identičan trend uočen je i kod ispitivanja provedenih u [54]. Vrijednost posmičnog naprezanja, pri kojoj je određen modul posmika, odabrana je u iznosu od 0,35 maksimalno zabilježene vrijednosti. Rezultati su prikazani u Tablicama od 5.15. do 5.17 u ovisnosti o vrsti zidanog ispuna. Modul posmika za *cvm* uzorke zidanog ispuna nije određen iz razloga što je došlo do sloma uzoraka prilikom manipulacije. Vrijednosti modula posmika za pojedine uzorke i srednju vrijednost zaokružene su na najbližih 10 N/mm^2.



a) *bpm_1*

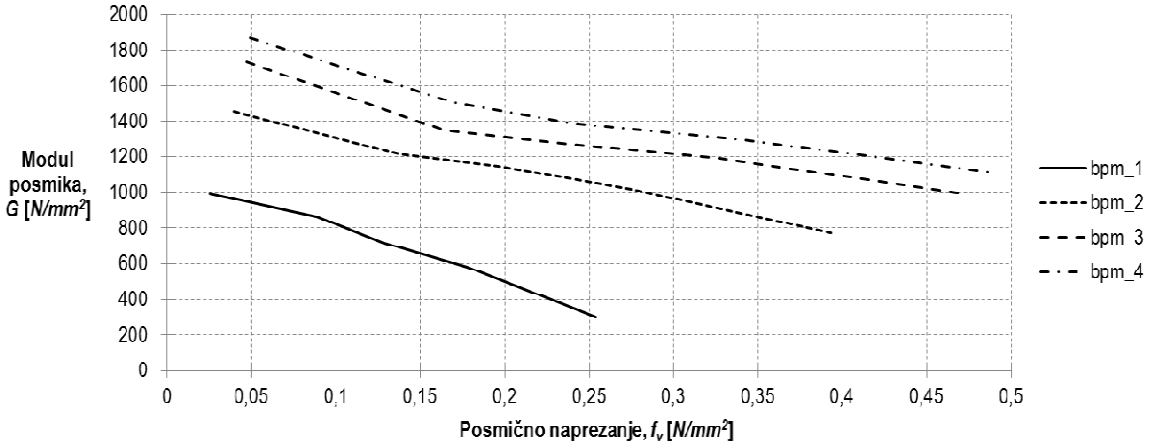


b) *bpm_2*

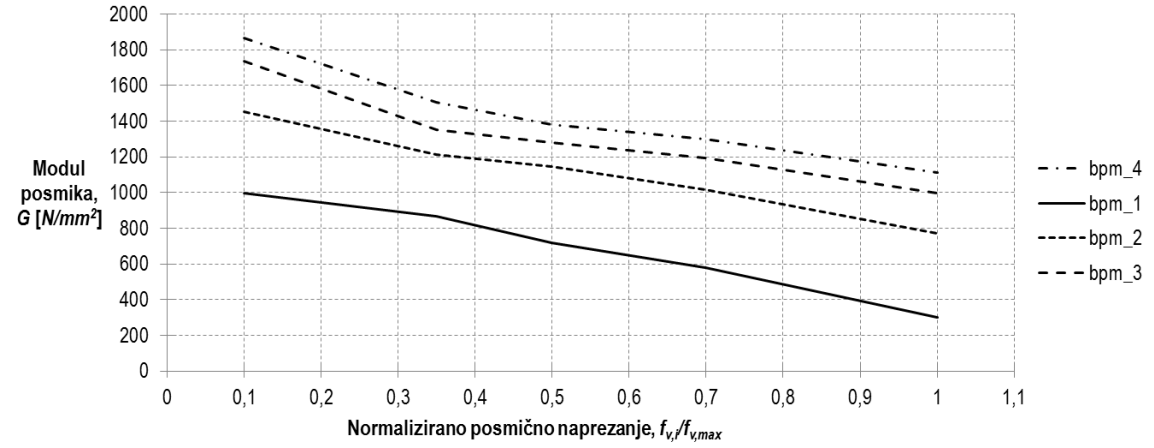


c) *bpm_3* d) *bpm_4*

Slika 5.16 *Ovisnost opterećenja i pripadnih deformacija dijagonala za bpm uzorke zidanog ispuna*



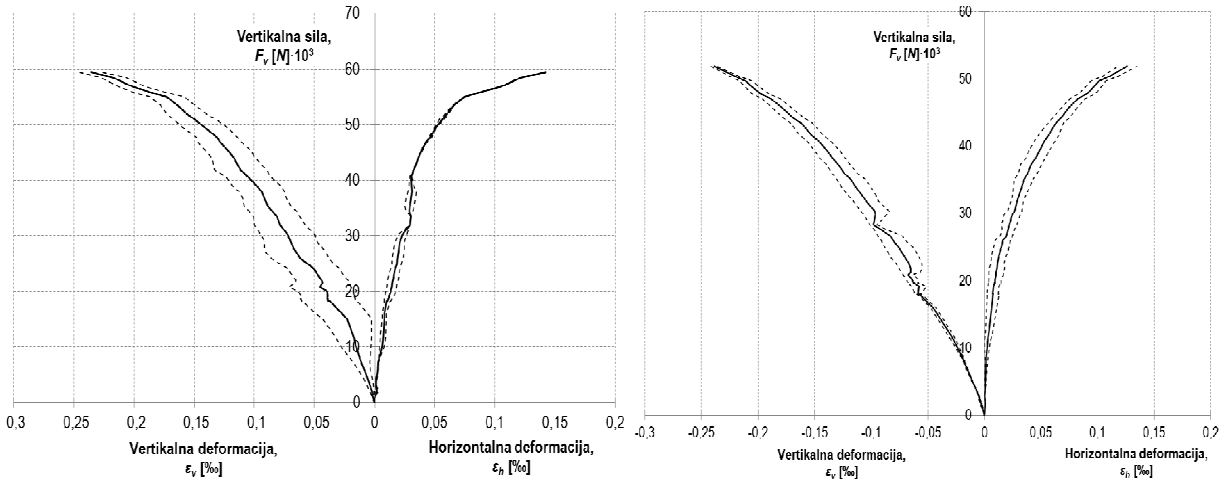
Slika 5.17 *Ovisnost modula posmika i posmičnog naprezanja za bpm uzorke zidanog ispuna*



Slika 5.18 *Ovisnost modula posmika i normaliziranog posmičnog naprezanja za bpm uzorke zidanog ispuna*

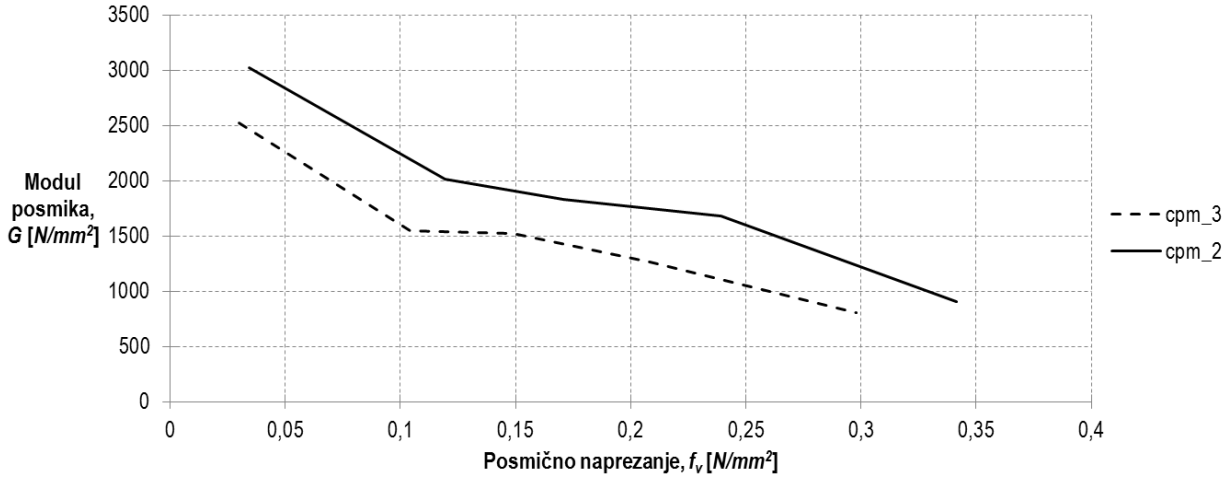
Tablica 5.15 *Vrijednosti modula posmika za bpm ispitne uzorke zidanog ispuna*

Ispitni uzorak	*bpm_1*	*bpm_2*	*bpm_3*	*bpm_4*
30% posmične čvrstoće, $f_{v30\%}$ [N/mm²]	0,088	0,135	0,164	0,170
Srednja vrijednost $f_{v30\%,sr}$ [N/mm2]	0,139			
Standardno odstupanje, *s**	0,051	0,004	0,025	0,031
	0,04			
Koeficijent varijacije, *V** [%]	28,73			
Pripadna relativna deformacija, $\gamma_{v30\%}$ [*mm/mm*]	0,00010	0,00011	0,00012	0,00011
Srednja vrijednost $\gamma_{v30\%,sr}$ [*mm/mm*]	0,00011			
Standardno odstupanje, *s**	0,00001	0,0	0,0001	0,0
	8,165E-06			
Koeficijent varijacije, *V**[%]	7,42			
Modul posmika, G_i [*N/mm²*]	880	1230	1340	1540
Srednja vrijednost G_{sr} [*N/mm²*]	1250			
Standardno odstupanje, *s**	370	20	90	290
	274,59			
Koeficijent varijacije, *V**[%]	21,97			

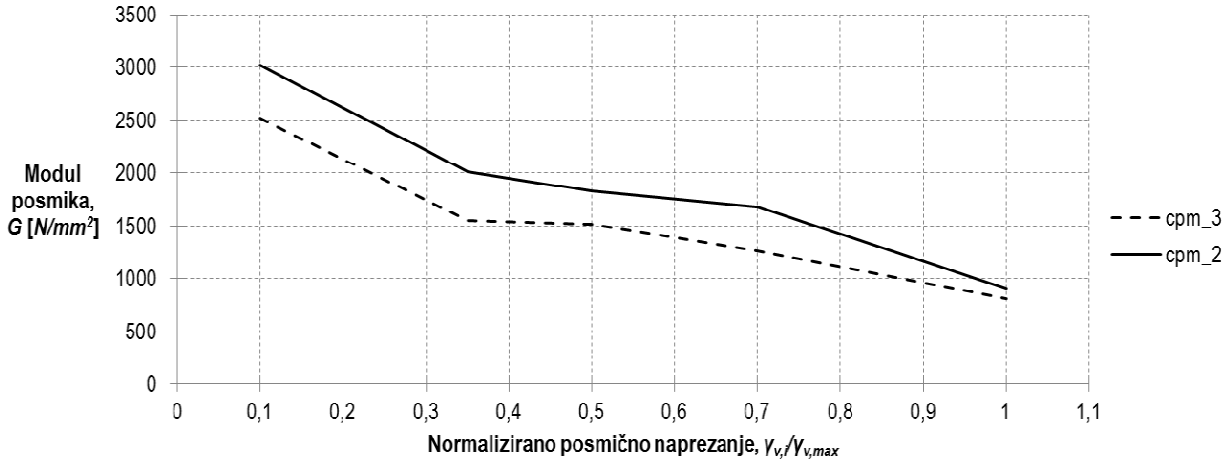


a) *cpm_2* b) *cpm_3*

Slika 5.19 *Ovisnost opterećenja i pripadnih deformacija dijagonala za cpm uzorke zidanog ispuna*



Slika 5.20 *Ovisnost modula posmika i posmičnog naprezanja za cpm uzorke zidanog ispuna*

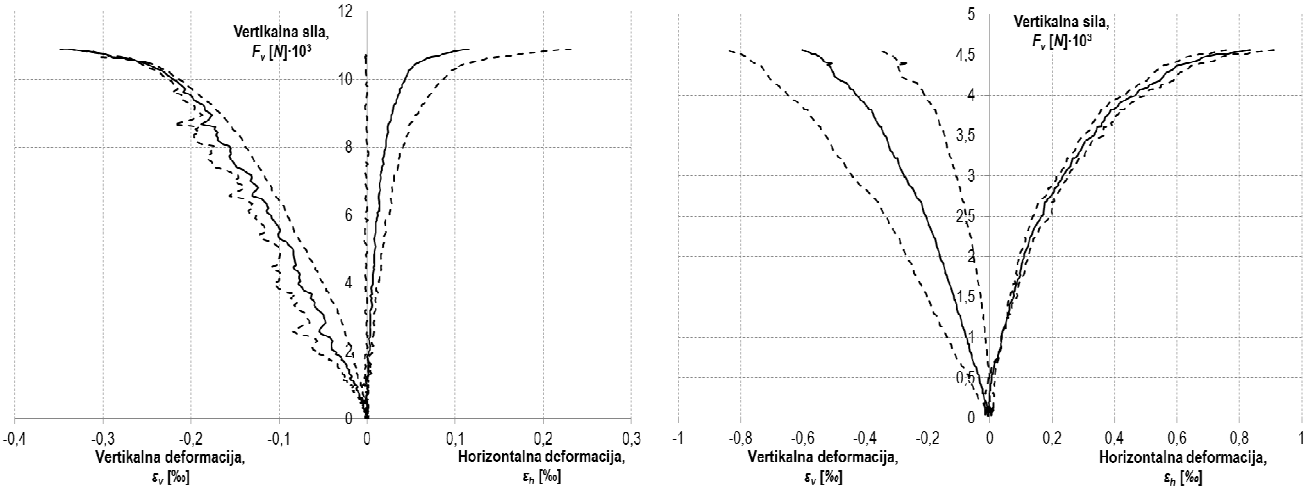


Slika 5.21 *Ovisnost modula posmika i normaliziranog posmičnog naprezanja za cpm uzorke zidanog ispuna*

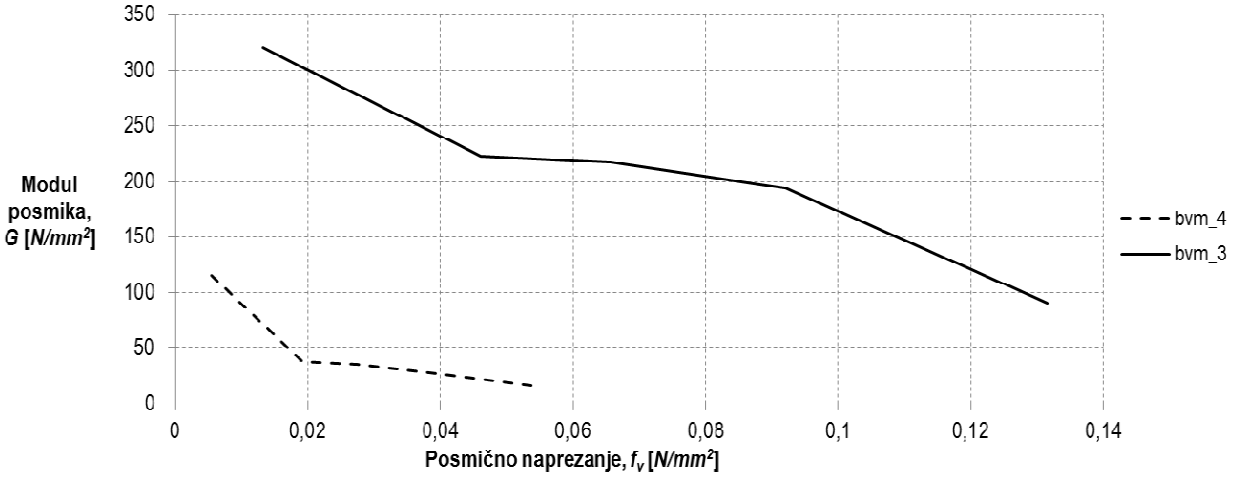
Tablica 5.16 *Vrijednosti modula posmika za cpm ispitne uzorke zidanog ispuna*

Ispitni uzorak	*cpm_1*	*cpm_2*	*cpm_3*	*cpm_4*
30% posmične čvrstoće, $f_{v30\%}$ [N/mm²]	-	0,119	0,104	-
Srednja vrijednost $f_{v30\%,sr}$ [N/mm2]	0,112			
Standardno odstupanje, *s**	-	0,008	0,007	-
	0,01			
Koeficijent varijacije, *V** [%]	8,97			
Pripadna relativna deformacija, $\gamma_{v30\%}$ [*mm/mm*]	-	0,000059	0,000067	-
Srednja vrijednost $\gamma_{v30\%,sr}$ [*mm/mm*]	0,000063			
Standardno odstupanje, *s**	-	0,000004	0,000004	-
	5,66E-06			
Koeficijent varijacije, *V**[%]	8,94			
Modul posmika, G_i [*N/mm²*]	-	2020	1550	-
Srednja vrijednost G_{sr} [*N/mm²*]	1780			

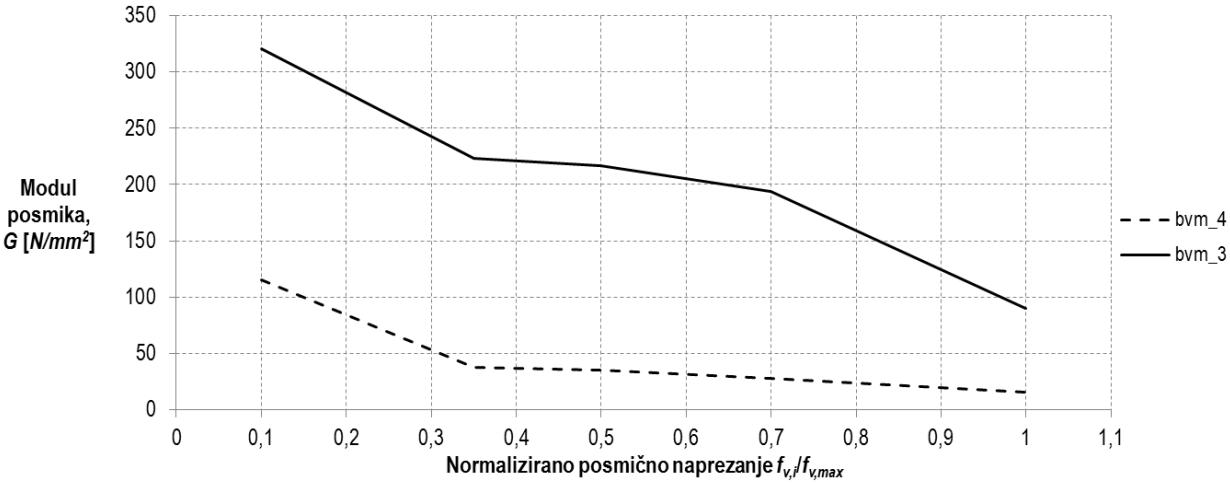
Standardno odstupanje, *s*	-	240	230	-
	332,41			
Koeficijent varijacije, *V* [%]	18,67			



Slika 5.22 *Ovisnost opterećenja i pripadnih deformacija dijagonala za cpm uzorke zidanog ispuna*



Slika 5.23 *Ovisnost modula posmika i posmičnog naprezanja za bvm uzorke zidanog ispuna*



Slika 5.24 *Ovisnost modula posmika i normaliziranog posmičnog naprezanja za bvm uzorke zidanog ispuna*

Tablica 5.17 *Vrijednosti modula posmika za bvm ispitne uzorke zidanog ispuna*

Ispitni uzorak	*bvm_1*	*bvm_2*	*bvm_3*	*bvm_4*
30% posmične čvrstoće, $f_{v30\%}$ [N/mm²]	-	-	0,046	0,019
Srednja vrijednost $f_{v30\%,sr}$ [N/mm2]	0,033			
Standardno odstupanje, *s**	-	-	0,014	0,014
	0,02			
Koeficijent varijacije, *V** [%]	61,54			
Pripadna relativna deformacija, $\gamma_{v30\%}$ [*mm/mm*]	-	-	0,000205	0,000504
Srednja vrijednost $\gamma_{v30\%,sr}$ [*mm/mm*]	0,000355			
Standardno odstupanje, *s**	-	-	0,00015	0,00015
	2,10E-06			
Koeficijent varijacije, *V**[%]	59,24			
Modul posmika, G_i [*N/mm²*]	-	-	220	40
Srednja vrijednost G_{sr} [*N/mm²*]	130			
Standardno odstupanje, *s**	-	-	90	90
	127,28			
Koeficijent varijacije, *V**[%]	97,91			

5.3. Usporedba rezultata ispitivanja mehaničkih i deformacijskih svojstava

Usporedba mjerenih mehaničkih i deformacijskih karakteristika primijenjenih tipova zidanog ispuna prikazana je u Tablici 5.18. Analizom rezultata vidljiv je dominantan utjecaj mehaničkih karakteristika morta na dobivene vrijednosti tlačne čvrstoće ispuna što je u skladu s pretpostavkama izraza (5.4) danim u [42]. Odstupanja vrijednosti tlačne čvrstoće pojedinih uzoraka u odnosu na srednju vrijednost prihvatljivih su iznosa, osim kod ispuna tipa *cvm* gdje je koeficijent varijacije veći od 25%. Kut unutarnjeg trenja i posmična čvrstoća ispuna (neovisno o metodi ispitivanja) također su pod

dominantnim utjecajem karakteristika primijenjenog morta gdje je vidljiv trend smanjenja vrijednosti navedenih karakteristika smanjenjem tlačne čvrstoće morta. Međutim, može se primijetiti da vrijednost početne posmične čvrstoće ispuna znatno varira u ovisnosti o primijenjenoj metodi ispitivanja, osim u slučaju zidanog ispuna tipa *bvm* gdje su dobivene približno jednake vrijednosti. Potrebno je naglasiti kako su vrijednosti određene dijagonalnim ispitivanjem temeljene na nedovoljnom broju ispitnih uzoraka kao posljedice sloma uzoraka prilikom manipulacije. Jednako vrijedi i za vlačnu čvrstoću uzoraka.

Vrijednosti su modula elastičnosti ispuna u intervalu $327 \cdot f_i \leq E_i \leq 1975 \cdot f_i$, što je u skladu s opažanjima danim u [28] ($200 \cdot f_i \leq E_i \leq 2000 \cdot f_i$). Međutim, vrijednost koeficijenata varijacije u slučaju triju tipova ispunâ (*bpm*, *bvm* i *cvm*)je veći su od 25%. Osim toga, vrijednosti Poissonovog omjera određene su na temelju teorije elastičnosti, imaju nerealne iznose, a posebno u slučaju ispuna tipa *cpm* gdje čak poprimaju negativnu vrijednost.

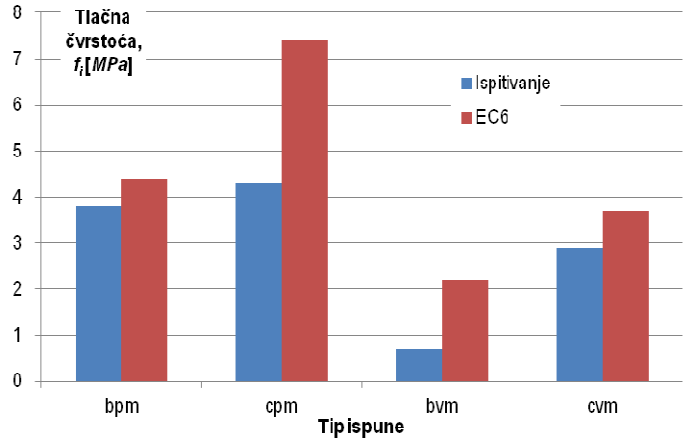
Iako su koeficijenti varijacije modula posmika G_i kod ispuna tipa *bpm* i *cpm* prihvatljivih iznosa, sama vrijednost je, kao i kod ostalih karakteristika određenih dijagonalnih ispitivanjem, temeljena na nedovoljnom broju uzoraka. S obzirom na navedene iznose koeficijenata varijacije i nerealne iznose Poissonovih omjera, vrijednosti su modula posmika za daljnje analize određene na temelju preporuka danih u [42] što je opisano u sljedećem poglavlju. Osim toga, nedostatak eksperimentalno određene vrijednosti modula posmika ispuna tipa *cvm* nameće potrebu primjene analitičkog modela procjene vrijednosti.

Tablica 5.18 *Usporedba mehaničkih i deformacijskih svojstava primjenjenih tipova zidanog ispuna*

	Tip zidanog ispuna			
	bmp	*cpm*	*bvm*	*cvm*
Tlačna čvrstoća, f_i [N/mm^2]	4,6	5,2	0,81	3,5
Koeficijent varijacije, V^* [%]	11,6	9,1	12,4	27,0
Početva posmična čvrstoća, f_{v0} [N/mm^2] (prema [])	0,42	0,18	0,13	0,04
Kut unutarnjeg trenja, $tg\alpha^*$ [*rad*]	0,32	0,56	0,21	0,57
Početna posmična čvrstoća, f_{v0} [N/mm^2] (prema [])	0,25	0,32	0,10	-
Vlačna čvrstoća, f_t [N/mm^2]	0,16	0,20	0,05	-
Modul elastičnosti, E_i [N/mm^2]	8100	1700	1600	1700
Koeficijent varijacije, V^* [%]	35,2	19,5	43,4	27,9
Modul posmika, G_i [N/mm^2]	1250	1780	130	-
Koeficijent varijacije, V^* [%]	22,0	18,7	97,9	-
Poissonov omjer, v	2,2	-0,5	5,1	-

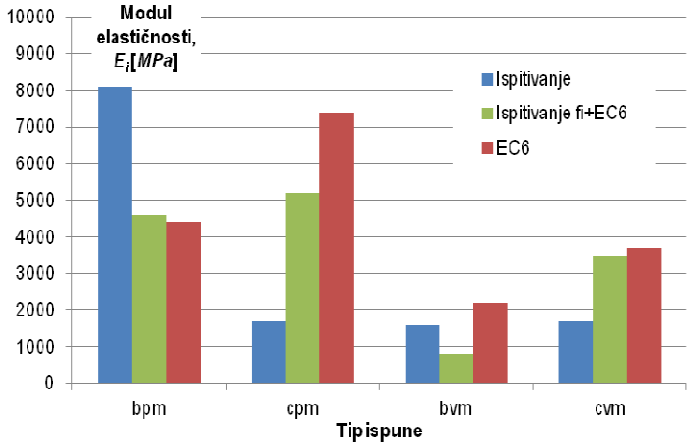
5.4. Usporedba rezultata ispitivanja s preporukama danim u Eurokodu 6

Usporedba eksperimentalno i analitički određene vrijednosti tlačne čvrstoće ispuna prikazana je Slikom 5.25. Iako su vrijednosti dobivene eksperimentalnim istraživanjem prihvaćene kao mjerodavne, usporedba je izvršena radi dosljednosti analize rezultata. Vrijednosti dobivene prema [42] za sva su četiri tipa ispune veće od izmjerenih vrijednosti. Razlike su u vrijednostima značajne, osim u slučaju ispuna tipa *bpm* gdje je zabilježeno prihvatljivo odstupanje manje od 20% (16%). Sličan trend odstupanja uočen je i kod mnogih drugih istraživača [28], [61]. Posljedica navedenog trenda odstupanja može se prepisati samim karakteristikama konstituenata ispuna gdje geometrijske karakteristike tip zidnog elementa i morta te tehnologija izvedbe imaju značajan utjecaj na vrijednost tlačne čvrstoće što nije moguće u potpunosti opisati analitičkim izrazom.



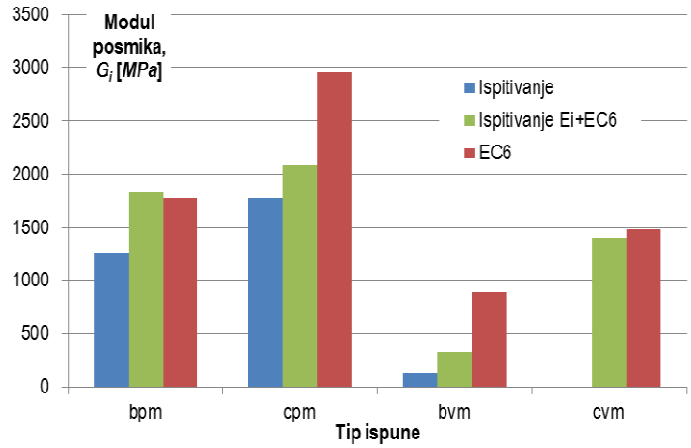
Slika 5.25 *Usporebna tlačne čvrstoće zidanog ispuna određene ispitivanjem i preporukama danim u EC6*

Prilikom usporedbe vrijednosti modula elastičnosti ispuna promatrane su tri vrijednosti od kojih je prva određena ispitivanjem, druga kao $f_i \cdot 1000$, gdje je f_i izmjerena tlačna čvrstoća ispune, a treća je određena na identičan način kao i druga osim što je tlačna čvrstoća ispune određena pomoću izraza (5.4). Neovisno o metodi određivanja vrijednosti modula elastičnosti, vidljiva su značajna odstupanja u rezultatima, pri čemu prikazani odnosi ne slijed jednak trend. Za daljnje analize, ponašanje sustava okvir s ispunom usvojene su vrijednosti određene na temelju ispitivanja.



Slika 5.26 *Usporedba modula elastičnosti zidanog ispuna određenog ispitivanjem i preporukama danim u EC6*

Vrijednosti modula posmika također je određenana trima načinima, a usporedba rezultata prikazana je Slikom 5.27. Prva vrijednost u nizu određena je eksperimentalno, dijagonalnim tlačnim ispitivanjem, dok su druge dvije vrijednosti određene prema preporukama danim u [42]. Razlika u vrijednostima druge i treće veličine u nizu proizlazi iz vrijednosti primijenjenog modula elastičnosti, pri čemu je druga vrijednost određena u iznosu od 40% usvojene vrijednosti modula elastičnosti dok je treća određena u cijelosti analitičkim putem. Za razliku od modula elastičnosti, iz usporedbe je rezultata vidljivo da su eksperimentalne vrijednosti u pravilu manje od analitički određenih, a za daljnje analize je usvojena vrijednost modula posmika određena na temelju usvojenog modula elastičnosti i preporukama danim u [42] (druga vrijednost u nizu).



Slika 5.27 *Usporedba modula posmika zidanog ispuna određenog ispitivanjem i preporukama danim u EC6*

6. ISPITIVANJE UZORAKA NEDUKTILNIH ARMIRANO-BETONSKIH OKVIRA SA ZIDANIM ISPUNOM

U sklopu provedenog istraživanja, ispitano je ukupno četrnaest uzoraka neduktilnih armirano-betonskih okvira s nearmiranim zidanim ispunom. Uzorci su izvedeni u mjerilu 1:2 i podijeljeni u skupine u ovisnosti o tipu okvira (*Poglavlje 3*). Ispitivanje uzoraka provedeno je u reaktivnom čeličnom okviru učvršćenom za krutu temeljnu ploču. Elementi reaktivnog čeličnog okvira izvedeni su od valjanih profila *HEB 280* i *HEB 360*. Dodatna horizontalna krutost reaktivnog okvira osigurana je ugradnjom čeličnih potpornih stupova s obje strane okvira izvedenih od kružnih profila prstenastog poprečnog presjeka promjera *Φ120 mm*, oslonjenih na mjestima predviđenim za unos horizontalne sile u ispitne uzorke i postavljenih pod kutom od 45º u odnosu na horizontalu. Veza, tj. učvršćenje ispitnih uzoraka u reaktivnom okviru, ostvareno je pomoću posebno izvedenih šupljina u temeljnim gredama uzoraka predviđenih za ostvarenje vijčanog spoja s temeljnom gredom reaktivnog okvira. Dodatno učvršćenje ispitnih uzoraka ostvareno je pomoću čeličnih profila i vijčanih veza postavljenih na krajevima temeljne grede ispitnih uzoraka.

Uzorci su ispitani pod vertikalnim i promjenjivim te cikličkim horizontalnim opterećenjem u ravnini modela. Vertikalno opterećenje uzoraka predstavlja težinu gornjih etaža konstrukcije gdje je vrijednost opterećenja određena iz uvjeta da uzrokuje naprezanje u stupovima uzoraka u iznosu od 30% projektirane tlačne čvrstoće ugrađenog betona. Unos vertikalne sile ostvaren je ručno pomoću hidrauličkih preša marke *Yale* kapaciteta 350 *kN* preko posebno izvedenih produžetaka stupova. Preše su postavljene u čelične kalupe postavljene na vrhovima stupova i oslonjene na reaktivni okvir pomoću posebno izvedenih oslonaca kojima se simulira horizontalni pomično-upeti oslonac. Razina vertikalnog opterećenja kontrolirana je vizualno pomoću digitalnog zapisa vrijednosti. Tijekom ispitivanja, uočena je promjena vrijednosti vertikalnog opterećenja stupova u ovisnosti o smjeru i razini horizontalnog opterećenja. Promjena vrijednosti vertikalnog opterećenja stupova može se pripisati pojavi sprega sila koji nastaje od momenta savijanja uzrokovanog horizontalnom silom i sprječenim vertikalnim pomakom stupova. Osim promjene vrijednosti vertikalnog opterećenja stupova, u nultim fazama horizontalnog opterećenja primijećen je postepeni pad početne vrijednosti vertikalnog opterećenja. Pad početne vrijednosti vertikalnog opterećenja stupova može se pripisati pojavi relaksacije betona uslijed oštećenja. Razina početnog vertikalnog opterećenja pri nultim fazama horizontalnog opterećenja, tijekom ispitivanja, više je puta korigirana. Varijacija je vertikalne sile u stupovima okvira, prilikom analize rezultata ispitivanja, dana za svaki uzorak posebno.

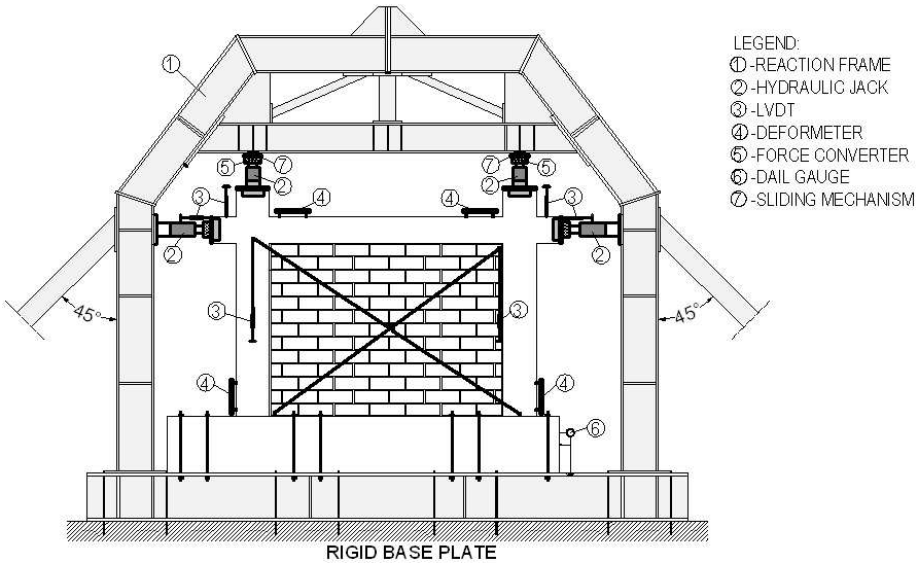
Horizontalno opterećenje uzoraka uneseno je ciklički s postepenim povećanjem iznosa pomoću elektromotorne hidrauličke preše marke *Yale* kapaciteta 300 *kN*. Horizontalno je opterećenje također uneseno kroz težišnu os grede uzoraka preko posebno izvedenih produžetaka s obje strane uzorka. Kontrola unosa horizontalnog opterećenja izvršena je u dvjema fazama. U prvoj fazi, u području malih deformacija, primijenjena je kontrola sile s postepenim povećanjem opterećenja u koracima od 10 *kN*. U drugoj fazi opterećenja, nakon pojave popuštanja, primijenjena je kontrola pomaka s postepenim povećanjem amplitude. Svaki korak opterećenja ponovljen je dva puta kako bi se obuhvatio utjecaj degradacije nosivosti i krutosti na ponašanje ispitnih uzoraka pri horizontalnom opterećenju. Kontrola opterećenja (sile i pomaka) vršena je vizualno pomoću kontinuiranog digitalnog zapisa vrijednosti dok je opterećenje uzoraka uneseno ručno. Odabir amplitude pomaka ovisio je o području odgovora uzoraka (*Poglavlje 3*) s vrijednostima u intervalu između 0,5 i 2 *mm.* Nakon pojave popuštanja uzorka pomak je nanesen u koracima iznosa od 0,5 *mm* sve do pojave značajnog oštećenja zidanog ispuna (područje nakon dosezanja maksimalne nosivosti), popraćenog pojavom smanjenja horizontalne nosivosti nakon čega je uslijedilo povećanje vrijednosti amplitude. Prilikom analize rezultata ispitivanja, za svaki je uzorak dan prikaz ovisnosti amplitude pomaka i koraka opterećenja. Svi uzorci, osim *O1_bpm* i *O1_bpm**, ispitani su do sloma.

Prilikom ispitivanja uzoraka, mjerene su vrijednosti unesenih sila (vertikalnih i horizontalnih) i ostvarenih pomaka. Mjerenje sila ostvareno je pomoću pretvarača sila smještenih na krajevima hidrauličkih preša, a mjerenje pomaka pomoću linearno varijabilnih diferencijalnih pretvarača (*LVDTa*) marke *WayCon*. Mjereni su horizontalni i dijagonalni pomaci uzoraka. Horizontalni pomaci mjereni su u razini unosa horizontalnog opterećenja s obje stane uzorka neovisno o smjer nanošenja opterećenja. Prilikom obrade rezultata, vrijednost horizontalnog pomaka određena je kao srednja vrijednost mjerenja. Mjerni uređaji postavljeni su na zasebnu čeličnu skelu kako bi se izbjegao mogući utjecaj deformacija reaktivnog čeličnog okvira na mjerene vrijednosti. Dijagonalni pomaci mjereni su na oba lica uzorka, pri čemu su zasebno promatrani pomaci ispuna i okvira. Mjerenje dijagonalnih pomaka omogućeno je izvedbom posebnog sustava utega i kolotura povezanih čeličnom žicom. Čelična žica fiksno je spojena na jednom kraju za uzorak, prebačena preko koloture, a na drugom se kraju nalazio uteg preko kojeg je ostvareno mjerenje. Kontrola horizontalnog klizanja uzoraka u reaktivnom čeličnom okviru, tijekom ispitivanja, provedena je pomoću digitalne mikroure, a dobivene su vrijednosti uzete u obzir prilikom analize rezultata.

Podatci s mjernih uređaja prikupljani su kontinuirano u vremenu pomoću sustava *DEWE-BOOK* uz *DEWESoft* softversku podršku pomoću koje se vrši kalibracija mjernih instrumenata. Kalibracija

mjernih instrumenata provedena je prema preporukama danim od strane proizvođača. Naknadna obrada rezultata provedena je u programskom paketu *MicrosoftOffice 2010* (*Excel*).

Svi su uzorci opremljeni istom opremom uz jednak raspored mjernih instrumenata. Prikaz opreme i rasporeda mjernih instrumenata prikazan je Slikom 6.1.



Slika 6.1 *Prikaz opreme i rasporeda mjernih uređaja prilikom provedbe ispitivanja*

Pojava i širenje pukotina praćena je vizualno i primjenom prostornog optičkog mjernog sustava imena *ARAMIS*. Iako sustav pruža mogućnost kontinuiranog snimanja uzoraka, zbog relativno dugog trajanja ispitivanja i nemogućnosti povezivanja sustava s pretvaračima sila, snimane su nulte faze i prvi ciklusi svakog koraka za oba smjera opterećenja. U nastavku teksta dan je detaljan opis optičkog mjernog sustava i metodologije primjene.

Iza imena *ARAMIS* krije se cjelina sastavljena od opreme za mjerenje, prikupljanje, analizu i obradu podataka, a koja služi za ravninska i prostorna optička mjerenja u realnom vremenu. *ARAMIS* je beskontaktni mjerni sustav koji služi za precizno mjerenje pomaka i površinskih deformacija unutar sustava neovisno o vrsti materijala. Upotrebom *ARAMIS* sustava pruža se mogućnost zamjene velikog broja konvencionalnih mjernih uređaja (ekstenzometri, *LVDTi*, deformetri itd.), čime se znatno ubrzava postupak instrumentacije i ispitivanja uzorka. Oprema za mjerenje i prikupljanje podataka (*Hardware system*) sastoji se od dvije kamere, stalka za kamere s *LED* osvjetljenjem, jedinice za prikupljanje podataka (*controler box*) te računala. Primjenom jedne kamere moguća su ravninska, a primjenom obiju kamera prostorna mjerenja. Programski paket za analizu i obradu podataka također se zove *ARAMIS* te pruža mogućnost grafičkog prikaza (u obliku izolinija i površina) željenih rezultata. Sustav se može koristi pri statičkim i dinamičkim ispitivanjima, a rezultate mjerenja iskazuje kao:

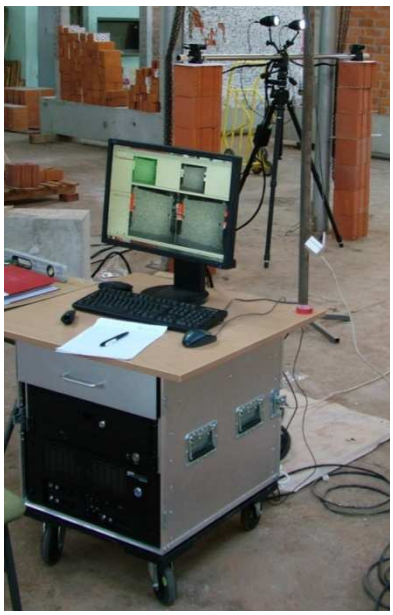
- *2D/3D* površinske koordinate,
- *2D/3D* pomake i brzine,
- brzinu prirasta deformacije i
- tenzor površinskih deformacija (glavne deformacije, glavna naprezanja, promjena debljine).

Sustav je pouzdan za određivanje mehaničkih karakteristika materijala (modul elastičnosti) i sustava (krutost), kao i za praćenje razvoja i širine pukotina. Integracijom *ARAMISA* i uređaj za nanošenje opterećenja, moguće je određivanje potpunih radnih dijagrama materijala.

Veličina mjerne površine kreće se od 1 mm^2 pa do nekoliko m^2, ovisno o rezoluciji kamera, pri čemu je vrijednost mjerene minimalne relativne deformacije jednaka 0,001%, uz točnost od 0,001%. Međusobni razmak kamera te njihova udaljenost od ispitnog uzorka, određena je samom površinom promatranog uzorka.

Faze mjerenja deformacija sustava općenito se mogu definirati na sljedeći način:

1. Priprema ispitnog uzoraka i mjernog sustava – nanošenje rastera, odabir i podešavanje objektiva, postavljanje mjernog uzorka u vidno polje kamera
2. Kalibracija mjernog sustava – automatizirana fotogrametrijska kalibracija kamera
3. Snimanje ispitnog uzorka – snimanje svake od faza opterećivanja. Sustav pruža mogućnost kontinuiranog praćenja ili snimanje pojedinih, tj. odabranih faza opterećivanja.
4. Analiza snimaka – digitalna korelacija, računanje pomaka i deformacija
5. Prikaz i obrada rezultata – generiranje izvještaja, slika i videa mjerenja



Slika 6.2 *Prikaz mjernog optičkog sustava ARAMIS*

Opis pojedinih faza mjerenja deformacija prikazan je u nastavku teksta na primjeru provedenih ispitivanja:

1. *Priprema modela i sustava*: za ostvarenje točnih rezultata mjerenja neophodno je napraviti „kvalitetan raster". „Raster" predstavlja šrafuru ostvarenu nanošenjem bijele i crne akrilne boje na ispitni uzorak. Njegovu kvalitetu određuje veličina i gustoća crnih točaka koja je definirana od strane proizvođača opreme, a u ovisnosti je o veličini promatrane površine ispitnog uzorka.

   Prvo se nanosi bijela boja na ispitni uzorak, nakon čijeg se sušenja nanosi crna boja. Crna boja nanosi se na način da se ostvari ravnomjeran, ali nepravilan raspored točaka na uzorku (Slika 6.4). Alat za nanošenje bijele boje obični je soboslikarski valjak dok se za nanošenje crne boje koristi specijalna četka osigurana od strane proizvođača opreme. Osvjetljenje uzorka u našem je slučaju ostvareno pomoću dvaju dodatnih halogenih rasvjetnih tijela snage 500 *W*. Iako oprema dolazi s vlastitim osvjetljenjem, pokazalo se da to nije dostatno za velike ispitne uzorke. Tijekom postavljanja rasvjete, potrebno je voditi računa o vanjskim utjecajima. Naime, iskustvo je pokazalo da promjena osvjetljenja ima veliki utjecaj na kvalitetu rezultata te je potrebno, što je više moguće, eliminirati utjecaj promjenjivog danjeg svijetla. To je ostvareno postavljanjem zaštitnih panela (Slika 6.5).

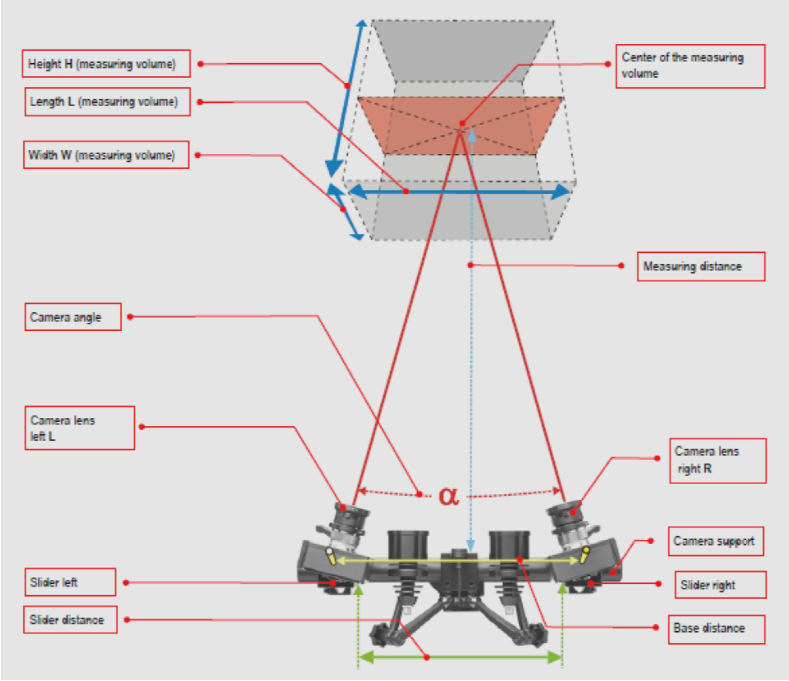
Slika 6.3 *Priprema ispitnog uzorka*

Slika 6.4 *Izgled rastera*

Slika 6.5 *Osvjetljenje ispitnog uzorka*

2. *Kalibracija sustava*: podrazumijeva dva koraka. Prvi korak podrazumijeva osiguranje zahtjevane udaljenosti kamera od promatranog ispitnog uzorka te njihovog međusobnog razmaka. Udaljenost

kamera, njihov međusobni razmak te kut postavljenja kamera, u odnosu na ispitni uzorak, definirani su od strane proizvođača. Iznimno, u slučajevima nedostatka prostora, moguće je promjenom kuta između kamera ostvariti drugačije odnose traženih geometrijskih izmjera. Veza između odabranih veličina ostvaruje se pomoću trigonometrijskih funkcija, s tim da se mora voditi računa da je obuhvaćena cijela promatrana površina uzorka. Slika 6.6 daje grafički prikaz međusobnih veza zahtjevanih geometrijskih izmjera.



Slika 6.6 *Geometrijske veze zahtijevanih izmjera*

Drugi korak podrazumijeva automatiziranu fotogrametrijsku kalibraciju kamera. Pod automatiziranom kalibracijom podrazumijeva se provođenje jasno definiranog postupka pomoću kalibracijskog objekta. Postupak kalibracije također je definiran od strane proizvođača te se sastoji od snimanja 24 različita položaja kalibracijskog objekta. Pojam kalibracijskog objekta podrazumijeva primjenu prikladnog objekta, ovisno o veličini mjerne površine. U slučaju manjih površina, koriste se kalibracijske pločice dok se kod većih površina koristi kalibracijski križ (Slika 6.7). Odabir kalibracijskog objekta direktno je vezan s promatranom površinom ispitnog uzorka, pri čemu su granične vrijednosti također definirane od strane proizvođača. U našem slučaju korišten je kalibracijski križ. Kako u našem slučaju promatrana površina ispitnog uzorka prelazi preporučenu vrijednost veličine površine, kojom se može kalibrirati *ARAMIS* pomoću kalibracijskog križa, bilo je potrebno osmisliti način kalibriranja. U konzultacijama s proizvođačem opreme, odabrana je kalibracija sustava u pet koraka. Prvim korakom pokriven je centralni dio površine ispitnog uzorka dok su u ostala četiri koraka pokrivene površine u uglovima. U svakom koraku izvršen je potpun postupak kalibracije (različita 24 položaja kalibracijskog

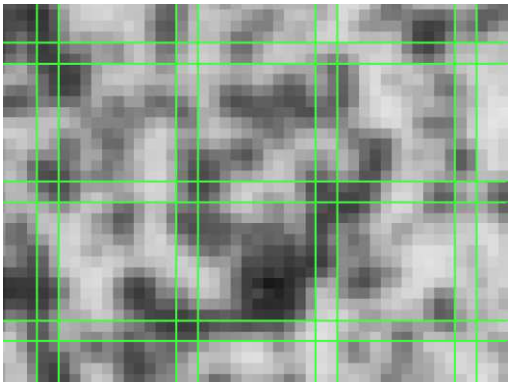
kriza u svakom koraku). Kako odabrana metoda kalibracije nije standardna, za očekivati je manju točnost rezultata.

a) b)

Slika 6.7 *Prikaz kalibracijskih objekata: a) ploča* i *b) križ*

3. *Snimanje modela*: podrazumijeva snimanje, tj. fotografiranje ispitnog uzorka u željenim fazama opterećivanja. *ARAMIS* pruža mogućnost kontinuiranog i pojedinačnog snimanja ovisno u vrsti ispitivanja i željenim rezultatima. Kontinuirana snimanja podrazumijevaju neprestano snimanje uzorka, a pojedinačna diskretno. Prilikom odabira vrste snimanja treba voditi računa o vremenskom trajanju ispitivanja. Kako je prilikom kontinuiranog snimanja najmanji mogući broj snimaka u sekundi jednak dva (*two frames per second*), potrebno je imati računalo velikog kapaciteta tvrdog diska. Ilustracije radi, jedna slika zauzima 5,8 *MB* tvrdog diska i ako imamo kontinuirano snimanje koje traje 3 sata, dobijemo da u konačnici snimljene slike zauzimaju 62640 *MB* (62,6 *GB*) tvrdog diska. Ako pretpostavimo da kapacitet tvrdog diska nije upitan, problemi nastaju prilikom obrade rezultata koja može trajati i do dva dana. Iz navedenog primjera, jasno je vidljiva potreba planiranja i odabira načina snimanja.
4. *Analiza snimaka*: Prije početka obradbe rezultata potrebno je definirati nulto stanje na temelju kojeg se određuju vrijednosti željenih podataka, odnosno koje služi kao referentni snimak. Tijekom proračuna željenih podataka, *ARAMIS* „promatra" promjene na slikama unutar prethodno definiranih kvadratnih ili pravokutnih detalja, tzv. *faseta*. Veličina faseta određuje se zadavanjem broja piksela koji sačinjavaju njegovu površinu, a prilikom odabira veličine, unutar istog izbornika, vrši se i zadavanje veličine njihovog međusobnog preklopa (Slika 6.8). Tijekom obrade snimaka, koji opisuju različite stadije ispitivanja, sustav traži i utvrđuje položaj faseta pomoću karakterističnih razina sive boje u strukturi svakog od njih. Nakon određivanja ravninskih koordinata istih faseta, promatranih kroz lijevu i desnu kameru, sustav pomoću fotogrametrijskih metoda objedinjuje njihove prikaze u prostorne koordinate. Nakon uspješnog proračuna prostornih koordinata svih faseta, u snimkama s ispitivanja, moguće je, ovisno o kvaliteti dobivenih rezultata, snimke podvrgnuti dodatnim

postupcima obrade ili koristiti dobivene podatke za prikaz rezultata, bilo pomaka, deformacija, raznih izvješća i sl.



Slika 6.8 *Primjer faseta veličine 15 x 15 piksela s preklopom od 2 piksela*

5. *Prikaz i obrada rezultata*: kao što je već navedeno u uvodnom dijelu, *ARAMIS* pruža mogućnost obrade različitih rezultata, pomaka (u i izvan ravnine ispitnog uzorka), relativnih deformacija i naprezanja u elastičnom području. Kako je zidana ispuna izrazito nelinearan materijal, te sadržava mnoštvo ploha slabosti (horizontalne i vertikalne reške), prikaz naprezanja nemoguće je ostvariti, čak i u područjima malih deformacija. *ARAMIS* pruža mogućnost kreiranja izvješća ili izvoza rezultata u druge računalne programe, npr. *Excel*. Prilikom kreiranja izvješća prvo je potrebno, u nultoj fazi opterećenja, definirati točku u kojoj se želi pratiti pomak. U našem slučaju odabrana je točka u sredini grede. Vrijednost pomaka u svakoj sljedećoj fazi opterećenja ispitnog uzorka definirana je u odnosu na nultu fazu. Osim navedenog, moguće je kreirati i izvješća u kojima se može sagledati prirast pomaka i/ili sile u pojedinim fazama opterećenja ispitnog uzorka.

6.1. Interpretacija rezultata ispitivanja

Prilikom analize rezultata provedenih istraživanja promatran je utjecaj odabranih parametara na: (1) konstrukcijske karakteristike, (2) dinamičke karakteristike i (3) oblik sloma ispitnih uzoraka. Ocjena doprinosa promatranih parametara izvršena je u odnosu na referentne vrijednosti dobivene ispitivanjem praznih okvira u ovisnosti o skupini ispitnih uzoraka.

Konstrukcijske karakteristike definirane su u poglede krutost i nosivost ispitnih uzoraka pri promatranim fazama ponašanja, za oba smjera horizontalnog opterećenja. Smjerovi opterećenja definirani su kao pozitivni i negativni gdje je pozitivan smjer određen pozitivnim parovima vrijednosti sila – pomak, a predstavlja opterećenja uzorka s lijeva na desno iz čitateljeve perspektive. Konstrukcijske karakteristike ispitnih uzoraka promatrane su u odnosu na tri karakteristične točke odgovora. Prva karakteristična točka, granično stanje pojave prve značajne pukotine u ispunu, definira početnu krutost

ispitnih uzoraka (K_i), a određena je parom vrijednosti $V_{cr} - \Delta_{cr}$, pri čemu je V_{cr} horizontalna nosivost pri pojavi prvih značajnih pukotina, a Δ_{cr} pripadni pomak uzorka. Horizontalna nosivost V_{cr} određena je za trenutak pri kojem pukotina prolazi kroz minimalno četiri reda ispune po visini ili tri reda po horizontali. Nastanak, tj. pojava prve značajne pukotine, određena je vizualno uz kontrolu optičkim mjernim sustavom. Druga karakteristična točka odgovora definira krutost ispitnih uzoraka pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispune (K_{max}), a određena je parom vrijednosti $V_{max} - \Delta_{max}$. Trenutak pojave dominantnog mehanizma sloma ispuna također je određen vizualno uz kontrolu optičkim mjernim sustavom. Parom vrijednosti $V_{col} - \Delta_{col}$ određena je krutost uzorka pri pojavi sloma jednog od elemenata sustava (K_{col}) čime je određena treća karakteristična točka odgovora. Ponašanje nakon sloma jednog od elemenata sustava definirano je rezidualnom nosivošću V_{res}, koja odgovara horizontalnoj nosivosti preostalog elemenata.

Navedeni parovi vrijednosti sila – pomak određeni su na temelju očitanja s primarnih krivulja odgovora ispitnih uzoraka i vizualnih opažanja. Primarne krivulje odgovora ispitnih uzoraka konstruirane su spajanjem vršnih vrijednosti prvog ciklusa u svakom koraku horizontalnog opterećenja.

Dinamičke karakteristike ispitnih uzoraka promatrane su kroz disipaciju unesene energije, ekvivalentno viskozno prigušenje i period. Disipacija unesene energije (E_D) određena je za oba ciklusa u svakom koraku horizontalnog opterećenja, a definirana je površinom petlje histerezne krivulje odgovora ispitnih uzoraka (Slika 6.9 a)). U literaturi se mogu pronaći dva pristupa ocjene disipacije energije. U prvom pristupu promatra se ukupno disipirana energija koja se određuje kao zbroj energija disipiranih u svakom ciklusu opterećenja dok se kod drugog pristupa promatra disipacija energije po jedinici pomaka ispitnog uzorka. Disipacija energije po jedinici pomaka (E_D^*) određuje se na način da se energija disipirana u određenom koraku opterećenja podijeli s pripadnim pomakom koji je određen kao zbroj apsolutnih vrijednosti pomaka pozitivne i negativne faze opterećenja pomoću izraza (6.1):

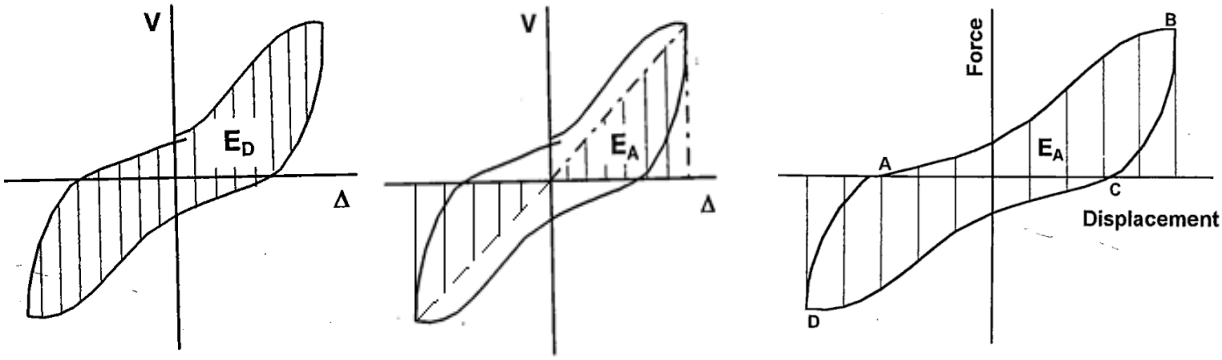
$$E_{D,i}^{*} = \frac{E_{D,i}}{2 \cdot \left| \Delta_i \right|} \tag{6.1}$$

Prilikom analize disipacije energije ispitnih uzoraka odabran je drugi pristup, tj. dan je prikaz disipacije energije po jedinici pomaka. U oba su slučaja dobivene vrijednosti kvantitativnog karaktera.

Ekvivalentno viskozno prigušenje (ξ) ispitnih uzoraka određeno je pomoću izraza (6.2) za oba ciklusa u svakom koraku opterećenja:

$$\xi = \frac{E_D}{2 \cdot \pi \cdot E_A} \tag{6.2}$$

pri čemu je E_D disipirana, a E_A apsorbirana energija. U literaturi se mogu pronaći dva načina određivanja apsorbirane energije. Kod prvog se načina apsorbirana energija (E_A) promatra kao potencijalna deformacijska energija (Slika 6.9 b)) dok se kod drugog načina promatra kao uloženi rad (E_A*) prilikom deformiranja ispitnih uzoraka. Uloženi rad je prikazan Slikom 6.9 c) i određen pomakom od točke A do točke B u jednom smjeru te pomakom od točke C do točke D u drugom smjeru horizontalnog opterećenja. Prilikom proračuna ekvivalentnog viskoznog prigušenja ispitnih uzoraka apsorbirana energija određena je na oba načina te je dan osvrt na dobivene razlike rezultata.



a) b) c)

Slika 6.9 *Prikaz disipirane (E_D) i apsorbirane energije (E_A) u jednom koraku horizontalnog opterećenja*

Osnovni period osciliranja ispitnih uzoraka određen je pomoću izraza (6.3). Pripadno opterećenje, tj. masa uzoraka, određena je iz ukupnog vertikalnog opterećenja koje je određeno kao dvostruka srednja vrijednost uzdužne sile u stupovima. Vlastita je težina uzoraka zanemarena. Početna krutost ispitnih uzoraka određena je na temelju rezultata ispitivanja:

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{m}{K_i}} \tag{6.3}$$

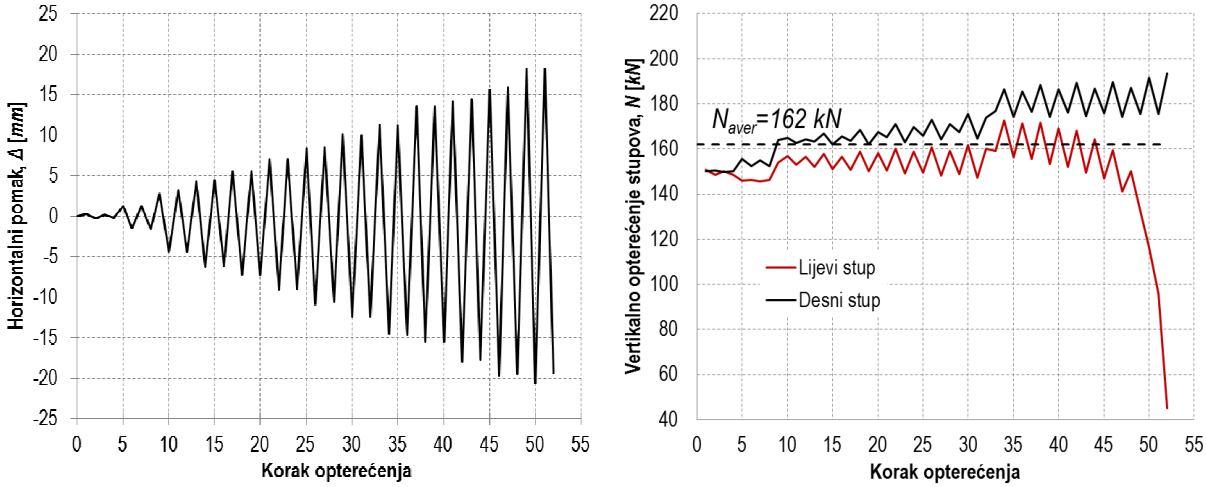
Mehanizam sloma ispitnih uzoraka promatran je kroz pojavu i razvoj pukotina na zidanom ispunu i na armirano-betonskim okvirima. Identifikacija mehanizama sloma elemenata sustava okvir s ispunom provedena je prema klasifikaciji opisanoj u *Poglavlju 2*. Na temelju opažanja pukotinskog stanja zidanog ispuna, određena su područja oštetljivosti istog te je dan prikaz slijeda pojave pojedinih mehanizama sloma za svaki ispitni uzorak.

6.2. Rezultati ispitivanja skupine uzoraka *O1*

Skupina ispitnih uzoraka *O1* sadrži ukupno šest modela neduktilnih armirano-betonskih okvira sa zidanim ispunom i jedan model neduktilnog armirano-betonskog okvira bez zidanog ispuna. Rezultati ispitivanja su u nastavku teksta dani za pojedini ispitni uzorak, a analizirani su na način opisan u prethodnom poglavlju.

6.2.1. Rezultati ispitivanja uzorka *O1*

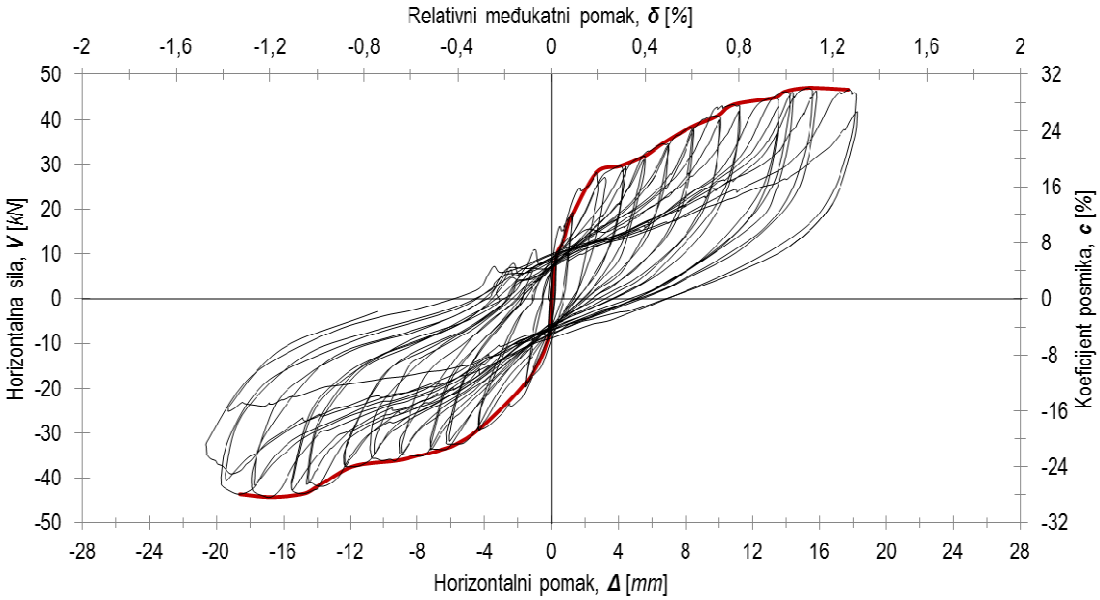
Ispitni uzorak *O1* prazan je neduktilni armirano-betonski okvir čiji rezultati ispitivanja predstavljaju referentne vrijednosti prilikom usporedbe doprinosa promatranih parametara sustava okvir s ispunom. Karakteristike i izvedba uzorka opisani su u *Poglavlju 3*. Horizontalno opterećenje uzorka prikazano je Slikom 6.10 a) u ovisnosti o koraku opterećenja dok je varijacija uzdužne sile u stupovima, uz naznačenu srednju vrijednost, prikazana Slikom 6.10 b).



a) b)

Slika 6.10 *Prikaz horizontalnog i vertikalnog opterećenja ispitnog uzorka O1*

Rezultati ispitivanja u obliku histerezne i primarne krivulje odgovora uzorka prikazani su Slikom 6.11. Na sekundarnoj vertikalnoj osi dan je prikaz odnosa vertikalnog i horizontalnog opterećenja (koeficijent posmika *c*) pri svakom koraku, izražen u % dok je na sekundarnoj horizontalnoj osi prikazana vrijednost relativnog međukatnog pomak (*δ*).

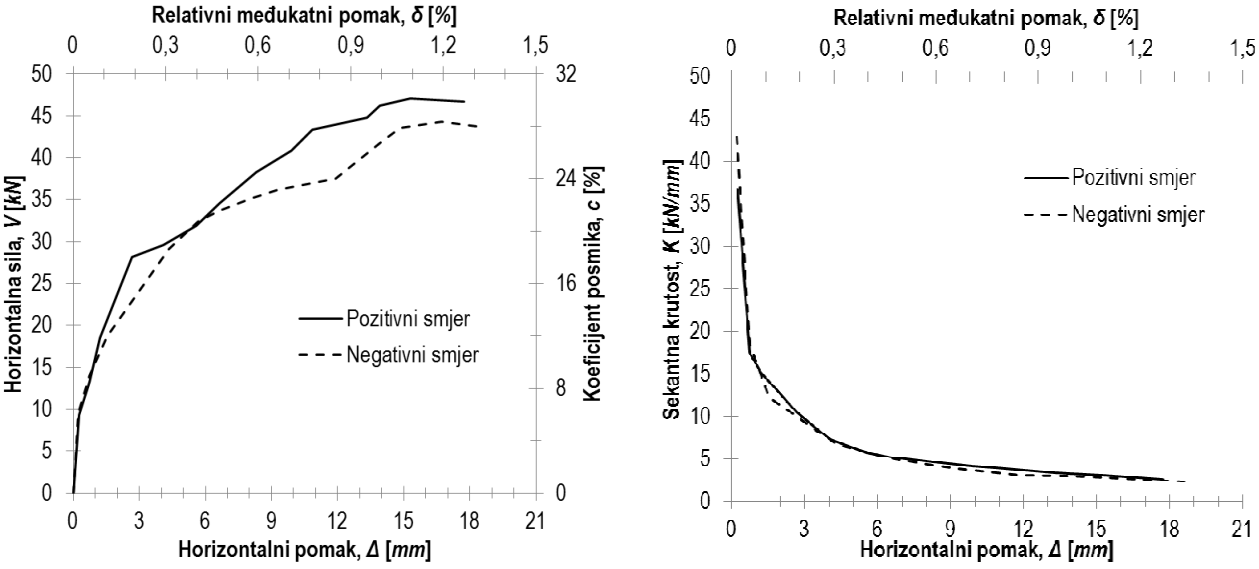


Slika 6.11 *Prikaz histerezne i primarne krivulje odgovora ispitnog uzorka O1*

Krutost i nosivost ispitnog uzorka, u promatranim karakterističnim točkama odziva, određena je za pozitivan i negativan smjer opterećenja, a dobiveni rezultati prikazani su u Tablici 6.1. Usporedba primarnih krivulja za pozitivni i negativni smjer opterećenja prikazana je Slikom 6.12 a). Prikaz sekantne krutosti, u ovisnosti o pomaku, dan je Slikom 6.12 b) za oba smjera opterećenja.

Tablica 6.1 *Krutost i nosivost ispitnog uzorka O1 u odabranim karakterističnim točkama odziva*

Smjer opterećenja	Pozitivni	Negativni
V_{cr} [*kN*]	28,1	-29,1
Δ_{cr} [*mm*]	2,7	-4,35
Početna krutost, K_i [*kN/mm*]	**10,4**	**6,7**
V_{max} [*kN*]	43,3	-37,5
Δ_{max} [*mm*]	10,9	-11,9
Krutost pri pojavi dominantnog mehanizma sloma, K_{max} [*kN/mm*]	**4,0**	**3,1**
V_{col} [*kN*]	46,7	-43,6
Δ_{col} [*mm*]	17,7	-18,6
Krutost pri slomu uzorka, K_{col} [*kN/mm*]	**2,6**	**2,3**
V_{res} [*kN*]	-	-

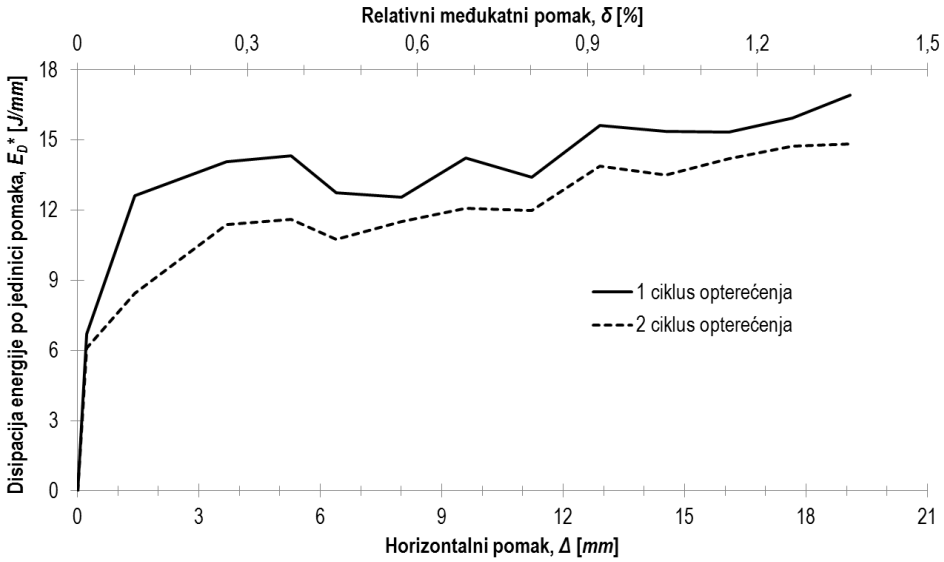


a) b)

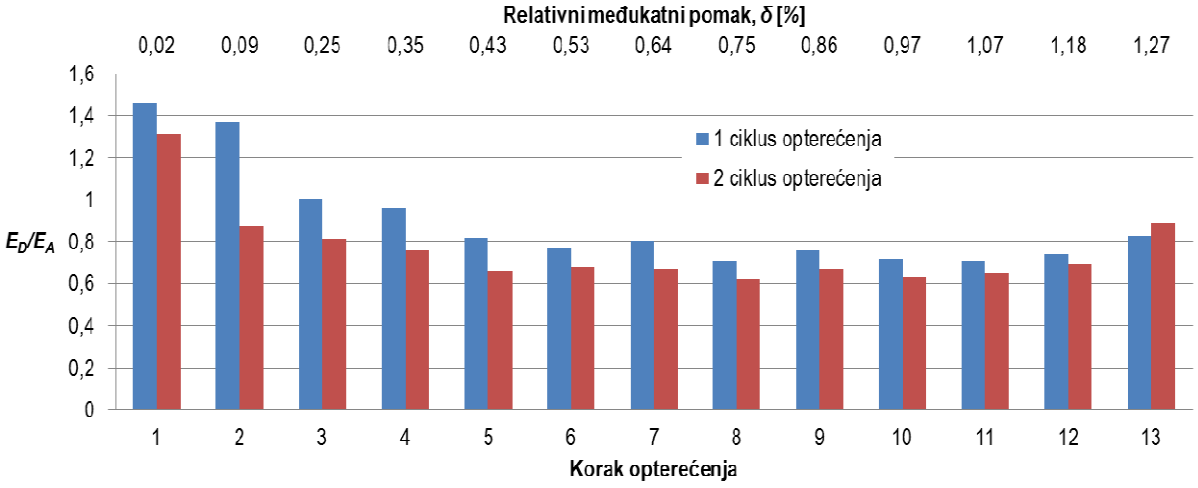
Slika 6.12 *Prikaz primarnih krivulja odgovora i sekantne krutosti, u ovisnosti o pomaku, pri pozitivnom i negativnom smjeru opterećenja ispitnog uzorka O1*

Iz usporedbe rezultata, prikazanih slikom 6.12 a) i b), vidljiva je veća nosivost uzorka pri pozitivnom te veća krutost pri negativnom smjeru opterećenja. Maksimalno ostvareni horizontalni pomaci približno su jednaki kao i trend smanjenja sekantne krutosti uzorka uslijed povećanja istog, neovisno o smjeru opterećenja. Odstupanje vrijednosti maksimalne nosivosti pri negativnom smjeru opterećenja iznosi 6% u odnosu na maksimalnu nosivost pri pozitivnom smjeru opterećenja. Početna krutost pri pozitivnom smjeru opterećenja manja je za 6% u odnosu na početnu krutost pri negativnom smjeru opterećenja.

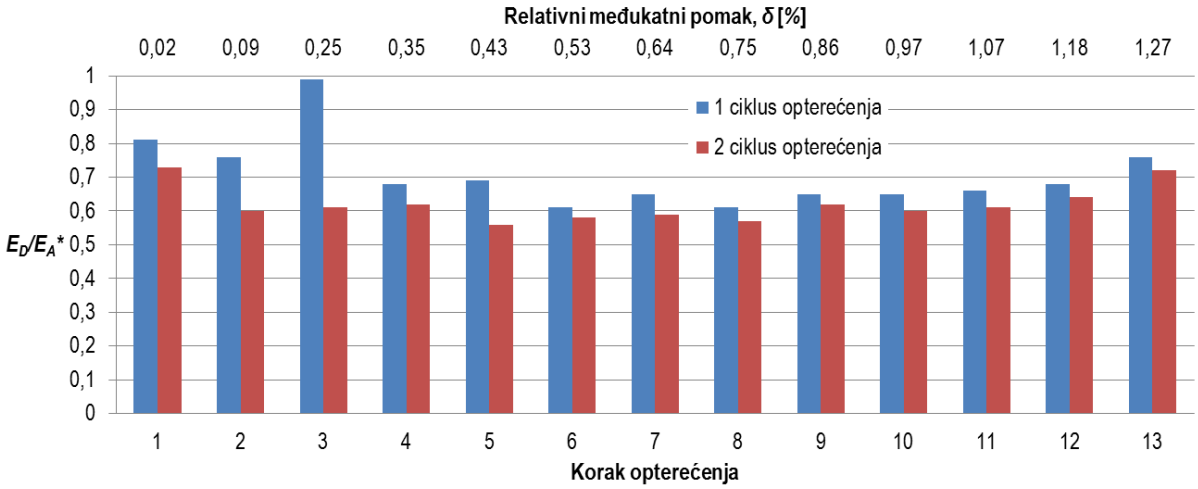
Disipacija energije po jedinici pomaka (E_D*) prikazana je Slikom 6.13. Odnos disipirane i apsorbirane energije prikazan je Slikom 6.14 u ovisnosti o načinu izračuna apsorbirane energije za oba ciklusa pri svakom koraku opterećenja gdje je na Slici 6.14 a) apsorbirana energija određena kao potencijalna deformacijska energija (E_A), a na Slici 6.14 b) kao uloženi rad (E_A*). Vrijednost prigušenja ispitnog uzorka također je određena u ovisnosti o načinu izračuna apsorbirane energije, a rezultati su prikazani Slikom 6.15 za oba ciklusa pri svakom koraku opterećenja. Ovisnost prigušenja o pomaku dana je Slikom 6.16 za oba načina izračuna apsorbirane energije.



Slika 6.13 *Disipacija energije po jedinici pomaka za ispitni uzorak O1*

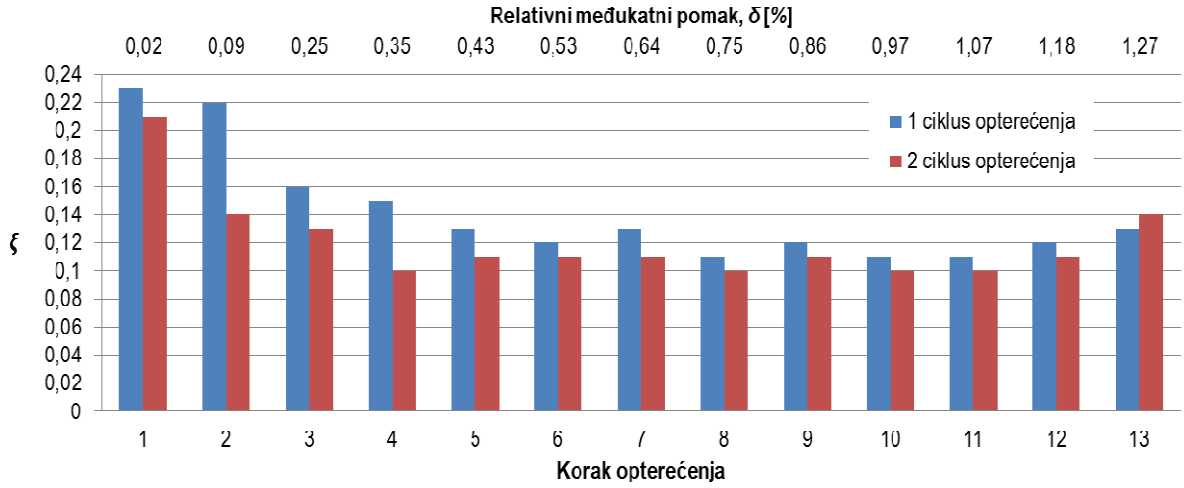


a)

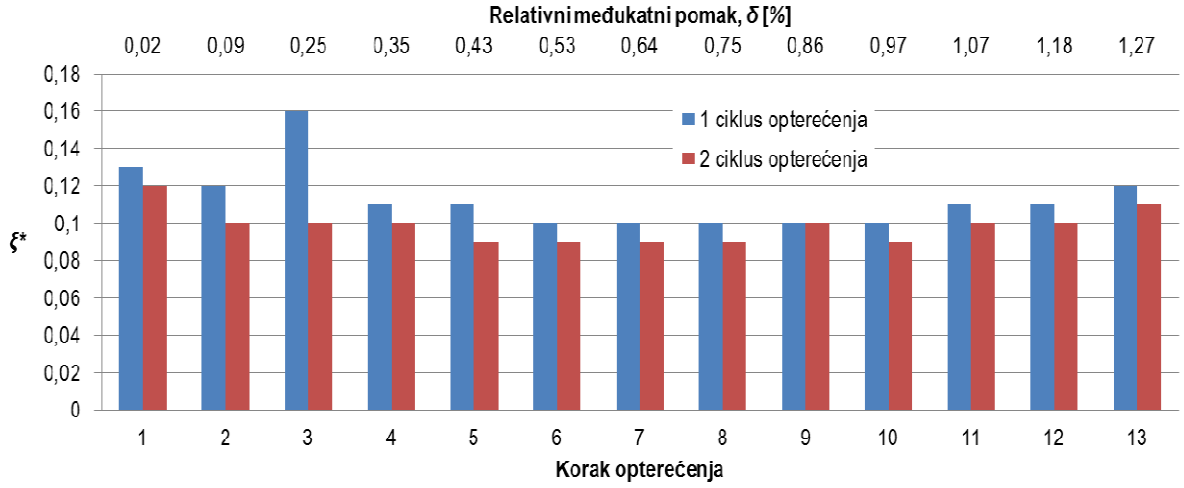


b)

Slika 6.14 *Odnos disipirane i apsorbirane energije za ispitni uzorak O1*

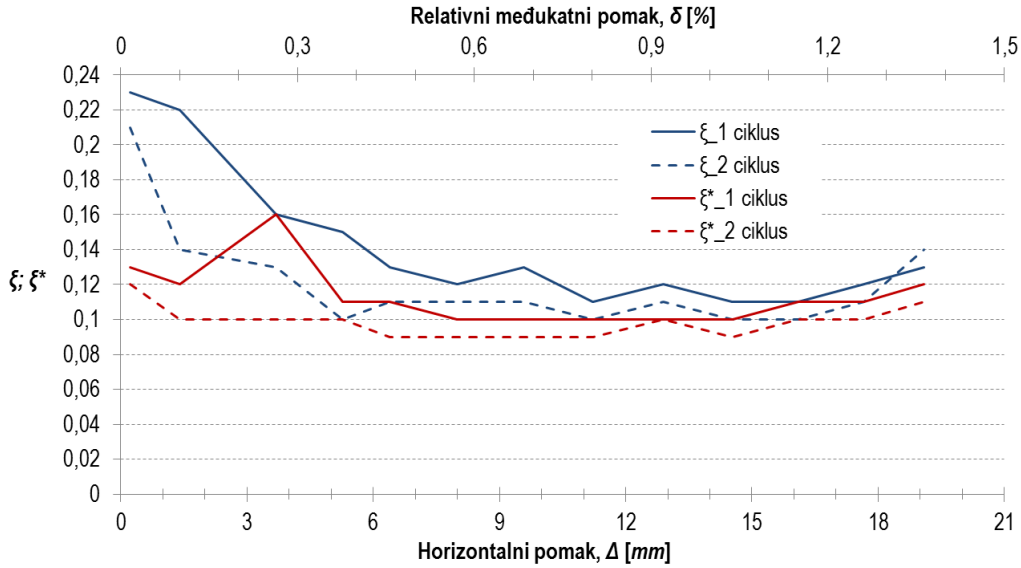


a)



b)

Slika 6.15 *Prigušenje ispitnog uzorka O1 u ovisnosti o načinu izračuna apsorbirane energije*



Slika 6.16 *Ovisnost prigušenja ispitnog uzorka O1 u odnosu na horizontalni pomak*

Prema dobivenim rezultatima (Slika 6.13), vidljivo je smanjenje disipacije energije po jedinici pomaka pri ponovljenim ciklusima opterećenja gdje su dobivene razlike u intervalu od zanemarivih 9% pri prvom koraku opterećenja pa do maksimalne vrijednosti od 33%. Navedene razlike određene su u odnosu na vrijednosti dobivene u prvim ciklusima opterećenja. Veća odstupanja promatrane veličine vidljiva su u području prije dosezanja maksimalno disipirane energije pri približnih 0,35% relativnog međukatnog pomaka. Nakon dosezanja maksimalne vrijednosti disipacije energije dolazi do približnog ujednačavanja razlika vrijednosti prvog i drugog ciklusa opterećenja, pri čemu je uočena srednja razlika u iznosu od 11%.

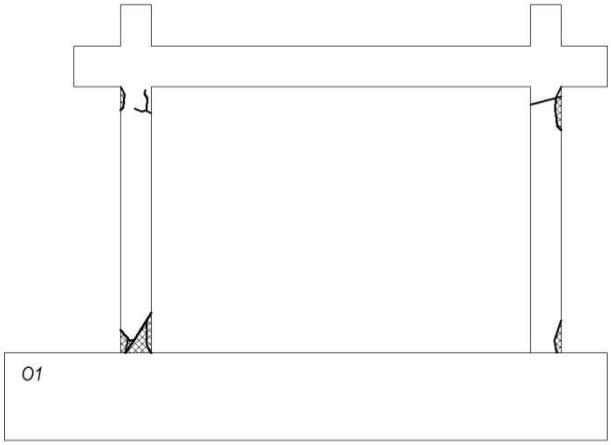
Odnos disipirane i apsorbirane energije (Slika 6.14) veći je pri prvih ciklusa opterećenja dok su razlike u vrijednostima promatranog odnosa pod izravnim utjecajem načina izračuna apsorbirane energije. Tako su pri izračunu apsorbirane energije, kao potencijalne deformacijske energije, dobivene veće vrijednosti promatranog odnosa što je posebno izraženo u prva tri koraka opterećenja. Dobivene vrijednosti su u intervalu od 0,71 do 1,46 za prve cikluse i od 0,62 do 1,31 za druge cikluse opterećenja. Kod izračuna apsorbirane energije, kao uloženog rada, dobivene vrijednosti su u intervalu od 0,61 do 1 za prve cikluse i od 0,56 do 0,73 za druge cikluse opterećenja. Povećanjem koraka opterećenja dolazi do smanjenja razlike u vrijednostima promatranog odnosa.

S obzirom da se prigušenje sustava određuje na temelju prethodno navedenog odnosa, pomoću izraza (6.2), dobiven je jednak trend u odstupanjima dobivenih vrijednosti u ovisnosti o načinu izračuna apsorbirane energije. Vrijednosti prigušenja, dobivene na temelju apsorbirane energije, određene su kao potencijalne deformacijske energije u intervalu su od 11 do 23% za prve cikluse dok su za druge cikluse opterećenja vrijednosti intervalu od 10 do 21% kritičnog prigušenja. Kod izračuna apsorbirane energije, kao uloženog rada, vrijednosti prigušenja nalaze se u intervalu od 10 do 16% za prve cikluse i od 9 do 12% za druge cikluse opterećenja.

Vlastiti period oscilacija ispitnog uzorka pri pozitivnom smjeru opterećenja iznosi 0,354 *s*, a pri negativnom 0,441 *s*.

Slom ispitnog uzorka uzrokovan je posmičnom slomom lijevog stupa u blizini spoja s temeljnom gredom pri pozitivnom smjeru opterećenja (Slika 6.17 a)). Slom je nastupio naglo, bez prethodne pojave posmičnih pukotina. Prije sloma lijevog stupa ispitnog uzorka, uočena su manja oštećenja lokalizirana na područjima krajeva stupova, u obliku raspucavanja i drobljenja zaštitnog sloja betona (Slike 6.17 c) i 6.17 d)).

a) *Oštećenje ispitnog uzorka O1*



b) *Prikaz pukotina na ispitnom uzorku O1*

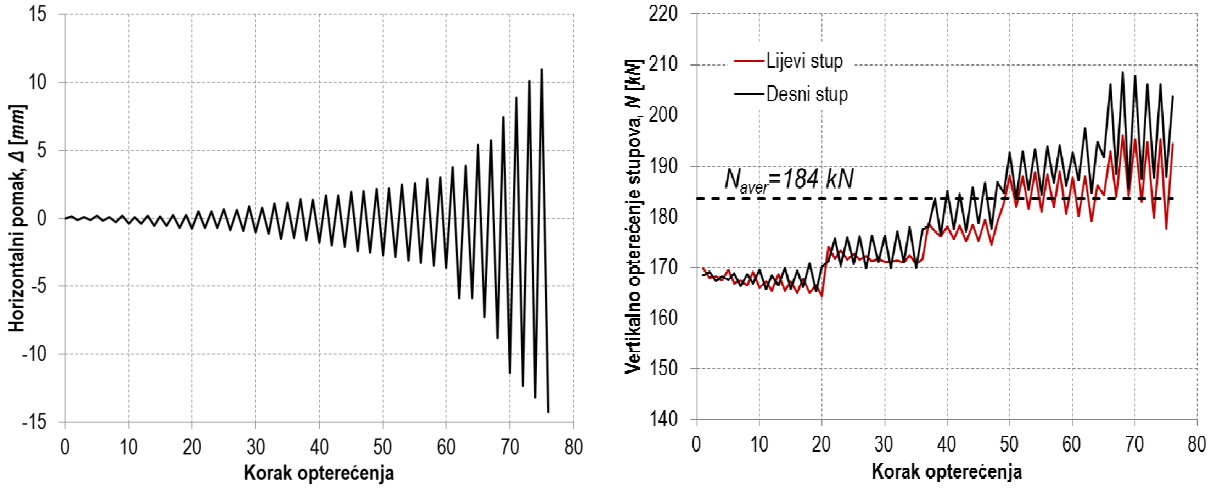
c) *Oštećenje lijevog stupa ispitnog uzorka*

d) *Oštećenje desnog stupa ispitnog uzorka*

Slika 6.17 *Prikaz oštećenja i sloma ispitnog uzorka O1*

6.2.2. Rezultati ispitivanja uzorka *O1_bpm*

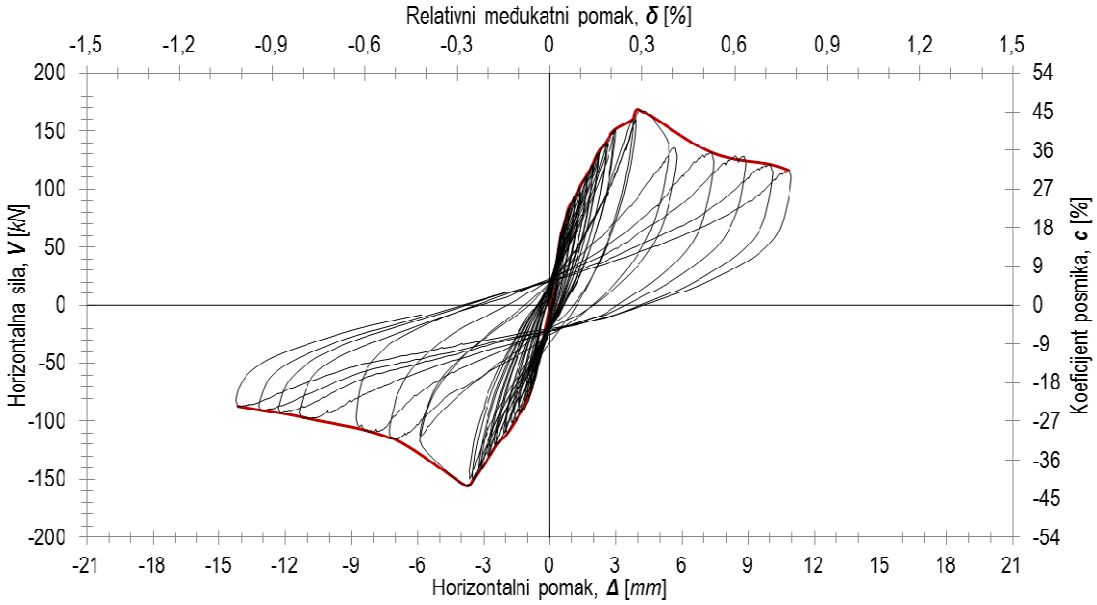
Ispitni uzorak *O1_bpm* je neduktilni armirano-betonski okvir tipa *O1* kod kojeg je ispun izveden od šupljih glinenih zidnih elemenata povezanih cementno-vapnenim mortom. Karakteristike i izvedba uzorka opisana je u *Poglavlju 3*. Horizontalno opterećenje uzorka prikazano je Slikom 6.18 a), u ovisnosti o koraku opterećenja, dok je varijacija uzdužne sile u stupovima prikazana Slikom 6.18 b).



a) b)

Slika 6.18 *Prikaz horizontalnog i vertikalnog opterećenja ispitnog uzorka O1_bpm*

Rezultati ispitivanja u obliku histerezne i primarne krivulje odgovora uzorka prikazani su Slikom 6.19. Na sekundarnoj vertikalnoj osi dan je prikaz odnosa vertikalnog i horizontalnog opterećenja (koeficijent posmka *c*) pri svakom koraku, izražen u %, dok je na sekundarnoj horizontalnoj osi prikazana vrijednost relativnog međukatnog pomak (*δ*).

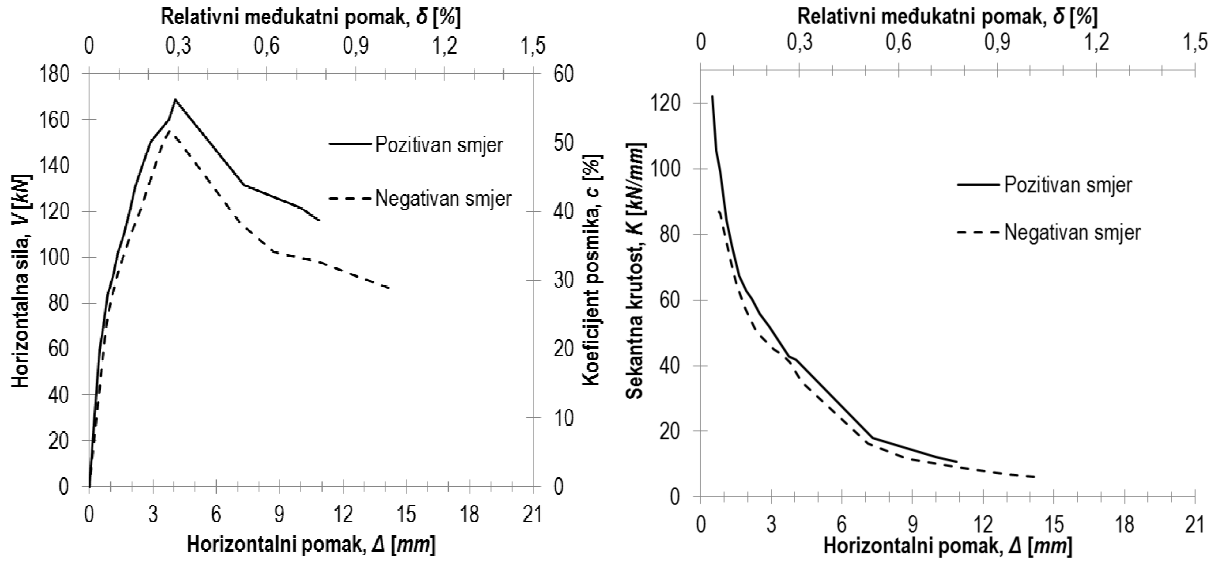


Slika 6.19 *Prikaz histerezne i primarne krivulje odgovora ispitnog uzorka O1_bpm*

Krutost i nosivost ispitnog uzorka u odabranim karakterističnim točkama odziva određena je za pozitivni i negativni smjer opterećenja, a dobiveni rezultati prikazani su Tablicom 6.2. Usporedba primarnih krivulja za pozitivni i negativni smjer opterećenja prikazana je Slikom 6.20 a). Prikaz sekantne krutosti, u ovisnosti o pomaku, dan je Slikom 6.20 b) za oba smjera opterećenja.

Tablica 6.2 *Krutost i nosivost ispitnog uzorka O1_bpm u odabranim karakterističnim točkama odziva*

Smjer opterećenja	Pozitivni	Negativni
V_{cr} [*kN*]	101,5	-109,5
Δ_{cr} [*mm*]	1,3	-1,9
Početna krutost, K_i [*kN/mm*]	**78,1**	**57,6**
V_{max} [*kN*]	160,0	-155,4
Δ_{max} [*mm*]	3,7	-3,8
Krutost pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispune, K_{max} [*kN/mm*]	**43,2**	**40,9**
V_{col} [*kN*]	116,2	-86,8
Δ_{col} [*mm*]	10,9	-14,1
Krutost pri slomu ispune, K_{col} [*kN/mm*]	**10,7**	**6,1**
V_{res} [*kN*]	**116,2**	**-86,8**



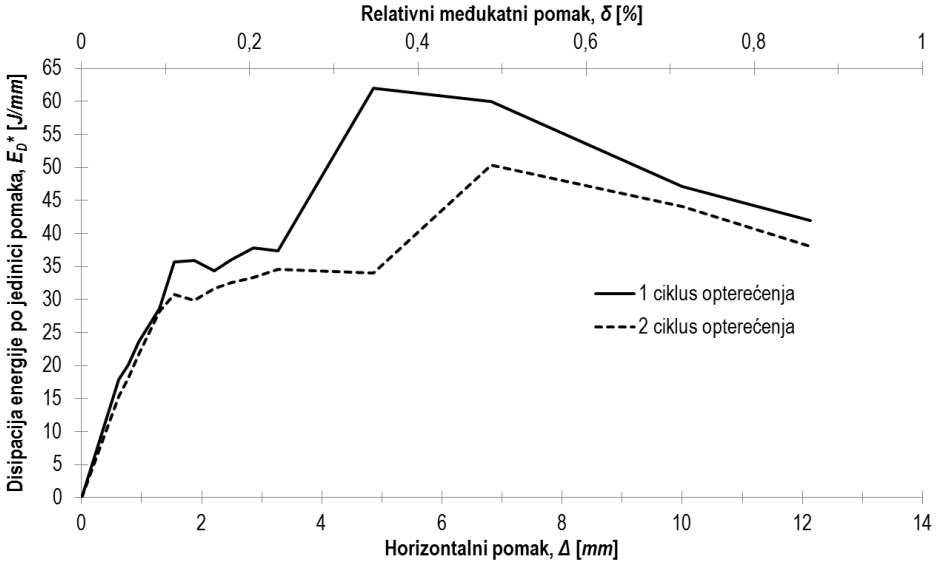
a) b)

Slika 6.20 *Prikaz primarnih krivulja odgovora i sekantne krutosti, u ovisnosti o pomaku, pri pozitivnom i negativnom smjeru opterećenja ispitnog uzorka O1_bpm*

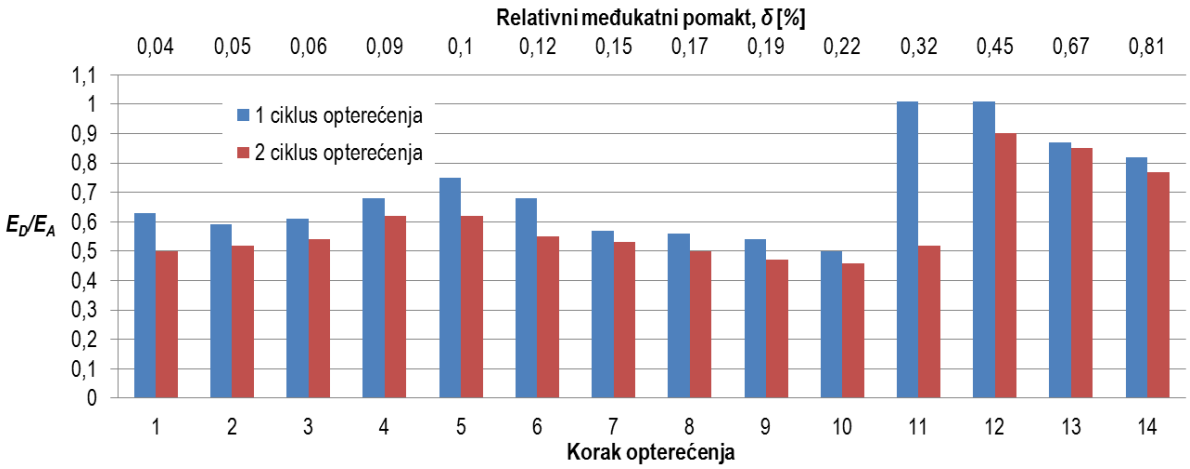
Iz usporedbe rezultata, prikazanih Slikama 6.20 a) i b), vidljiva je veća nosivost i početna krutost ispitnog uzorka pri pozitivnom smjeru opterećenja. Promatrane vrijednosti karakterističnih točaka odziva približno su jednaka za oba smjera opterećenja, pri čemu je uočena zanemariva vrijednost odstupanja s iznosom manjim od 8%. Navedeno odstupanje određeno je u odnosu na vrijednosti pri pozitivnom smjeru opterećenja. Jedina razlika u odzivu pozitivne i negativne faze opterećenja očituje se u pojavi očvršćivanja pozitivne faze nakon pojave dominantnog mehanizma sloma ispune. Navedena pojava može se pripisati uklještenju elemenata ispune, prvenstveno morta, na osnovnoj plohi sloma. Trend degradacije nosivosti uzorka nakon pojave dominantnog mehanizma

sloma ispuna približno je jednak za oba smjera opterećenja. Smanjenje sekantne krutostib uslijed povećanja horizontalnog pomakab približno je jednako za oba smjera opterećenja.

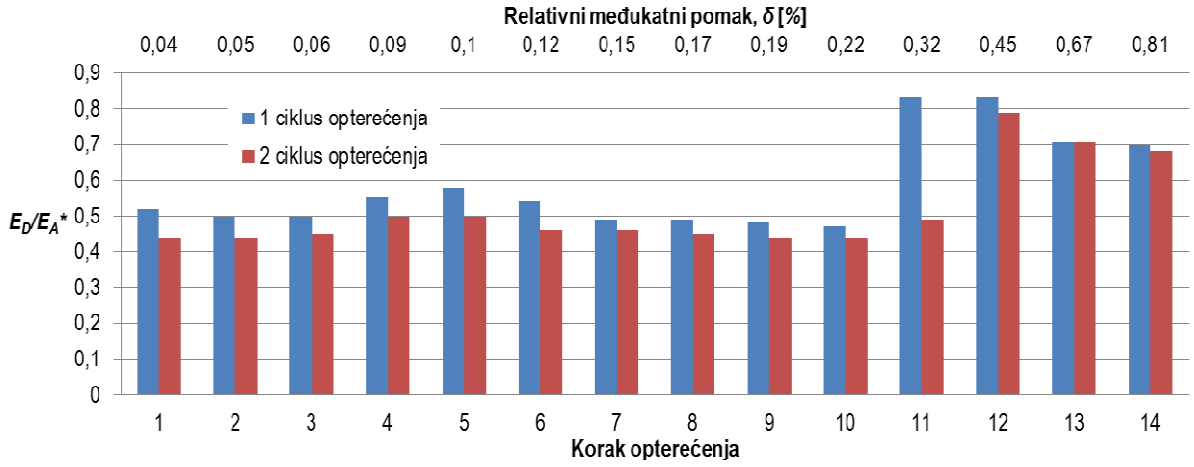
Disipacija energije po jedinici pomaka (E_D*) prikazana je Slikom 6.21. Odnos disipirane i apsorbirane energije prikazan je Slikom 6.22 u ovisnosti o načinu izračuna apsorbirane energije, za oba ciklusa pri svakom koraku opterećenja, gdje je na Slici 6.22 a) apsorbirana energija određena kao potencijalna deformacijske energija (E_A), a na Slici 6.22 b) kao uloženi rad (E_A*). Vrijednost prigušenje ispitnog uzorka također je određena u ovisnosti o izračunu apsorbirane energije, a rezultati su prikazani Slikom 6.23 za oba ciklusa pri svakom koraku opterećenja. Ovisnost prigušenja o pomaku dana je Slikom 6.24 za oba načina izračuna apsorbirane energije.



Slika 6.21 *Disipacija energije po jedinici pomaka za ispitni uzorak O1_bpm*

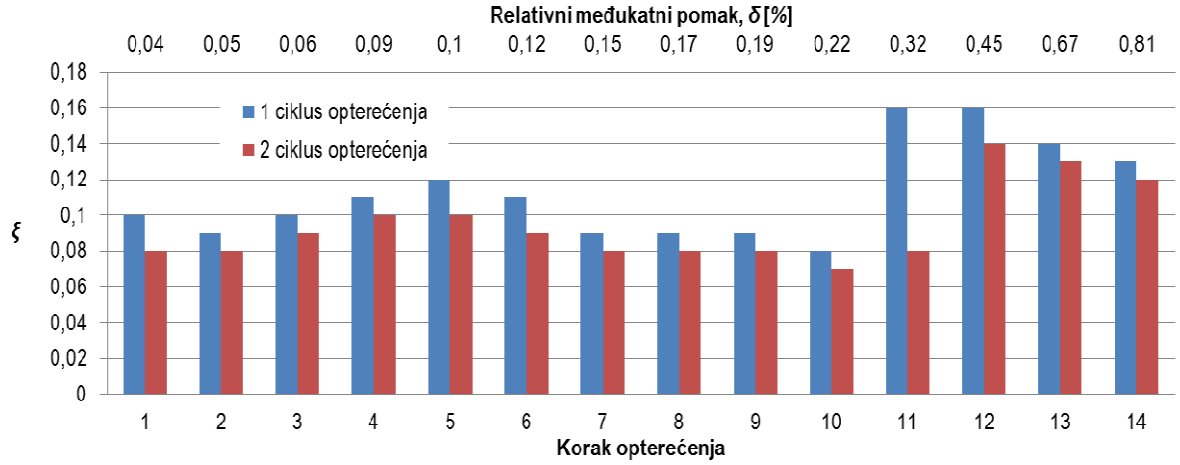


a)

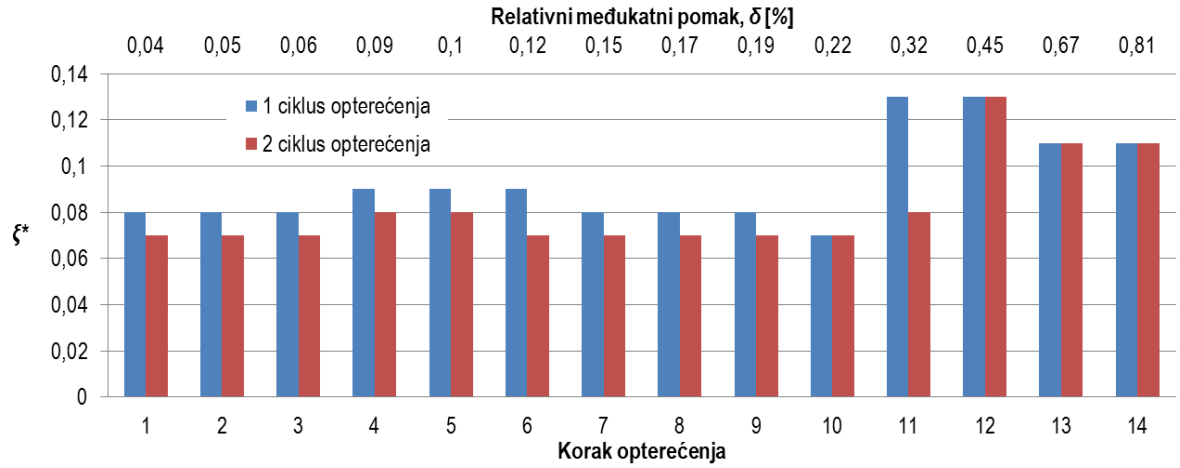


b)

Slika 6.22 *Odnos disipirane i apsorbirane energije za ispitni uzorak O1_bpm*

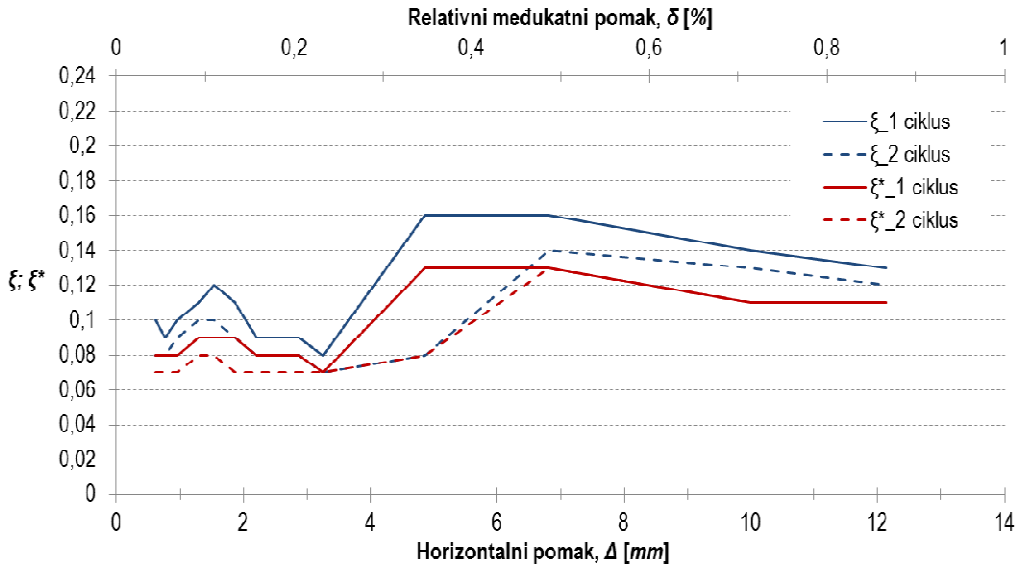


a)



b)

Slika 6.23 *Prigušenje ispitnog uzorka O1_bpm u ovisnosti o načinu izračuna apsorbirane energije*



Slika 6.24 *Ovisnost prigušenja ispitnog uzorka O1_bpm o horizontalnom pomaku*

Prema dobivenim rezultatima (Slika 6.21), vidljivo je smanjenje disipacije energije po jedinici pomaka pri ponovljenim ciklusima opterećenja, a dobivene su razlike u intervalu od zanemarivih 1% pa do maksimalnih 45% pri koraku opterećenja gdje je zabilježena maksimalna disipacija energije što odgovara relativnom međukatnom pomaku od približnih 0,46%. Maksimalna odstupanja dobivenih vrijednosti vidljiva su u području od 0,31 do 0,65% relativnog međukatnog pomaka. U početnim fazama opterećenja (do 0,31% relativnog međukatnog pomaka) i nakon dosezanja relativnog međukatnog pomaka, u iznosu od 0,95% odstupanja u disipaciji energije prvog i drugog ciklusa, zanemariva su. Navedena odstupanja određena su u odnosu na vrijednosti dobivene u prvim ciklusima opterećenja.

Odnos disipirane i apsorbirane energije (Slika 6.22) veći je pri prvim ciklusima opterećenja, a razlike u vrijednostima odnosa pod izravnim su utjecajem načina izračuna apsorbirane energije gdje su pri izračunu apsorbirane energije kao potencijalne deformacijske energije dobivene veće vrijednosti promatranog odnosa. Dobivene su vrijednosti u intervalu od 0,5 do 1 za prve cikluse i od 0,46 do 0,9 za druge cikluse opterećenja. Kod izračuna apsorbirane energije, kao uloženog rada, dobivene su vrijednosti odnosa u intervalu od 0,47 do 0,83 za prve cikluse i od 0,44 do 0,79 za druge cikluse opterećenja. Skok u vrijednostima odnosa disipirane i apsorbirane energije, neovisno o načinu izračuna apsorbirane energije, vidljiv je u završnim fazama ispitivanja gdje su i zabilježene najveće vrijednosti promatranog odnosa.

Vrijednosti prigušenja sustava (Slika 6.24) pod izravnim su utjecajem načina izračuna apsorbirane energije i horizontalnog pomaka gdje su uočene manje vrijednosti u slučaju izračuna apsorbirane energije kao uloženog rada. Pri početnim fazama opterećenja, do vrijednosti relativnog međukatnog pomaka od približnih 0,25%, vrijednosti su prigušenja u intervalu od 7 do 12%. Nakon

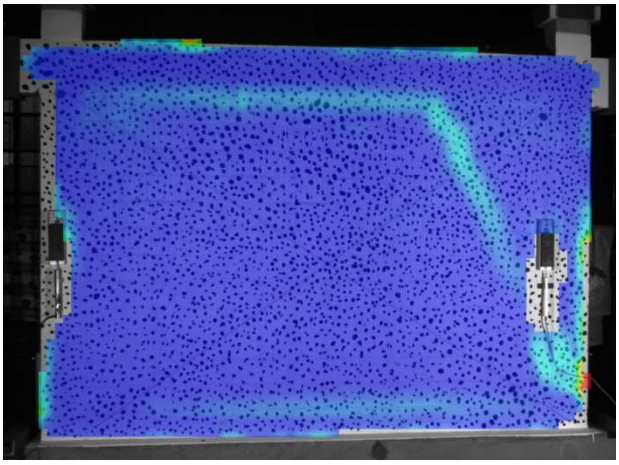
dosezanja navedenog relativnog međukatnog pomaka, dolazi do naglog skoka u prigušenju sustava, a dobivene su vrijednosti u intervalu od 8 do 16% kritičnog viskoznog prigušenja. Nagli skok u vrijednostima prigušenja uzrokovan je pojavom znatnog oštećenja uzorka nakon pojave dominantnog mehanizma sloma ispune. Odnos vrijednosti prigušenja sustava, u prvim i drugim ciklusima opterećenja, istovjetni su odnosima disipirane i apsorbirane energije gdje su, u oba odnosa, uočene manje vrijednosti pri drugim ciklusima opterećenja.

Vlastiti period oscilacija ispitnog uzorka pri pozitivnom smjeru opterećenja iznosi 0,138 *s*, a pri negativnom 0,160 *s*.

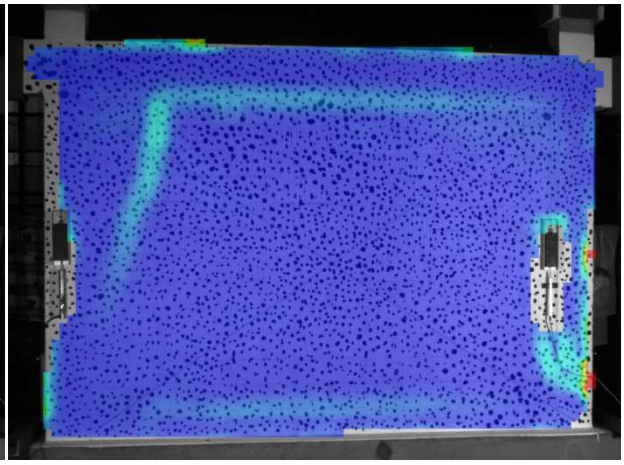
Prikaz oštećenja i pukotina ispitnog uzorka dan je Slikom 6.25. Prema podijeli navedenoj u *Potpoglavlju 2.4.,* slom ispuna klasificiran je kao drobljenje uglova. Prva značajna pukotina u ispunu, Slika 6.25 a), nastala je u lijevom gornjem uglu uzorka uslijed prekoračenja vlačne čvrstoće istog pri relativnom međukatnom pomaku u iznosu od 0,1% pri pozitivnom smjeru opterećenja. Pukotina se pružala kroz posljednja četiri reda ispune pod nagibom od približnih 63º u odnosu na horizontalu i u smjeru kontakta greda – ispun (odvajanje) prema neopterećenom uglu. Prva značajna pukotina pri negativnom smjeru opterećenja uočena je pri relativnom međukatnom pomaku od 0,14%. Pukotina nastaje u opterećenom uglu u obliku kose pukotine, pri čemu je zabilježen nagib od približnih 76º u odnosu na horizontalu (Slika 6.25 b)). Pukotina se prostirala kroz sedam zadnjih redova ispune i u smjeru kontakta greda – ispuna kao i kod pozitivnog smjera opterećenja. Prikaz prvih značajnih pukotina u ispunu uzorka, snimljen pomoću optičkog mjernog sustava, dan je Slikama 6.25 c) i d). U odnosu na vizualno opaženo oštećenje, prikazane slike otkrivaju i pojavu horizontalne pukotine u prvoj reški ispuna. Navedena pukotina vizualno je primijećena tek u kasnijim fazama opterećenja. Daljnjim povećanjem horizontalnog opterećenja nije uočena (značajna) pojava pukotina u ispunu, a oštećenje je lokalizirano isključivo u područjima uglova, pojavom drobljenja dijelova ispuna omeđene uglovima okvira i prvim pukotinama, te na kontaktu okvir – ispun. Gubitak i oštećenje kontakta okvir – ispun ukazuje na mogućnost pojave vanravninskog sloma ispuna uslijed djelovanja potresa, posebice pri velikim oštećenjima kao što su dobivena ispitivanjem (Slika 6.26). Prva pukotina na okviru nastaje pri negativnom smjeru opterećenja u području pripadnog čvora pri relativnom međukatnom pomaku od 0,23%. Pojava posmičnih pukotina na stupovima okvira uočena je pri relativnom međukatnom pomaku od 0,47% za negativni i 0,45% za pozitivni smjer opterećenja. Do formiranja posmičnih pukotina došlo je u istom koraku u drugom ciklusu opterećenja, u području u blizini čvorova okvira. Oštećenje okvira većinom je lokalizirano na vanjskoj strani stupova u obliku horizontalnih (savojnih) pukotina.

a) *Prva značajna pukotina pri pozitivnom smjeru opterećenja*

b) *Prva značajna pukotina pri negativnom smjeru opterećenja*

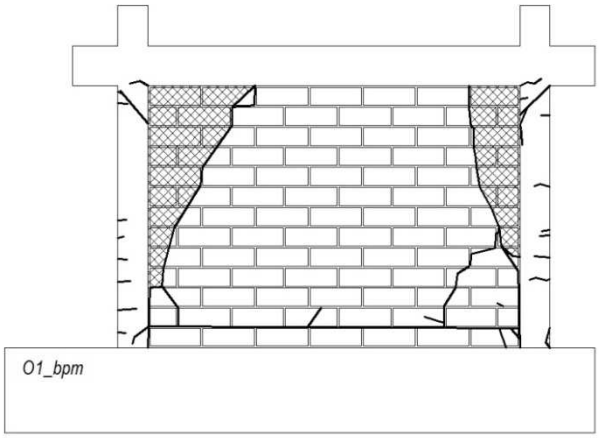


c) *Prva značajna pukotina pri pozitivnom smjeru opterećenja (ARAMIS)*



d) *Prva značajna pukotina pri negativnom smjeru opterećenja (ARAMIS)*

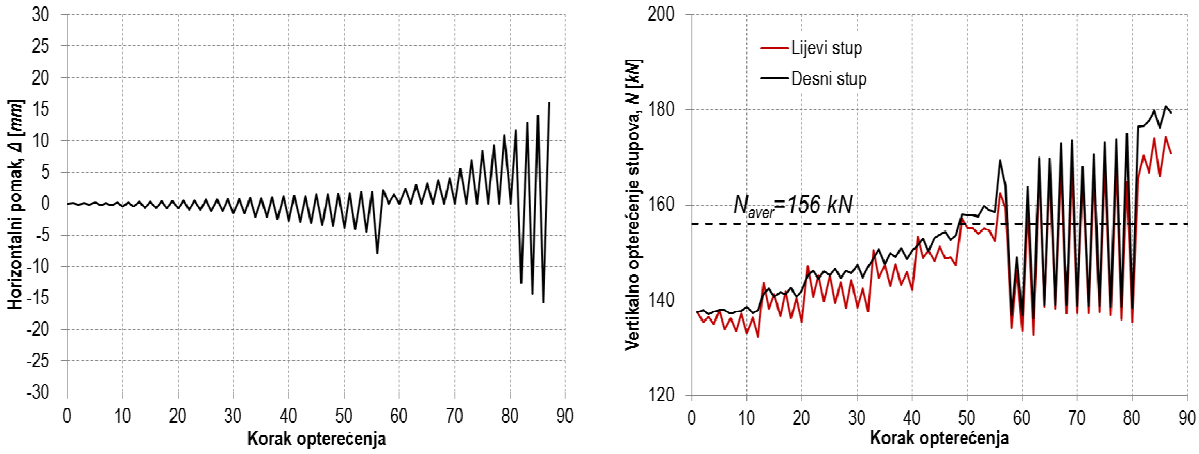
Slika 6.25 *Prve značajne pukotine zidane ispune O1_bpm ispitnog uzorka*



Slika 6.26 *Prikaz oštećenja i pukotina ispitnog uzorka O1_bpm*

6.2.3. Rezultati ispitivanja uzorka *O1_bpm**

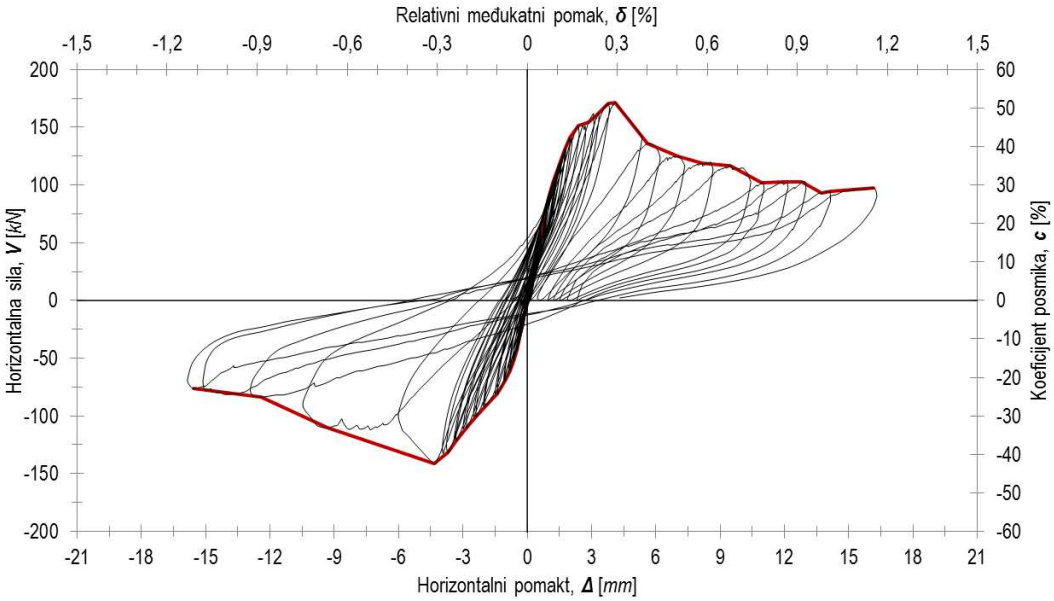
Ispitni uzorak *O1_bpm** po svim je karakteristikama identičan ispitnom uzorku *O1_bpm* čija su svojstva i izvedba opisani u *Poglavlju 3*. U nastavku teksta dane su samo konstrukcijske karakteristike u odabranim karakterističnim točkama ponašanja uz osvrt na uočeni mehanizam sloma. Nemogućnost prikaza dinamičkih karakteristika uzrokovana je greškom prilikom provođenja ispitivanja gdje je opterećenje uzorka u određenom području odgovora vršeno samo u pozitivnom smjeru. Uslijed navedene pogreške onemogućena je interpretacija vrijednosti disipacije energije i prigušenja uzorka. Međutim, navedena pogreška ne utječe na definiranje osnovnog perioda osciliranja ispitnog uzorka s obzirom da se određuje na temelju konstrukcijskih karakteristika. Horizontalno opterećenje uzorka i varijacija uzdužne sile u stupovima prikazane su Slikom 6.27 a) i b) u ovisnosti o koraku opterećenja. Za razliku od ostalih uzoraka, ondje je svaki korak opterećenja nanošen u jednom ciklusu.



a) b)

Slika 6.27 *Prikaz horizontalnog i vertikalnog opterećenja ispitnog uzorka O1_bpm**

Rezultati ispitivanja u obliku histerezne i primarne krivulje odgovora ispitnog uzorka, prikazani su Slikom 6.28. Na sekundarnoj vertikalnoj osi, dan je prikaz odnosa vertikalnog i horizontalnog opterećenja (*c*), pri svakom koraku, izražen u % dok je na sekundarnoj horizontalnoj osi prikazana vrijednost relativnog međukatnog pomak (*δ*).

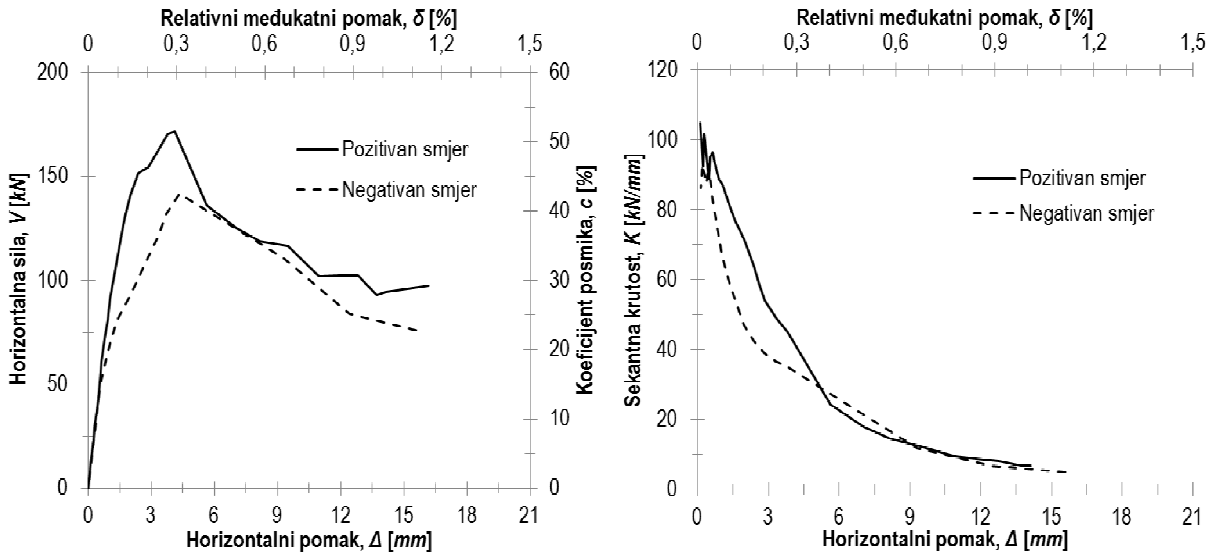


Slika 6.28 *Prikaz histerezne i primarne krivulje odgovora ispitnog uzorka O1_bpm**

Krutost i nosivost ispitnog uzorka, u odabranim karakterističnim točkama odziva, određena je za pozitivni i negativni smjer opterećenja, a dobiveni rezultati prikazani su Tablicom 6.3. Usporedba primarnih krivulja za pozitivni i negativni smjer opterećenja prikazana je Slikom 6.29 a). Prikaz sekantne krutosti, u ovisnosti o pomaku, dan je Slikom 6.29 b) za oba smjera opterećenja.

Tablica 6.3 *Krutost i nosivost ispitnog uzorka O1_bpm* u odabranim karakterističnim točkama odziva*

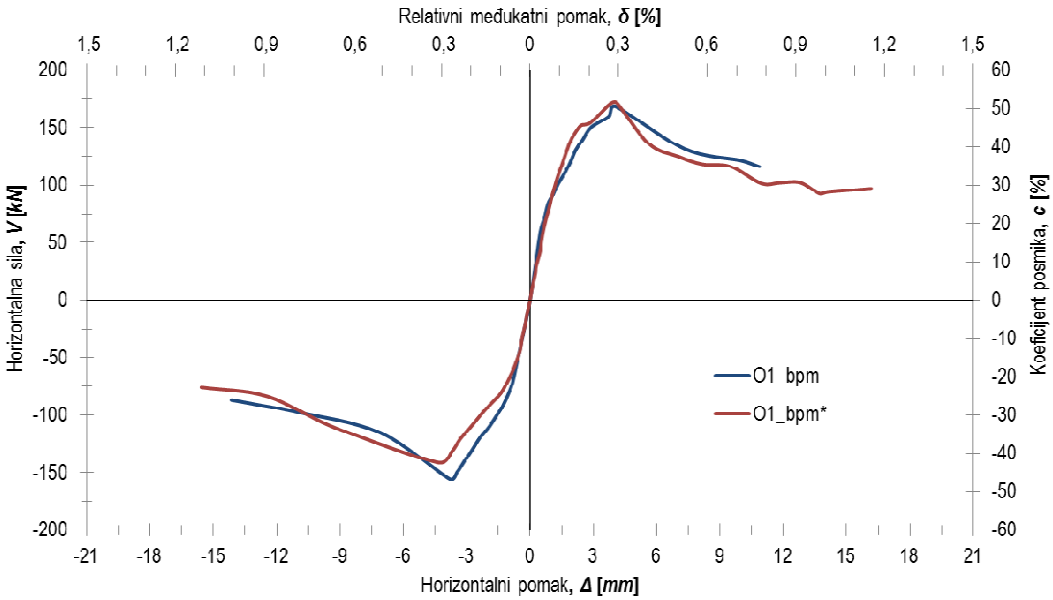
Smjer opterećenja	Pozitivni	Negativni
V_{cr} [*kN*]	101,6	-92,0
Δ_{cr} [*mm*]	1,2	-1,9
Početna krutost, K_i [*kN/mm*]	**84,7**	**48,4**
V_{max} [*kN*]	170,6	-141,5
Δ_{max} [*mm*]	3,8	-4,3
Krutost pri dominantnog mehanizma sloma ispune, K_{max} [*kN/mm*]	**44,9**	**32,9**
V_{col} [*kN*]	94,2	-76,1
Δ_{col} [*mm*]	14,1	-15,6
Krutost pri slomu ispune, K_{col} [*kN/mm*]	**6,7**	**4,9**
V_{res} [*kN*]	94,2	-76,1



Slika 6.29 *Prikaz primarnih krivulja odgovora i sekantne krutosti, u ovisnosti o pomaku, pri pozitivnom i negativnom smjeru opterećenja ispitnog uzorka O1_bpm**

Iz usporedbe primarnih krivulja odgovora vidljiva je veća nosivost i početna krutost uzorka pri pozitivnom smjeru opterećenja. Odstupanja u vrijednostima horizontalne nosivosti izražena su u području odgovora uzorka prije pojave dominantnog mehanizma sloma ispune. Razlika u horizontalnoj nosivosti, pri pojavi dominantnog mehanizma sloma, iznosi 17% u odnosu na vrijednosti pri pozitivnom smjeru opterećenja. Ponašanje uzorka nakon pojave dominantnog mehanizma sloma približno je jednako za oba smjera opterećenja. Degradacija horizontalne nosivosti pri pozitivnom smjeru opterećenja, neposredno nakon pojave dominantnog sloma ispune, izražajnija je u odnosu na negativni smjer. S druge je strane ovisnost, tj. opadanje sekantne krutosti u odnosu na horizontalni pomak, izražajnije kod negativnog smjera opterećenja.

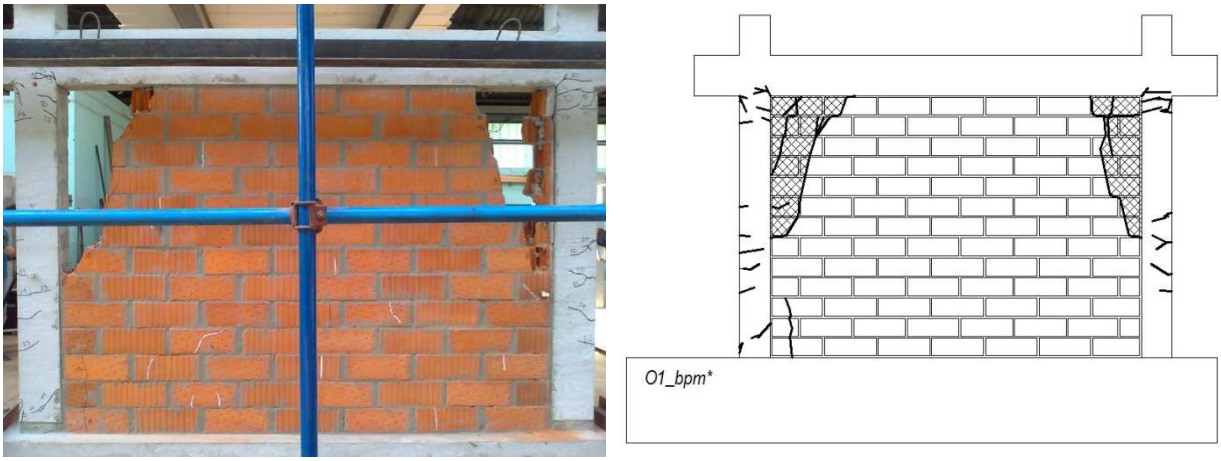
Ponašanje ispitnih uzoraka *O1_bpm* i *O1_bpm**, prikazano Slikom 6.30, gotovo je identično u području cijelog odgovora uzoraka. Neznatne razlike uočljive su pri negativnom smjeru opterećenja, a očituju se u vrijednosti horizontalne nosivosti i relativnog međukatnog pomaka pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna. Uočeno odstupanje horizontalne nosivosti iznosi približno 9% u odnosu na nosivosti ispitnog uzorka *O1_bpm*. Odstupanje vrijednosti relativnog međukatnog pomaka, pri pojavi dominantnog mehanizma sloma, također je određeno u odnosu na ispitni uzorak *O1_bpm* i iznosi približno 15%.



Slika 6.30 *Usporedba primarnih krivulja odgovora ispitnih uzoraka O1_bpm i O1_bpm**

Vlastiti period oscilacija ispitnog uzorka pri pozitivnom smjeru opterećenja iznosi 0,122 *s*, a pri negativnom 0,161 *s*.

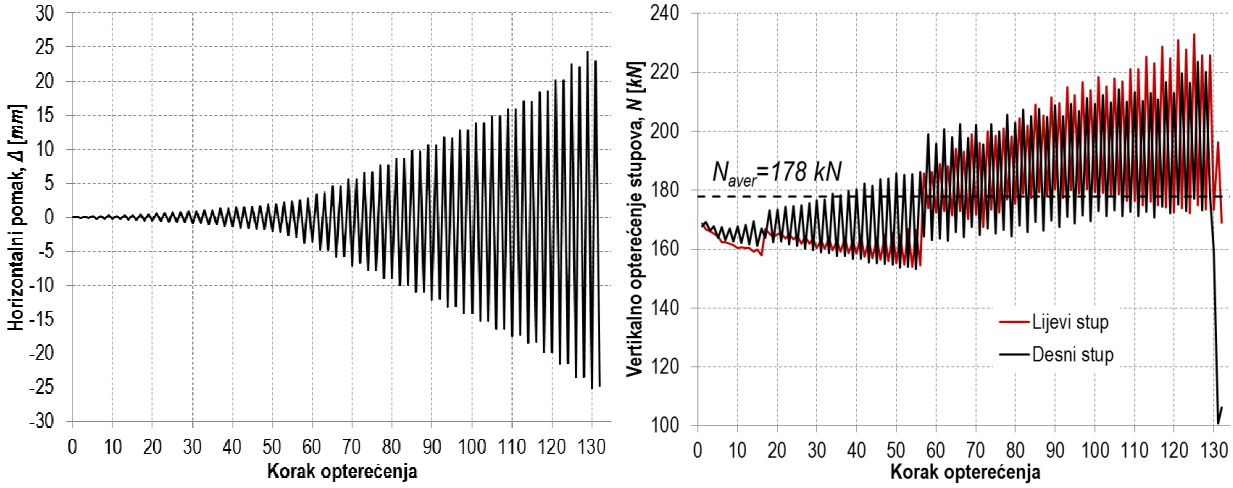
Oštećenje i pukotine ispitnog uzorka prikazane su Slikom 6.31. Mehanizam sloma ispuna i razvoj pukotina identičan je ispitnom uzorku *O1_bpm*. Osnovna razlika očituje se u veličini područja ispuna koji je zahvaćen drobljenjem i u oštećenju okvira ispitnog uzorka. Prve značajne pukotine u ispunu također su uočene u istom koraku pri pozitivnom i negativnom smjeru opterećenja pri vrijednosti relativnog međukatnog pomaka u iznosu od približnih 0,16‰. Nagib prvih značajnih pukotina, u odnosu na horizontalu, iznosi približno 75º. Također je upitna vanravniska stabilnost ispuna uslijed gubitka veze i znatnog oštećenja u području kontakta okvir – ispun. Značajnije oštećenje okvira ispitnog uzorka uzrokovano je većim relativnim međukatnim pomakom pri završnim koracima opterećenja, a uzrokovano je savojnim pukotinama. Za razliku od ispitnog uzorka *O1_bpm* ondje nije uočena pojava posmičnih pukotina na stupovima okvira. Međutim, koncentracija savojnih pukotina u području oslanjanja ispuna o okvir pri horizontalnom opterećenju upućuje na pojavu efekta kratkog stupa. Navedeno se može opravdati i gotovo potpunim izostankom savojnih pukotina u području stupa u blizini spoja s temeljnom gredom. Oštećenje grede nije uočeno.



Slika 6.31 *Prikaz oštećenja i pukotina ispitnog uzorka O1_bpm**

6.2.4. Rezultati ispitivanja uzorka *O1_cpm*

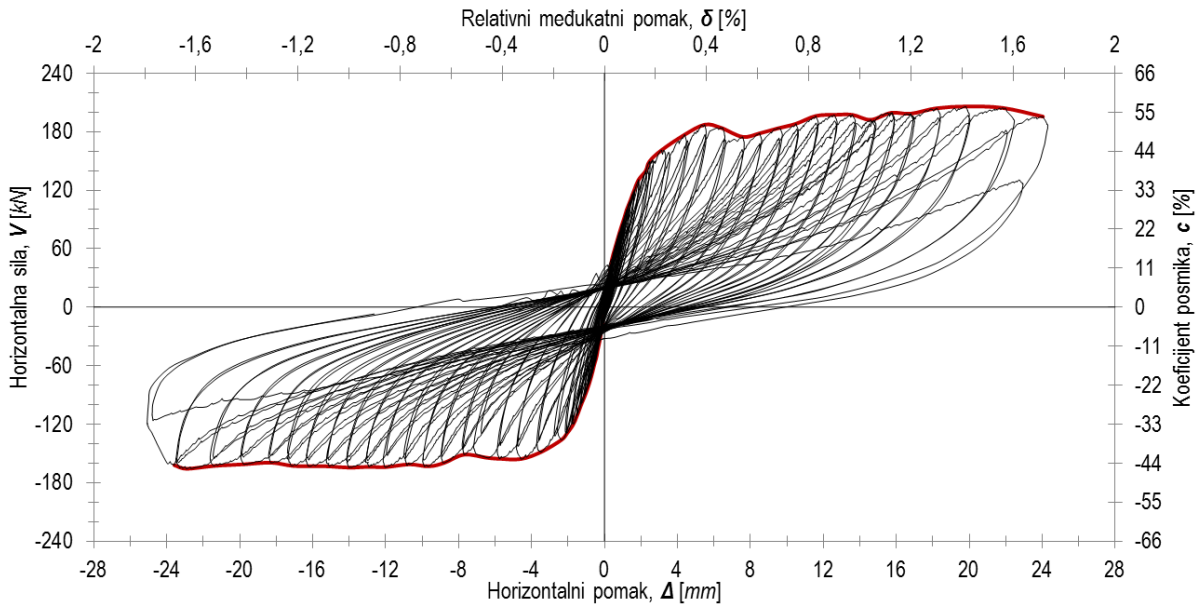
Ispitni uzorak *O1_cpm* neduktilni je armirano-betonski okvir tipa *O1* kod kojeg je ispun izveden od glinene opeke povezane cementno-vapnenim mortom. Karakteristike i izvedba uzorka opisana je u *Poglavlju 3*. Horizontalno opterećenje uzorka prikazano je Slikom 6.32 a), u ovisnosti o koraku opterećenja, dok je varijacija uzdužne sile u stupovima prikazana Slikom 6.32 b).



a) b)

Slika 6.32 *Prikaz horizontalnog i vertikalnog opterećenja ispitnog uzorka O1_cpm*

Rezultati ispitivanja u obliku histerezne i primarne krivulje odgovora uzorka prikazani su Slikom 6.33. Na sekundarnoj vertikalnoj osi dan je prikaz odnosa vertikalnog i horizontalnog opterećenja (*c*), pri svakom koraku, izražen u %, dok je na sekundarnoj horizontalnoj osi prikazana vrijednost relativnog međukatnog pomak (*δ*).

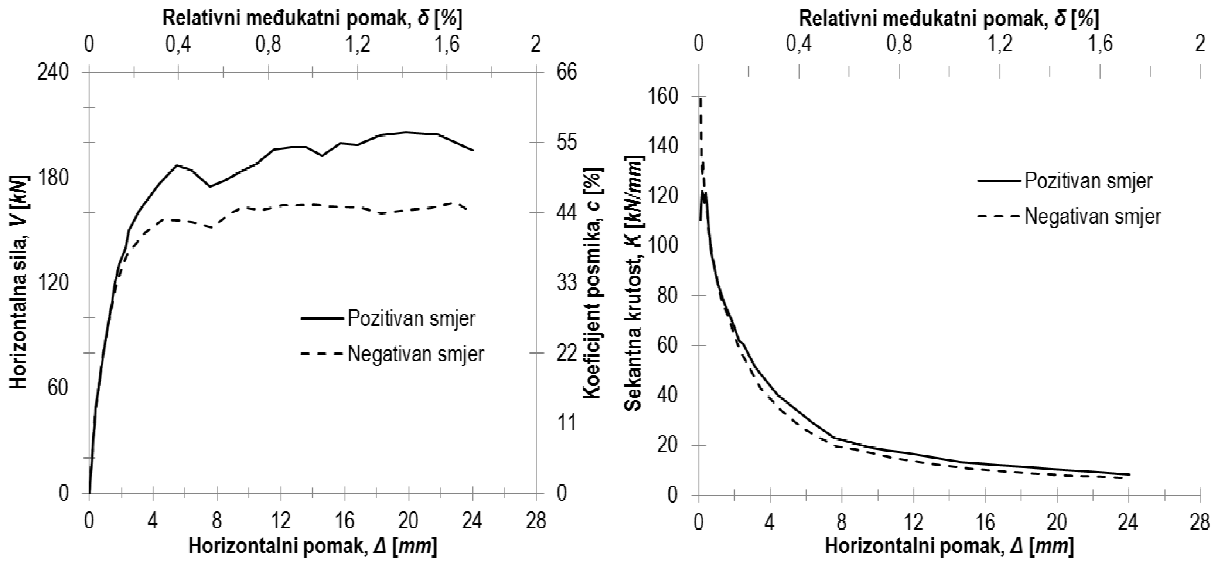


Slika 6.33 *Prikaz histerezne i primarne krivulje odgovora ispitnog uzorka O1_cpm*

Krutost i nosivost ispitnog uzorka u odabranim karakterističnim točkama odziva određena je za pozitivni i negativni smjer opterećenja, a dobiveni rezultati prikazani su Tablicom 6.4. Usporedba primarnih krivulja za pozitivni i negativni smjer opterećenja prikazana je Slikom 6.34 a). Prikaz sekantne krutosti, u ovisnosti o pomaku, dan je Slikom 6.34 b) za oba smjera opterećenja.

Tablica 6.4 *Krutost i nosivost ispitnog uzorka O1_cpm u odabranim karakterističnim točkama odziva*

Smjer opterećenja	Pozitivni	Negativni
V_{cr} [*kN*]	139,7	-136,2
Δ_{cr} [*mm*]	2,3	-2,4
Krutost pri pojavi značajne pukotine u ispuni, K_i [*kN/mm*]	**61,8**	**57,7**
V_{max} [*kN*]	187,2	-155,5
Δ_{max} [*mm*]	5,5	-5,7
Krutost pri dominantnog mehanizma sloma ispune, K_{max} [*kN/mm*]	**34,1**	**27,1**
V_{col} [*kN*]	-	-162,2
Δ_{col} [*mm*]	-	-23,6
Krutost pri slomu okvira, K_{col} [*kN/mm*]	**-**	**6,9**
V_{res} [*kN*]	-	-

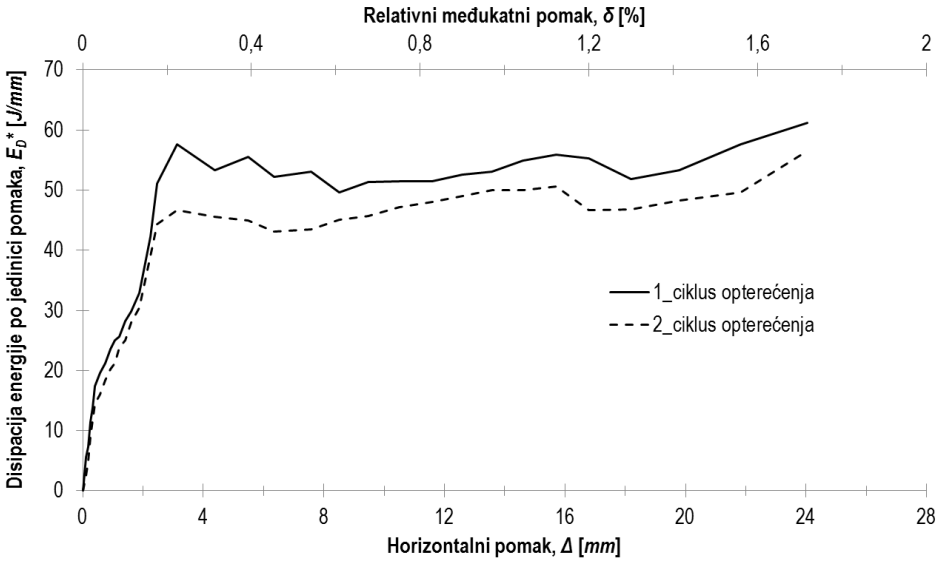


a) b)

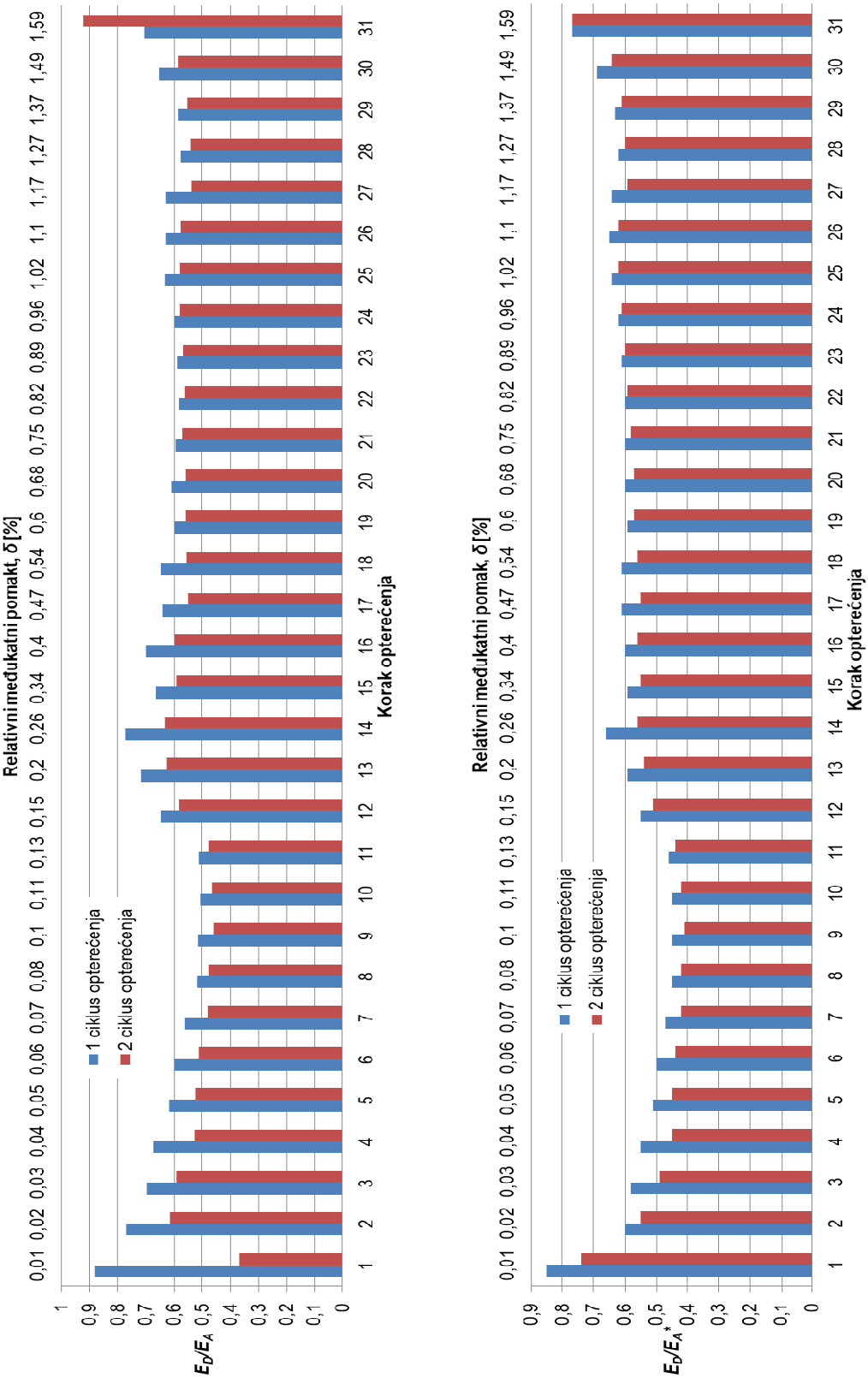
Slika 6.34 *Prikaz primarnih krivulja odgovora i sekantne krutosti, u ovisnosti o pomaku, pri pozitivnom i negativnom smjeru opterećenja ispitnog uzorka O1_cpm*

Iz usporedbe rezultata, prikazanih Slikom 6.34 a) i b), vidljiva je veća nosivost ispitnog uzorka pri pozitivnom te neznatno veća početna krutost pri negativnom smjeru opterećenja. Nosivost uzorka pri negativnom smjeru opterećenja manja je u svim promatranim karakterističnim točkama odziva, a najveće su razlike uočene kod horizontalne nosivosti pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispune V_{max} i sloma okvira V_{col}. Odstupanja kod navedenih vrijednosti približno su jednaka i iznose 17%. Odstupanje je određeno u odnosu na vrijednosti dobivene pri pozitivnom smjeru opterećenja. Trend degradacija nosivosti uzorka, nakon pojave dominantnog mehanizma sloma ispuna, približno je jednak za oba smjera opterećenja, a osnovna se razlika očituje u pojavi očvršćivanja pri pozitivnoj fazi opterećenja. Navedena pojava nema znatnog utjecaja na nosivost sustava kao cjelina. Smanjenje sekantne krutosti uslijed povećanja horizontalnog pomaka približno je jednako za oba smjera opterećenja.

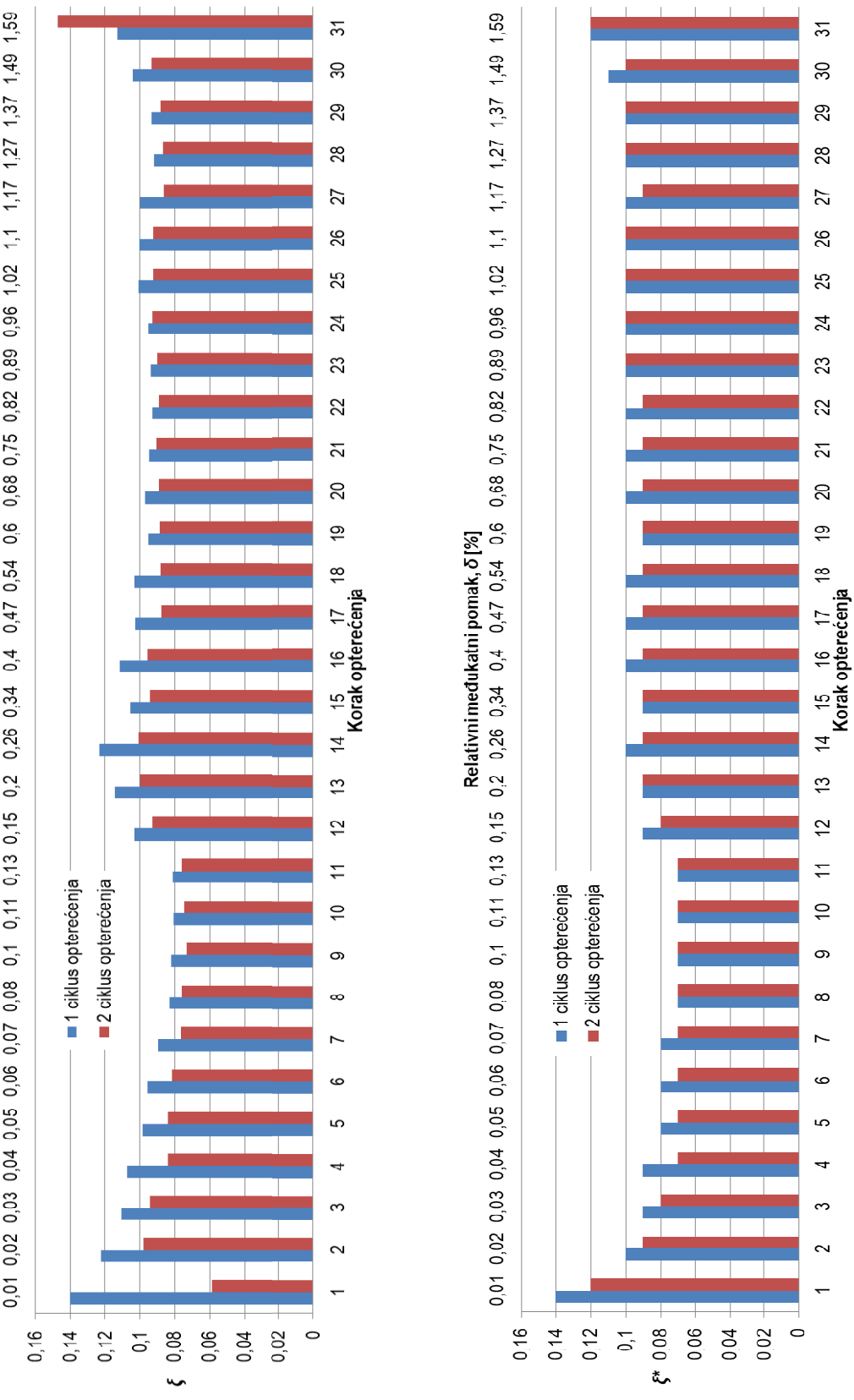
Disipacija energije po jedinici pomaka (E_D*) prikazana je Slikom 6.35. Odnos disipirane i apsorbirane energije prikazan je Slikom 6.36 a) i b), u ovisnosti o načinu izračuna apsorbirane energije, za svaki korak opterećenja. Na Slici 6.36 a) apsorbirana energija određena je kao potencijalna deformacijske energija (E_A), a na slici 6.36 b) kao uloženi rad (E_A*). Prigušenje ispitnog uzorka također je određeno za oba načina određivanja apsorbirane energije, a rezultati su prikazani Slikom 6.37 a) i b) za svaki korak opterećenja. Ovisnost prigušenja o pomaku dana je Slikom 6.38 za oba slučaja izračuna apsorbirane energije.



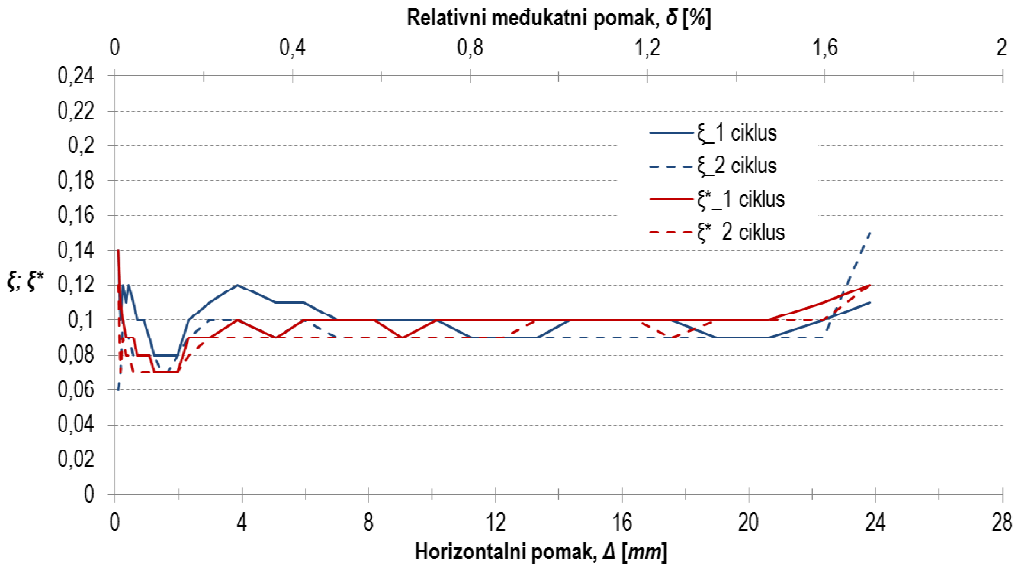
Slika 6.35 *Disipacija energije po jedinici pomaka za ispitni uzorak O1_cpm*



Slika 6.36 *Disipacija energije po jedinici pomaka za ispitni uzorak O1_cpm*



Slika 6.37 *Prigušenje ispitnog uzorkaO1_cpm u ovisnosti o načinu izračuna apsorbirane energije*



Slika 6.38 *Ovisnost prigušenja ispitnog uzorka O1_cpm o horizontalnom pomaku*

Prema rezultatima prikazanim Slikom 6.38 vidljiva je veća disipacija energije po jedinici pomaka pri prvim ciklusima opterećenja. U početnoj fazi ispitivanja, do vrijednosti relativnog međukatnog pomaka u iznosu od približnih 0,18%, razlika je u dispiaciji energije prvog i drugog ciklusa opterećenja neznatna. Najveće odstupanje u disipaciji energije po jedinici pomaka uočeno je pri vrijednosti relativnog međukatnog pomaka u intervalu od 0,18 do 0,61% u iznosu od prosječnih 14% u odnosu na vrijednosti dobivene pri prvim ciklusima opterećenja. Nakon dosezanja vrijednosti relativnog međukatnog pomaka, u iznosu od 0,61%, odstupanja su znatno manja s prosječnom vrijednošću u iznosu od 9%.

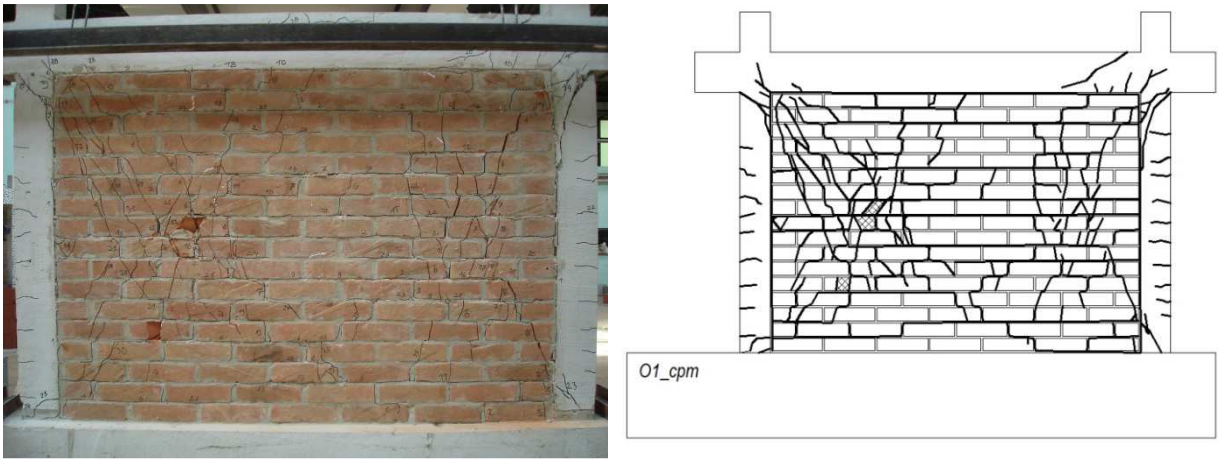
Vrijednost odnosa disipirane i apsorbirane energije ovisna je o načinu izračuna apsorbirane energije, pri čemu su uočene veće vrijednosti navedenog odnosa u slučaju kada je apsorbirana energija određena kao potencijalna deformacijska energija. Vrijednosti su promatranog odnosa u intervalu od 0,5 do 0,88 za prve te od 0,36 do 0,92 za druge cikluse opterećenja, pri izračunu apsorbirane energije, definirane kao potencijalne deformacijske energije. U slučaju izračuna apsorbirane energije, kao uloženog rada, dobivene su manje vrijednosti navedenog odnosa u intervalu od 0,45 do 0,85 za prve te od 0,41 do 0,77 za druge cikluse opterećenja. Neovisno o načinu izračuna apsorbirane energije, dobivene su manje vrijednosti pri drugim ciklusima opterećenja.

S obzirom da se prigušenje sustava određuje na temelju prethodno navedenog odnosa, dobiven je jednak trend u vrijednostima prvog i drugog ciklusa opterećenja. Vrijednosti su promatrane veličine intervalu od 8 do 14% za prve te od 6 do 14% kritičnog viskoznog prigušenja za druge cikluse opterećenja, pri izračunu apsorbirane energije, definirane kao potencijalne deformacijske energije. Kod izračuna apsorbirane energije, kao uloženog rada, promatrane su vrijednosti u intervalu od 7 do 14% za

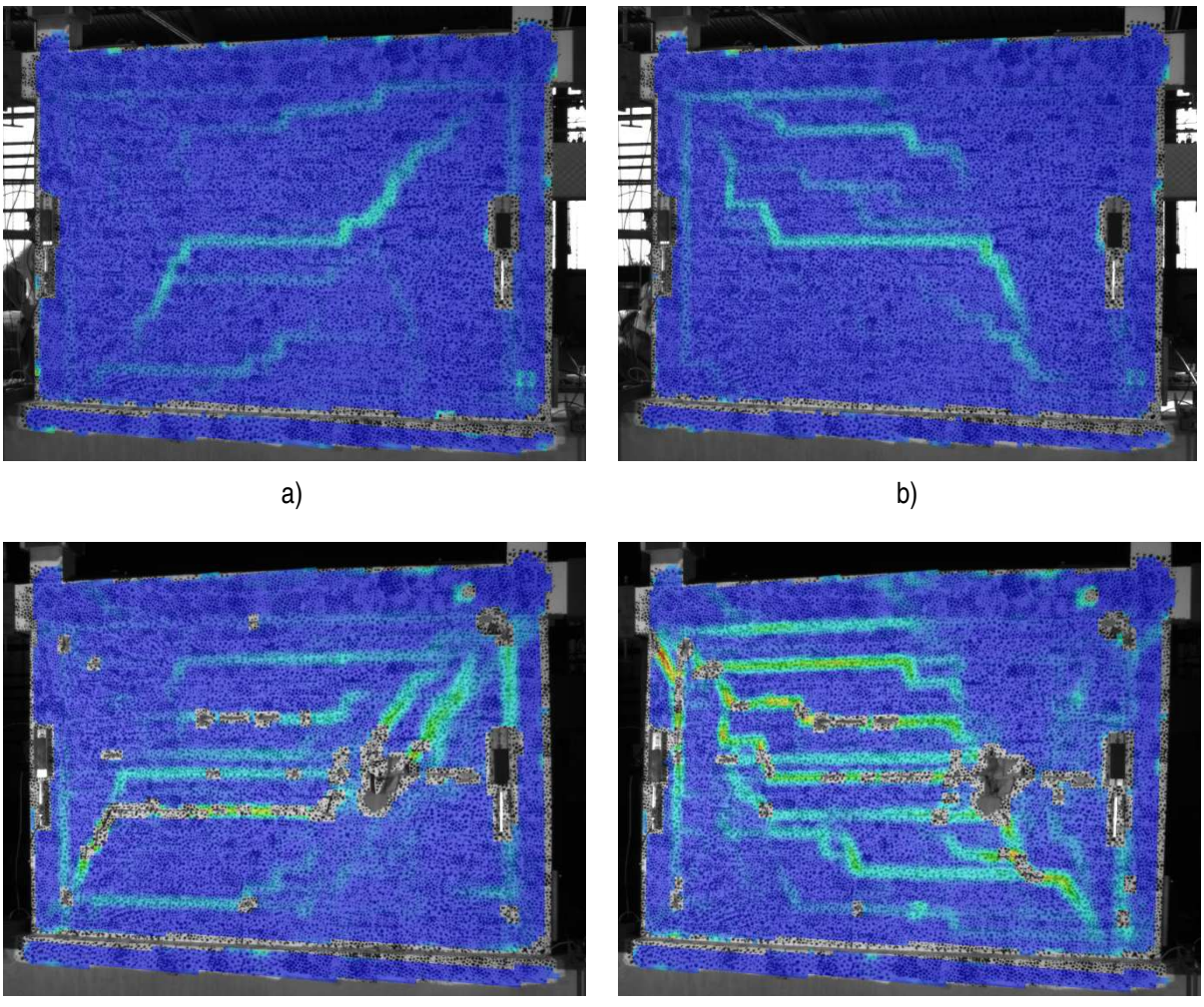
prve te od 7 do 12% za druge cikluse opterećenja. Vrijednosti dobivene pri prvom koraku opterećenje najvećih su iznosa što nije realno za očekivati. Navedena pojava može se pripisati osjetljivosti mjernih uređaja pogotovo ako se uzme u obzir da je pri prvom koraku ostvaren pomak od 0,1 *mm*. Osim toga, pri navedenom je pomaku uzorak u području elastičnog ponašanja, stoga se može reći da su dobivene vrijednosti mjerodavne.

Vlastiti period oscilacija ispitnog uzorka pri pozitivnom smjeru opterećenja iznosi 0,152 *s*, a pri negativnom 0,157 *s*.

Prikaz oštećenja i pukotina ispitnog uzorka dan je Slikom 6.39. Prema klasifikaciji navedenoj u *Poglavlju 2* uočeni slom ispuna može se definirati kao dijagonalni posmični slom. Do pojave prvih značajnih pukotina u ispunu došlo je u istom koraku opterećenja, a može se pripisati prekoračenju vlačne čvrstoće istog. Dominantni mehanizam sloma ispuna nastupio je uslijed prekoračenja dijagonalne posmične čvrstoće, u obliku dviju ili više pukotina pri približno jednakoj vrijednosti relativnog međukatnog pomaka pozitivnog i negativnog smjer opterećenja. Uočene pukotine nastale su spajanjem dijagonalnih i horizontalnih pukotina u reškama ispuna, a prolazile su cijelom duljinom dijagonale ispuna (Slika 6.40 a) i b)) gdje je slikom a) prikazan dominantni mehanizam sloma ispune pri pozitivnom, a slikom b) pri negativnom smjeru opterećenja. Dijagonalne pukotine, nastale u nasuprotnim uglovima uzorka, orijentirane su pod kutom od približnih 65º u odnosu na horizontalu. Nakon pojave dominantnog mehanizma sloma ispuna, uočeno je daljnje oštećenje istog u obliku vlačnih pukotina zidnih elemenata. Slike snimljene optičkim mjernim sustavom otkrivaju koncentraciju deformacija većinom na jednoj plohi sloma. U koracima horizontalnog opterećenja neposredno prije sloma stupa okvira, uočena je pojava znatnog broja horizontalnih pukotina u ispunu preko kojih je ostvaren prijenos opterećenja (Slika 6.40 c) i d)), pri čemu je slikom c) prikazan pozitivni, a slikom d) negativni smjer opterećenja. Slom okvira uzrokovan je naglim posmičnim slomom desnog stupa uzorka pri negativnom smjeru opterećenja. Pojava prvih posmičnih pukotina na stupovima okvira uočena je u pretposljednjem koraku opterećenja. Oštećenje stupova uzorka, prije pojave posmičnih pukotina, lokalizirano je na vanjskoj strani stupova u obliku horizontalnih (savojnih) pukotina. Posmične pukotine (slom) stupova prikazan je Slikom 6.41 a) i b) gdje je slikom a) prikazan lijevi, a slikom b) desni stup. Orijentacija lijevo-desno određena je iz čitateljeve perspektive.



Slika 6.39 *Oštećenje ispitnog uzorka O1_cpm*



a) b)

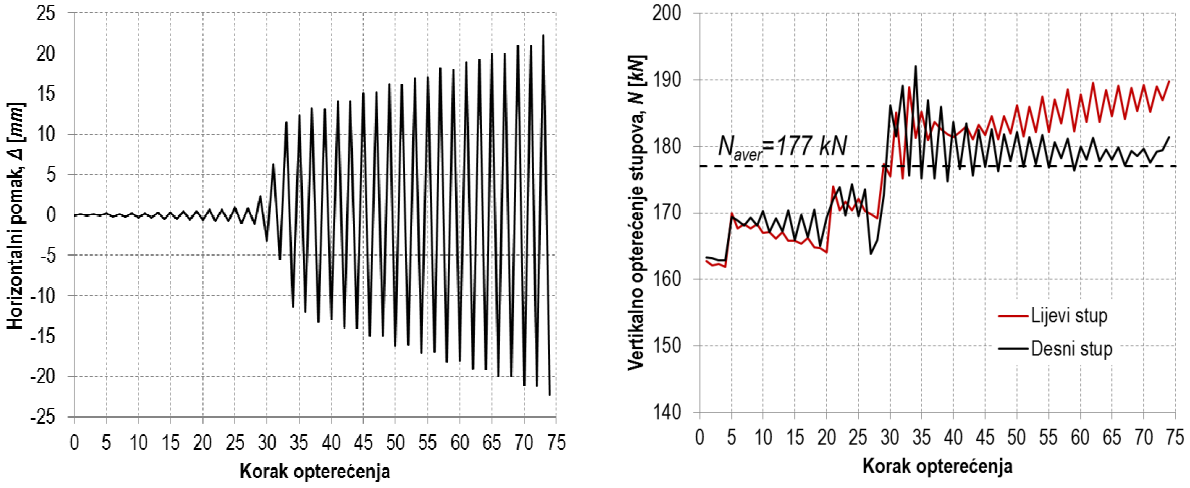
c) d)

Slika 6.40 *Prikaz razvoja pukotinskog stanja ispitnog uzorka O1_cpm*

Slika 6.41 *Prikaz posmičnih pukotina stupova okvira ispitnog uzorka O1_cpm*

6.2.5. Rezultati ispitivanja uzorka *O1_bvm*

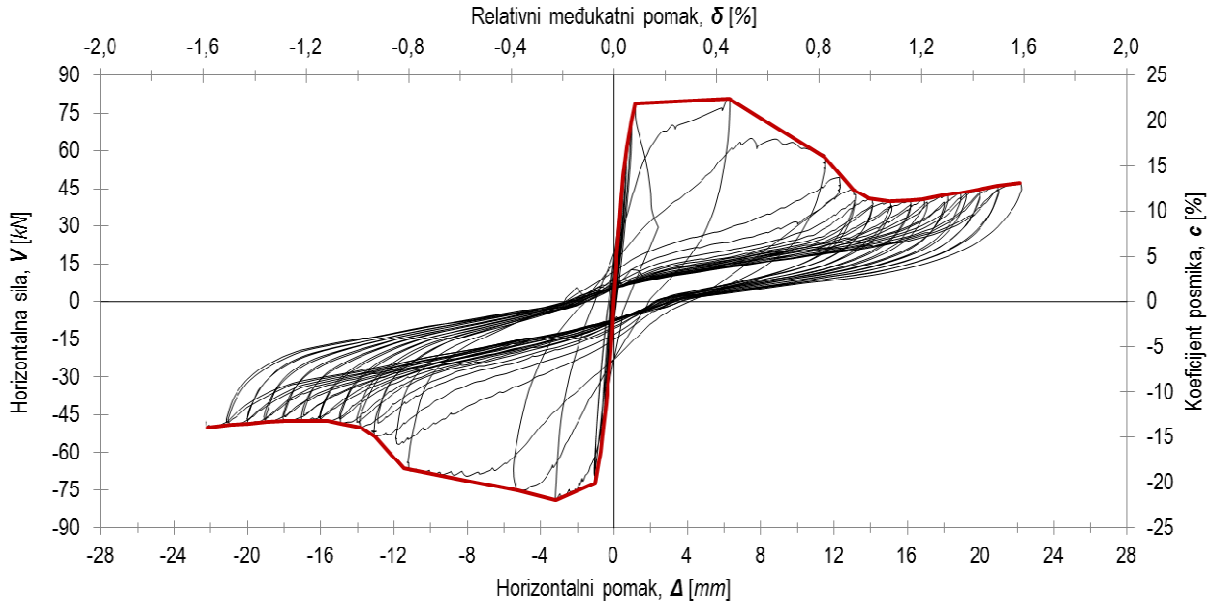
Ispitni uzorak *O1_bvm* neduktilni je armirano-betonski okvir tipa *O1* kod kojeg je ispun izvedena od šupljih glinenih zidnih elemenata povezanih vapnenim mortom. Karakteristike i izvedba uzorka opisana je u *Poglavlju 3*. Horizontalno opterećenje uzorka prikazano je Slikom 6.42 a) u ovisnosti o koraku opterećenja dok je varijacija uzdužne sile u stupovima prikazana Slikom 6.42 b).



a) b)

Slika 6.42 *Prikaz horizontalnog i vertikalnog opterećenja ispitnog uzorka O1_bvm*

Rezultati ispitivanja u obliku histerezne i primarne krivulje odgovora uzorka prikazani su Slikom 6.43. Na sekundarnoj vertikalnoj osi dan je prikaz odnosa vertikalnog i horizontalnog opterećenja (*c*) pri svakom koraku, izražen u %, dok je na sekundarnoj horizontalnoj osi prikazana vrijednost relativnog međukatnog pomak (*δ*).

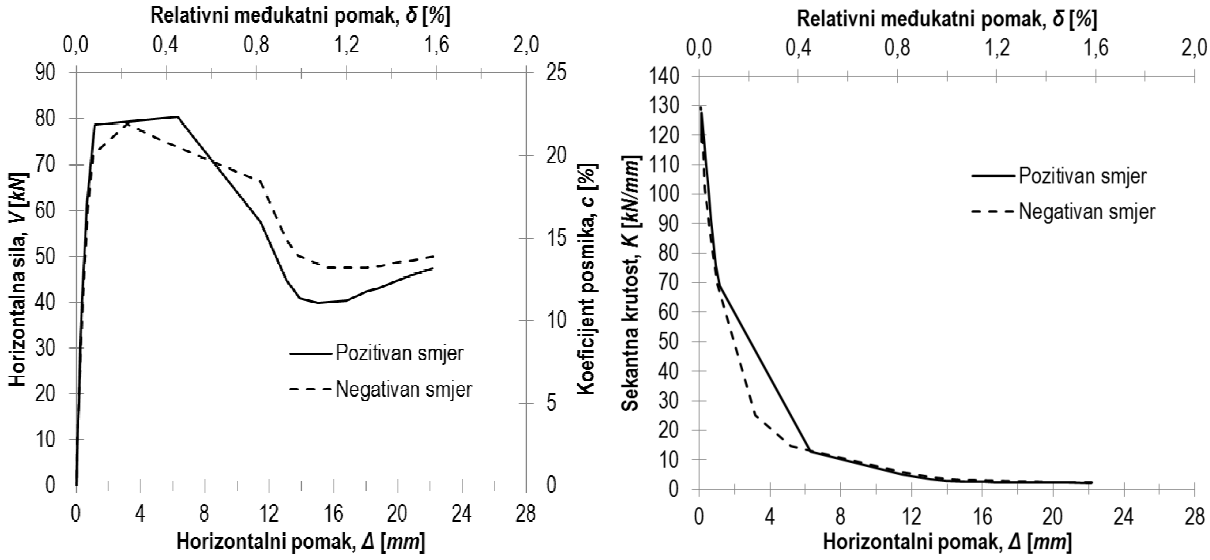


Slika 6.43 *Prikaz histerezne i primarne krivulje odgovora ispitnog uzorka O1_bvm*

Krutost i nosivost ispitnog uzorka u promatranim karakterističnim točkama odgovora određena je za pozitivni i negativni smjer opterećenja, a dobiveni rezultati prikazani su Tablicom 6.5. Usporedba primarnih krivulja za pozitivni i negativni smjer opterećenja prikazana je Slikom 6.44 a) dok je ovisnost sekantne krutosti o horizontalnom pomaku dana Slikom 6.44 b).

Tablica 6.5 *Krutost i nosivost ispitnog uzorka O1_bvm u odabranim karakterističnim točkama odziva*

Smjer opterećenja	Pozitivni	Negativni
V_{cr} [*kN*]	78,7	-72,2
Δ_{cr} [*mm*]	1,1	-1,0
Krutost pri pojavi prve značajne pukotine u ispuni, K_i [*kN/mm*]	**71,5**	**72,2**
V_{max} [*kN*]	78,7	-78,8
Δ_{max} [*mm*]	1,1	-3,1
Krutost pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispune, K_{max} [*kN/mm*]	**61,8**	**25,0**
V_{col} [*kN*]	39,7	-48,5
Δ_{col} [*mm*]	15,0	-14,9
Krutost pri slomu ispune, K_u [*kN/mm*]	**2,6**	**3,2**
V_{res} [*kN*]	**39,7**	**-48,5**

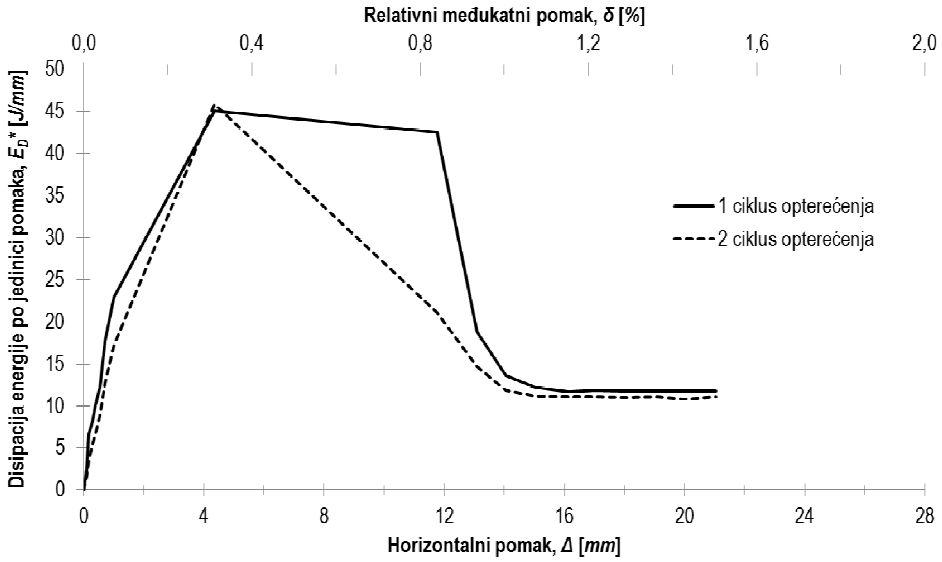


a) b)

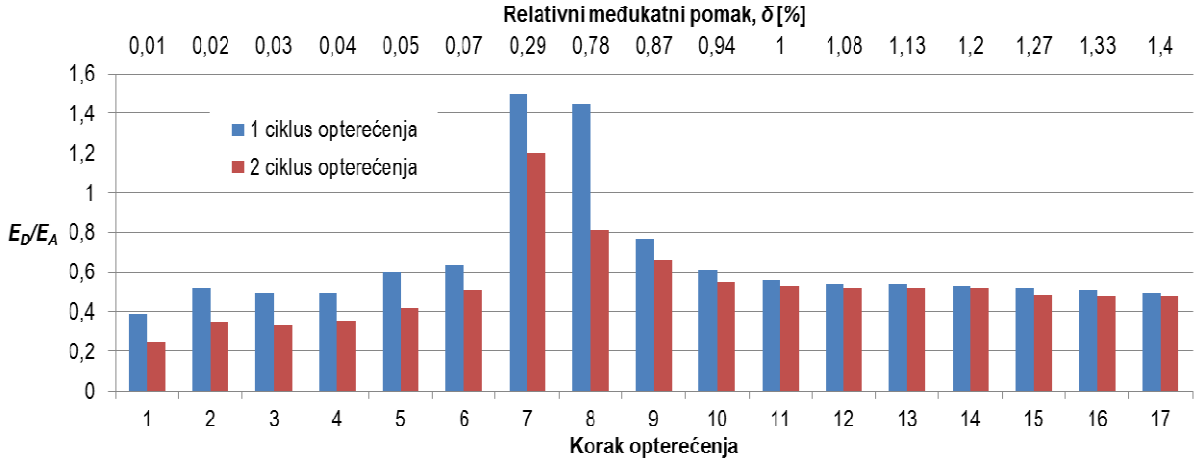
Slika 6.44 *Prikaz primarnih krivulja odgovora i sekantne krutosti, u ovisnosti o pomaku, pri pozitivnom i negativnom smjeru opterećenja ispitnog uzorka O1_bvm*

Prema rezultatima prikazanim Slikom 6.44 vidljiva je zanemariva razlika u odgovoru uzorka pri pozitivnom i negativnom smjeru opterećenja. Početna krutost i horizontalna nosivost uzorka, pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna, gotovo su identične. Osnovna razlika u odgovoru sustava pri pozitivnom i negativnom smjeru opterećenja očituje se u vrijednosti relativnog međukatnog pomaka pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna. Degradacija nosivosti uzorka, nakon pojave dominantnog mehanizma sloma ispuna, približno je jednaka za oba smjera opterećenja. Rezidualna nosivost sustava razlikuje se u ovisnosti o smjeru opterećenja, pri čemu je srednja vrijednost odstupanja u iznosu od približnih 13%. Navedeno odstupanje određeno je u odnosu na vrijednosti pozitivnog smjera opterećenja. Smanjenje sekantne krutosti, uslijed povećanja horizontalnog pomaka, približno je jednako za oba smjera opterećenja.

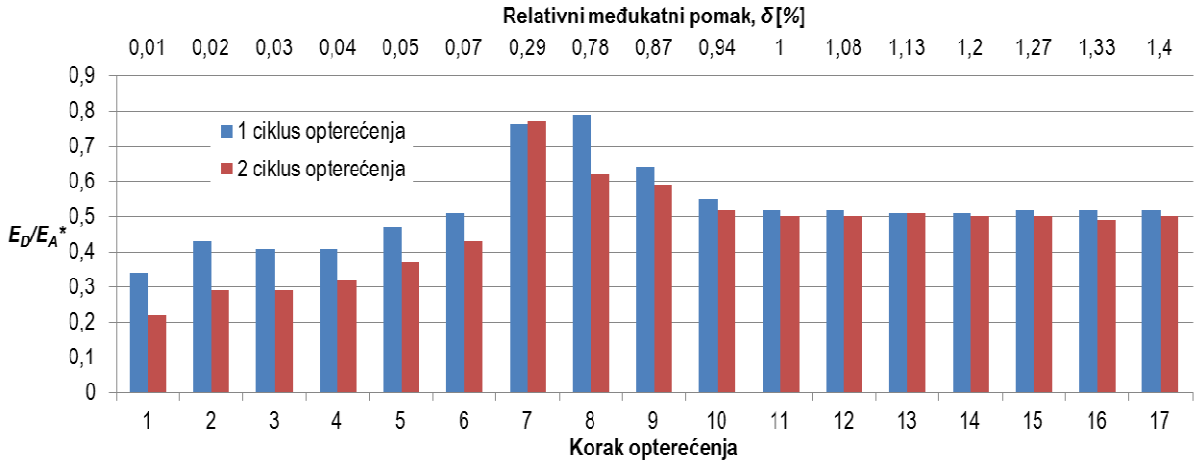
Disipacija energije po jedinici pomaka (E_D*) prikazana je Slikom 6.45. Odnos disipirane i apsorbirane energije prikazan je Slikom 6.46 a) i b) za svaki korak opterećenja, ovisno o načinu izračuna apsorbirane energije. Na Slici 6.46 a) apsorbirana energija određena je kao potencijalna deformacijska energija (E_A), a na Slici 6.46 b) kao uloženi rad (E_A*). Prigušenje ispitnog uzorka također je određeno za oba načina određivanja apsorbirane energije, a rezultati su prikazani Slikom 6.47 a) i b) za svaki korak opterećenja. Ovisnost prigušenja o pomaku dana je Slikom 6.48 za oba slučaja izračuna apsorbirane energije.



Slika 6.45 *Disipacija energije po jedinici pomaka za ispitni uzorak O1_bvm*

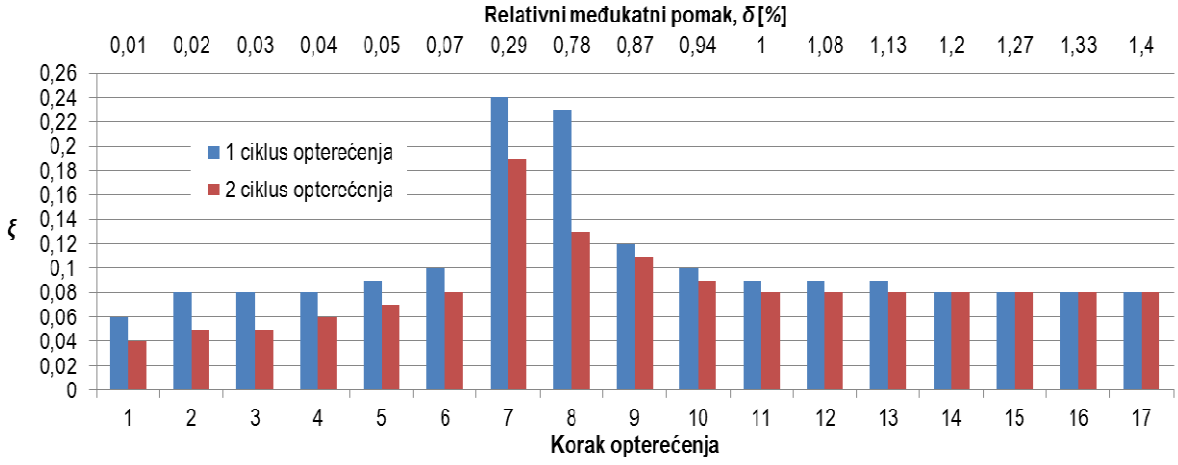


a)

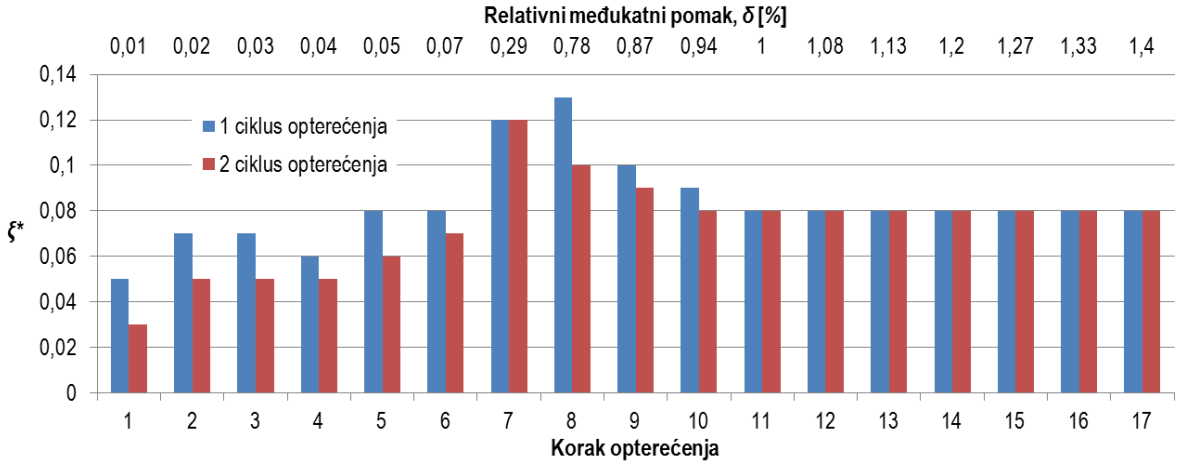


b)

Slika 6.46 *Odnos disipirane i apsorbirane energije za ispitni uzorak O1_bvm*

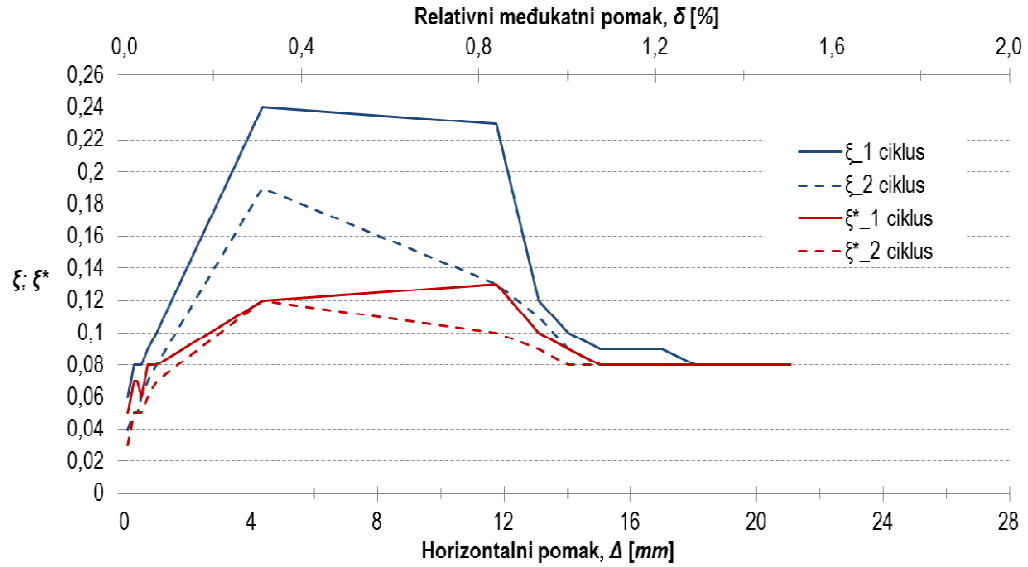


a)



b)

Slika 6.47 *Prigušenje ispitnog uzorka O1_bvm u ovisnosti o načinu izračuna apsorbirane energije*



Slika 6.48 *Ovisnost prigušenja ispitnog uzorka O1_bvm o horizontalnom pomaku*

Disipacija energije uzorka po jedinici pomaka, prikazana Slikom 6.45, razlikuje se u ovisnosti o ciklusu opterećenja. Veće vrijednosti promatrane veličine dobivene su pri prvim ciklusima opterećenja, međutim, u početnim fazama nije uočena znatna razlika. Odstupanje u vrijednostima disipacije energije prvog i drugog ciklusa opterećenja dolazi do izražaja nakon pojave dominantnog mehanizma sloma ispuna što odgovara relativnom međukatnom pomaku u iznosu od približnih 0,3% i u području gdje je izražen utjecaj degradacije nosivosti uzorka. Srednja vrijednost odstupanja u navedenom području iznosi približnih 29%. Navedeno odstupanje određeno je u odnosu na vrijednosti pozitivnog smjera opterećenja. Nakon pojave sloma ispuna, vrijednost promatrane veličine, približno je jednaka za oba ciklusa opterećenja.

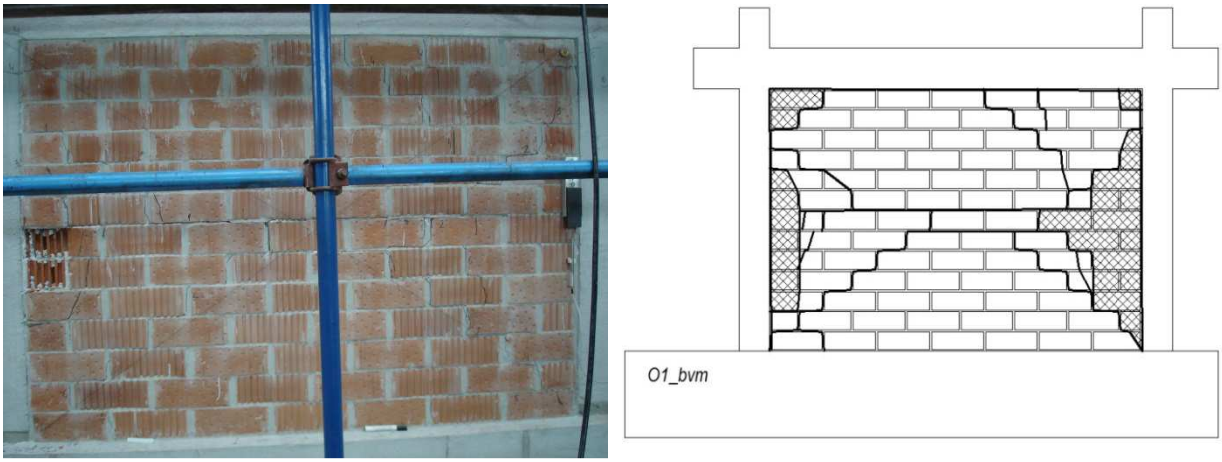
Odnos disipirane i apsorbirane energije, prikazan Slikom 6.46, ovisan je o načinu izračuna apsorbirane energije gdje su uočene veće vrijednosti navedenog odnosa u slučaju kad je apsorbirana energije određena kao potencijalna deformacijska energija. Vrijednosti navedenog odnosa su u intervalu od 0,4 do 1,5 za prve te od 0,25 do 1,2 za druge cikluse opterećenja u slučaju kada je apsorbirana energija određena kao deformacijska potencijalna energija. U slučaju gdje je apsorbirana energija određena kao uloženi rad, vrijednosti promatranog odnosu manje su i nalaze se u intervalu od 0,34 od 0,79 za prve te od 0,22 od 0,77 za druge cikluse opterećenja. Vršne vrijednosti promatranog odnosa, neovisno o izračunu apsorbirane energije, uočene su pri koracima nastajanja dominantnog mehanizma sloma ispune. Međutim, potrebno je naglasiti da se vrijednosti iznosa veće od 1 čine nerealnim. Navedeno bi značilo da sustav disipira više energije nego što je prvobitno uneseno u sustav.

Vrijednost prigušenja uzorka ovisna je o prethodno navedenom odnosu uslijed čega je dobiven jednak trend u ovisnosti o koraku opterećenja. Prilikom izračuna apsorbirane energije, kao potencijalne deformacijske energije vrijednosti, prigušenja su u intervalu od 6 do 24% za prve i od 4 do 19% kritičnog viskoznog prigušenja za druge cikluse opterećenja. U slučaju izračuna apsorbirane energije, kao uloženog rada, uočene su manje vrijednosti prigušenja s vrijednostima u intervalu od 5 do 13% za prve te od 3 do 12% za druge cikluse opterećenja. Međutim, potrebno je naglasiti da se vrijednosti prigušenja, dobivene na temelju odnosa apsorbirane i disipirane energije većeg od 1, čine nerealnim iz razlogâ navedenih u prethodno odlomku.

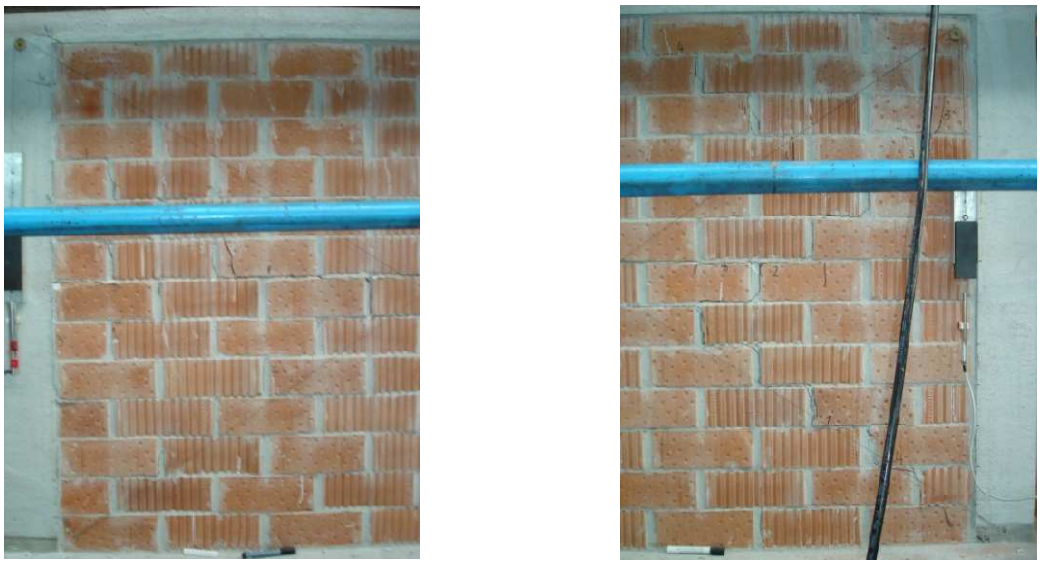
Vlastiti period oscilacija ispitnog uzorka pri pozitivnom smjeru opterećenja iznosi 0,141 *s*, a pri negativnom 0,140 *s*.

Prikaz oštećenja i pukotina ispitnog uzorka dan je Slikom 6.49. Pojava prvih značajnih pukotina u ispunu uočena je u istom koraku pozitivnog i negativnog smjera opterećenja, a uzrokovana je prekoračenjem posmične čvrstoće istog. Prve značajne pukotine prolazile su većim dijelom ispuna u

smjeru dijagonala pod kutom od približnih 45º (Slika 6.50). U koraku nakon pojave značajnih pukotina, pri pozitivnom smjeru opterećenja s vrijednošću relativnog međukatnog pomaka u iznosu od 0,08%, dolazi do formiranja dominantnog mehanizma sloma ispuna također uslijed prekoračenja posmične čvrstoće. Prema klasifikaciji navedenoj u *Poglavlju 2,* uočeni mehanizam sloma ispuna može se definirati kao horizontalno klizanje. Daljnje oštećenje ispuna lokalizirano je na kontaktu s okvirom u obliku drobljenja dok su središnji dijelovi praktički neoštećeni. Drobljenje ispuna predstavlja dominantan mehanizam sloma sve do iščezavanja doprinosa ispuna horizontalnoj nosivosti sustava. Međutim, potrebno je naglasiti da lokalizirano oštećenje ispuna u području kontakta s okvirom značajno doprinosi vanravninskoj nestabilnosti istog, uslijed čega se eksponencijalno povećava vjerojatnost vanravninskog sloma. Uočeno oštećenje okvira neznatno je i lokalizirano na vanjskim dijelovima stupova u obliku horizontalnih (savojnih) pukotina.



Slika 6.49 *Prikaz oštećenja i pukotina ispitnog uzorka O1_bvm*

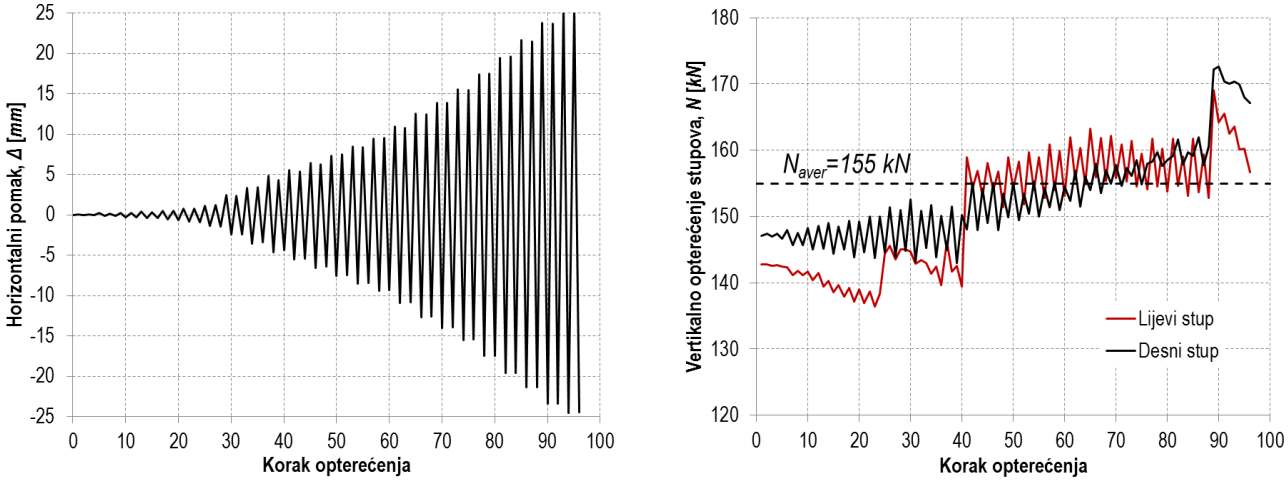


a) b)

Slika 6.50 *Prikaz prvih pukotina ispitnog uzorka O1_bvm*

6.2.6. Rezultati ispitivanja uzorka *O1_cvm*

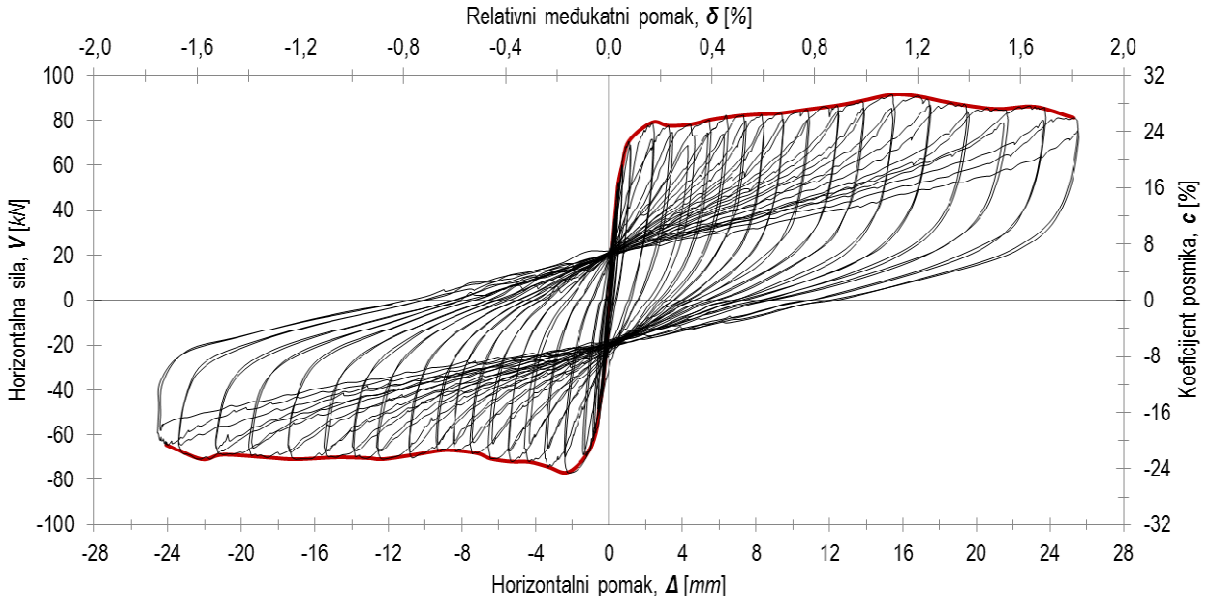
Ispitni uzorak *O1_cvm* neduktilni je armirano-betonski okvir tipa *O1* kod kojeg je ispun izveden od glinene opeke povezane vapnenim mortom. Karakteristike i izvedba uzorka opisana je u *Poglavlju 3*. Horizontalno opterećenje uzorka prikazano je Slikom 6.51 a), u ovisnosti o koraku opterećenja, dok je varijacija uzdužne sile u stupovima prikazana Slikom 6.51 b).



a) b)

Slika 6.51 *Prikaz horizontalnog i vertikalnog opterećenja ispitnog uzorka O1_cvm*

Rezultati ispitivanja u obliku histerezne i primarne krivulje odgovora uzorka prikazani su Slikom 6.52. Na sekundarnoj vertikalnoj osi dan je prikaz odnosa vertikalnog i horizontalnog opterećenja (*c*) pri svakom koraku, izražen u %, dok je na sekundarnoj horizontalnoj osi prikazana vrijednost relativnog međukatnog pomak (*δ*).

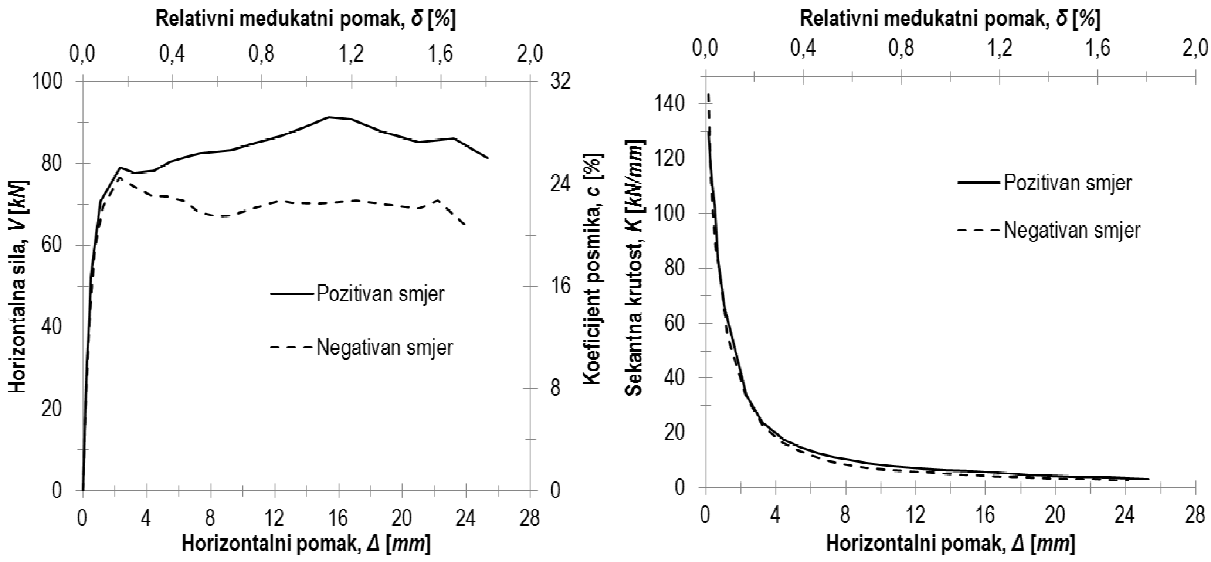


Slika 6.52 *Prikaz histerezne i primarne krivulje odgovora ispitnog uzorka O1_cvm*

Krutost i nosivost ispitnog uzorka u odabranim karakterističnim točkama odziva je određena za pozitivni i negativni smjer opterećenja, a dobiveni rezultati prikazani su Tablicom 6.6. Usporedba primarnih krivulja za pozitivni i negativni smjer opterećenja prikazana je Slikom 6.53 a). Prikaz sekantne krutosti, u ovisnosti o pomaku, dan je Slikom 6.53 b) za oba smjera opterećenja.

Tablica 6.6 *Krutost i nosivost ispitnog uzorka O1_cvm u odabranim karakterističnim točkama odziva*

Smjer opterećenja	Pozitivni	Negativni
V_{cr} [*kN*]	79,1	-76,6
Δ_{cr} [*mm*]	2,3	-2,3
Krutost pri pojavi prve značajne pukotine u ispuni, K_i [*kN/mm*]	**34,4**	**33,9**
V_{max} [*kN*]	79,1	-76,6
Δ_{max} [*mm*]	2,3	-2,3
Krutost pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispune, K_{max} [*kN/mm*]	**34,4**	**33,9**
V_{col} [*kN*]	81,2	-
Δ_{col} [*mm*]	25,3	-
Krutost pri slomu okvira, K_{col} [*kN/mm*]	**3,2**	**-**
V_{res} [*kN*]	**-**	**-**



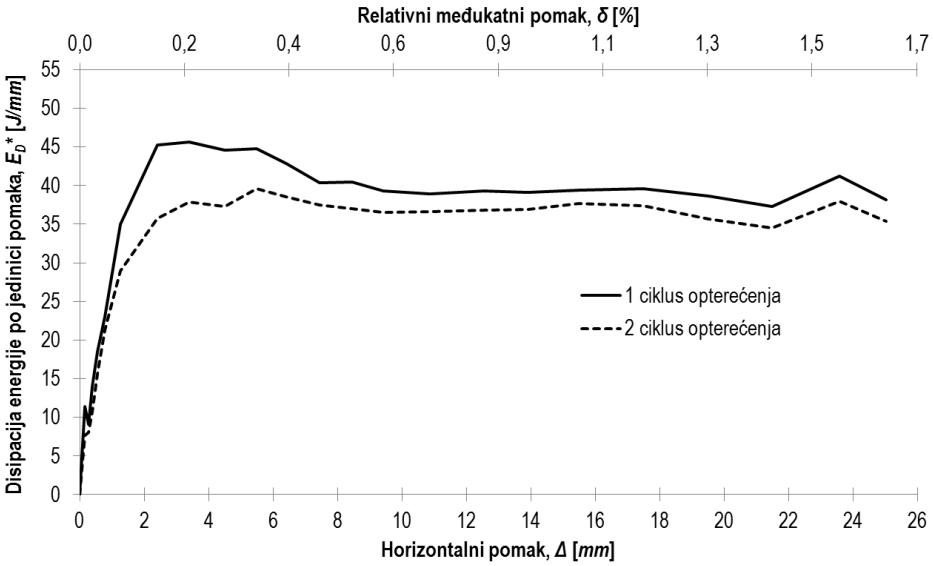
a) b)

Slika 6.53 *Prikaz primarnih krivulja odgovora i sekantne krutosti, u ovisnosti o pomaku, pri pozitivnom i negativnom smjeru opterećenja ispitnog uzorka O1_cvm*

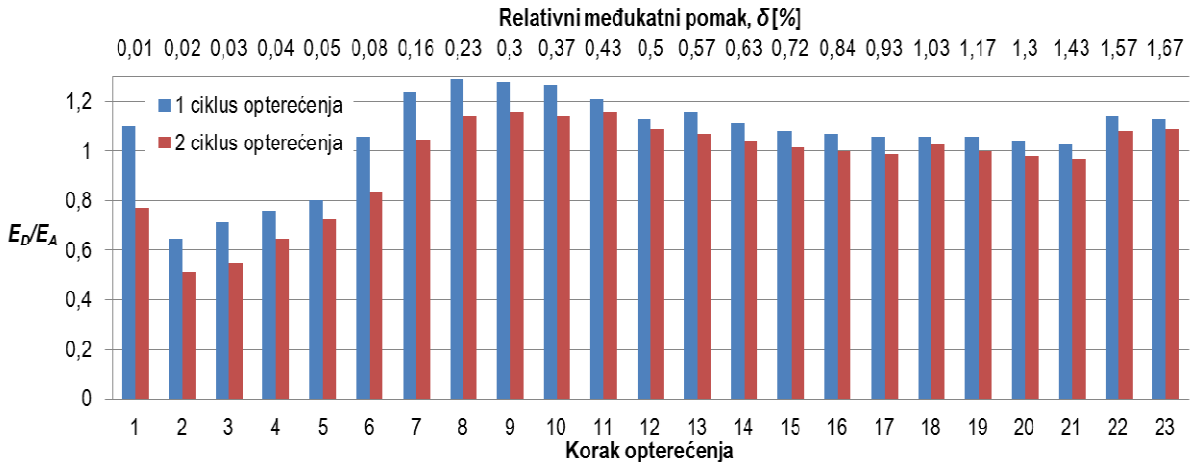
Iz usporedbe rezultata, prikazanih Slikom 6.53, vidljiva je veća horizontalna nosivost ispitnog uzorka pri pozitivnom smjeru opterećenja. Osnovna razlika u odgovoru pri pozitivnom i negativnom smjeru opterećenja očituje se u ponašanju uzorka u području nakon pojave dominantnog mehanizma sloma ispuna. Pojava očvršćivanja, pri pozitivnom smjeru opterećenja, u potpunosti izostaje pri negativnom smjeru gdje je maksimalna nosivost sustava jednaka horizontalnoj nosivosti pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna. Početna krutost te horizontalna nosivost uzorka, pri pojavi

dominantnog mehanizma sloma ispuna, gotovo je identična za oba smjera opterećenja. Srednja vrijednost odstupanja vrijednosti horizontalne nosivosti uzorka, nakon pojave dominantnog mehanizma sloma ispuna, iznosi približnih 17%. Navedeno odstupanje određeno je u odnosu na rezultate pozitivnog smjera opterećenja. Ovisnost sekantne krutosti o horizontalnom pomaku približno je jednaka za oba smjera opterećenja.

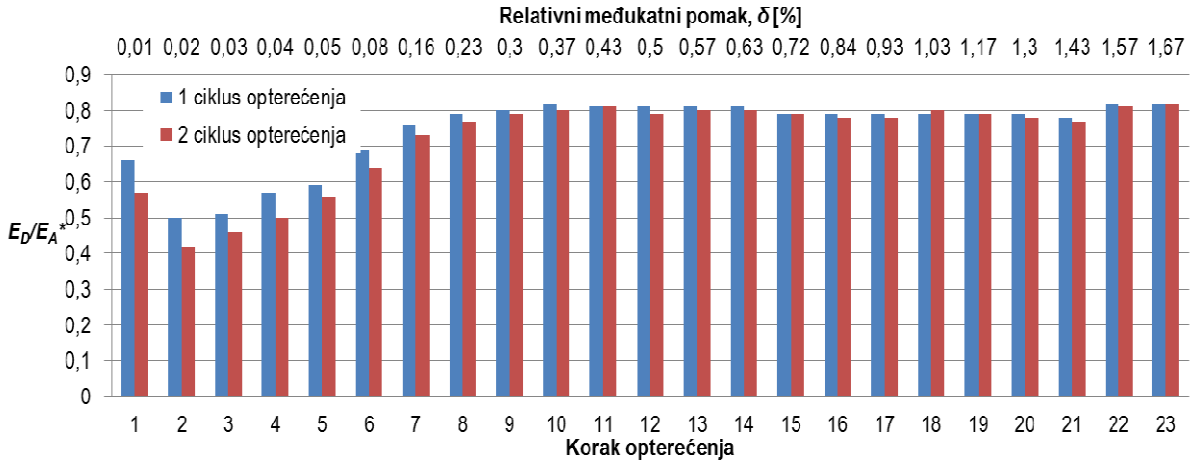
Disipacija energije po jedinici pomaka (E_D*) prikazana je Slikom 6.54. Odnos disipirane i apsorbirane energije prikazan je Slikom 6.55 a) i b), ovisno o načinu izračuna apsorbirane energije, za svaki korak opterećenja. Na Slici 6.55 a) apsorbirana energija određena je kao potencijalna deformacijske energija (E_A), a na Slici 6.55 b) kao uloženi rad (E_A*). Vrijednosti prigušenja ispitnog uzorka također su određene u ovisnosti o izračunu apsorbirane energije, a dobiveni rezultati prikazani su Slikom 6.56 a) i b) za svaki korak opterećenja. Ovisnost prigušenja sustava o horizontalnom pomaku dana je Slikom 6.57 za oba slučaja izračuna apsorbirane energije.



Slika 6.54 *Disipacija energije po jedinici pomaka za ispitni uzorak O1_cvm*

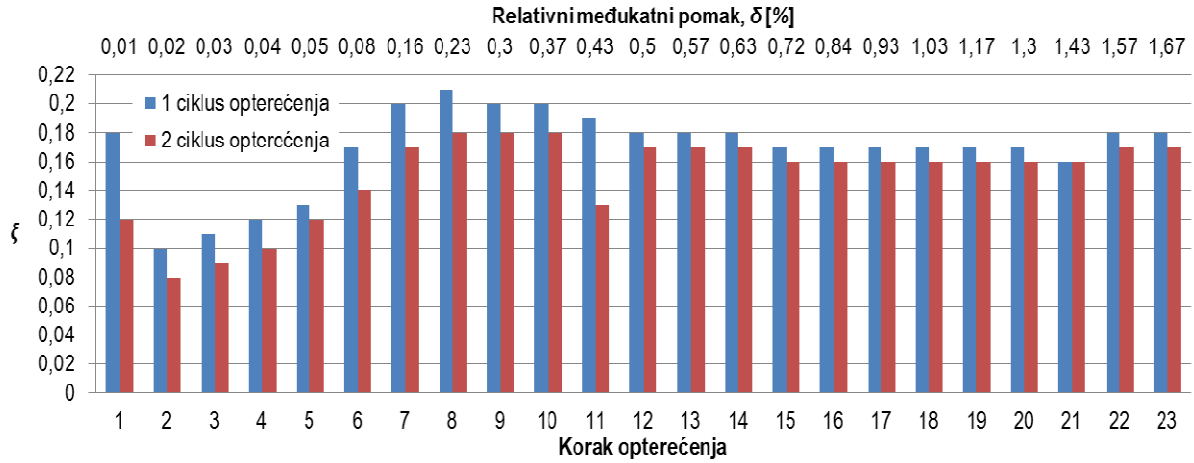


a)

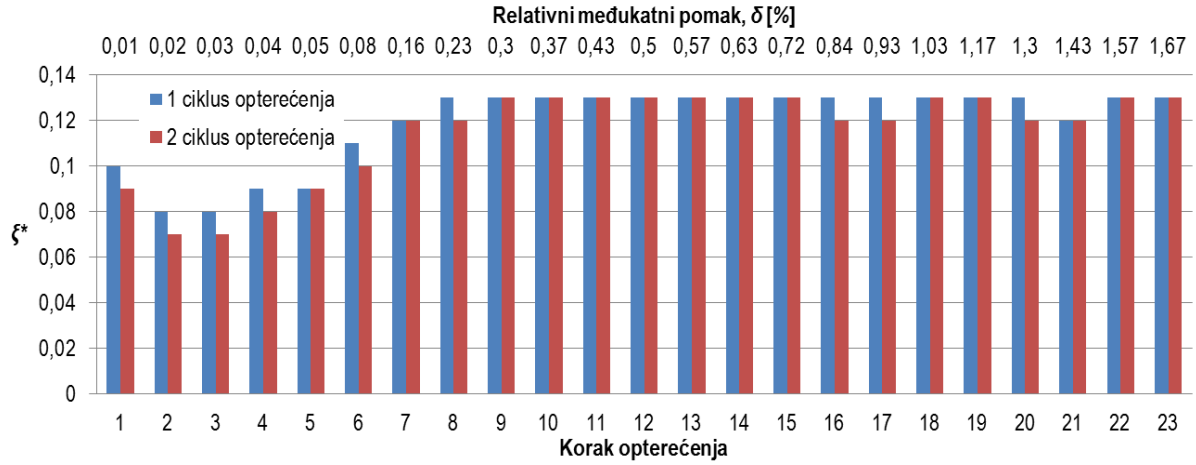


b)

Slika 6.55 *Odnos disipirane i apsorbirane energije za ispitni uzorak O1_cvm*

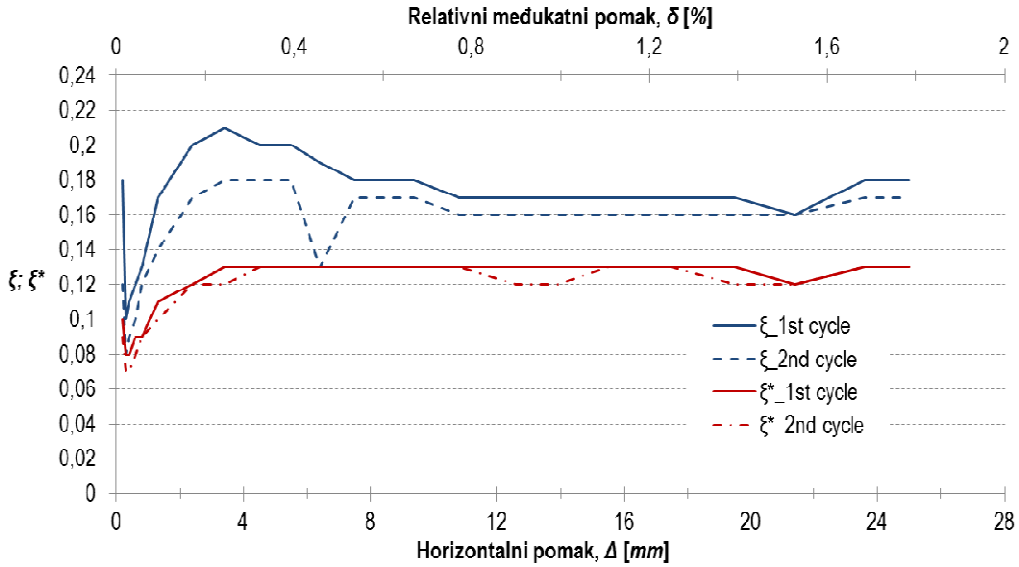


a)



b)

Slika 6.56 *Prigušenje ispitnog uzorka O1_cvm u ovisnosti o načinu izračuna apsorbirane energije*



Slika 6.57 *Ovisnost prigušenja ispitnog uzorka O1_cvm o horizontalnom pomaku*

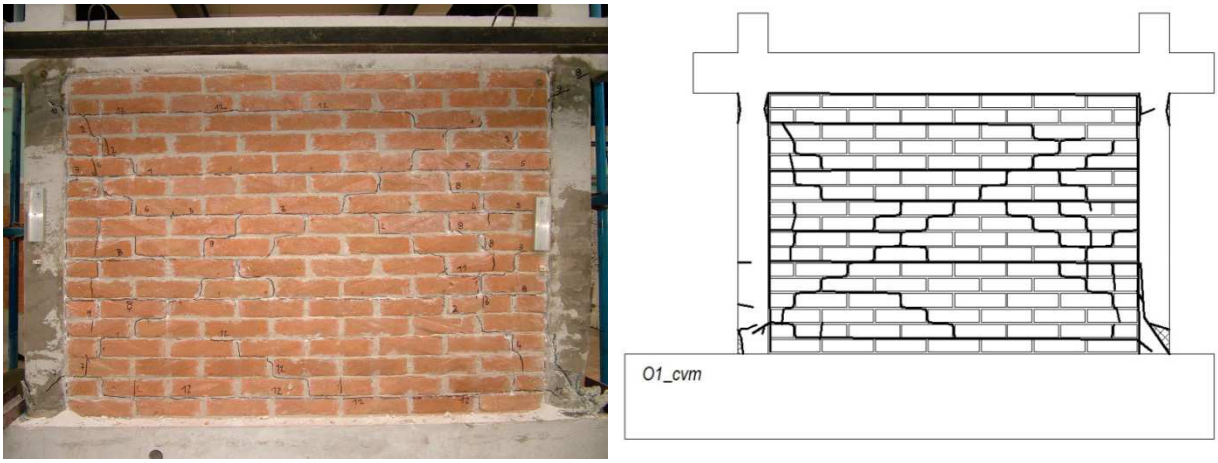
Disipacija energije uzorka po jedinici pomaka, prikazana Slikom 6.54, ovisna je o ciklusu opterećenja. Veće vrijednosti promatrane veličine dobivene su pri prvim ciklusima opterećenja, međutim, u početnim fazama i u koracima opterećenja nakon pojave dominantnog mehanizma sloma ispuna nije uočena znatna razlika. Srednje odstupanje u području s najvećim razlikama vrijednosti prvog i drugog ciklusa opterećenja iznosi približno 14%. Navedeno odstupanje određeno je u odnosu na vrijednosti pozitivnog smjera opterećenja. Odstupanja nakon pojave dominantnog mehanizma sloma ispuna zanemarivog je iznosa.

Vrijednosti odnosa disipirane i apsorbirane energije, prikazane Slikom 6.55, u ovisnosti su načina izračuna apsorbirane energije i koraka opterećenja. Tako su, kod izračuna apsorbirane energije kao potencijalne deformacijske energije, uočene veće vrijednosti promatrane veličine neovisno o ciklusu opterećenja. Dobivene vrijednosti promatranog odnosa u intervalu su od 0,65 do 1,29 za pozitivni te od 0,51 do 1,16 za negativni smjer opterećenja. Tu su, kao i kod prethodnog uzorka, pri određenim koracima opterećenja dobivene nerealne vrijednosti odnosa. Naime, vrijednost odnosa veća od 1 upućuje da je više disipirane energije nego što je prvobitno uneseno u sustav. Kod izračuna apsorbirane energije, kao uloženog rada, vrijednosti promatranog odnosa u intervalu su od 0,5 do 0,82 za pozitivni i od 0,42 do 0,82 za negativni smjer opterećenja. Osim razlika u vrijednostima, pri koracima opterećenja nakon dosezanja vrijednosti relativnog međukatnog pomaka u iznosu od 0,3%, uočen je ujednačeniji trend promatranog odnosa u slučaju gdje je apsorbirana energija određena kao uloženog rada. Osim toga, vrijednosti odnosa pri prvom i drugom ciklusu opterećenja približno su jednake u području odgovora nakon navedene vrijednosti relativnog međukatnog pomaka.

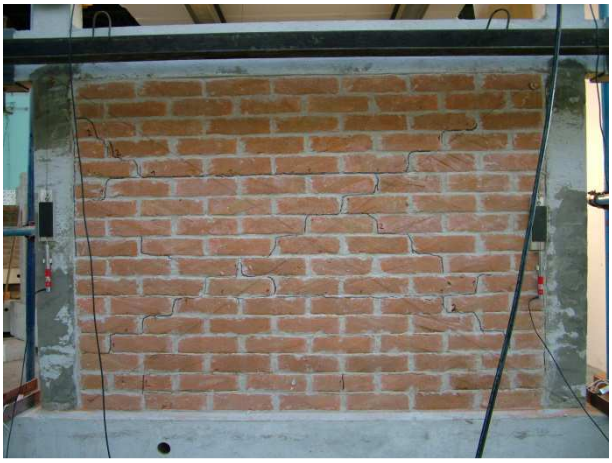
Vrijednost prigušenja uzorka ovisna je o prethodno navedenom odnosu uslijed čega je dobiven jednak trend u ovisnosti o koraku opterećenja. Prilikom izračuna apsorbirane energije, kao potencijalne deformacijske energije, vrijednosti su prigušenja u intervalu od 10 do 21% za prve i od 8 do 18% kritičnog viskoznog prigušenja za druge cikluse opterećenja. U slučaju izračuna apsorbirane energije, kao uloženog rada, uočene su manje vrijednosti prigušenja s vrijednostima u intervalu od 8 do 13% za prve te od 7 do 13% za druge cikluse opterećenja. Tu je, kao i kod prethodno navedenog odnosa, u području odgovora uzorka nakon dosezanja vrijednosti relativnog međukatnog pomaka u iznosu od 0,3%, uočena približno jednaka vrijednost prigušenja sve do sloma. Međutim, potrebno je naglasiti da se vrijednosti prigušenja, dobivene na temelju odnosa apsorbirane i disipirane energije većeg od 1, čine nerealnim iz razloga navedenih u prethodno odlomku.

Vlastiti period oscilacija ispitnog uzorka pri pozitivnom smjeru opterećenja iznosi 0,190 *s*, a pri negativnom 0,191 *s*.

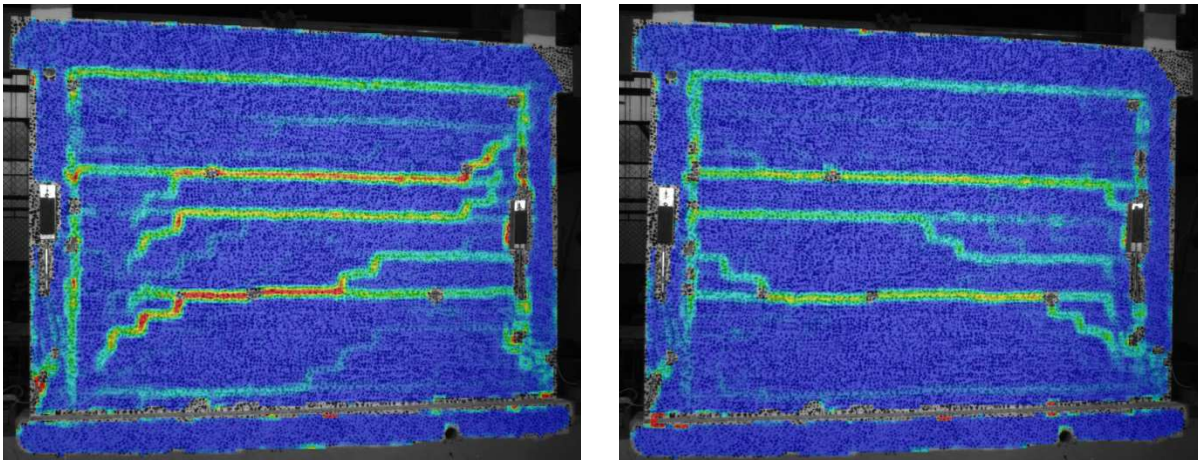
Prikaz oštećenja i pukotina ispitnog uzorka *O1_cvm* dan je Slikom 6.58. Pojava prvih značajnih pukotina u ispunu uočena je u istom koraku pozitivnog i negativnog smjera opterećenja pri vrijednosti relativnog međukatnog pomaka u iznosu od približnih 0,16%. Prve značajne pukotine prostirale su se kroz čitav ispun u smjeru dijagonala i horizontalnih reški (Slika 6.59). Potrebno je naglasiti da je uočen veći broj pukotina kojima su definirane prve značajne pukotine. Nagib pukotina u opterećenim uglovima približno je jednak 45º. Za razliku od prethodno opisanih uzoraka, pojava prvih značajnih pukotina ujedno je predstavljala i pojavu dominantnog mehanizma sloma ispuna promatranog uzorka. Prema klasifikaciji navedenoj u *Poglavlju 2*, opaženi se mehanizam sloma može definirati kao dijagonalni posmični slom. Nakon pojave dominantnog mehanizma sloma ispuna uočeno je povećanje broja horizontalnih pukotina proporcionalno povećanju koraka opterećenja. Daljnje oštećenje ispuna lokalizirano je na horizontalnim pukotinama u obliku drobljenja morta uslijed klizanja dijelova istog po plohama sloma. Slikama 6.60 a) i b) prikazano je pukotinsko stanje ispuna u koracima neposredno nakon pojave dominantnog sloma ispuna, a Slikama c) i d) stanje pri završnim fazama ispitivanja ovisno o smjeru opterećenja. Slom okvira uzrokovan je posmičnim slomom lijevog stupa pri pozitivnom smjeru opterećenja (Slika 6.61 b)). Neposredno prije posmičnog sloma stupa uočena su neznatna oštećenja okvira lokalizirana na krajevima stupova u obliku horizontalnih (savojnih) pukotina i drobljenja zaštitnog sloja betona (Slika 6.61 a)).



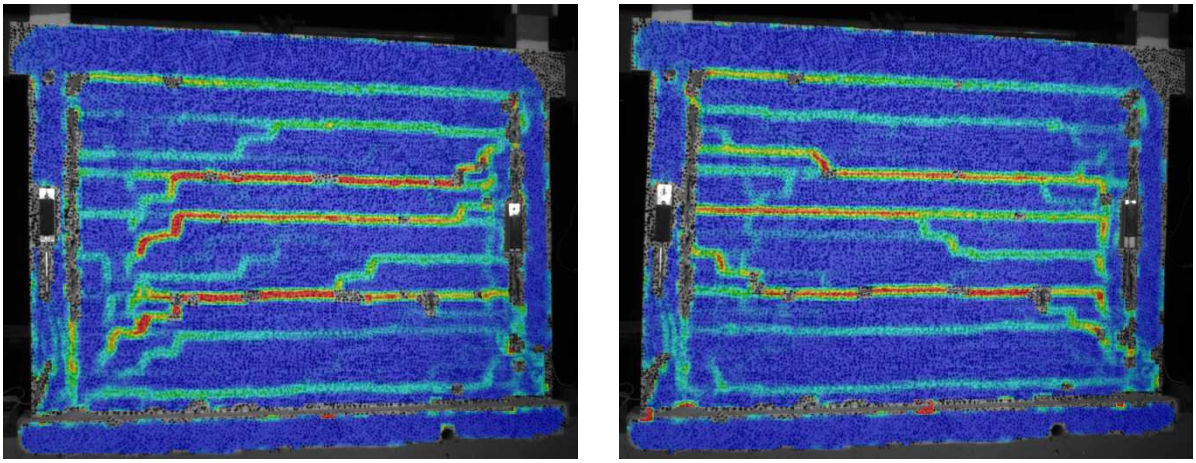
Slika 6.58 *Prikaz oštećenja i pukotina ispitnog uzorka O1_cvm*



Slika 6.59 *Prve značajne pukotine u ispuni ispitnog uzorka O1_cvm*



a) b)



c) d)

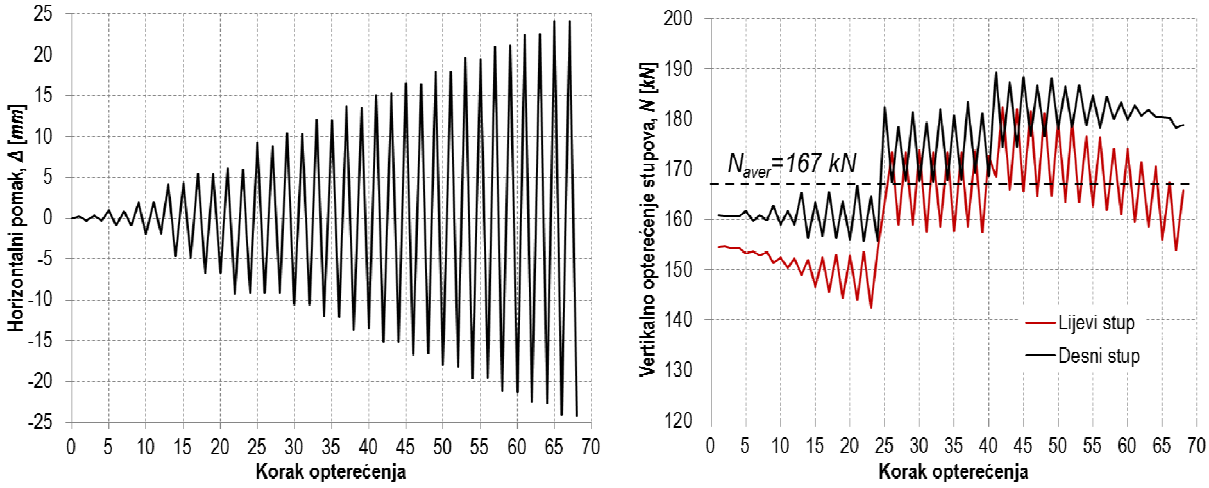
Slika 6.60 *Prikaz razvoja pukotinskog stanja ispune ispitnog uzorka O1_cvm*

a) b)

Slika 6.61 *Prikaz oštećenja stupova ispitnog uzorka O1_cvm*

6.2.7. Rezultati ispitivanja uzorka *O1_b*

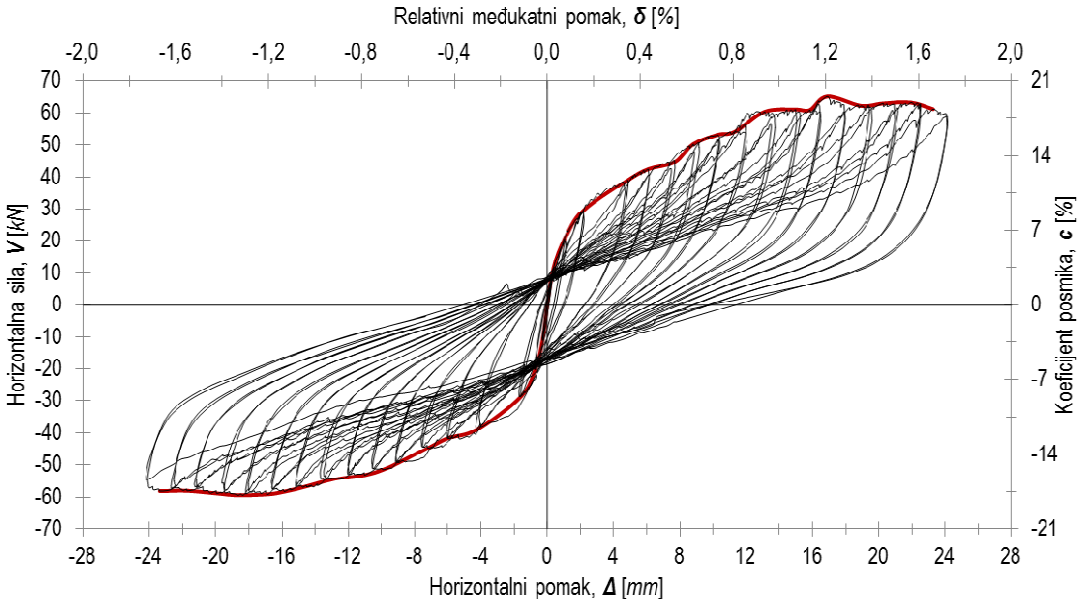
Ispitni uzorak *O1_b* neduktilni je armirano-betonski okvir tipa *O1* kod kojeg je ispun izvedena od šupljih glinenih zidnih elemenata bez povezivanja mortom. Karakteristike i izvedba uzorka opisana je u *Poglavlju 3*. Horizontalno opterećenje uzorka prikazano je Slikom 6.62 a), u ovisnosti o koraku opterećenja, dok je varijacija uzdužne sile u stupovima prikazana Slikom 6.62 b).



a) b)

Slika 6.62 *Prikaz horizontalnog i vertikalnog opterećenja ispitnog uzorka O1_b*

Rezultati ispitivanja u obliku histerezne i primarne krivulje odgovora uzorka prikazani su Slikom 6.63. Na sekundarnoj vertikalnoj osi dan je prikaz odnosa vertikalnog i horizontalnog opterećenja (*c*) pri svakom koraku, izražen u %, dok je na sekundarnoj horizontalnoj osi prikazana vrijednost relativnog međukatnog pomak (*δ*).



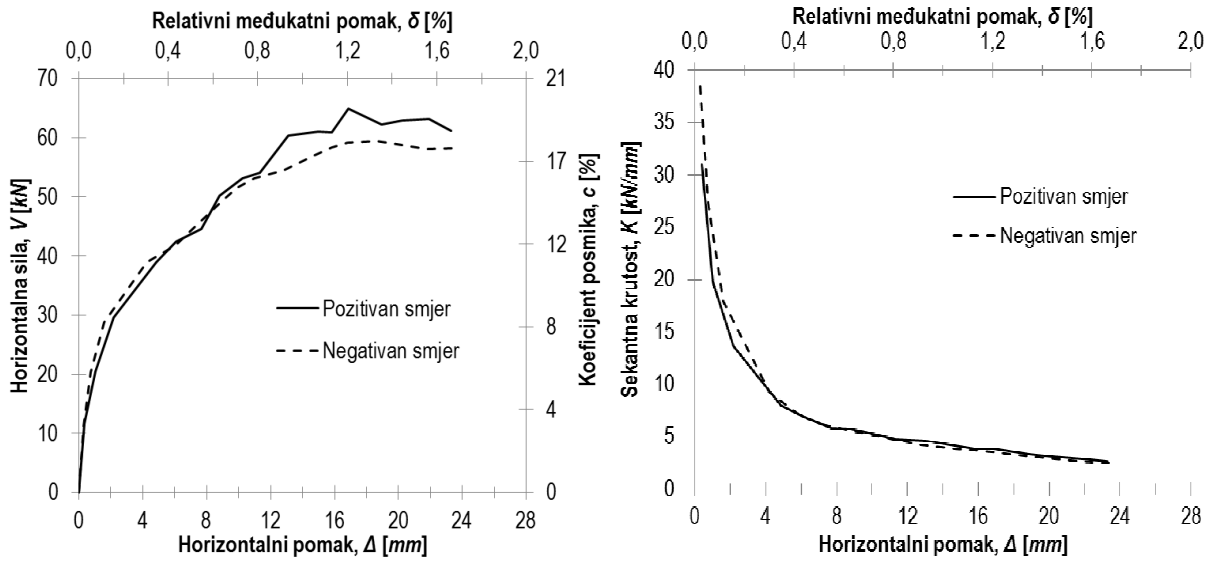
Slika 6.63 *Prikaz histerezne i primarne krivulje odgovora ispitnog uzorka O1_b*

Usporedba primarnih krivulja za pozitivni i negativni smjer opterećenja prikazana je Slikom 6.64 a) dok je prikaz sekantne krutosti, u ovisnosti o pomaku, dan Slikom 6.64 b). Potrebno je naglasiti da prilikom analize rezultata promatranog uzorka nije bilo moguće odrediti horizontalnu nosivost uzorka pri promatranim graničnim stanjima, a samim time ni vrijednosti pripadnih relativnih međukatnih pomaka (Tablica 6.7). Navedeno je uzrokovano zanemarivim oštećenjem ispuna pretežno lokaliziranim na

manjim dijelovima istog, čime nije bilo moguće izvršiti klasifikaciju oštećenja prema odabranim kriterijima.

Tablica 6.7 *Krutost i nosivost ispitnog uzorka O1_b u odabranim karakterističnim točkama odziva*

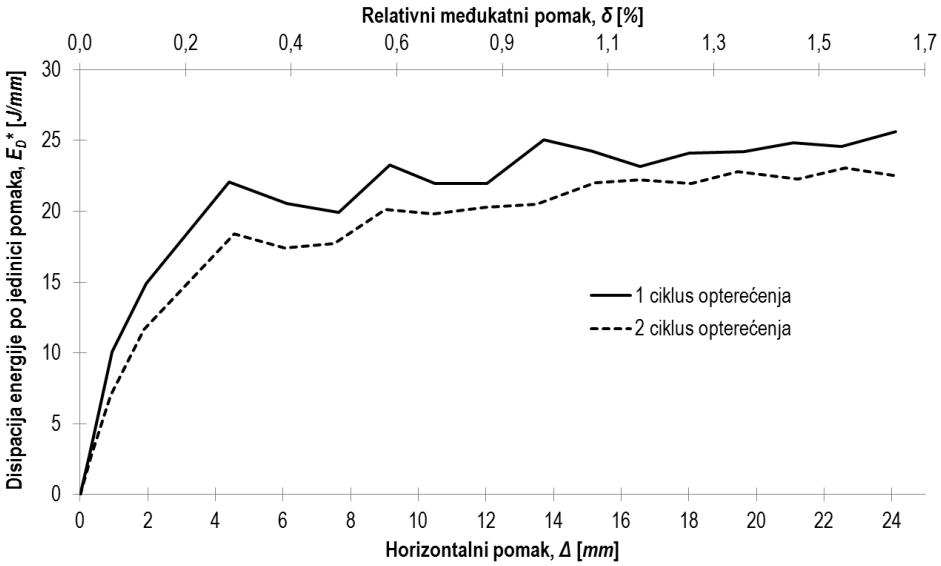
Smjer opterećenja	Pozitivni	Negativni
V_{cr} [*kN*]	-	-
Δ_{cr} [*mm*]	-	-
Krutost pri pojavi prve značajne pukotine u ispuni, K_i [*kN/mm*]	-	-
V_{max} [*kN*]	-	-
Δ_{max} [*mm*]	-	-
Krutost pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispune, K_{max} [*kN/mm*]	-	-
V_{col} [*kN*]	-	-
Δ_{col} [*mm*]	-	-
Krutost pri slomu, K_{col} [*kN/mm*]	-	-
V_{res} [*kN*]	-	-



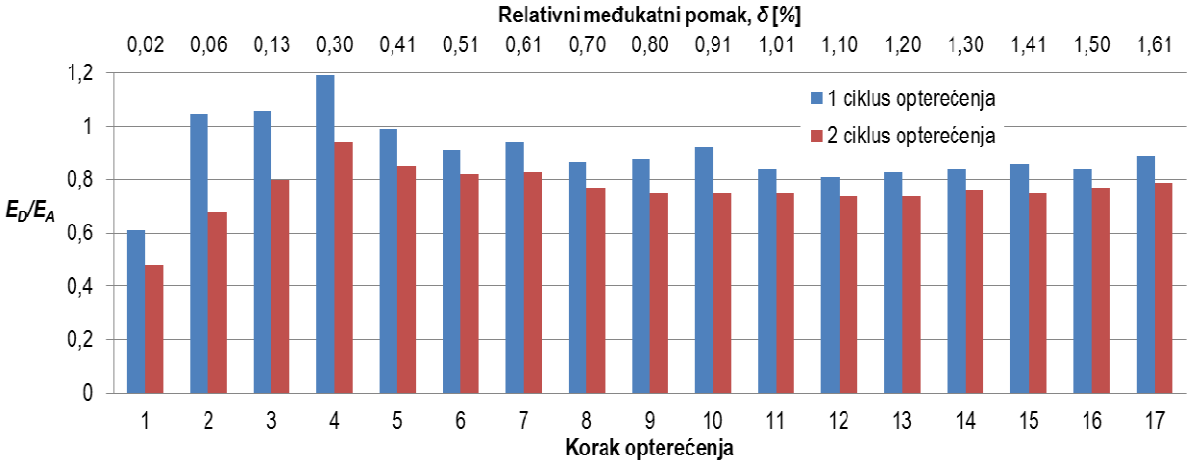
Slika 6.64 *Prikaz primarnih krivulja odgovora i sekantne krutosti, u ovisnosti o pomaku, pri pozitivnom i negativnom smjeru opterećenja ispitnog uzorka O1_b*

Iz rezultata, prikazanih Slikom 6.64, vidljive su zanemarive razlike u odgovoru ispitnog uzorka pri pozitivnom i negativnom smjeru opterećenja. Razlika u horizontalnoj nosivosti pozitivnog i negativnog smjera vidljiva je u fazama opterećenja nakon dosezanja vrijednosti relativnog međukatnog pomaka u iznosu od približnih 0,8%. Srednja vrijednost uočenog odstupanja iznosi približno 6% u odnosu na vrijednosti dobivene pri pozitivnom smjeru opterećenja. Ovisnost sekantne krutosti o horizontalnom pomaku približno je jednaka za oba smjera opterećenja.

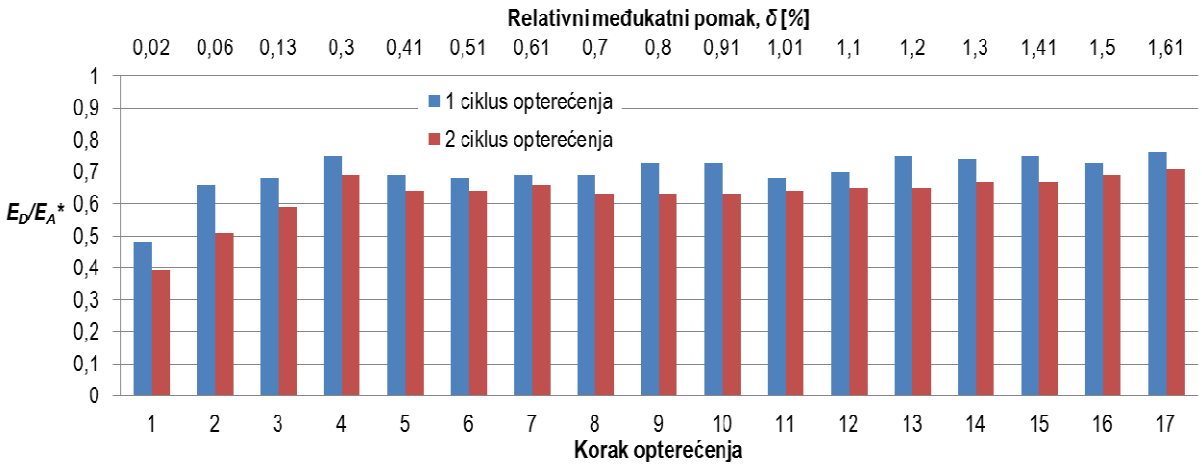
Disipacija energije po jedinici pomaka (E_D*) prikazana je Slikom 6.65. Odnos disipirane i apsorbirane energije prikazan je Slikom 6.66 a) i b), ovisno o načinu izračuna apsorbirane energije, za svaki korak opterećenja. Na Slici 6.66 a) apsorbirana energija određena je kao potencijalna deformacijske energija (E_A), a na Slici 6.66 b) kao uloženi rad (E_A*). Prigušenje ispitnog uzorka također je određeno za oba načina određivanja apsorbirane energije, a dobiveni rezultati prikazani su Slikom 6.67 a) i b) za svaki korak opterećenja. Ovisnost prigušenja uzorka o horizontalnom pomaku dana je Slikom 6.68 za oba načina izračuna apsorbirane energije.



Slika 6.65 *Disipacija energije po jedinici pomaka za ispitni uzorak O1_b*

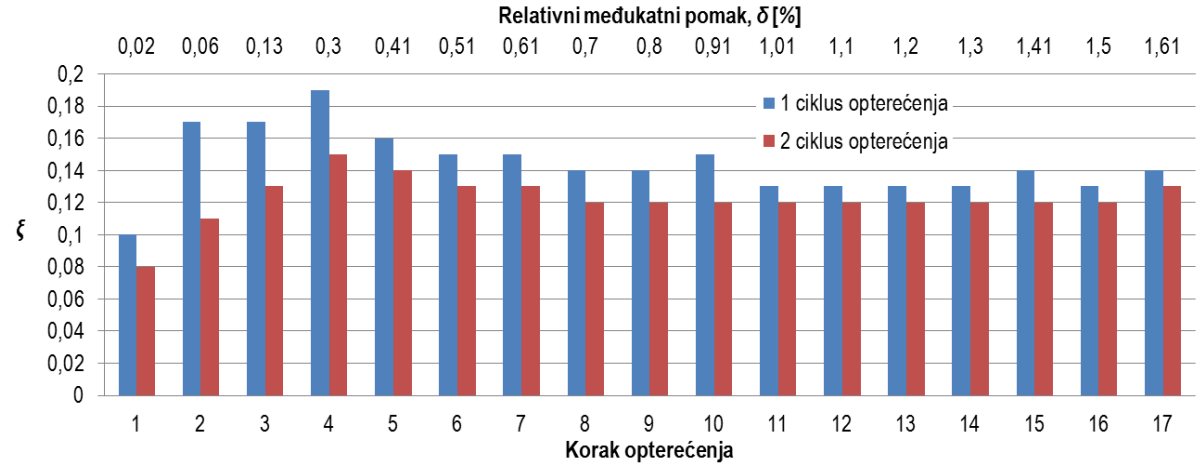


a)

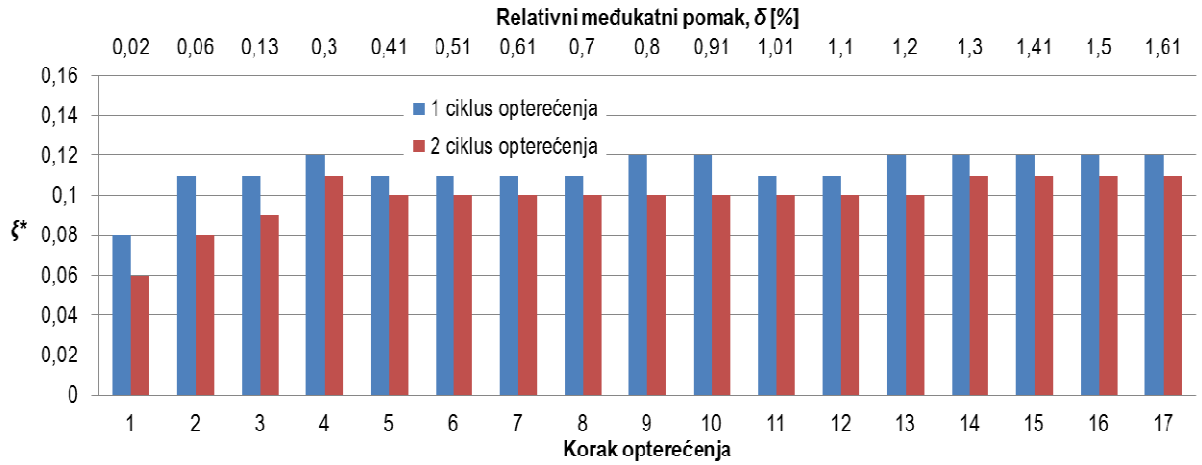


b)

Slika 6.66 *Odnos disipirane i apsorbirane energije za ispitni uzorak O1_b*

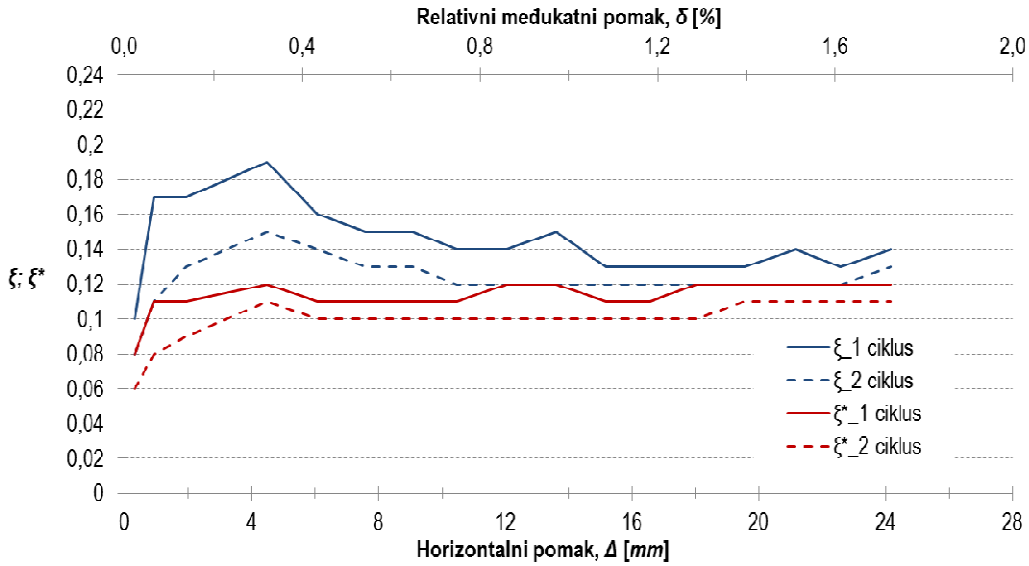


a)



b)

Slika 6.67 *Prigušenje ispitnog uzorka O1_b u ovisnosti o načinu izračuna apsorbirane energije*



Slika 6.68 *Ovisnost prigušenja ispitnog uzorka O1_b o horizontalnom pomaku*

Vrijednost disipacije energije ispitnog uzorka po jedinici pomaka, prikazana Slikom 6.65, ovisna je o ciklusu opterećenja pri čemu su uočene veće vrijednosti kod prvih ciklusa. Razlika u disipaciji energije pri prvom i drugom ciklusu približno je jednaka u svim koracima opterećenja. Srednja vrijednost odstupanja iznosi približnih 13% u odnosu na vrijednosti dobivene pri pozitivnom smjeru opterećenja.

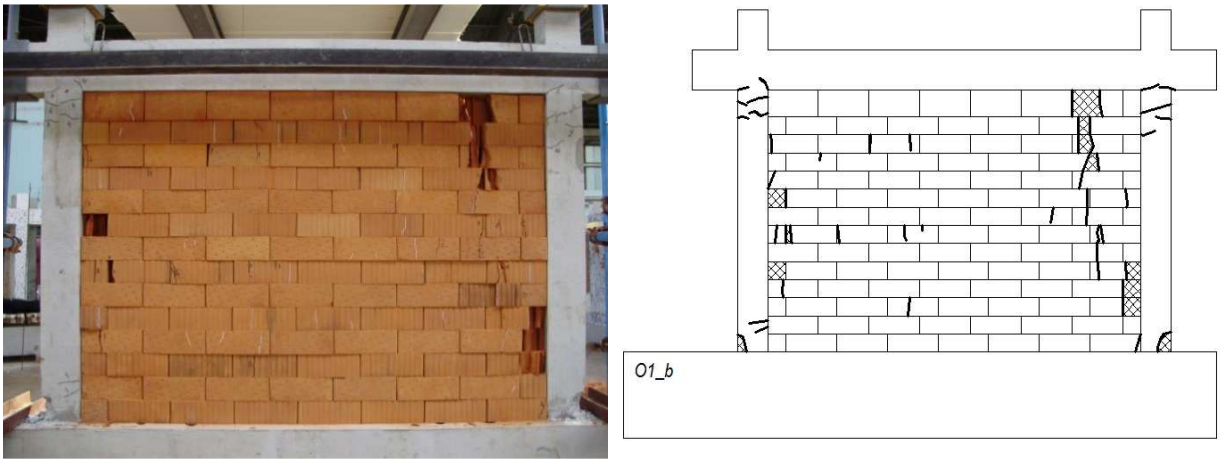
Vrijednosti odnosa disipirane i apsorbirane energije, prikazane Slikom 6.66, ovisne su o načinu izračuna apsorbirane energije. Veće vrijednosti promatranog odnosa uočenu su u slučaju gdje je apsorbirana energija određena kao potencijalna deformacijska energija neovisno o smjeru opterećenja. Dobivene su vrijednosti u intervalu od 0,61 do 1,9 za pozitivne te od 0,48 do 0,94 za negativni smjer opterećenja. Tu su također pri određenim koracima opterećenja dobivene vrijednosti promatranog odnosa veće od 1 što predstavlja nerealnu vrijednost. Navedeno je uočeno pri početnim koracima opterećenja s maksimalnom vrijednošću relativnog međukatnog pomaka u iznosu od 0,3%. Kod izračuna apsorbirane energije, kao uloženog rada, vrijednosti promatranog odnosa u intervalu su od 0,48 do 0,76 za pozitivni i od 0,39 do 0,71 za negativni smjer opterećenja. Neovisno o načinu izračuna apsorbirane energije, vrijednosti promatranog odnosa veće su pri prvim ciklusima opterećenja.

Vrijednosti prigušenja ispitnog uzorka pod izravnim su utjecajem prethodno navedenog odnosa uslijed čega je dobiven jednak trend vrijednosti u ovisnosti o koraku opterećenja. Međutim, vrijednosti prigušenja, određene na temelju vrijednosti odnosa disipirane i apsorbirane energije većih od 1, čine se nerealnim iz razloga što navedena vrijednost odnosa implicira veću disipaciju energije od prvobitno apsorbirane. Vrijednosti prigušenja uzorka, u slučaju gdje je apsorbirana energija određena je kao potencijalna deformacijska energija, u intervalu su od 10 do 19% pri pozitivnom te od 8 do 15%

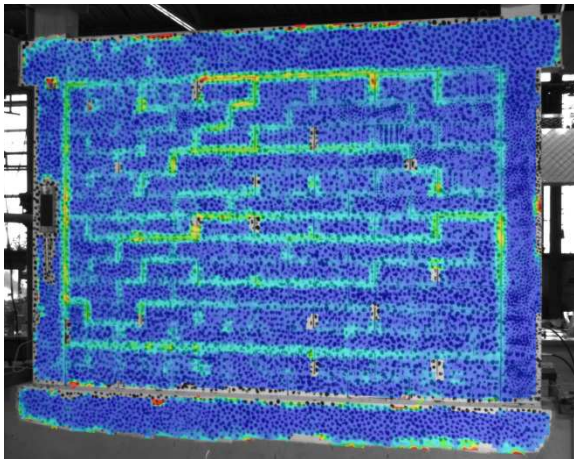
kritičnog viskoznog prigušenja pri negativnom smjeru opterećenja. U slučaju gdje je apsorbirana energija određena kao uloženi rad, vrijednosti prigušenja su u intervalu od 8 do 12% za pozitivni te od 6 do 11% za negativni smjer opterećenja. Trend ovisnosti vrijednosti prigušenja o horizontalnom pomaku približno je jednak za oba načina izračuna apsorbirane energije.

Vlastiti period oscilacija ispitnog uzorka određeni su na temelju vrijednosti relativnog međukatnog pomaka pragnog okvira promatrane skupine uzoraka pri pojavi prve značajne pukotine, i pozitivnom smjeru opterećenja iznosi 0,340 *s*, a pri negativnom 0,384 *s*.

Oštećenje i pukotine ispitnog uzorka *O1_b* prikazani su Slikom 6.69. Oštećenje ispune lokalizirano je u područjima u blizini stupova u obliku vlačnih pukotina te na dodirnim plohama zidnih elemenata uzrokovanog klizanjem. Slikom 6.70 vidljiva je aktivacija većeg dijela horizontalnih i vertikalnih dodirnih ploha zidnih elemenata prilikom prijenosa horizontalnog opterećenja trenjem. Oštećenje okvira lokalizirano je u područjima krajeva stupova u obliku horizontalnih (savojnih) pukotina i drobljenja zaštitnog sloja betona.



Slika 6.69 *Prikaz oštećenja i pukotina ispitnog uzorka O1_b*



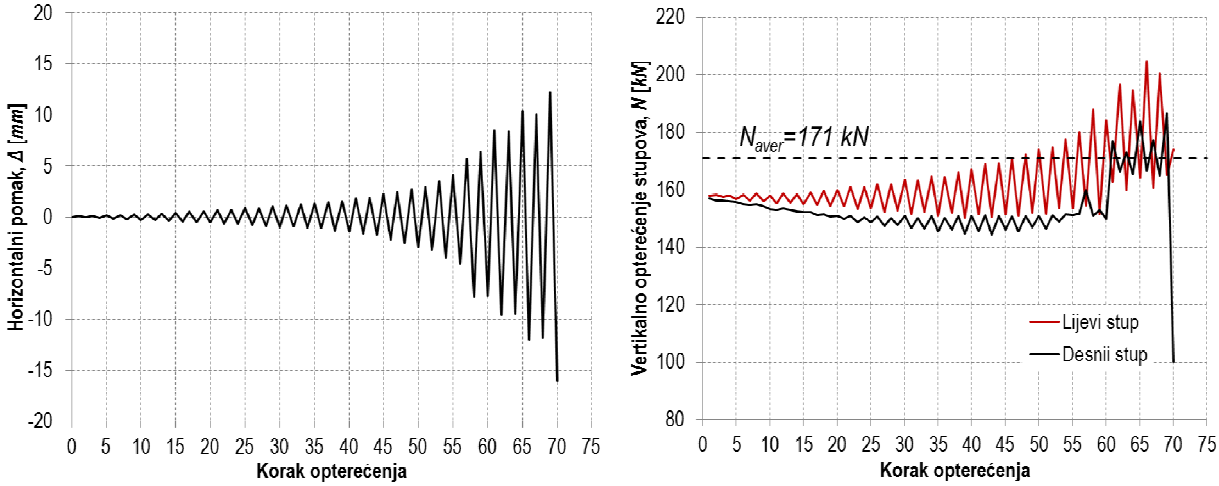
Slika 6.70 *Prikaz aktivacije horizontalnih i vertikalnih dodirnih ploha zidnih elemenata uzorka O1_b pri prijenosu horizontalnog opterećenja*

6.3. Rezultati ispitivanja skupine uzoraka *O2*

Skupina uzoraka *O2* sadrži jedan model neduktilnog armirano-betonskog okvira sa zidanim ispunom.

6.3.1. Rezultati ispitivanja uzorka *O2_cpm*

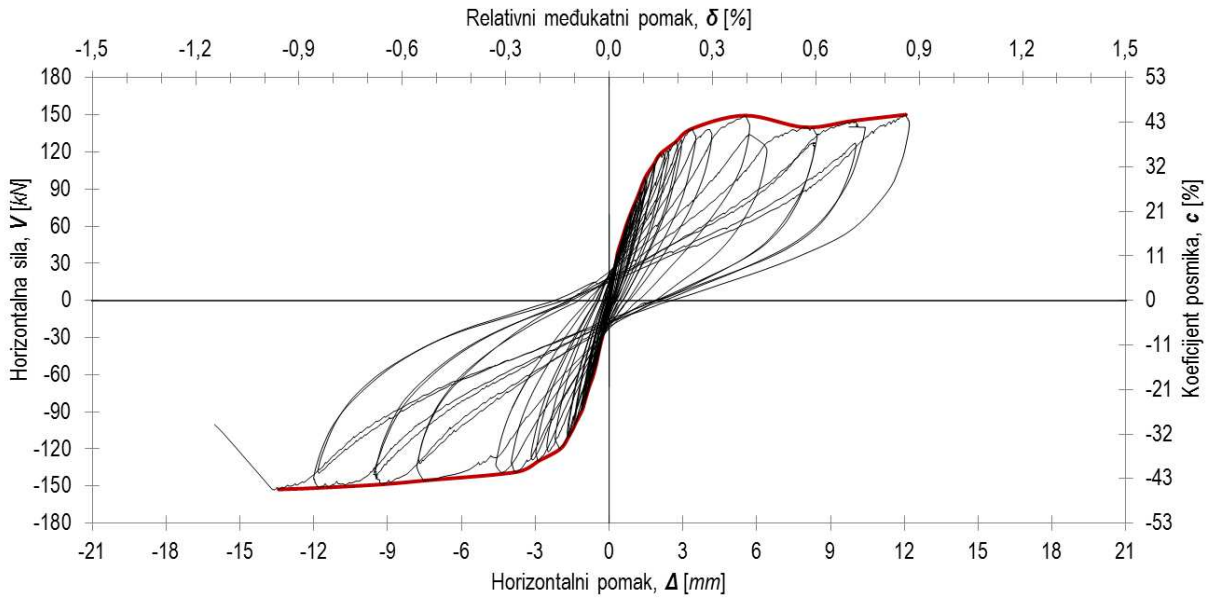
Ispitni uzorak *O2_cpm* neduktilni je armirano-betonski okvir tipa *O2* kod kojeg je ispun izvedena od glinene opeke povezane cementno-vapnenim mortom. Karakteristike i izvedba uzorka opisana je u *Poglavlju 3*. Horizontalno opterećenje uzorka prikazano je Slikom 6.71 a), u ovisnosti o koraku opterećenja, dok je varijacija uzdužne sile u stupovima prikazana Slikom 6.71 b).



a) b)

Slika 6.71 *Prikaz horizontalnog i vertikalnog opterećenja ispitnog uzorka O2_cpm*

Rezultati ispitivanja u obliku histerezne i primarne krivulje odgovora uzorka prikazani su Slikom 6.72. Na sekundarnoj vertikalnoj osi dan je prikaz odnosa vertikalnog i horizontalnog opterećenja (*c*) pri svakom koraku, izražen u %, dok je na sekundarnoj horizontalnoj osi prikazana vrijednost relativnog međukatnog pomak (*δ*).

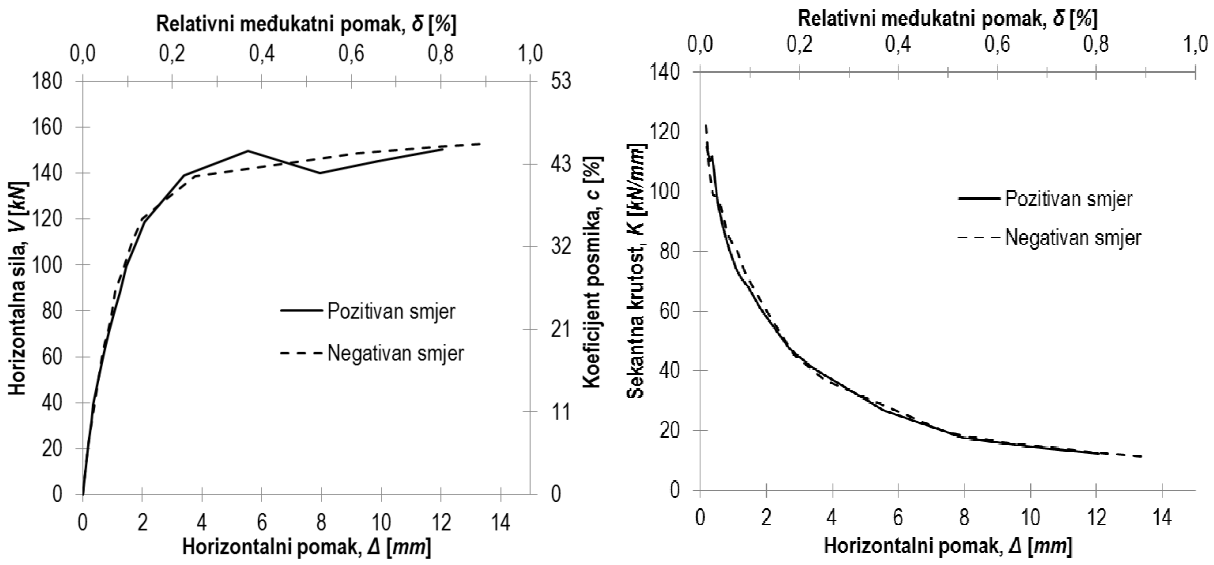


Slika 6.72 *Prikaz histerezne i primarne krivulje odgovora ispitnog uzorka O2_cpm*

Krutost i nosivost ispitnog uzorka određena je u promatranim karakterističnim točkama odziva, a dobiveni rezultati prikazani su Tablicom 6.8. Usporedba primarnih krivulja za pozitivni i negativni smjer opterećenja prikazana je Slikom 6.73 a) dok je prikaz sekantne krutosti, u ovisnosti o pomaku, dan slikom 6.73 b) za oba smjera opterećenja.

Tablica 6.8 *Krutost i nosivost ispitnog uzorka O2_cpm u odabranim karakterističnim točkama odziva*

Smjer opterećenja	Pozitivni	Negativni
V_{cr} [*kN*]	118,6	-120,1
Δ_{cr} [*mm*]	2,1	-2,0
Krutost pri pojavi prve značajne pukotine u ispuni, K_i [*kN/mm*]	**57,0**	**60,1**
V_{max} [*kN*]	149,5	-145,5
Δ_{max} [*mm*]	5,5	-7,5
Krutost pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispune, K_{max} [*kN/mm*]	**27,0**	**19,3**
V_{col} [*kN*]	-	-152,7
Δ_{col} [*mm*]	-	-13,4
Krutost pri slomu okvira, K_{col} [*kN/mm*]	**-**	**11,4**
V_{res} [*kN*]	**-**	**-124,7**

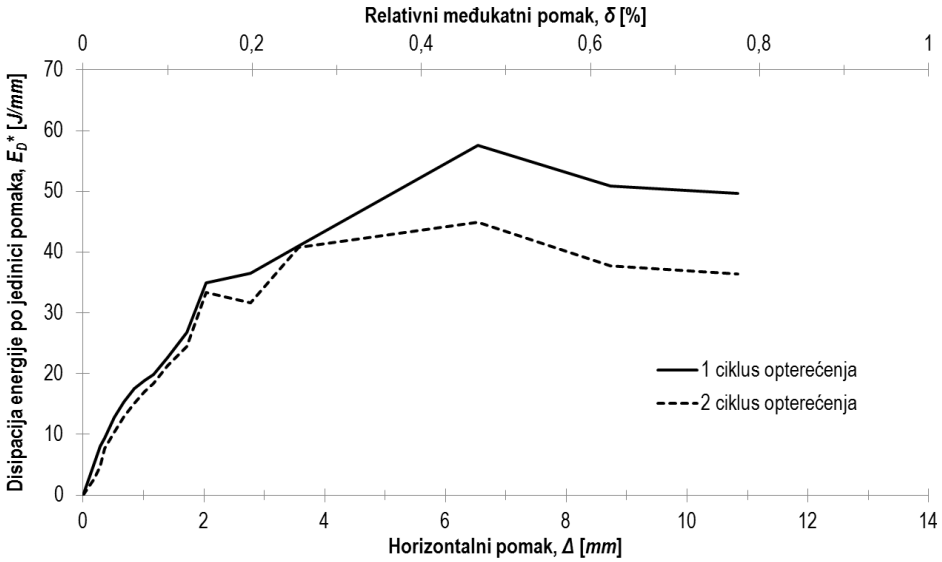


a) b)

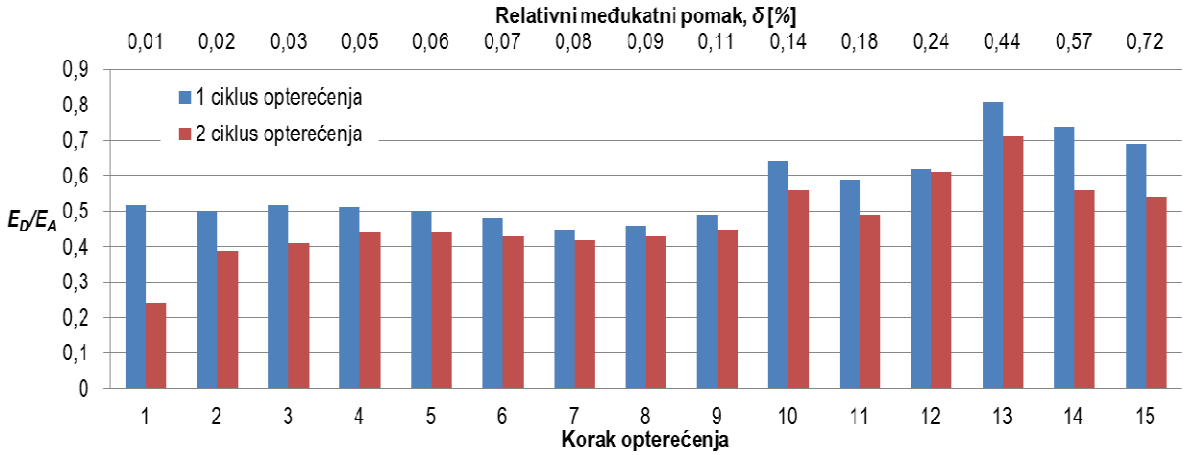
Slika 6.73 Prikaz primarnih krivulja odgovora i sekantne krutosti, u ovisnosti o pomaku, pri pozitivnom i negativnom smjeru opterećenja ispitnog uzorka *O2_cpm*.

Iz usporedbe rezultata, prikazanih Slikom 6.73, vidljivo je gotovo identično ponašanje ispitnog uzorka pri pozitivnom i negativnom smjeru opterećenja. Vrijednosti odstupanja horizontalne nosivosti i početne krutosti, pri pozitivnom i negativnom smjeru opterećenja, zanemarivih su iznosa. Osnovna razlika u odgovoru uzorka pri pozivnom i negativnom smjeru opterećenja očituje se u vrijednosti relativnog međukatnog pomaka pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna (Tablica 6.8). Ovisnost sekantne krutosti o horizontalnom pomaku približno je jednaka za oba smjera opterećenja.

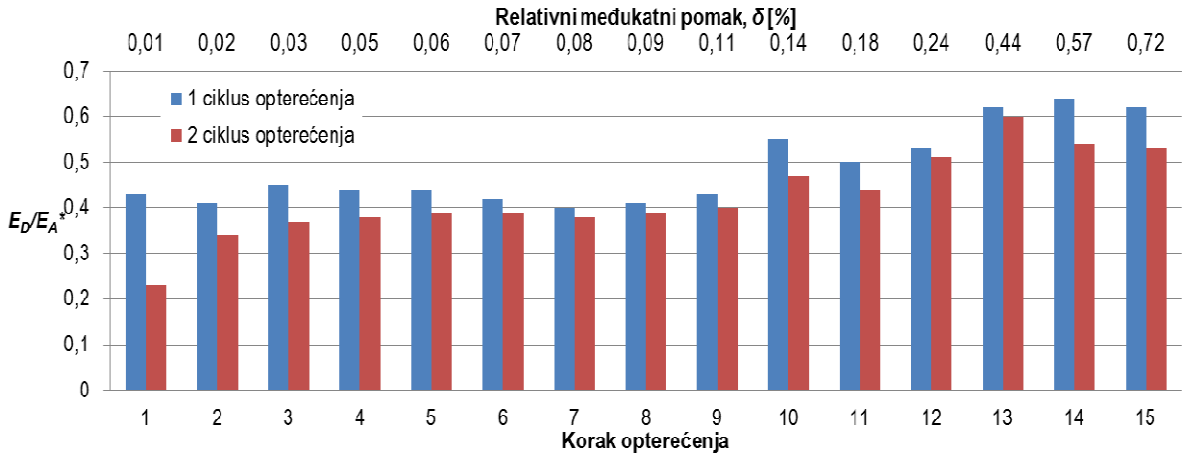
Disipacija energije po jedinici pomaka (E_D*) je prikazana je Slikom 6.74. Odnos disipirane i apsorbirane energije prikazan je Slikom 6.75 a) i b) ovisno o načinu izračuna apsorbirane energije za svaki korak opterećenja. Na Slici 6.75 a) apsorbirana energija određena je kao potencijalna deformacijske energija (E_A), a na Slici 6.75 b) kao uloženi rad (E_A*). Prigušenje ispitnog uzorka također je određeno za oba načina određivanja apsorbirane energije, a rezultati su prikazani Slikom 6.76 a) i b), za svaki korak opterećenja. Ovisnost prigušenja o pomaku dana je Slikom 6.77 za oba slučaja izračuna apsorbirane energije.



Slika 6.74 *Disipacija energije po jedinici pomaka za ispitni uzorak O2_cpm*

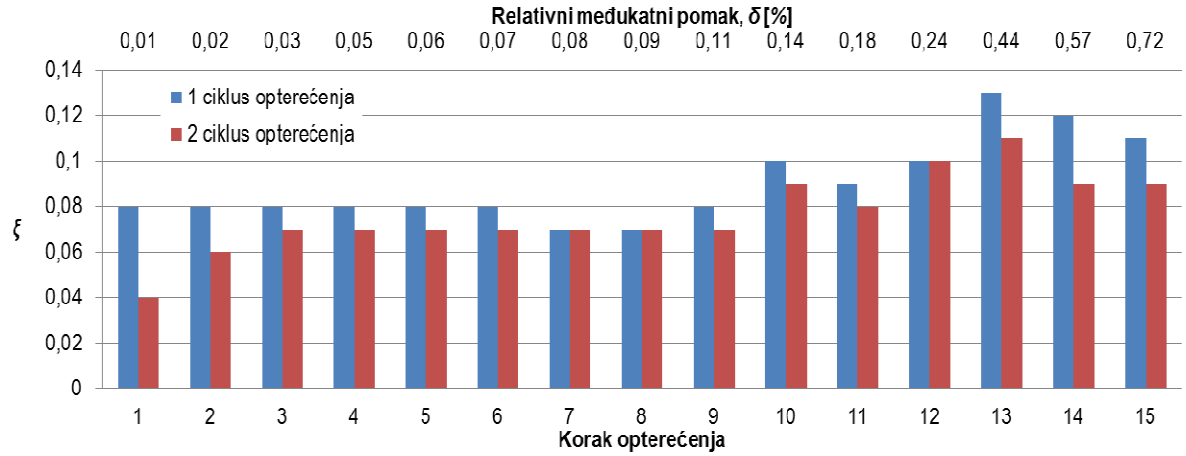


a)

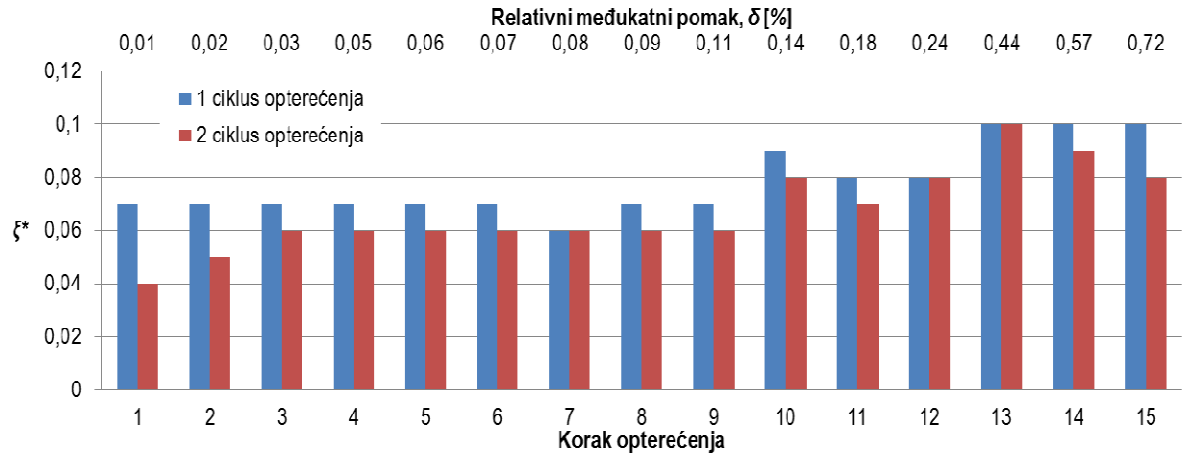


b)

Slika 6.75 *Odnos disipirane i apsorbirane energije za ispitni uzorak O2_cpm*

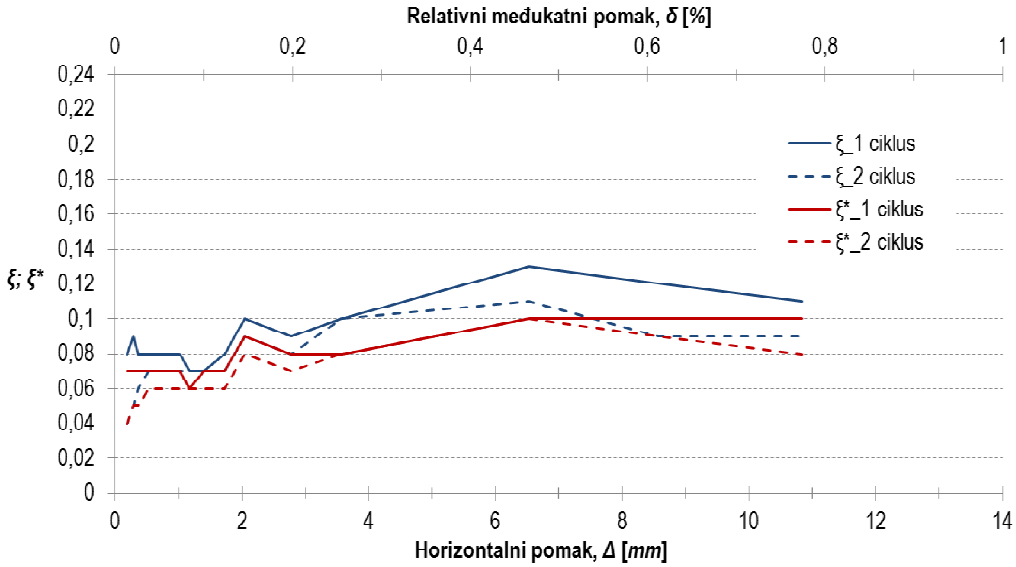


a)



b)

Slika 6.76 *Prigušenje ispitnog uzorka O2_cpm u ovisnosti o izračunu apsorbirane energije*



Slika 6.77 *Ovisnost prigušenja ispitnog uzorka O2_cpm o pomaku*

Disipacija energije uzorka po jedinici pomaka, prikazana Slikom 6.74, ovisna je o ciklusu opterećenja. Veće vrijednosti promatrane veličine dobivene su pri prvim ciklusima opterećenja. Međutim, sve do pojave dominantnog mehanizma sloma ispuna nije uočena znatna razlika u disipaciji energije prvog i drugog ciklusa opterećenja. Srednje odstupanje u vrijednostima promatrane veličine, u području odgovora uzorka nakon pojave dominantnog mehanizma sloma ispuna, iznosi približno 25%. Navedeno odstupanje određeno je u odnosu na vrijednosti pozitivnog smjera opterećenja.

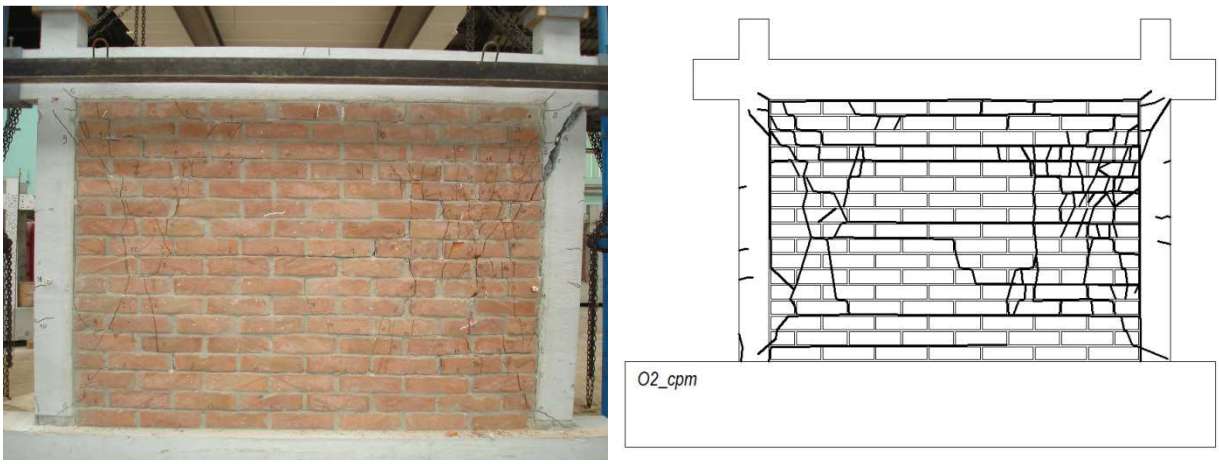
Vrijednost odnosa disipirane i apsorbirane energije, prikazana Slikom 6.75, ovisna je o načinu izračuna apsorbirane energije. Neovisno o načinu izračuna apsorbirane energije uočene su veće vrijednosti promatranog odnosa pri prvim ciklusima opterećenja te približno jednak trend odnosa vrijednosti prvog i drugog ciklusa opterećenja. Vrijednost promatranog odnosa pri izračunu apsorbirane energije, kao potencijalne deformacijske energije, u intervalu je od 0,5 do 0,81 za prve te od 0,24 do 0,71 za druge cikluse opterećenja. U slučaju gdje je apsorbirana energija određena kao uloženi rad, vrijednosti promatranog odnosa u intervalu su od 0,41 do 0,64 za prve te od 0,23 do 0,6 za druge cikluse opterećenja.

Vrijednost prigušenja uzorka ovisna je o prethodno navedenom odnosu, pri čemu je uočen približno jednak trend u ovisnosti o horizontalnom pomaku (Slika 6.76). Vrijednosti prigušenja uzorka u slučaju kada je apsorbirana energija određena kao potencijalna deformacijska energija u intervalu su od 8 do 13% pri prvim te od 4 do 11% kritičnog viskoznog prigušenja pri drugim ciklusima opterećenja. U slučaju gdje je apsorbirana energija određena kao uloženi rad, vrijednosti prigušenja u intervalu su od 7 do 10% za prve te od 4 do 10% za druge cikluse opterećenja.

Vlastiti period oscilacija ispitnog uzorka pri pozitivnom smjeru opterećenja iznosi 0,158 *s*, a pri negativnom 0,154 *s*.

Prikaz oštećenja i pukotina ispitnog uzorka dan je Slikom 6.78. Pojava prvih značajnih pukotina u ispunu uočena je u istom koraku pri pozitivnom i negativnom smjeru opterećenja, s vrijednošću relativnog međukatnog pomaka u iznosu od 0,1%. Prve pukotine prostirale su se iz opterećenih uglova i većim dijelom po horizontalnim reškama ispuna. Nagib pukotina u uglovima ispuna približno je jednak 70º. Potrebno je naglasiti da je uočen veći broj pukotina kojima su definirane prve značajne pukotine. Pojava dominantnog mehanizma sloma ispuna također je uočena u istom koraku pri pozitivnom i negativnom smjeru opterećenja pri srednjem relativnom međukatnom pomaku u iznosu od 0,46%. Prema klasifikaciji navedenoj u *Poglavlju 2* uočeni se mehanizam sloma ispuna može definirati kao dijagonalni posmični slom. Nakon pojave dominantnog mehanizma sloma daljnje oštećenje ispuna lokalizirano je u području horizontalnih reški uslijed pojave većeg broja pukotina i u području uz lijevi

stup. Slom okvira uzrokovan je posmičnim slomom lijevog stupa pri negativnom smjeru opterećenja (Slika 6.79 a)). Slom je nastupio naglo bez prethodnog značajnog oštećenja. Nakon pojave posmičnog sloma stupa, ispitivanje je nastavljeno s ciljem određivanja rezidualne nosivosti uzorka (*Poglavlje 7.6.5.*) prilikom čega nije uočeno znatno smanjenje horizontalne nosivosti uzorka. U odnosu na horizontalnu nosivost uzorka neposredno prije sloma stupa, smanjenje nosivosti iznosi 20% za pozitivni i 18% za negativni smjer opterećenja. Oštećenje ispuna u koracima opterećenja nakon posmičnog sloma lijevog stupa lokalizirano je u području u blizini navedenog stupa (Slika 6.79 b)).



Slika 6.78 *Prikaz oštećenja i pukotina ispitnog uzorka O2_cpm*

a) b)

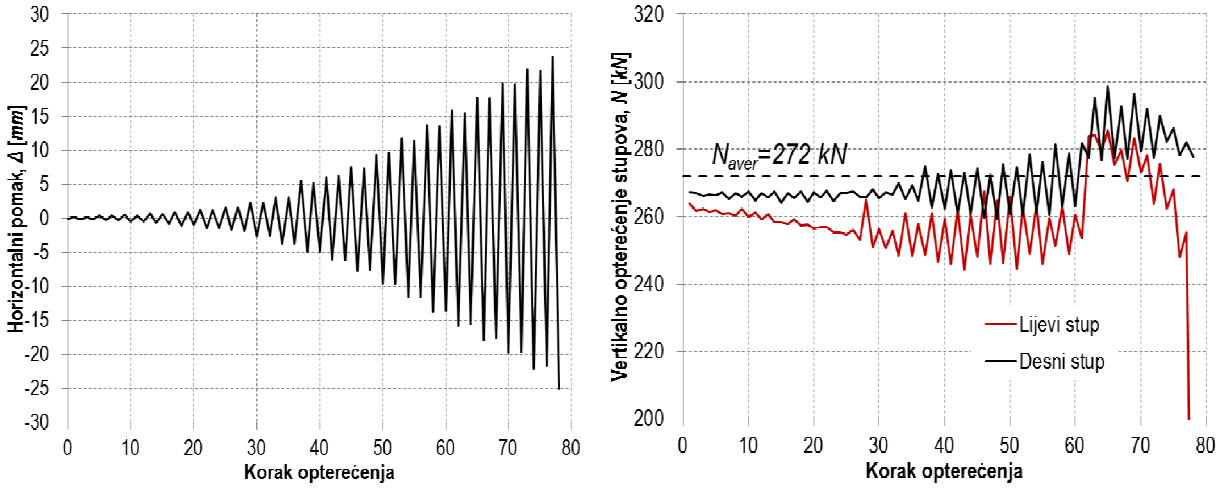
Slika 6.79 *Slom stupa i oštećenje ispune nakon sloma stupa ispitnog uzorka O2_cpm*

6.4. Rezultati ispitivanja skupine uzoraka *O3*

Skupina uzoraka *O3* sadrži dva modela neduktilnih armirano-betonskih okvira sa zidanim ispunom i jedan model neduktilnog armirano-betonskog okvira bez zidanog ispuna. Rezultati ispitivanja u nastavku teksta dani su za pojedini ispitni uzorak, a analizirani su na način opisan u uvodnom dijelu ovog poglavlja.

6.4.1. Rezultati ispitivanja uzoraka *O3*

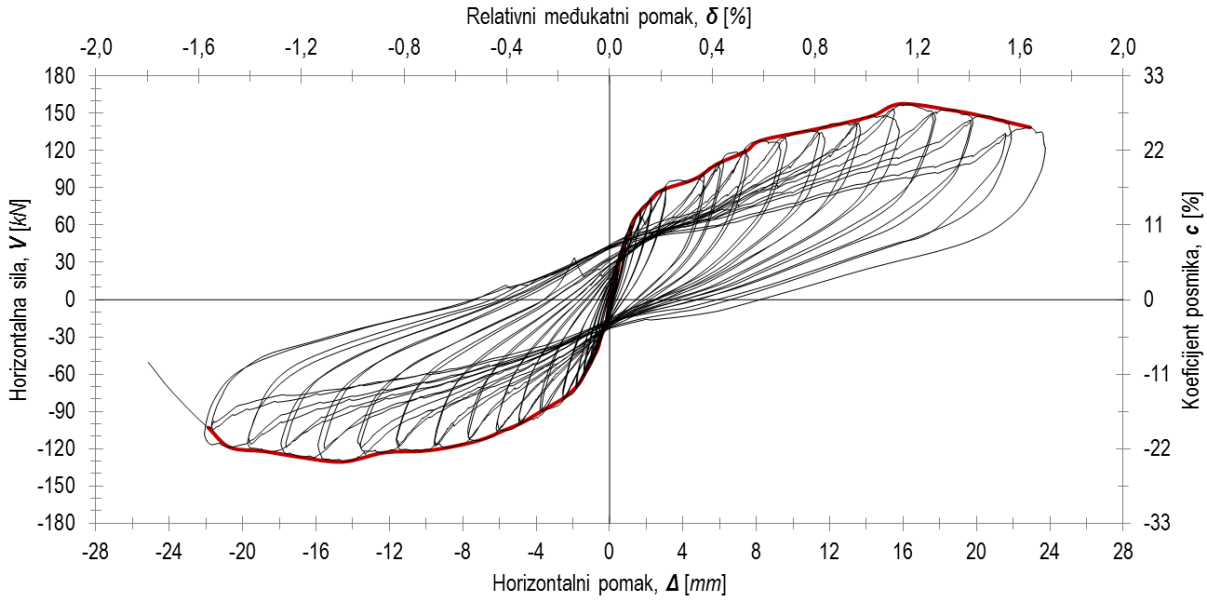
Ispitni uzorak *O3* prazan je neduktilni armirano-betonski okvir čiji rezultati ispitivanja predstavljaju referentne vrijednosti prilikom usporedbe doprinosa promatranih parametara sustava okvir s ispunom. Karakteristike i izvedba uzorka opisani su u *Poglavlju 3*. Horizontalno opterećenje uzorka prikazano je Slikom 6.80 a), u ovisnosti o koraku opterećenja, dok je varijacija uzdužne sile u stupovima prikazana Slikom 6.80 b).



a) b)

Slika 6.80 Prikaz horizontalnog i vertikalnog opterećenja ispitnog uzorka *O3*

Rezultati ispitivanja u obliku histerezne i primarne krivulje odgovora ispitnog uzorka prikazani su Slikom 6.81. Na sekundarnoj vertikalnoj osi dan je prikaz odnosa vertikalnog i horizontalnog opterećenja (*c*) pri svakom koraku, izražen u %, dok je na sekundarnoj horizontalnoj osi prikazan relativni međukatni pomak (δ).

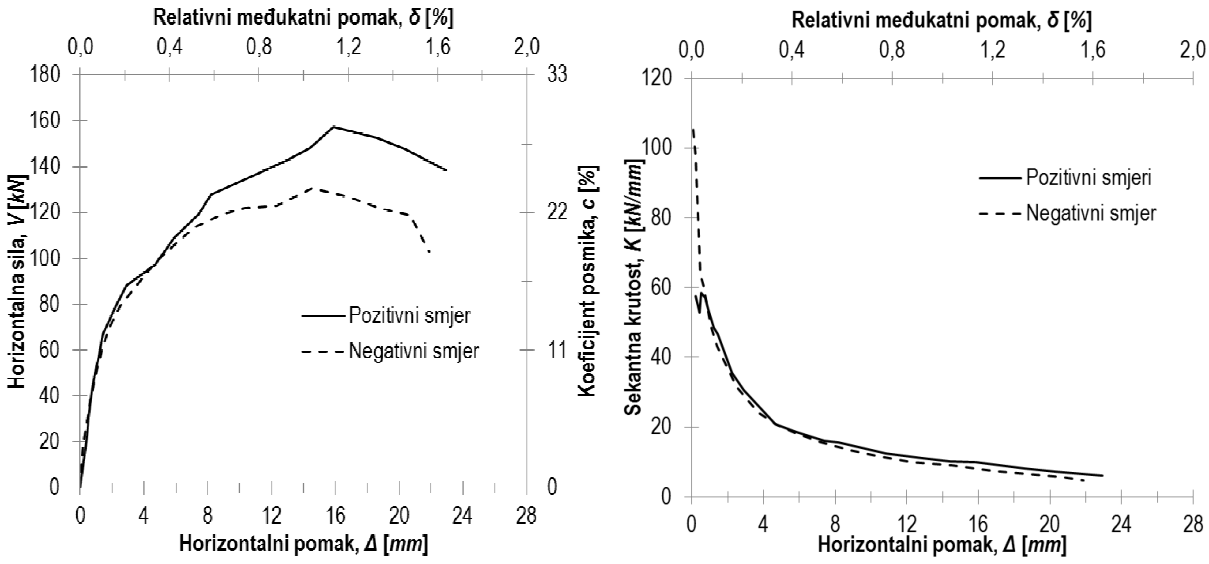


Slika 6.81 *Prikaz histerezne i primarne krivulje odgovora ispitnog uzorka O3*

Krutost i nosivost ispitnog uzorka određeni su o odabranim karakterističnim točkama odziva, a dobiveni rezultati su prikazani Tablicom 6.9. Usporedba primarnih krivulja odgovora pri pozitivnom i negativnom smjer opterećenja prikazana je Slikom 6.82 a) dok je prikaz sekantne krutosti, u ovisnosti o pomaku, dan Slikom 6.82 b) za oba smjera opterećenja.

Tablica 6.9 *Krutost i nosivost ispitnog uzorka O3 u odabranim karakterističnim točkama odziva*

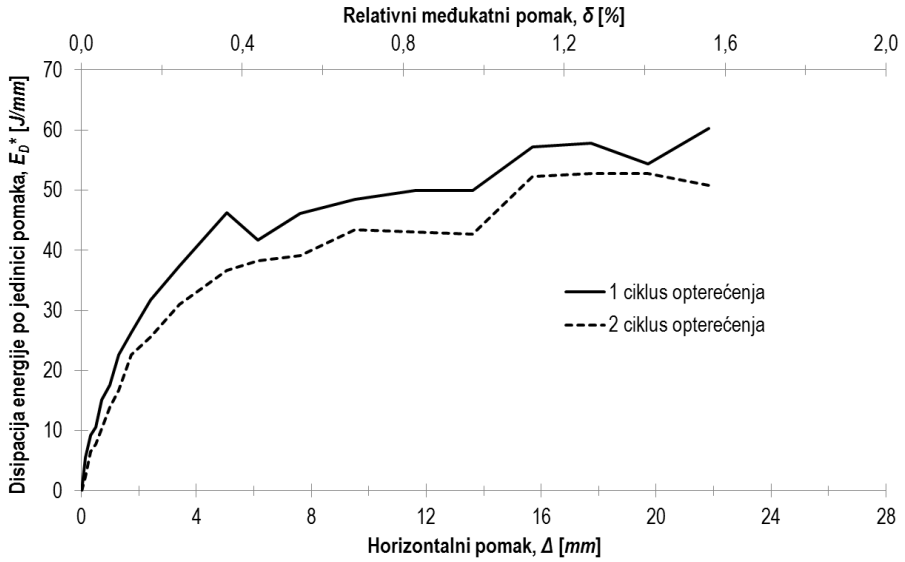
Smjer opterećenja	Pozitivni	Negativni
V_{cr} [*kN*]	97,3	-105,3
Δ_{cr} [*mm*]	4,7	-5,8
Krutost pri pojavi prve značajne pukotine, K_i [*kN/mm*]	**20,9**	**18,2**
V_{max} [*kN*]	142,5	-130,5
Δ_{max} [*mm*]	12,9	-14,5
Krutost pri pojavi dominantnog mehanizma sloma, K_{max} [*kN/mm*]	**11,0**	**9,0**
V_{col} [*kN*]	138,6	-103,0
Δ_{col} [*mm*]	22,9	-21,9
Krutost pri slomu, K_{col} [*kN/mm*]	**6,0**	**4,7**
V_{res} [*kN*]	**-**	**-**



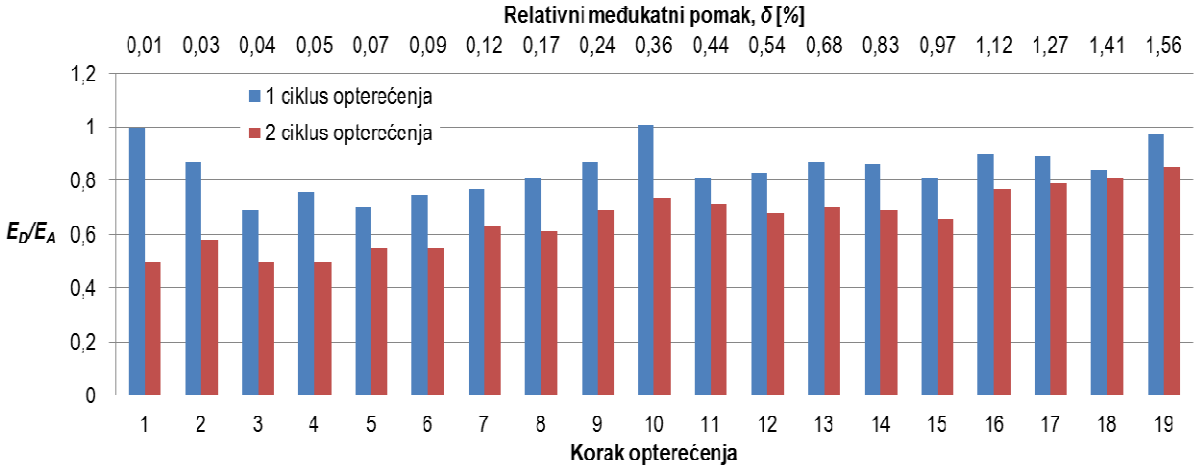
Slika 6.82 *Prikaz primarnih krivulja odgovora i sekantne krutosti, u ovisnosti o pomaku, pri pozitivnom i negativnom smjeru opterećenja ispitnog uzorka O3*

Iz usporedbe rezultata, prikazanih Slikom 6.82, vidljiva je veća nosivost ispitnog uzorka pri pozitivnom smjeru opterećenja. U početnim fazama ispitivanja nosivost uzorka, pri pozitivnom i negativnom smjeru opterećenja, približno je jednaka sve do pojave značajnih pukotina na stupovima okvira. Nakon navedenog, što odgovara vrijednosti relativnog međukatnog pomaka u iznosu od približnih 0,4%, dolazi do izraženijeg očvršćivanja pri pozitivnom smjeru opterećenja. Početna krutost, kao i ovisnost sekantne krutosti o horizontalnom pomaku, približno je jednaka za oba smjera opterećenja.

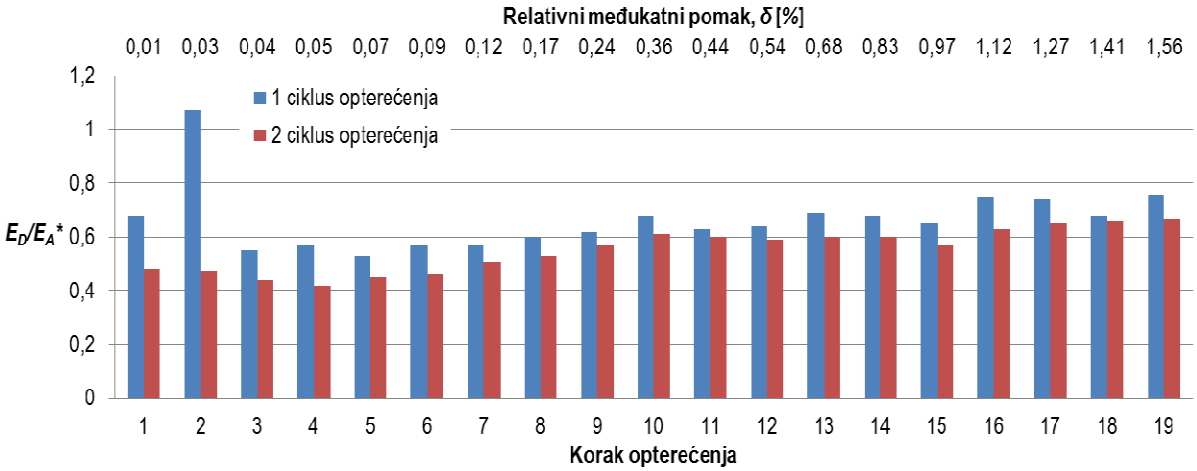
Disipacija energije po jedinici pomaka (E_D*) prikazana je Slikom 6.83. Odnos disipirane i apsorbirane energije prikazan je Slikom 6.84 a) i b) u ovisnosti o načinu izračuna apsorbirane energije za svaki korak opterećenja. Na Slici 6.84 a) apsorbirana energija određena je kao potencijalna deformacijske energija (E_A), a na Slici 6.84 b) kao uloženi rad (E_A*). Prigušenje ispitnog uzorka također je određeno za oba načina određivanja apsorbirane energije, a rezultati su prikazani Slikom 6.85 a) i b) za svaki korak opterećenja. Ovisnost prigušenja o horizontalnom pomaku dana je Slikom 6.86 za oba slučaja izračuna apsorbirane energije.



Slika 6.83 *Disipacija energije po jedinici pomaka za ispitni uzorak O3*

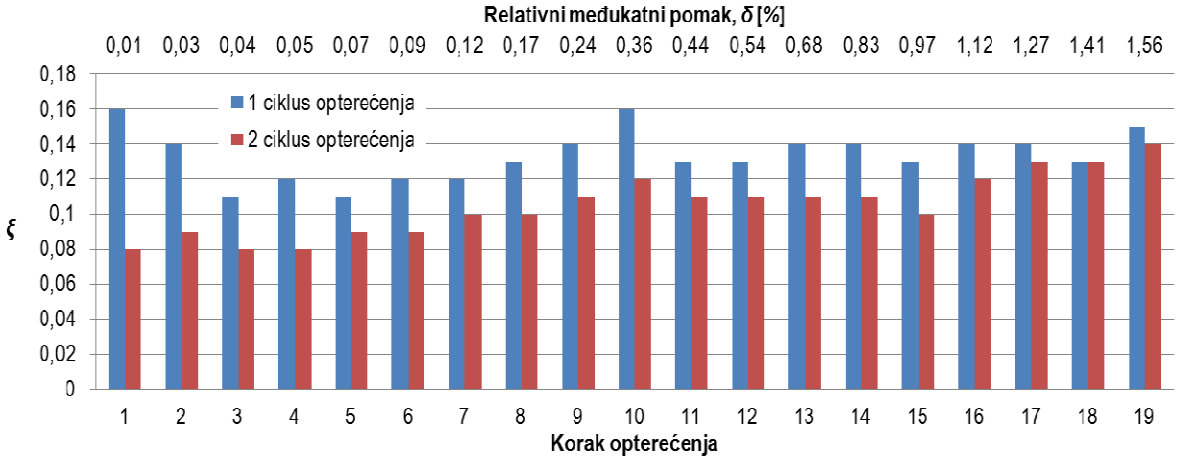


a)

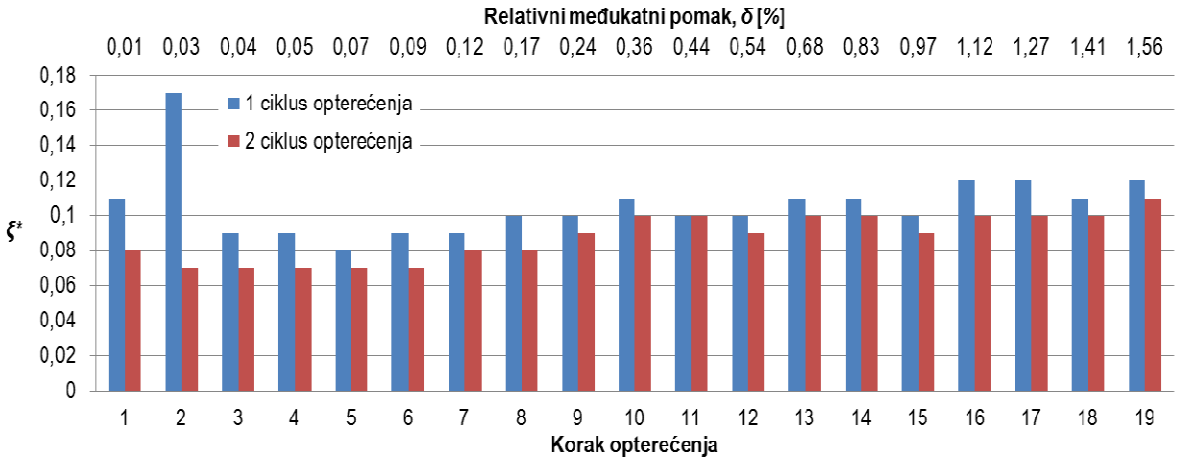


b)

Slika 6.84 *Odnos disipirane i apsorbirane energije za ispitni uzorak O3*

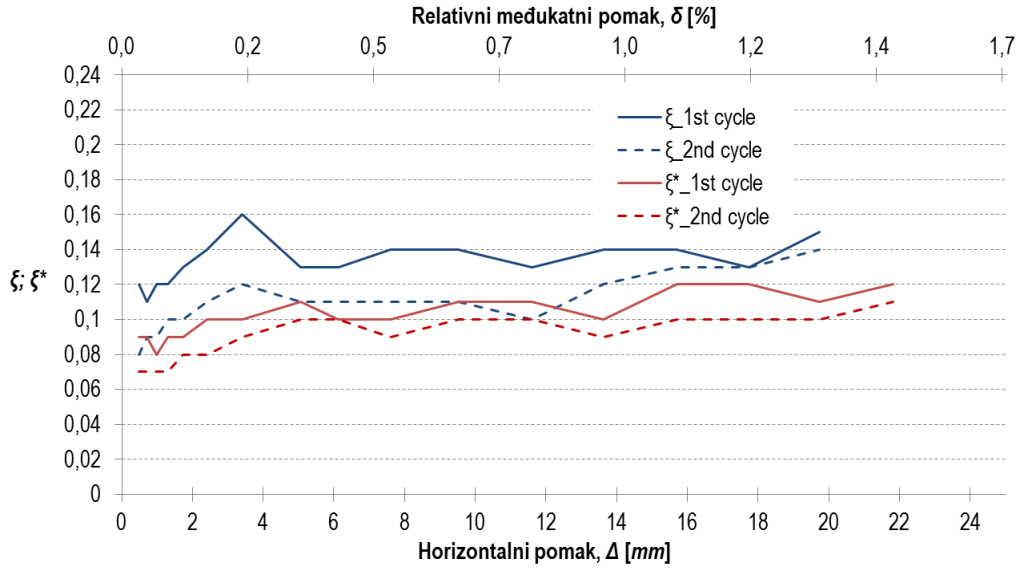


a)



b)

Slika 6.85 *Prigušenje ispitnog uzorka O3 u ovisnosti o načinu izračuna apsorbirane energije*



Slika 6.86 *Ovisnost prigušenja ispitni uzorak O3 o horizontalnom pomaku*

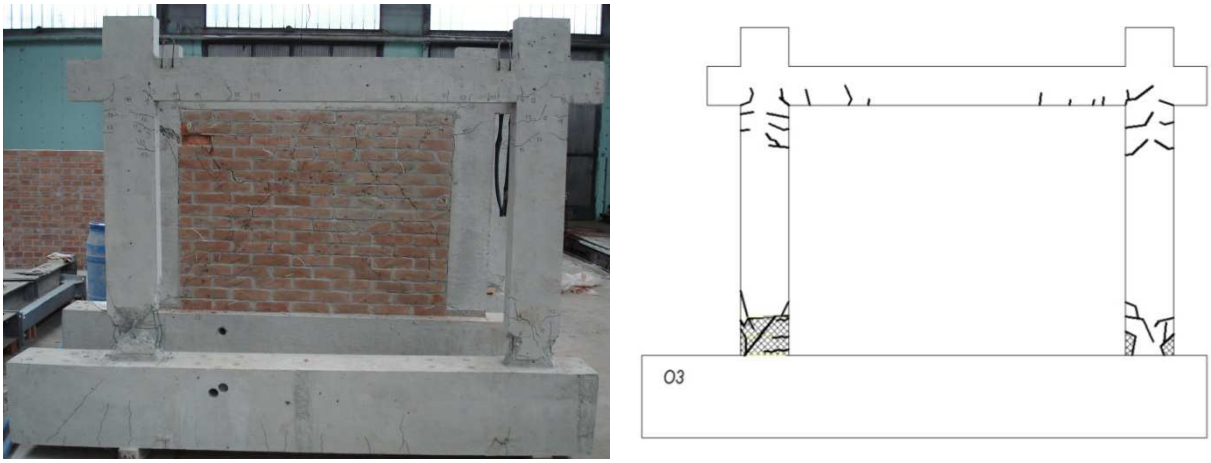
Disipacija energije uzorka po jedinici pomaka, prikazana Slikom 6.83, ovisna je o ciklusu opterećenja prilikom čega su uočene veće vrijednosti pri prvim ciklusima. Odstupanja u vrijednostima promatrane veličine približno su jednaka u cijelom području odgovora uzorka. Srednje odstupanje u vrijednostima promatrane veličine, u cijelom području odgovora uzorka, iznosi približno 19%. Navedeno odstupanje određeno je u odnosu na vrijednosti pozitivnog smjera opterećenja.

Odnos disipirane i apsorbirane energije ispitnog uzorka, prikazan Slikom 6.84, ovisan je o načinu izračuna apsorbirane energije i ciklusu opterećenja gdje su veće vrijednosti promatranog odnosa uočene pri prvim ciklusima opterećenja. U slučaju kada je apsorbirane energija određena kao potencijalna deformacijska energija, vrijednosti promatranog odnosa u intervalu su od 0,7 do 1,01 za prve te od 0,5 do 0,85 za druge cikluse opterećenja. S druge strane, u slučaju kada je apsorbirana energija određena kao uloženi rad, vrijednosti promatranog odnosa u intervalu su od 0,53 do 1,07 za prve te od 0,42 do 0,67 za druge cikluse opterećenja. Potrebno je napomenuti da su, kao i u kod prijašnjih ispitnih uzoraka, vrijednosti promatranog odnosa pri pojedinim koracima opterećenja veće od 1. Navedena je vrijednost nerealna i implicira veću disipaciju energije od prvobitno unesene.

Vrijednosti prigušenja ispitnog uzorka, prikazane Slikom 6.85, ovisne su o prethodno navedenom odnosu pri čemu je uočen približno jednak trend u ovisnosti o vrijednosti horizontalnog pomaka. Vrijednosti prigušenja uzorka u slučaju kada je apsorbirana energija određena kao potencijalna deformacijska energija, u intervalu su od 11 do 16% pri prvim te od 8 do 14% kritičnog viskoznog prigušenja pri drugim ciklusima opterećenja. U slučaju kada je apsorbirana energija određena kao uloženi rad, vrijednosti prigušenja u intervalu su od 8 do 17% za prve te od 7 do 11% za druge cikluse opterećenja.

Vlastiti period oscilacija ispitnog uzorka pri pozitivnom smjeru opterećenja iznosi 0,323 *s*, a pri negativnom 0,347 *s*.

Prikaz oštećenja i pukotina ispitnog uzorka dan je Slikom 6.87. Slom ispitnog uzorka uzrokovan je posmičnom slomom lijevog stupa u blizini spoja s temeljnom gredom pri pozitivnom smjeru opterećenja (Slika 6.88 a)). Prije pojave sloma lijevog stupa uočena su znatna oštećenja u obliku posmičnih i savojnih pukotina te drobljenja betona. Oštećenje desnog stupa ispitnog uzorka prikazano je Slikom 6.88 b), a uzrokovano je u većoj mjeri drobljenjem zaštitnog sloja i pojavom posmičnih pukotina. U blizini čvora, oštećenje oba stupa uzrokovano je pojavom većeg broja horizontalnih (savojnih) pukotina. Oštećenje grede ispitnog uzorka također je lokalizirano u području u blizini čvora u obliku manjeg broja savojnih pukotina.

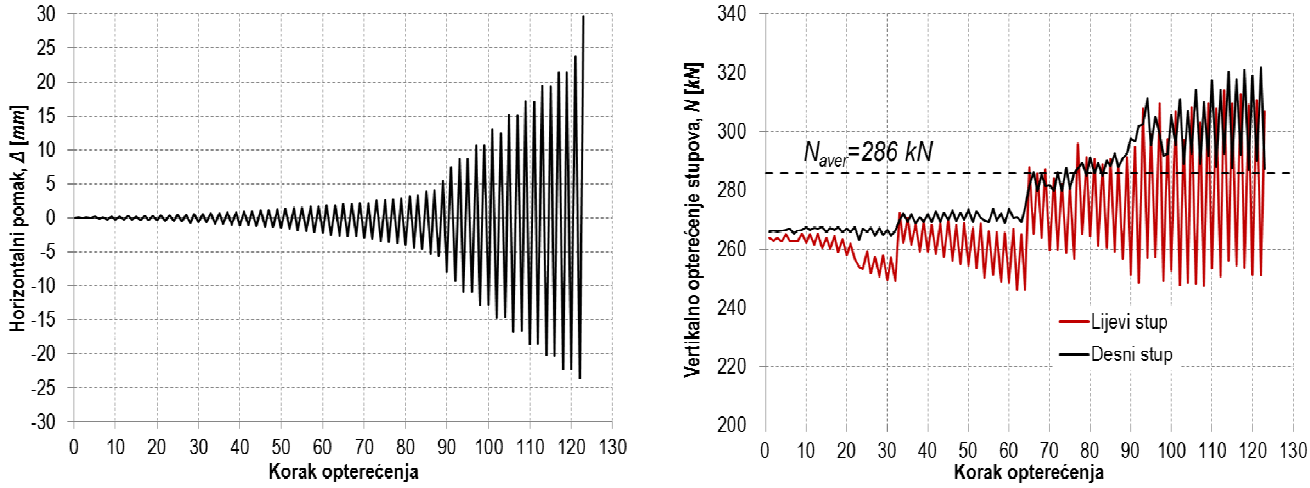


Slika 6.87 *Prikaz oštećenja i pukotina ispitnog uzorka O3*

Slika 6.88 *Slom i oštećenje stupova ispitnog uzorka O3*

6.4.2. Rezultati ispitivanja uzorka *O3_bpm*

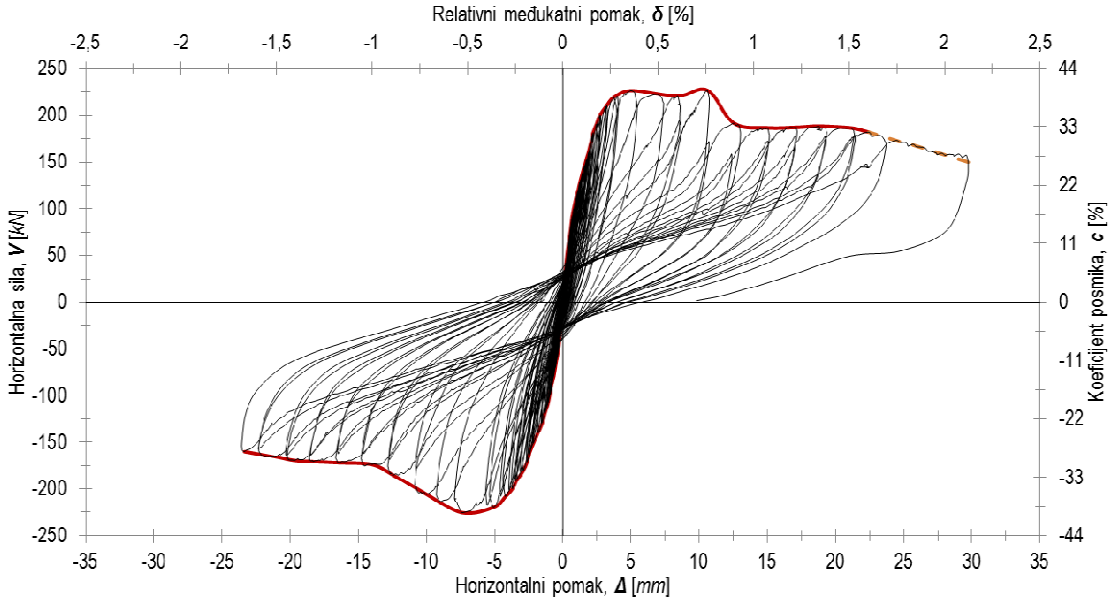
Ispitni uzorak *O3_bpm* neduktilni je armirano-betonski okvir tipa *O3* kod kojeg je ispun izvedena od šupljih glinenih zidnih elemenata povezanih cementno-vapnenim mortom. Karakteristike i izvedba uzorka opisani su u *Poglavlju 3*. Horizontalno opterećenje uzorka prikazano je Slikom 6.89 a), u ovisnosti o koraku opterećenja, dok je varijacija uzdužne sile u stupovima prikazana Slikom 6.89 b).



a) b)

Slika 6.89 *Prikaz horizontalnog i vertikalnog opterećenja ispitnog uzorka O3_bpm*

Rezultati ispitivanja u obliku histerezne i primarne krivulje odgovora ispitnog uzorka prikazani su Slikom 6.90. Na sekundarnoj vertikalnoj osi dan je prikaz odnosa vertikalnog i horizontalnog opterećenja (*c*) pri svakom koraku, izražen u %, dok je na sekundarnoj horizontalnoj osi prikazan relativni međukatni pomak (δ).

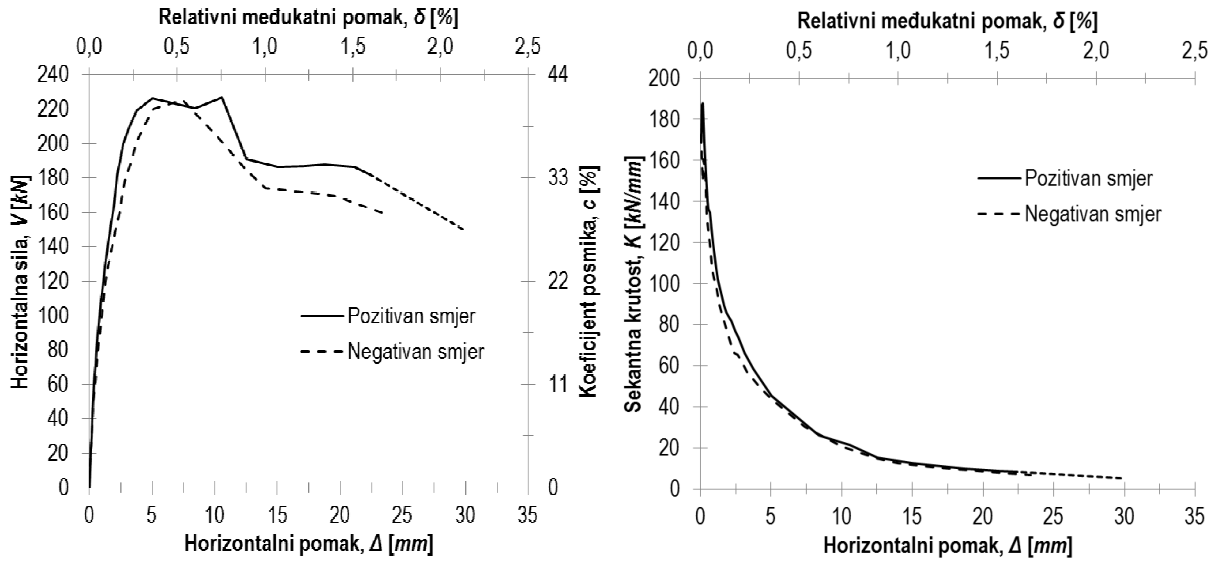


Slika 6.90 *Prikaz histerezne i primarne krivulje odgovora ispitnog uzorka O3_bpm*

Krutost i nosivost ispitnog uzorka određeni su u odabranim karakterističnim točkama odziva, a dobiveni rezultati prikazani su Tablicom 6.10. Usporedba primarnih krivulja odgovora za pozitivni i negativni smjer opterećenja prikazana je Slikom 6.91 a). Prikaz sekantne krutosti u ovisnosti o horizontalnom pomaku dan je Slikom 6.91 b) za oba smjera opterećenja.

Tablica 6.10 *Krutost i nosivost ispitnog uzorka O3_bpm u odabranim karakterističnim točkama odziva*

Smjer opterećenja	Pozitivni	Negativni
V_{cr} [*kN*]	152,13	-171,39
Δ_{cr} [*mm*]	1,7	-2,6
Krutost pri pojavi prve značajne pukotine u ispuni, K_i [*kN/mm*]	**89,5**	**65,4**
V_{max} [*kN*]	219,2	-219,8
Δ_{max} [*mm*]	3,8	-5,1
Krutost pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispune, K_{max} [*kN/mm*]	**58,3**	**43,3**
V_{col} [*kN*]	191,1	-174,0
Δ_{col} [*mm*]	12,5	-14,0
Krutost pri slomu ispune, K_{col} [*kN/mm*]	**15,3**	**12,4**
V_{res} [*kN*]	**191,1**	**-174,0**

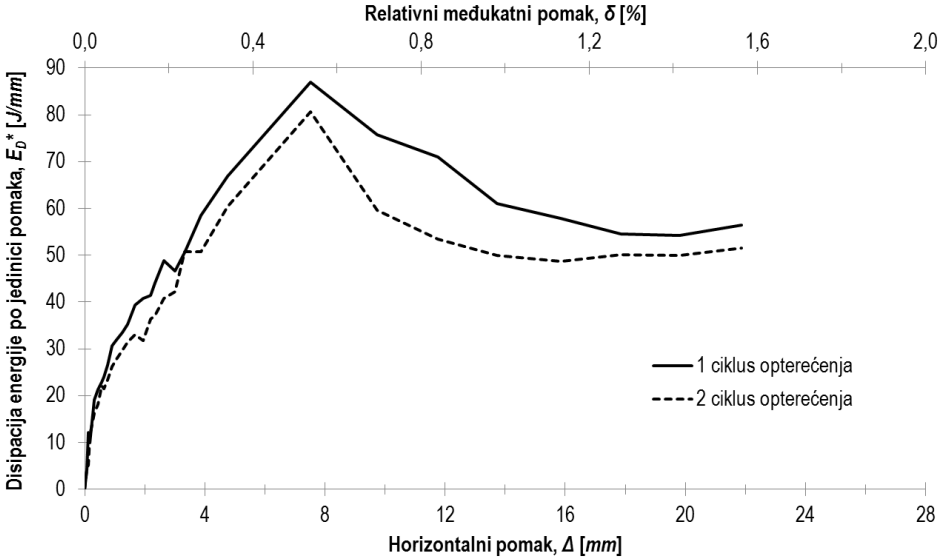


a) b)

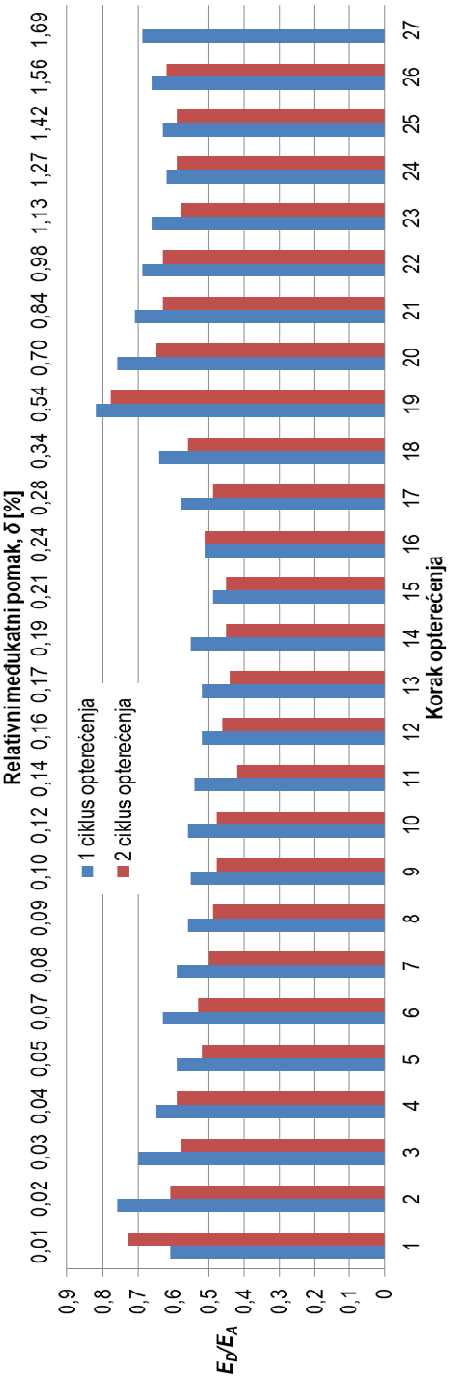
Slika 6.91 *Prikaz primarnih krivulja odgovora i sekantne krutosti, u ovisnosti o pomaku, pri pozitivnom i negativnom smjeru opterećenja ispitnog uzorka O3_bpm*

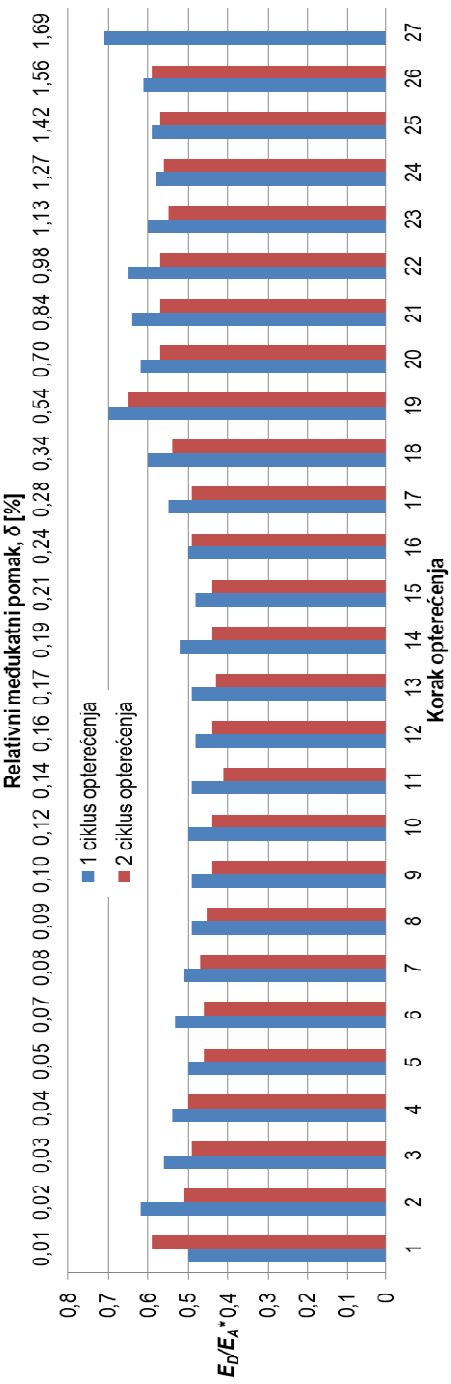
Iz usporedbe prikazane Slikom 6.91, vidljive su zanemarive razlike u odgovoru ispitnog uzorka u području do pojave dominantnog mehanizma sloma ispuna pri pozitivnom i negativnom smjeru opterećenja. Horizontalna nosivost i početna krutost ispitnog uzorka približno je jednaka pri pozitivnom i negativnom smjeru opterećenja, a osnovna razlika u odgovoru uzorka vidljiva je u području nakon pojave dominantnog mehanizma sloma ispuna. Međutim, pojava skoka vrijednosti horizontalne nosivosti, uočena pri pozitivnom smjeru opterećenja u koraku gdje je vrijednost relativnog međukatnog pomaka u iznosu od približnih 0,6%, nije uobičajena kod promatranog sustava i može se pripisati uklještenju elemenata ispuna na osnovnoj plohi sloma i kao takva može se zanemariti. Ovisnost sekantne krutosti uzorka o horizontalnom pomaku približno je jednaka za oba smjera opterećenja.

Disipacija energije ispitnog uzorka po jedinici pomaka (E_D*) prikazana je Slikom 6.92. Odnos disipirane i apsorbirane energije prikazan je Slikom 6.93 a) i b), ovisno o načinu izračuna apsorbirane energije za svaki korak opterećenja. Na Slici 6.93 a) apsorbirana energija određena je kao potencijalna deformacijske energija (E_A), a na Slici 6.93 b) kao uloženi rad (E_A*). Prigušenje ispitnog uzorka također je određeno za oba načina određivanja apsorbirane energije, a rezultati su prikazani Slikom 6.94 a) i b) za svaki korak opterećenja. Ovisnost prigušenja o pomaku dana je Slikom 6.95 za oba slučaja izračuna apsorbirane energije.

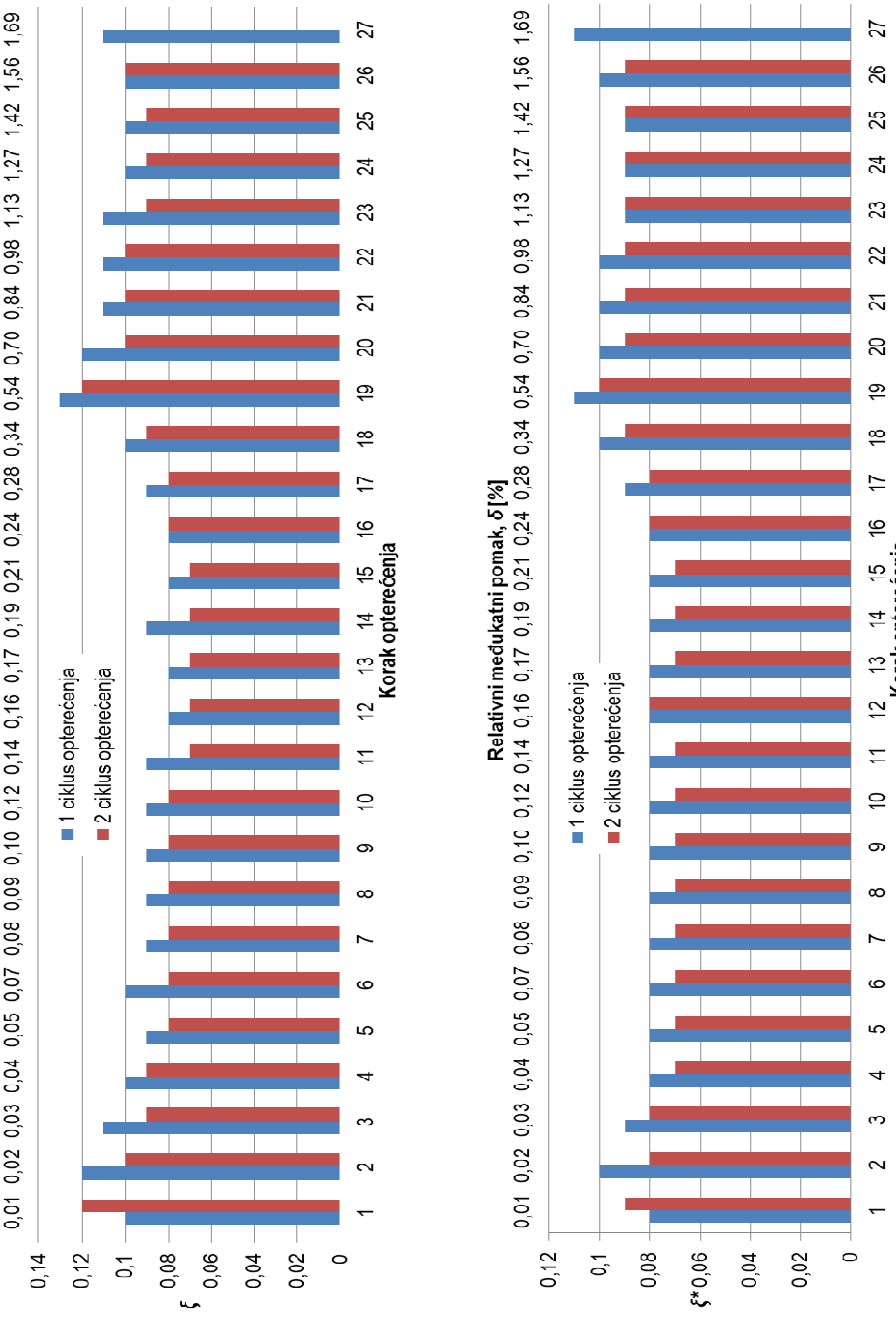


Slika 6.92 *Disipacija energije po jedinici pomaka za ispitni uzorak O3_bpm*

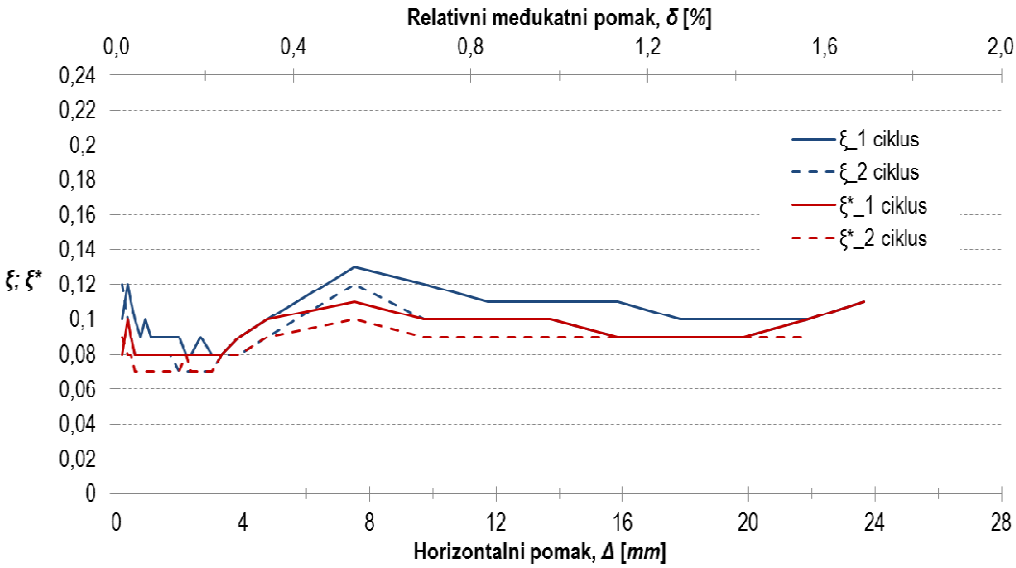




Slika 6.93 *Odnos disipirane i apsorbirane energije za ispitni uzorak O3_bpm*



Slika 6.94 *Prigušenje ispitnog uzorka O3_bpm u ovisnosti o izračunu apsorbirane energije*



Slika 6.95 *Ovisnost prigušenja ispitnog uzorka O3_bpm o horizontalnom pomaku*

Vrijednost disipacije energije uzorka po jedinici pomaka, prikazana Slikom 6.92, ovisna je o ciklusu i koraku opterećenja. Veće vrijednosti promatrane veličine uočene su pri prvim ciklusima opterećenja u području cijelog odgovora uzorka. U području odgovora uzorka do vrijednosti relativnog međukatnog pomaka u iznosu od približnih 0,47%, gdje je uočena maksimalna vrijednost promatrane veličine, razlika u disipaciji energije prvog i drugog ciklusa opterećenja zanemariva je. Srednja vrijednost odstupanja u navedenom području odgovora uzorka iznosi približno 12%. U području odgovora uzorka, nakon dosezanja maksimalne vrijednosti promatrane veličine, uočena su nešto veća odstupanja u disipaciji energije prvog i drugog ciklusa opterećenja sa srednjom vrijednošću odstupanja u iznosu od približnih 15%. Navedena odstupanja određena su u odnosu na vrijednosti prvog ciklusa opterećenja.

Vrijednosti odnosa disipirane i apsorbirane energije uzorka, prikazane Slikom 6.93, ovisne su o načinu izračuna apsorbirane energije i koraku opterećenja gdje su veće vrijednosti promatranog odnosa uočene u slučaju kada je apsorbirana energije određena kao potencijalna deformacijska energija. Tu su, kao i kod prethodnih uzoraka, uočene veće vrijednosti promatranog odnosa pri prvim ciklusima opterećenja neovisno o načinu izračuna apsorbirane energije i koraku opterećenja. Vrijednosti promatranog odnosa, u slučaju gdje je apsorbirana energija određena kao potencijalna deformacijska energija, u intervalu su od 0,49 do 0,82 za prve te od 0,42 do 0,78 za druge cikluse opterećenja. U slučaju gdje je apsorbirana energija određena kao uloženi rad, vrijednosti promatranog odnosa u intervalu su od 0,48 do 0,71 za prve te od 0,41 do 0,65 za druge cikluse opterećenja.

Vrijednosti prugušenja uzorka, prikazane Slikom 6.94, ovisne su o prethodno navedenom odnosu, pri čemu je uočen približno jednak trend ovisnosti o koraku opterećenja. Prigušenje uzorka u

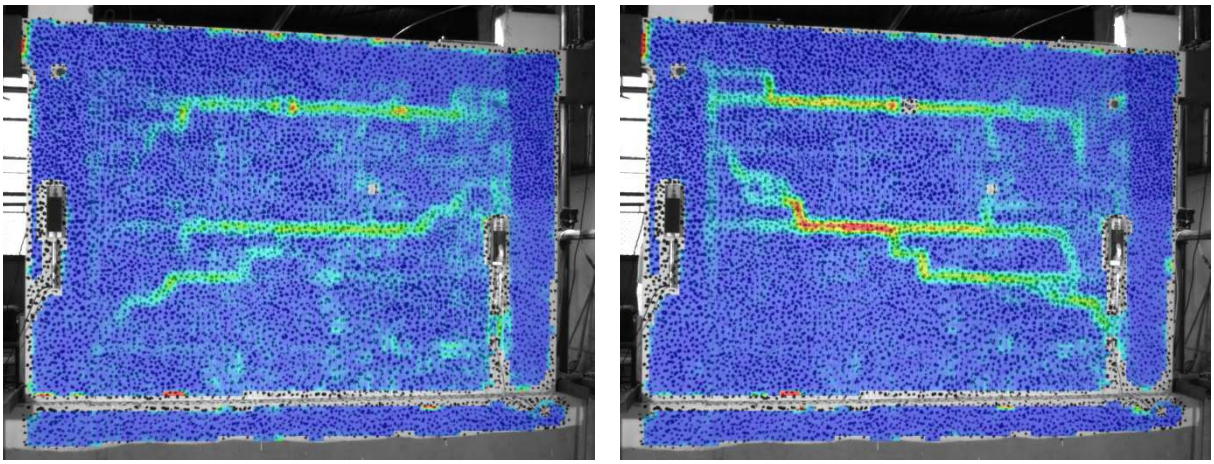
slučaju gdje je apsorbirane energija određena kao potencijalna deformacijska energija u intervalu je od 8 do 13% za prve te od 7 do 12% kritičnog viskoznog prigušenja za druge cikluse opterećenja. U slučaju gdje je apsorbirana energija određena kao uloženi rad, vrijednosti promatrane veličine u intervalu su od 8 do 11% za prve te od 7 do 10% za druge cikluse opterećenja.

Vlastiti period oscilacija ispitnog uzorka pri pozitivnom smjeru opterećenja iznosi 0,160 *s*, a pri negativnom 0,183 *s*.

Prikaz oštećenja i pukotina ispitnog uzorka dan je Slikom 6.96. Prve značajne pukotine u ispunu uočene su u području uglova u blizini čvorova okvira gdje je ostvaren unos horizontalnog opterećenja i u smjeru pretposljednje horizontalne reške. Pojava prvih značajnih pukotina u ispunu prejudicira pojavu drobljenja uglova kao dominantnog mehanizma sloma, međutim, daljnjim povećanjem horizontalnog opterećenja, dolazi do promjene mehanizma sloma istog gdje se uočeni dominantni mehanizam sloma, prema klasifikaciji iz *Poglavlje 2*, može definirati kao dijagonalni posmični slom (Slika 6.97). Do pojave dominantnog mehanizma sloma ispuna dolazi u različitim koracima opterećenja. Pojava dominantnog mehanizma sloma ispuna, pri pozitivnom smjeru opterećenja, uočena je pri relativnom međukatnom pomaku u iznosu od 0,27% dok je pri negativnom smjeru opterećenja vrijednost relativnog međukatnog pomaka jednaka 0,36%. Kose pukotine u ispunu, uzrokovane dominantnim mehanizmom sloma, pod nagibom su od približnih 60º u odnosu na horizontalu. U koracima opterećenja, nakon pojave dominantnog mehanizma sloma ispuna, ponovno dolazi do promjene mehanizma sloma koji se može definirati kao horizontalno klizanje. Uočeno horizontalno klizanje većim je dijelom ostvareno na dvjema dominantnim plohama sloma (Slika 6.98). Nakon pojave horizontalnog klizanja, oštećenje ispuna lokalizirano je u području uz stupove uzorka, a uzrokovano je drobljenjem istog uslijed prethodno navedenog mehanizma sloma. Ondje je potrebno naglasiti kako je nakon pojave drobljenja, u području uz stupove okvira, upitna vanravninska stabilnost ispune. U području uglova ispuna, u blizini spoja stupova i temeljne grede, nije uočena pojava drobljenja istog. U odnosu na mehanizam sloma praznog okvira, uočena je promjena položaja posmične pukotine sa stupa na gredu okvira ispitnog uzorka. Oštećenje stupova okvira ispitnog uzorka lokalizirano je na krajevima elementa u obliku savojnih pukotina i drobljenja zaštitnog sloja betona. Posmična pukotina na gredi uzorka uočena je samo na lijevom kraju elementa. Prije pojave posmične pukotine na gredi, nisu uočena prethodna oštećenja. Oštećenje elemenata okvira ispitnog uzorka prikazano je Slikom 6.99. Slom grede svakako je poželjniji od sloma stupa u pogledu osiguranja stabilnosti konstrukcije, međutim, potrebno je naglasiti da ostaje nejasan mehanizam koji uzrokuje navedenu promjenu.

Slika 6.96 *Prikaz oštećenja i pukotina ispitnog uzorka O3_bpm*

Slika 6.97 *Prikaz dominantnog mehanizma sloma ispune ispitnog uzorka O3_bpm*



a) *Pozitivni smjer opterećenja* b) *Negativni smjer opterećenja*

Slika 6.98 *Prikaz dominantnih ploha sloma ispune ispitnog uzorka O3_bpm pri pojavi horizontalnog klizanja*

a) *Lijevi stup okvira ispitnog uzorka*

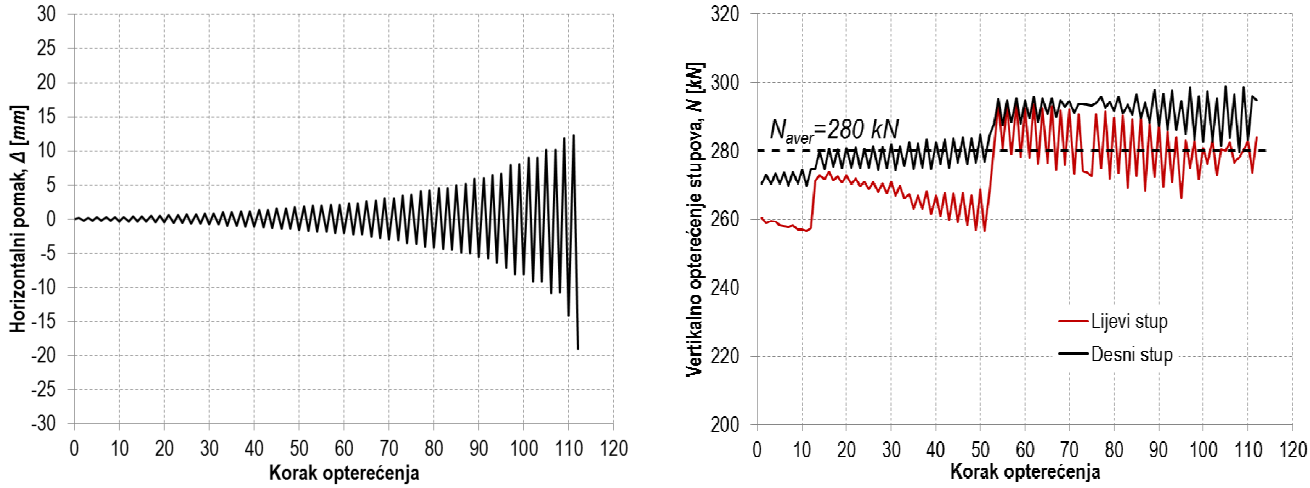
b) *Desni stup okvira ispitnog uzorka*

c) *Greda okvira ispitnog uzorka*

Slika 6.99 *Prikaz oštećenja elemenata okvira ispitnog uzorka O3_bpm*

6.4.3. Rezultati ispitivanja uzorka *O3_cpm*

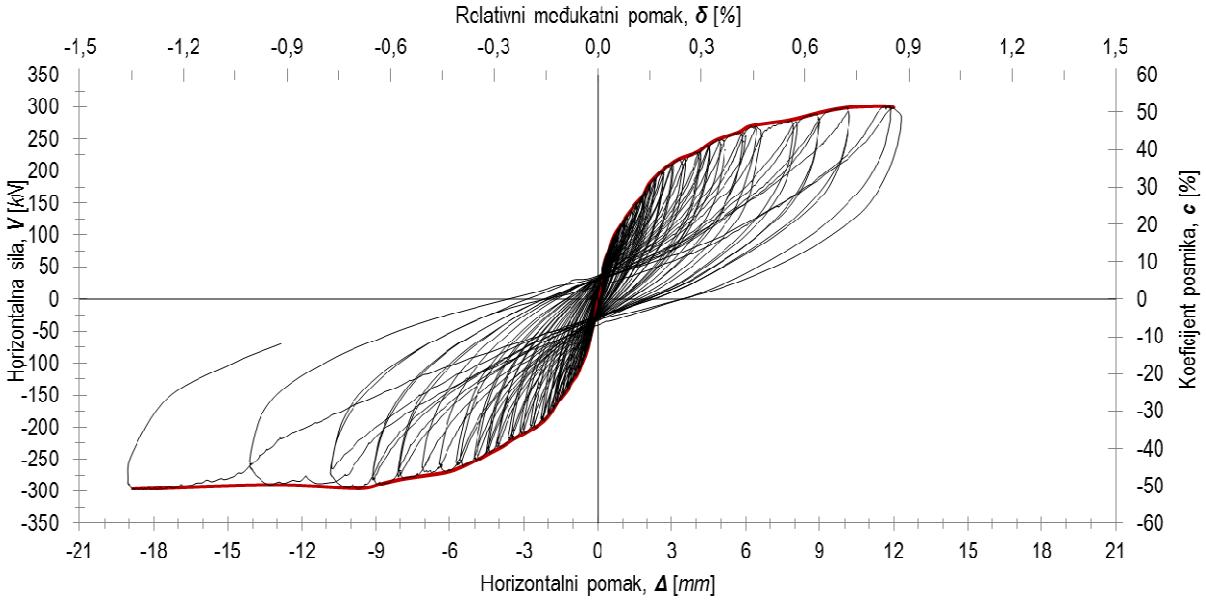
Ispitni je uzorak *O3_cpm* neduktilni armirano-betonski okvir tipa *O3* kod kojeg je ispun izvedena od glinene opeke povezane cementno-vapnenim mortom. Karakteristike i izvedba uzorka opisana je u *Poglavlju 3.* Horizontalno opterećenje uzorka prikazano je Slikom 6.100 a), u ovisnosti o koraku opterećenja, dok je varijacija uzdužne sile u stupovima prikazana Slikom 6.100 b).



a) b)

Slika 6.100 *Prikaz horizontalnog i vertikalnog opterećenja ispitnog uzorka O3_cpm*

Rezultati ispitivanja u obliku histerezne i primarne krivulje odgovora ispitnog uzorka prikazani su Slikom 6.101. Na sekundarnoj vertikalnoj osi dan je prikaz odnosa vertikalnog i horizontalnog opterećenja (*c*) pri svakom koraku, izražen u %, dok je na sekundarnoj horizontalnoj osi prikazan relativni međukatni pomak (*δ*).

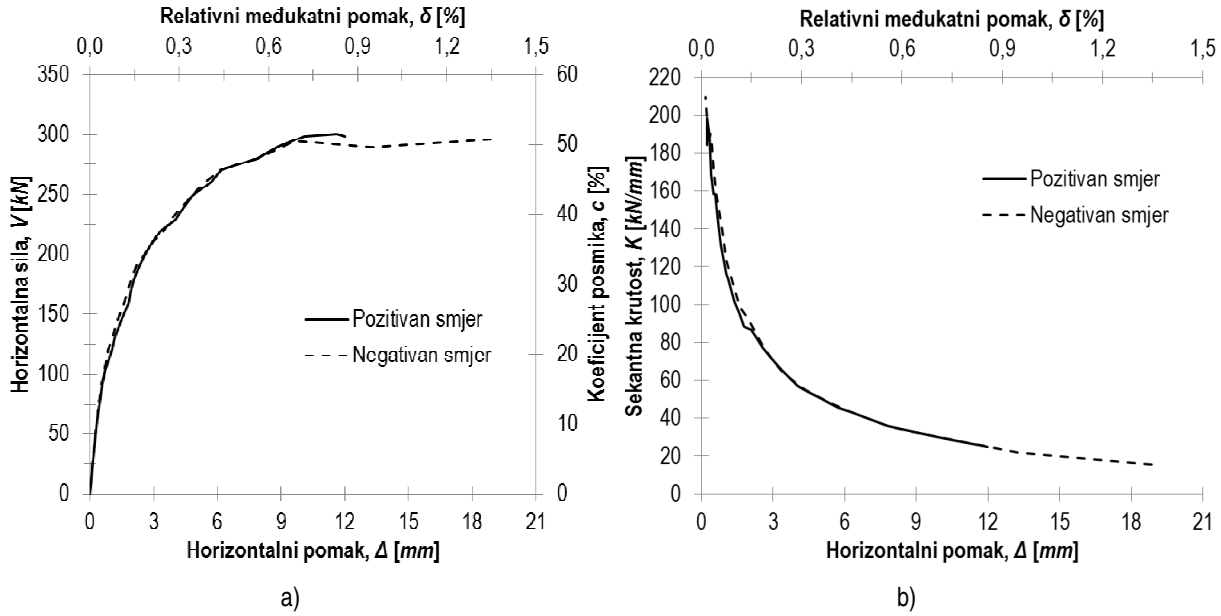


Slika 6.101 *Prikaz histerezne i primarne krivulje odgovora ispitnog uzorka O3_cpm*

Krutost i nosivost ispitnog uzorka određena je u ovisnosti o odabranim karakterističnim točkama odziva, a dobiveni rezultati su prikazani Tablicom 6.11. Usporedba primarnih krivulja za pozitivni i negativni smjer opterećenja prikazana je Slikom 6.102 a). Prikaz sekantne krutosti u ovisnosti o horizontalnom pomaku dan je Slikom 6.102 b) za oba smjera opterećenja.

Tablica 6.11 *Krutost i nosivost ispitnog uzorka O3_cpm u odabranim karakterističnim točkama odziva*

Smjer opterećenja	Pozitivni	Negativni
V_{cr} [*kN*]	189,0	-200,2
Δ_{cr} [*mm*]	2,3	-2,5
Krutost pri pojavi prve značajne pukotine u ispuni, K_i [*kN/mm*]	**82,9**	**78,5**
V_{max} [*kN*]	279,9	-280,2
Δ_{max} [*mm*]	7,8	-7,9
Krutost pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispune, K_{max} [*kN/mm*]	**35,8**	**35,6**
V_{col} [*kN*]	-	-296,2
Δ_{col} [*mm*]	-	-18,9
Krutost pri slomu okvira, K_{col} [*kN/mm*]	**-**	**15,7**
V_{res} [*kN*]	**-**	**-296,2**

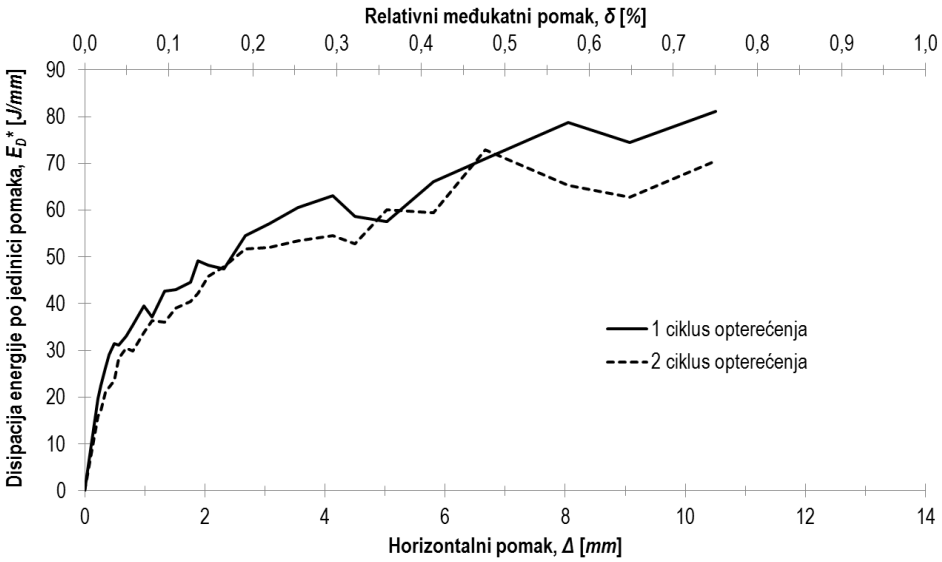


a) b)

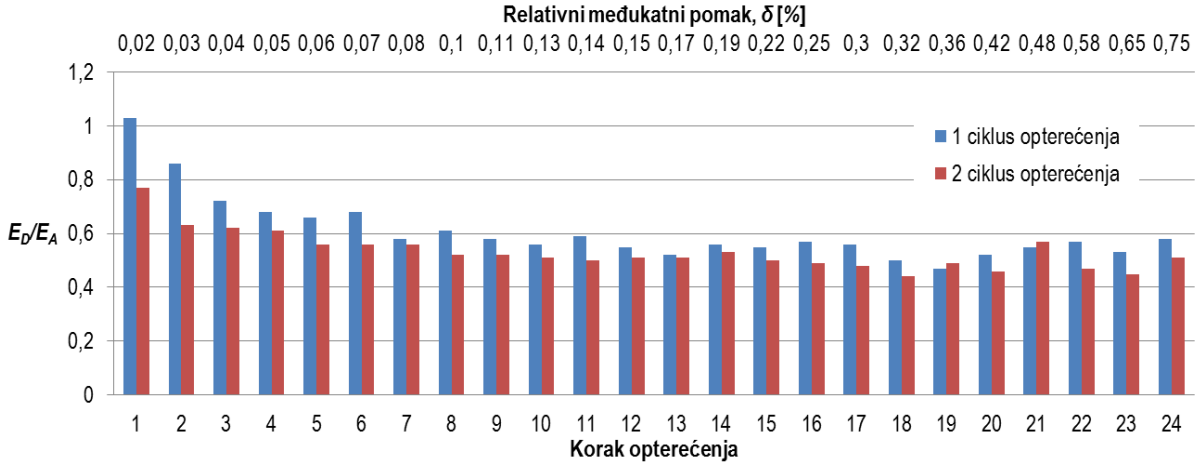
Slika 6.102 *Prikaz primarnih krivulja odgovora i sekantne krutosti, u ovisnosti o pomaku, pri pozitivnom i negativnom smjeru opterećenja ispitnog uzorka O3_cpm*

Iz usporedbe rezultata, prikazanih Slikom 6.102, vidljiva je zanemariva razlika u odgovoru ispitnog uzorka pri pozitivnom i negativnom smjeru opterećenja. Ovisnost sekantne krutosti uzorka o horizontalnom pomaku približno je jednaka za oba smjera opterećenja.

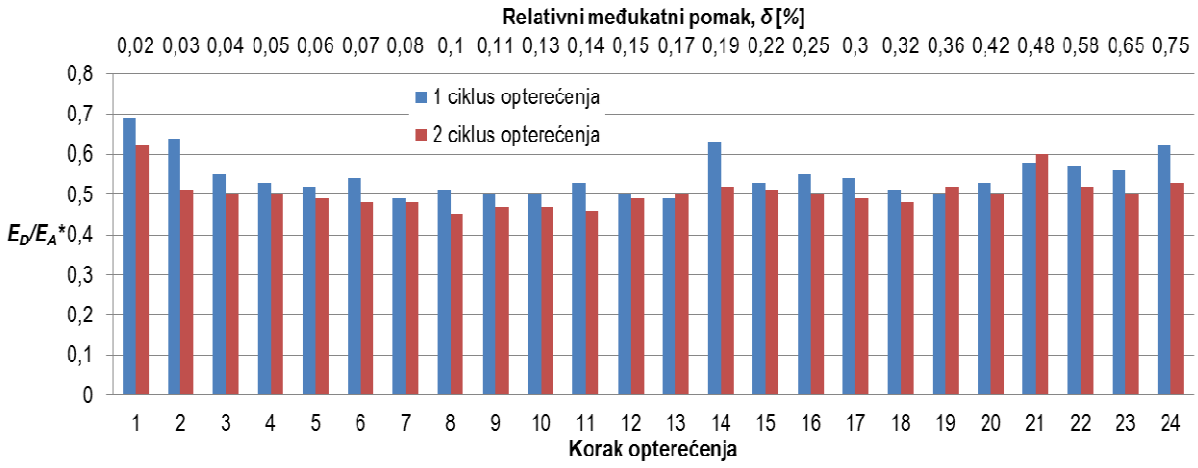
Disipacija energije ispitnog uzorka po jedinici pomaka (E_D*) prikazana je Slikom 6.103. Odnos disipirane i apsorbirane energije prikazan je Slikom 6.104 a) i b) ovisno o načinu izračuna apsorbirane energije za svaki korak opterećenja. Na Slici 6.104 a) apsorbirana energija određena je kao potencijalna deformacijske energija (E_A), a na Slici 6.104 b) kao uloženi rad (E_A*). Prigušenje ispitnog uzorka također je određeno za oba načina određivanja apsorbirane energije, a dobiveni rezultati prikazani su Slikom 6.105 a) i b) za svaki korak opterećenja. Ovisnost prigušenja o pomaku dana je Slikom 6.106 za oba slučaja izračuna apsorbirane energije.



Slika 6.103 *Disipacija energije po jedinici pomaka za O3_cpm ispitni uzorak*

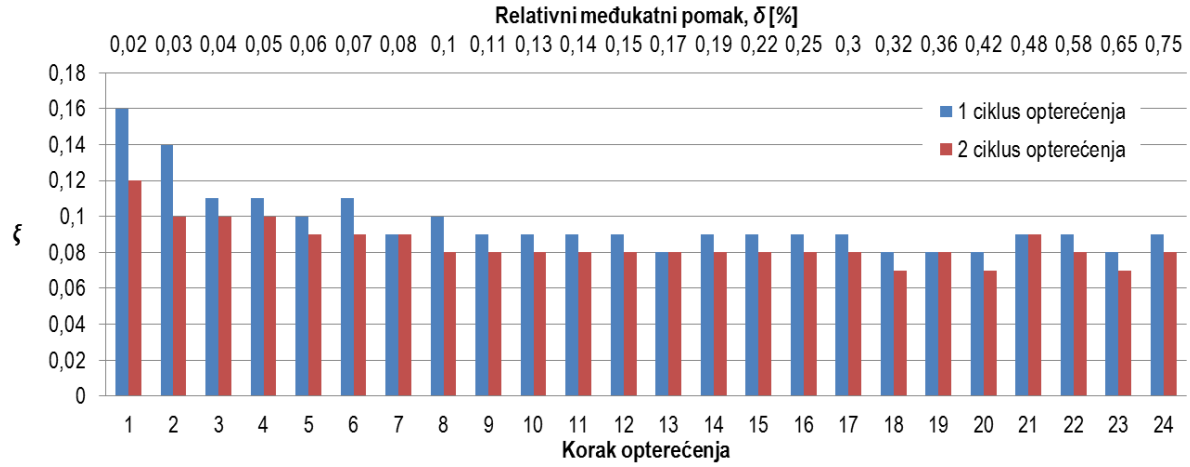


a)

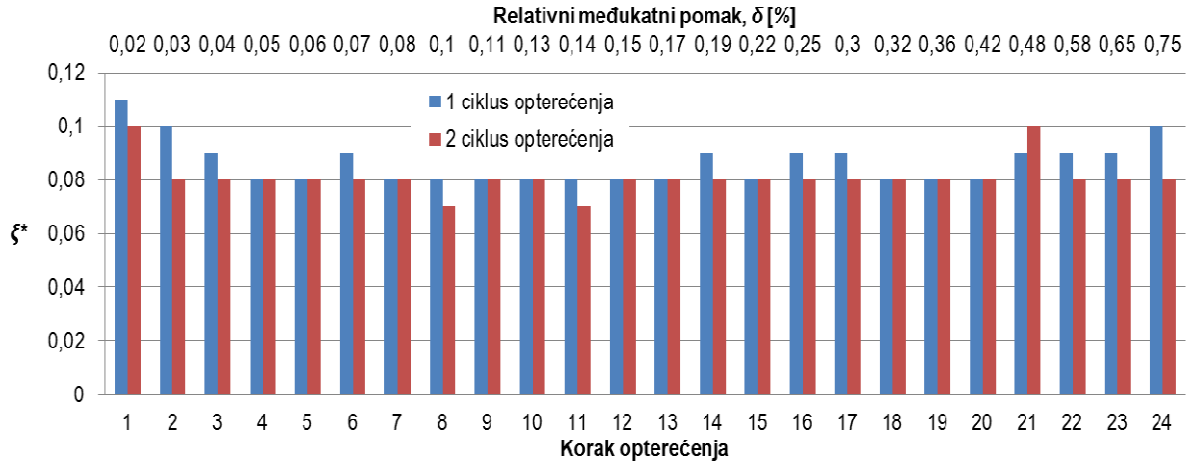


b)

Slika 6.104 *Odnos disipirane i apsorbirane energije za ispitni uzorak O3_cpm*

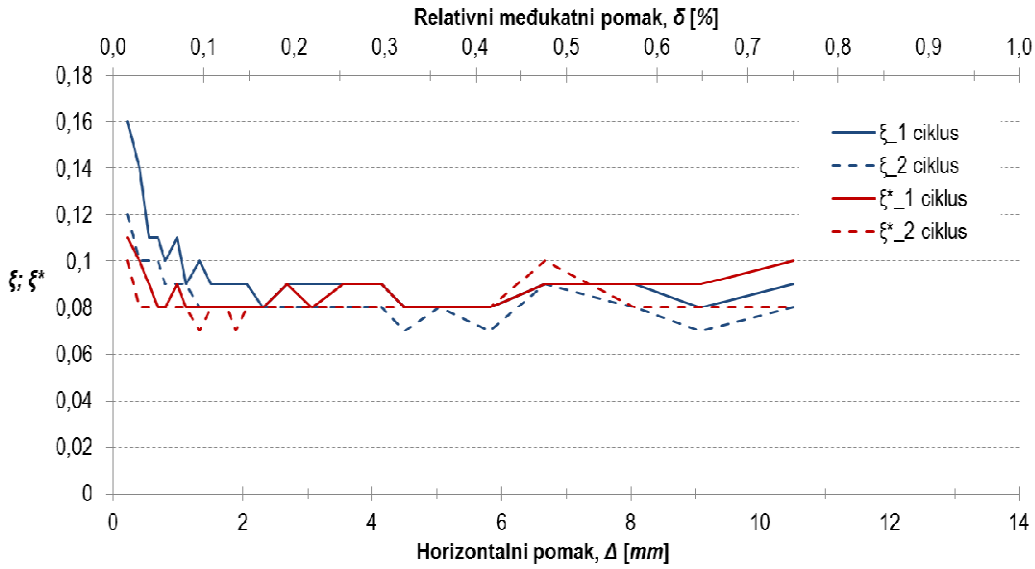


a)



b)

Slika 6.105 *Prigušenje ispitnog uzorka O3_cpm u ovisnosti o načinu izračunu apsorbirane energije*



Slika 6.106 *Ovisnost prigušenja ispitnog uzorka O3_cpm o horizontalnom pomaku*

Vrijednost disipacije energije ispitnog uzorka po jedinici pomaka, prikazana Slikom 6.103, ovisna je o ciklusu i koraku opterećenja. Veće vrijednosti promatrane veličine uočene su pri prvim ciklusima i uslijed povećanja koraka opterećenja. Za razliku od prijašnjih uzoraka, nije uočeno znatno odstupanje u vrijednostima disipacije energije prvog i drugog ciklusa opterećenja. Srednja vrijednost odstupanja, u području cijelog odgovora ispitnog uzorka, iznosi približno 11%. Navedeno odstupanje određeno je u odnosu na vrijednosti dobivene u prvim ciklusima opterećenja.

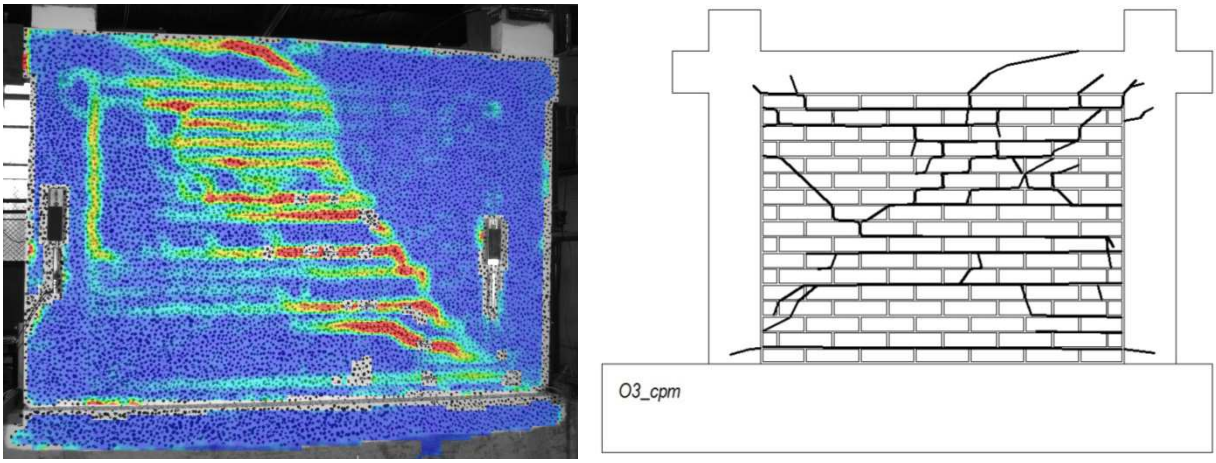
Vrijednosti odnosa disipirane i apsorbirane energije, prikazane Slikom 6.104, ovisne su o načinu izračuna apsorbirane energije i koraku opterećenja. Tu su također uočene veće vrijednosti promatranog odnosa pri prvim ciklusima opterećenja. U slučaju gdje je apsorbirana energija određena kao potencijalna deformacijska energija, vrijednosti promatranog odnosa u intervalu su od 0,47 do 1,03 za prve te od 0,44 do 0,77 za druge cikluse opterećenja. Vrijednost veća od 1, uočena pri prvom koraku opterećenja, nerealna je i može se pripisati osjetljivosti mjernih instrumenata s obzirom da je vrijednost horizontalnog opterećenja pri navedenom koraku 0,22 *mm*. U slučaju gdje je apsorbirana energija određena kao uloženi rad vrijednosti promatranog odnosa, u intervalu su od 0,49 do 0,69 za prve te od 0,45 do 0,62 za druge cikluse opterećenja.

Vrijednosti prigušenja ispitnog uzorka, prikazane Slikom 6.105 ovisne su o prethodno navedenom odnosu prilikom čega je uočen približno jednak trend u ovisnosti o koraku opterećenja. Prigušenje uzorka u slučaju gdje je apsorbirane energija određena kao potencijalna deformacijska energija, u intervalu je od 8 do 16% za prve te od 7 do 12% kritičnog viskoznog prigušenja za druge cikluse opterećenja. Najveća vrijednost (16%) uočena je u prvom koraku opterećenja i dobivena na temelju vrijednosti prethodno navedenog odnosa u iznosu od 1,03, stoga se može zaključiti da je ona također nerealna. U slučaju gdje je apsorbirana energija određena kao uloženi rad, vrijednosti promatrane veličine u intervalu su od 8 do 11% za prve te od 7 do 10% za druge cikluse opterećenja.

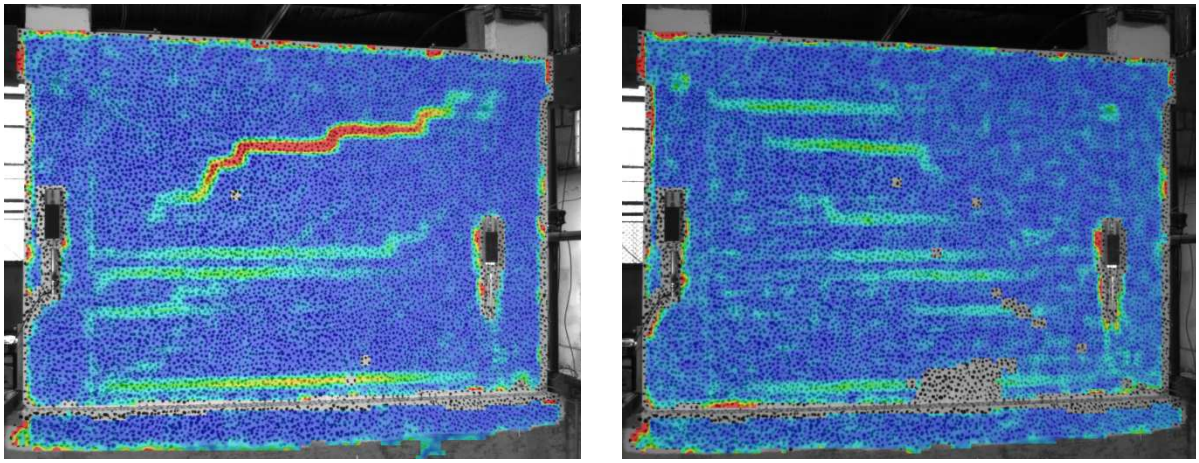
Vlastiti period oscilacija ispitnog uzorka pri pozitivnom smjeru opterećenja iznosi 0,165 *s*, a pri negativnom 0,167 *s*.

Prikaz oštećenja i pukotina ispitnog uzorka dan je Slikom 6.107. Prve značajne pukotine u ispunu uočene su o obliku većeg broja pukotina u smjeru horizontalnih reški. Tamo su prve značajne pukotine definirane s minimalnim brojem od tri horizontalne pukotine (Slika 6.108). Iako prve značajne pukotine prejudiciraju pojavu horizontalnog klizanja, kao dominantnog mehanizma sloma ispuna, povećanjem koraka opterećenja dolazi do pojave dijagonalnog posmičnog sloma istog (Slika 6.109). Kose pukotine, pri pojavi dijagonalnog posmičnog sloma, pod nagibom su od približnih 60º u odnosu na horizontalu. Daljnjim povećanjem koraka opterećenja dolazi do pojave niza horizontalnih pukotina

gotovo na punoj visini ispuna. Prijenos horizontalnog opterećenja osiguran je trenjem na horizontalnim plohama sloma (Slika 6.110). Tu je, kao i kod prethodnog ispitnog uzorka, slom okvira uzrokovan posmičnim slomom grede u posljednjem koraku pri negativnom smjeru opterećenja. Prije posmičnog sloma grede nisu uočena znatna oštećenja elemenata okvira. Neznatan broj pukotina na stupovima okvira lokaliziran je na krajevima elementa u obliku savojnih pukotina. U koracima opterećenja, neposredno prije pojave posmičnog sloma grede, uočen je manji broj savojnih pukotina.



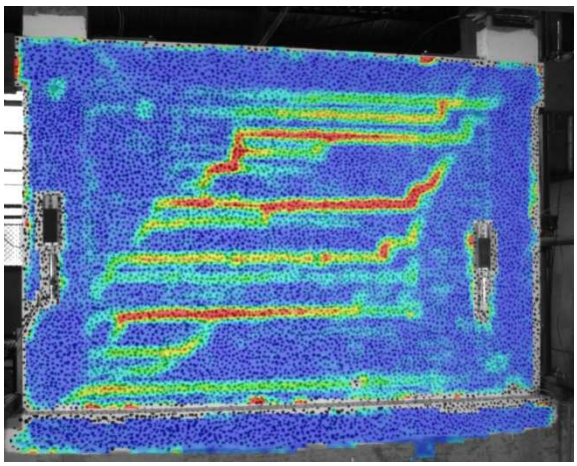
Slika 6.107 *Prikaz Oštećenja i pukotina ispitnog uzorka O3_cpm*



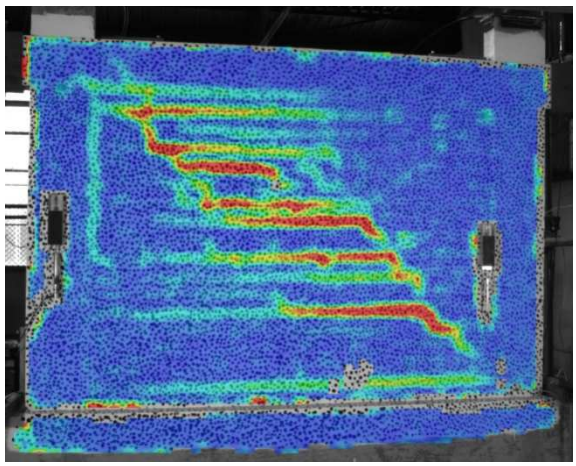
a) *Pozitivan smjer opterećenja* b) *Negativan smjer opterećenja*

Slika 6.108 *Prikaz prvih značajnih pukotina u ispuni ispitnog uzorka O3_cpm*

Slika 6.109 *Prikaz dominantnog mehanizma sloma ispune (dijagonalni posmični slom) ispitnog uzorka O3_cpm*



a) *Pozitivan smjer opterećenja*



b) *Negativan smjer opterećenja*

Slika 6.110 *Prikaz horizontalnog klizanja ispune ispitnog uzorka O3_cpm*

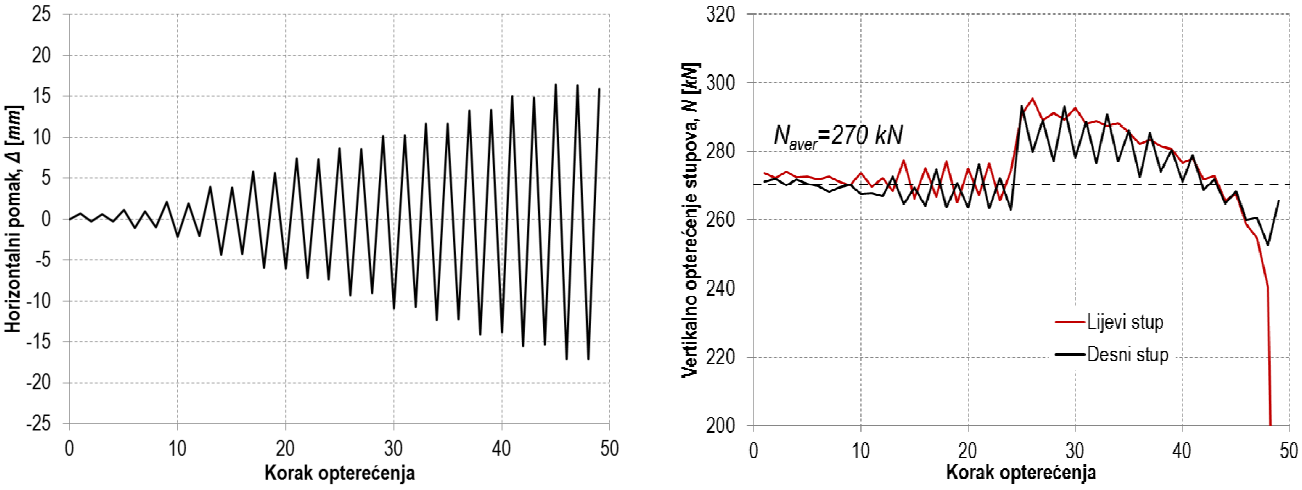
6.5. Rezultati ispitivanja skupine uzoraka *O4*.

Skupina uzoraka *O4* sadrži dva modela neduktilnih armirano-betonskih okvira sa zidanim ispunom i jedan model neduktilnog armirano-betonskog okvira bez zidane ispune. Rezultati ispitivanja u nastavku su teksta dani za pojedini ispitni uzorak, a analizirani su na način opisan u uvodnom dijelu poglavlju.

6.5.1. Rezultati ispitivanja uzorka *O4*.

Ispitni uzorak *O4* prazan je neduktilni armirano-betonski okvir, a rezultati ispitivanja predstavljaju referentne vrijednosti prilikom usporedbe doprinosa promatranih parametara sustava okvir s ispunom. Karakteristike i izvedba uzorka opisana je u *Poglavlju 3*. Horizontalno opterećenje uzorka je

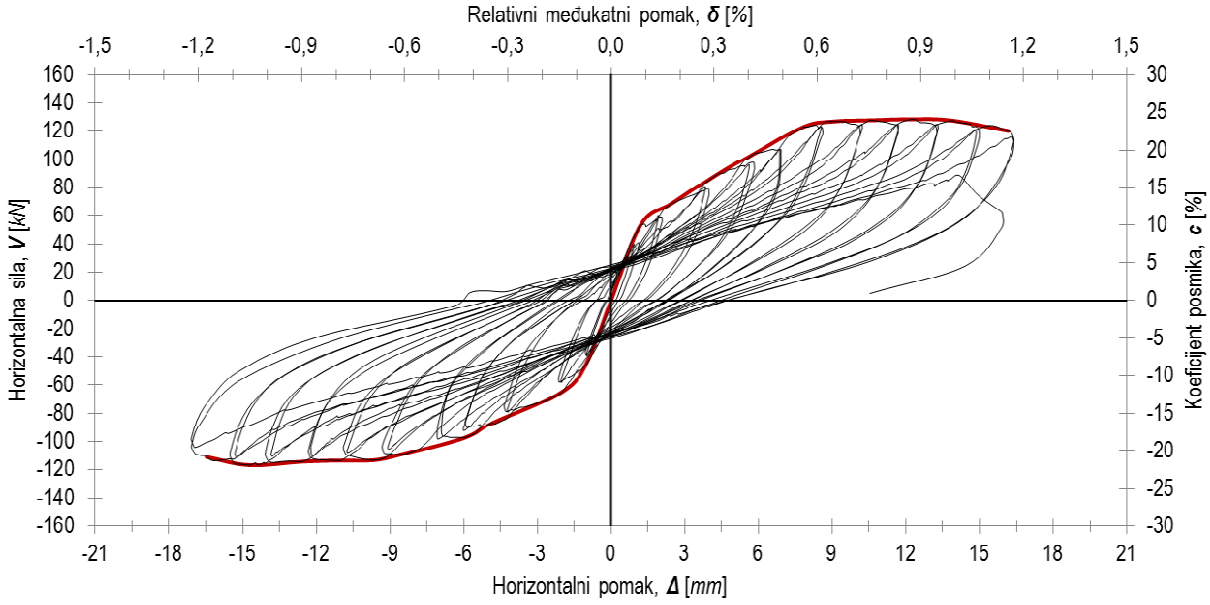
prikazano Slikom 6.111a), u ovisnosti o koraku opterećenja, dok je varijacija uzdužne sile u stupovima prikazana Slikom 6.111 b).



a) b)

Slika 6.111 *Prikaz horizontalnog i vertikalnog opterećenja ispitnog uzorka O4*

Rezultati ispitivanja u obliku histerezne i primarne krivulje odgovora ispitnog uzorka prikazani su Slikom 6.112. Na sekundarnoj vertikalnoj osi dan je prikaz odnosa vertikalnog i horizontalnog opterećenja (*c*) pri svakom koraku, izražen u %, dok je na sekundarnoj horizontalnoj osi prikazan relativni međukatni pomak (*δ*).

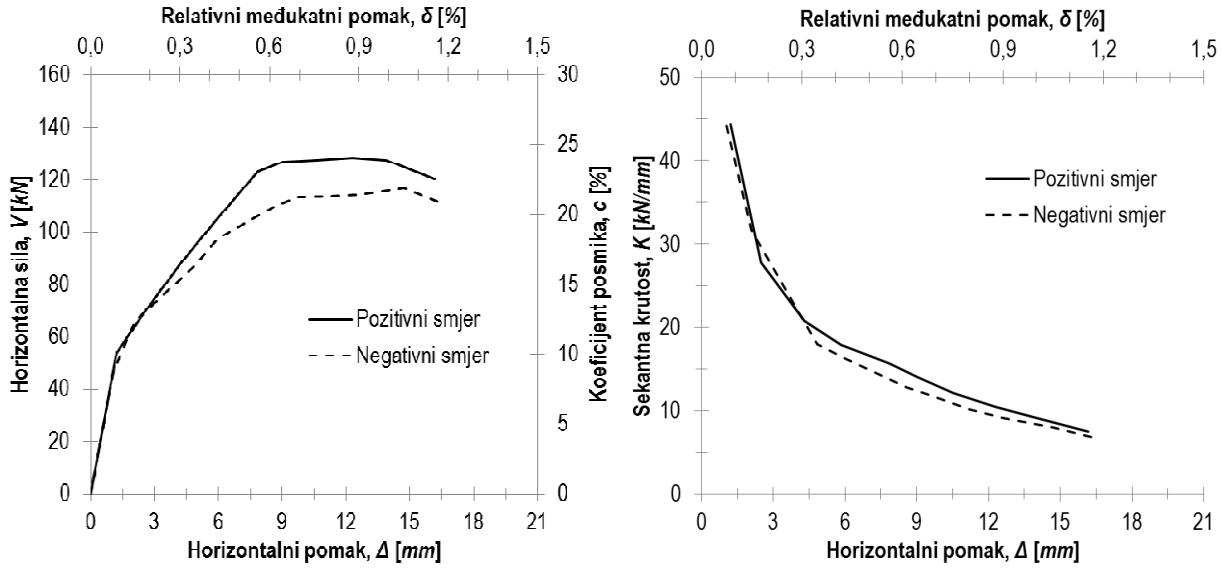


Slika 6.112 *Prikaz histerezne i primarne krivulje odgovora ispitnog uzorka O4*

Krutost i nosivost ispitnog uzorka određeni su u odabranim karakterističnim točkama odgovora, a dobiveni rezultati prikazani su Tablicom 6.12. Usporedba primarnih krivulja odgovora za pozitivni i negativni smjer opterećenja prikazana je Slikom 6.113 a). Prikaz sekantne krutosti uzorka, u ovisnosti o pomaku, dan je Slikom 6.113 b) za oba smjera opterećenja.

Tablica 6.12 *Krutost i nosivost ispitnog uzorka O4 u odabranim karakterističnim točkama odziva*

Smjer opterećenja	Pozitivni	Negativni
V_{cr} [*kN*]	123,0	-97,3
Δ_{cr} [*mm*]	7,8	-5,9
Krutost pri pojavi prve značajne pukotine, K_i [*kN/mm*]	**15,8**	**16,5**
V_{max} [*kN*]	127,5	-113,5
Δ_{max} [*mm*]	10,5	-11,6
Krutost pri pojavi dominantnog mehanizma sloma, K_{max} [*kN/mm*]	**12,1**	**9,8**
V_{col} [*kN*]	120,3	-111,1
Δ_{col} [*mm*]	16,2	-16,5
Krutost pri slomu ispitnog uzorka, K_{col} [*kN/mm*]	**7,4**	**6,7**
V_{res} [*kN*]	120,3	**-**



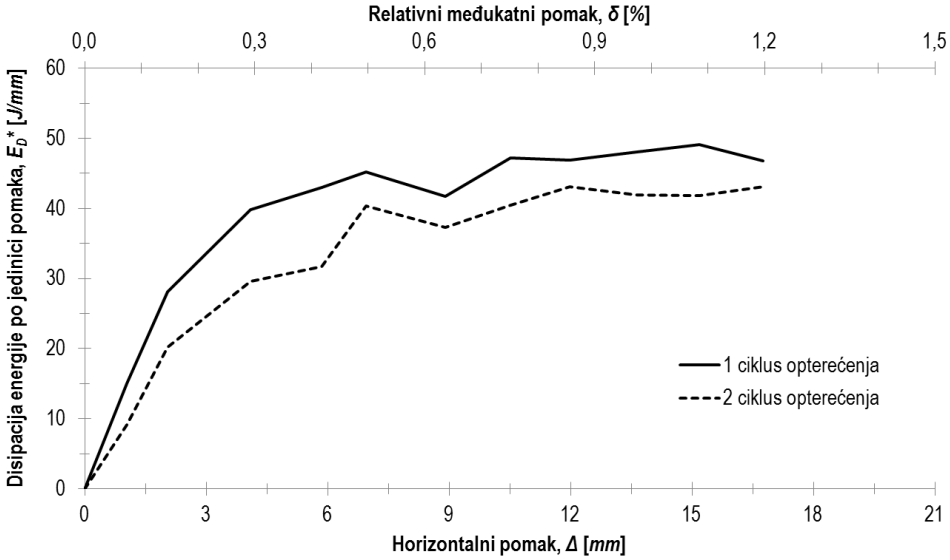
a) b)

Slika 6.113 *Prikaz primarnih krivulja odgovora i sekantne krutosti, u ovisnosti o pomaku, pri pozitivnom i negativnom smjeru opterećenja ispitnog uzorka O4*

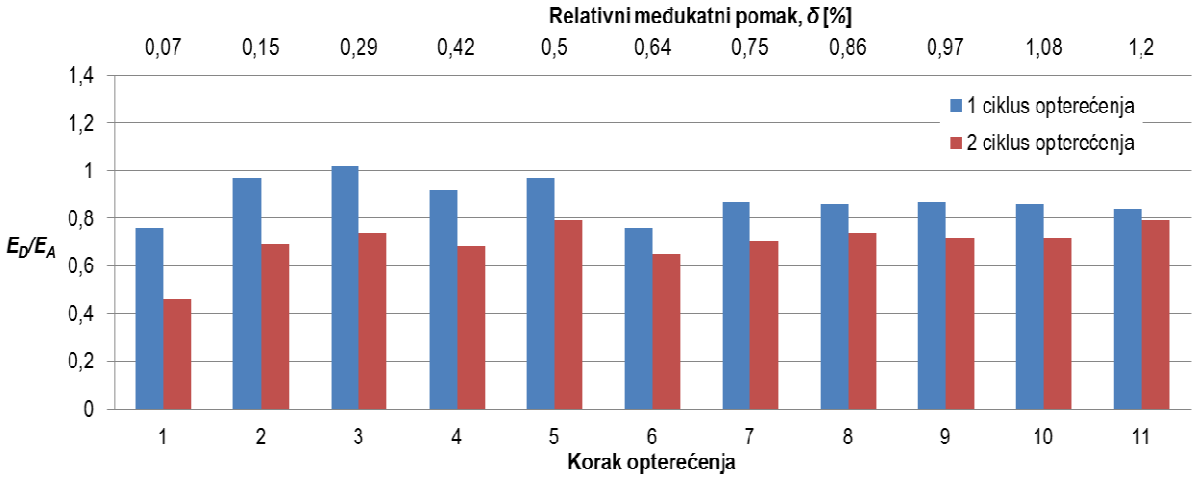
Iz usporedbe rezultata, prikazanih Slikom 6.113, vidljiva je veća nosivost ispitnog uzorka pri pozitivnom smjeru opterećenja. Srednja vrijednost odstupanja horizontalne nosivosti, u području cijelog odgovora uzorka, iznosi približno 8%. Navedeno odstupanje određeno je u odnosu na vrijednosti pozitivnog smjera opterećenja. Početna krutost uzorka približno je jednaka kao i ovisnost sekantne krutosti o horizontalnom pomaku.

Disipacija energije ispitnog uzorka po jedinici pomaka (E_D*) prikazana je Slikom 6.114. Odnos disipirane i apsorbirane energije prikazan je Slikom 6.115 a) i b) ovisno o načinu izračuna apsorbirane energije za svaki korak opterećenja. Na Slici 6.115 a) apsorbirana energija određena je kao potencijalna deformacijske energija (E_A), a na Slici 6.115 b) kao uloženi rad (E_A*). Prigušenje ispitnog uzorka također je određeno za oba načina određivanja apsorbirane energije, a rezultati su prikazani

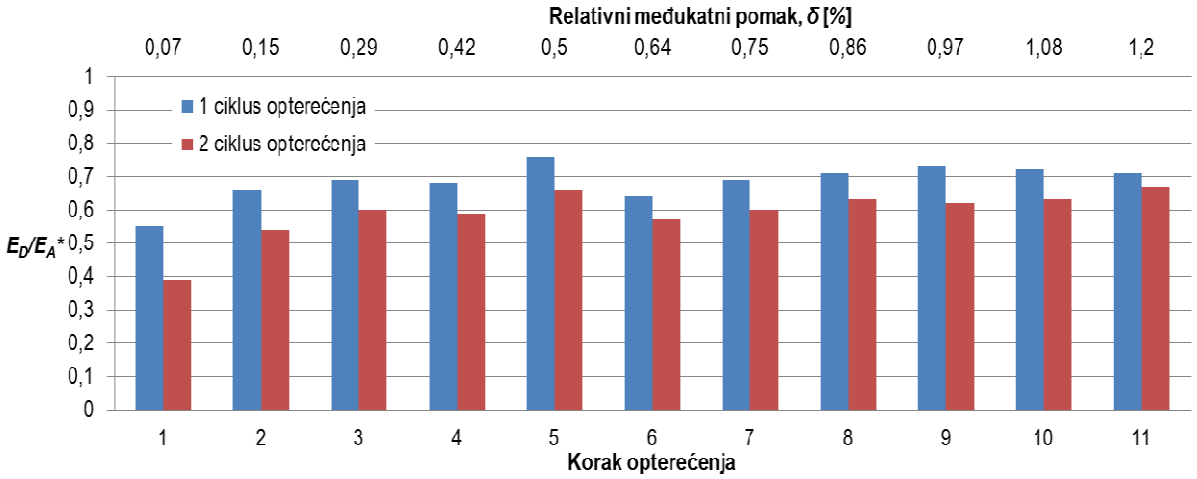
Slikom 6.116 a) i b) za svaki korak opterećenja. Ovisnost prigušenja o pomaku dana je Slikom 6.117 za oba slučaja izračuna apsorbirane energije.



Slika 6.114 *Disipacija energije po jedinici pomaka za ispitni uzorak O4*

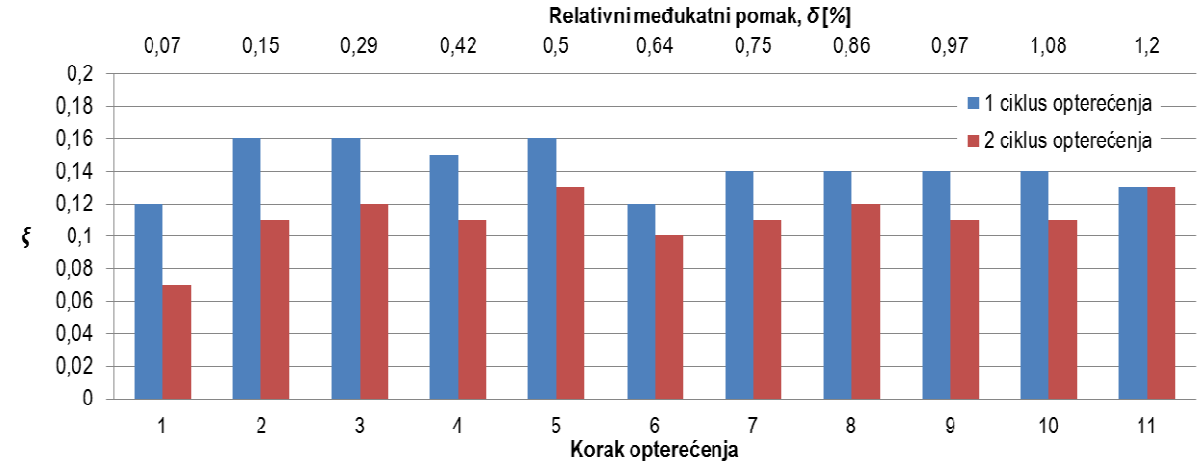


a)

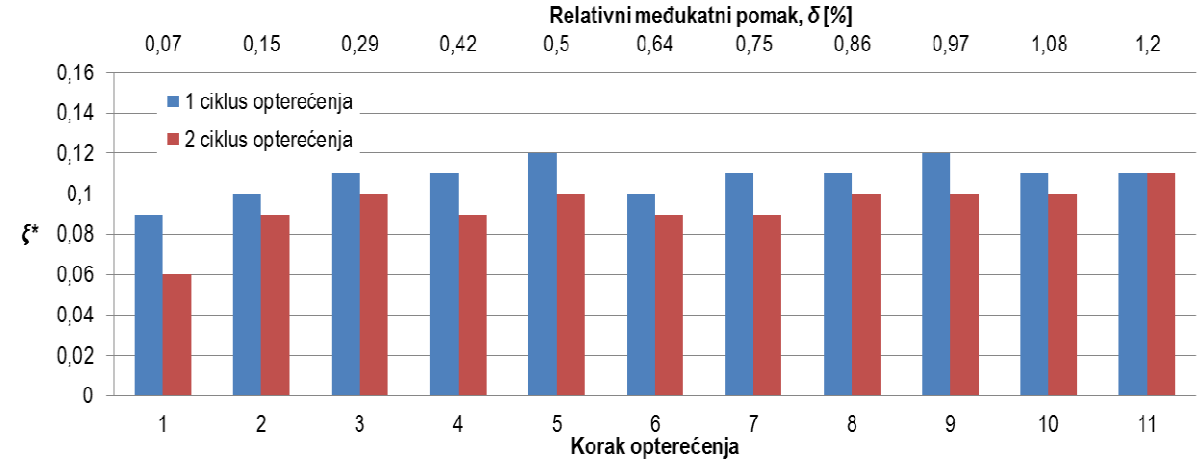


b)

Slika 6.115 *Odnos disipirane i apsorbirane energije za ispitni uzorak O4*

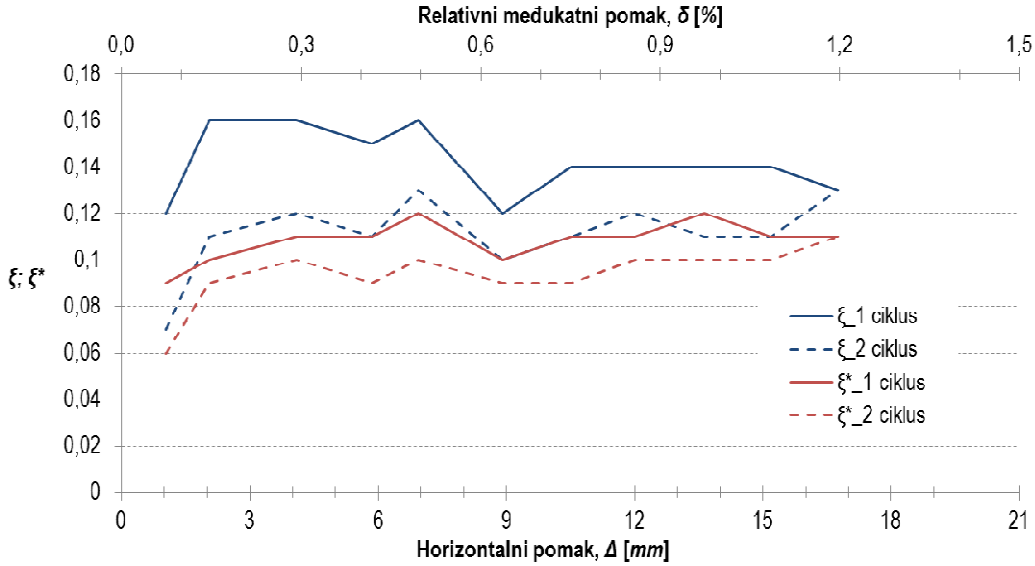


a)



b)

Slika 6.116 *Prigušenje ispitnog uzorka O4 u ovisnosti o načinu izračunu apsorbirane energije*



Slika 6.117 *Ovisnost prigušenja ispitnog uzorka O4 o horizontalnom pomaku*

Vrijednost disipacije energije ispitnog uzorka po jedinici pomaka, prikazana Slikom 6.114, ovisna je o koraku i ciklusu opterećenja. U području cijelog odgovora uzorka navedena veličina ima veće vrijednosti pri prvim ciklusima opterećenja. Za razliku od drugih uzoraka praznih okvira, uočena je nešto veća razlika u disipaciji energije prvog i drugog ciklusa pri početnim fazama opterećenja (do vrijednosti relativnog međukatnog pomaka u iznosu od 0,5%). Trend ovisnosti disipacije energije o koraku opterećenja približno je jednak za oba ciklusa. Srednje odstupanje u području cijelog odgovora ispitnog uzorka iznosi približno 18%. Navedeno odstupanje određeno je u odnosu na vrijednosti pozitivnog smjera opterećenja.

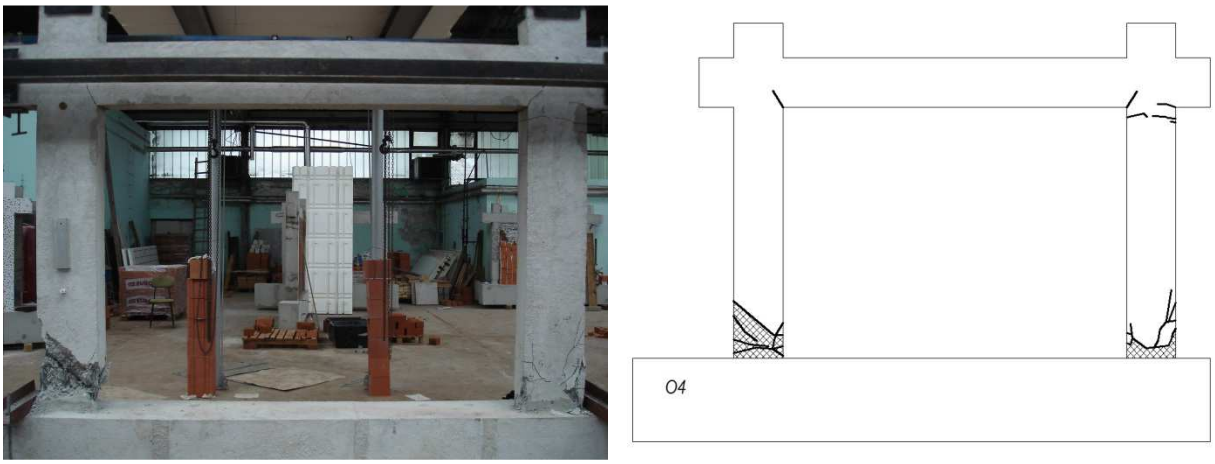
Vrijednosti odnosa disipirane i apsorbirane energije, prikazane Slikom 6.115, ovisne su o načinu izračuna apsorbirane energije te o koraku opterećenja. Neovisno o načinu izračuna apsorbirane energije, vrijednosti promatranog odnosa veće su pri prvim ciklusima opterećenja, pri čemu je uočen i jednak trend ovisnosti o koraku opterećenja. U slučaju gdje je apsorbirana energija određena kao potencijalna deformacijska energija, vrijednosti promatranog odnosa u intervalu su od 0,76 do 1,02 za prve te od 0,46 do 0,79 za druge cikluse opterećenja. Vrijednost veća od 1, uočena u jednom koraku opterećenja, nerealna je iz razloga što implicira veću disipaciju energije od prvobitno apsorbirane. U slučaju gdje je apsorbirana energija određena kao uloženi rad, vrijednosti promatranog odnosa u intervalu su od 0,55 do 0,76 za prve te od 0,39 do 0,67 za druge cikluse opterećenja.

Vrijednosti prugušenja ispitnog uzorka, prikazane Slikom 6.116, ovisne su o prethodno navedenom odnosu i koraku opterećenja prilikom čega je uočen približno jednak trend u ovisnosti o horizontalnom pomaku. Prigušenje ispitnog uzorka, u slučaju gdje je apsorbirane energija određena kao deformacijska potencijalna energija, u intervalu je od 12 do 16% za prve te od 7 do 11% kritičnog

viskoznog prigušenja za druge cikluse opterećenja. Vrijednost dobivene na temelju prethodno navedenog odnosa većeg od 1 nerealna je iz razloga navedenog u prethodnom odlomku. U slučaju gdje je apsorbirana energija određena kao uloženi rad, vrijednosti prigušenja su u intervalu od 9 do 12% za prve te od 6 do 10% za druge cikluse opterećenja.

Vlastiti period oscilacija ispitnog uzorka pri pozitivnom smjeru opterećenja iznosi 0,371 *s*, a pri negativnom 0,363 *s*.

Prikaz oštećenja i pukotina ispitnog uzorka dan je Slikom 6.118. Slom ispitnog uzorka uzrokovan je posmičnom slomom lijevog stupa u blizini spoja s temeljnom gredom pri pozitivnom smjeru opterećenja (Slika 6.119 a)). Prije pojave sloma lijevog stupa, uočena su znatna oštećenja u obliku posmičnih i savojnih pukotina te drobljenja betona. Oštećenje desnog stupa ispitnog uzorka prikazano je Slikom 6.119 b), a uzrokovano je u većoj mjeri drobljenjem zaštitnog sloja i pojavom posmičnih pukotina. U blizini čvora lijevog stupa nije uočeno oštećenje dok je u blizini čvora desnog stupa uočeno neznatno oštećenje u obliku savojnih pukotina. Oštećenje grede ispitnog uzorka također nije uočeno.



Slika 6.118 *Prikaz oštećenja i pukotina ispitnog uzorka O4*

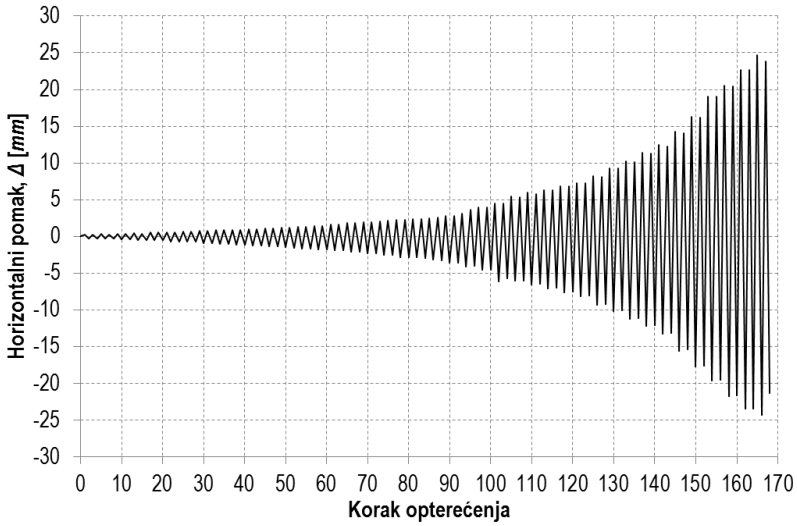
a) *Lijevi stup*

b) *Desni stup*

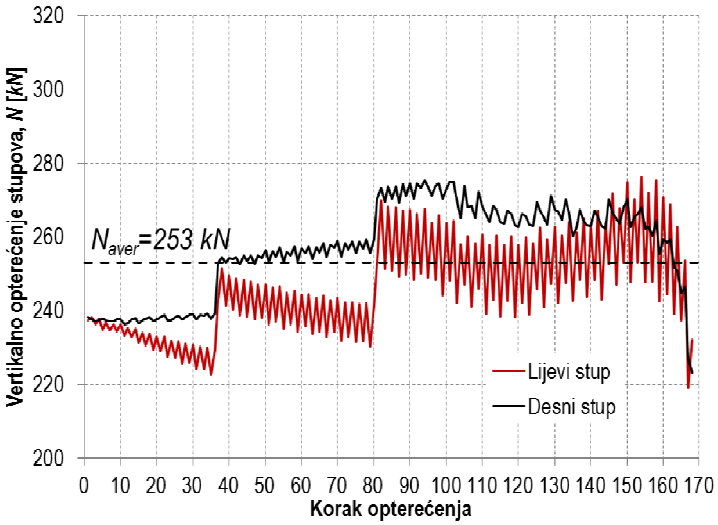
Slika 6.119 *Prikaz oštećenja stupova ispitnog uzorka O4*

6.5.2. Rezultati ispitivanja uzorka *O4_bpm*

Ispitni uzorak *O4_bpm* neduktilni je armirano-betonski okvir tipa *O4* kod kojeg je ispun izvedena od šupljih glinenih zidnih elemenata povezanih cementno-vapnenim mortom. Karakteristike i izvedba uzorka opisana je u *Poglavlju 3*. Horizontalno opterećenje uzorka prikazano je Slikom 6.120 a), u ovisnosti o koraku opterećenja, dok je varijacija uzdužne sile u stupovima prikazana Slikom 6.120 b).



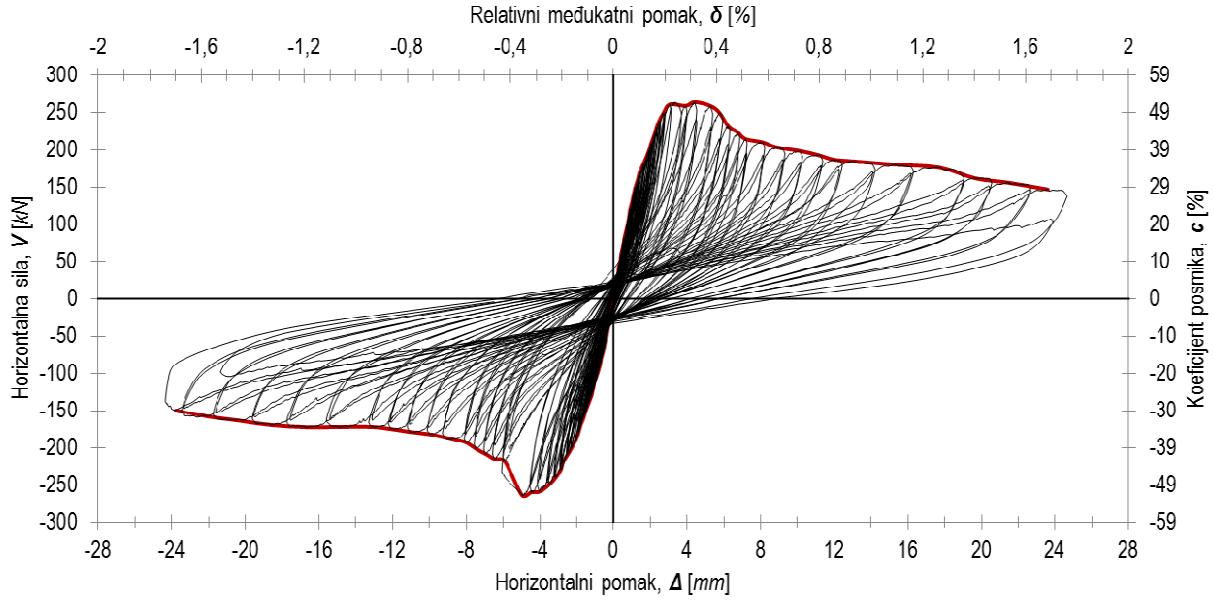
a)



b)

Slika 6.120 *Prikaz horizontalnog i vertikalnog opterećenja ispitnog uzorka O4_bpm*

Rezultati ispitivanja u obliku histerezne i primarne krivulje odgovora ispitnog uzorka prikazani su Slikom 6.121. Na sekundarnoj vertikalnoj osi dan je prikaz odnosa vertikalnog i horizontalnog opterećenja (*c*) pri svakom koraku, izražen u %, dok je na sekundarnoj horizontalnoj osi prikazan relativni međukatni pomak (δ).

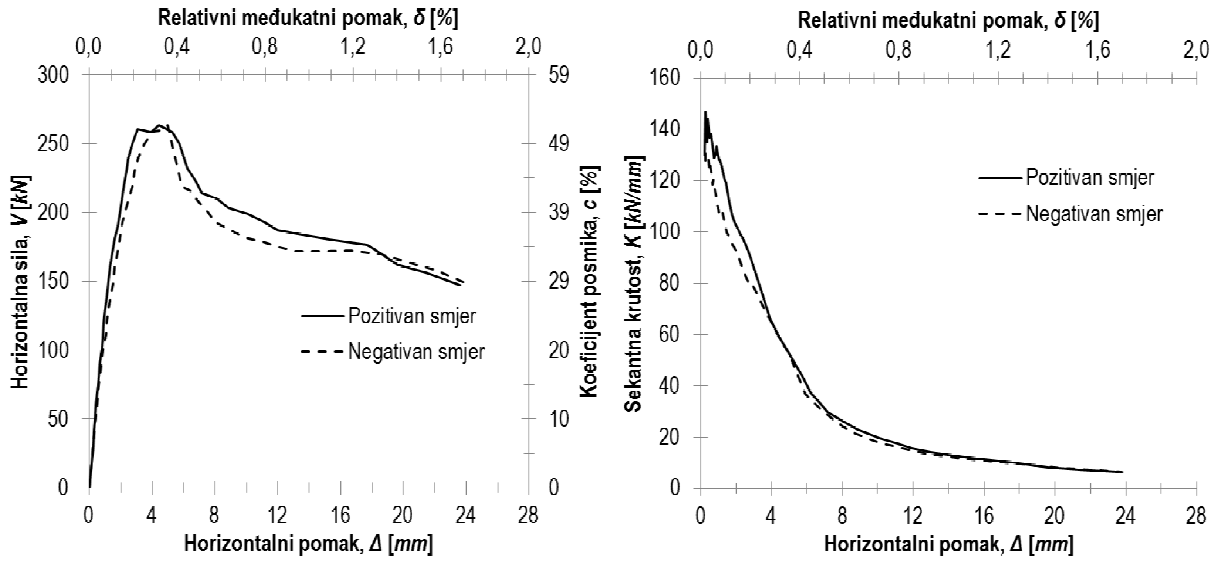


Slika 6.121 *Prikaz histerezne i primarne krivulje odgovora ispitnog uzorka O4_bpm*

Krutost i nosivost ispitnog uzorka određeni su u odabranim karakterističnim točkama odziva, a dobiveni rezultati su prikazani Tablicom 6.13. Usporedba primarnih krivulja odgovora za pozitivni i negativni smjer opterećenja prikazana je Slikom 6.122 a). Prikaz sekantne krutosti, u ovisnosti o horizontalnom pomaku, dan je Slikom 6.122 b) za oba smjera opterećenja.

Tablica 6.13 *Krutost i nosivost ispitnog uzorka O4_bpmu odabranim karakterističnim točkama odziva*

Smjer opterećenja	Pozitivni	Negativni
V_{cr} [*kN*]	239,0	-229,6
Δ_{cr} [*mm*]	2,5	-2,9
Krutost pri pojavi prve značajne pukotine u ispuni, K_i [*kN/mm*]	**95,6**	**80,0**
V_{max} [*kN*]	258,5	-258,8
Δ_{max} [*mm*]	3,9	-4,0
Krutost pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispune, K_{max} [*kN/mm*]	**65,8**	**64,4**
V_{col} [*kN*]	184,7	-172,0
Δ_{col} [*mm*]	13,0	-13,1
Krutost pri slomu ispune, K_{col} [*kN/mm*]	**14,2**	**13,1**
V_{res} [*kN*]	**-**	**-**



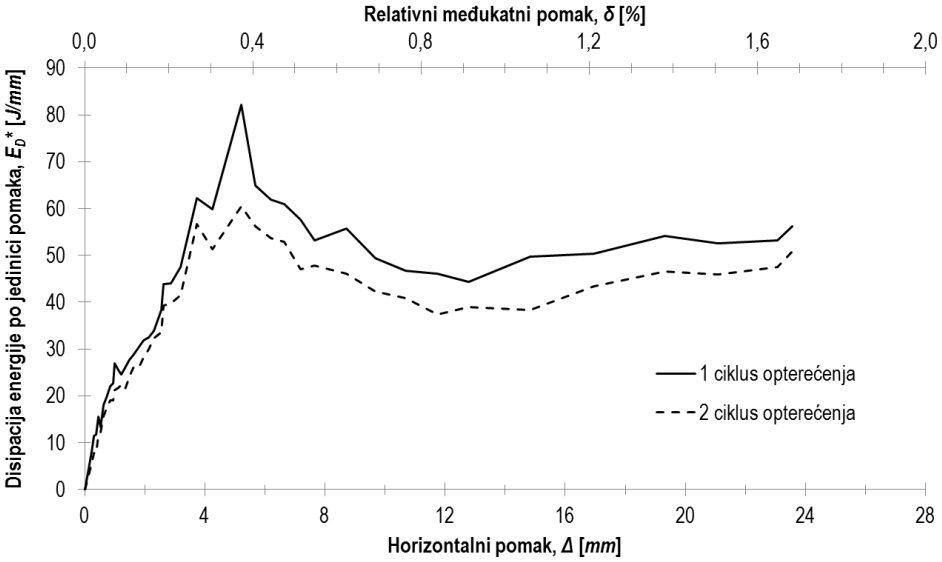
a) b)

Slika 6.122 *Prikaz primarnih krivulja odgovora i sekantne krutosti, u ovisnosti o pomaku, pri pozitivnom i negativnom smjeru opterećenja ispitnog uzorka O4_bpm*

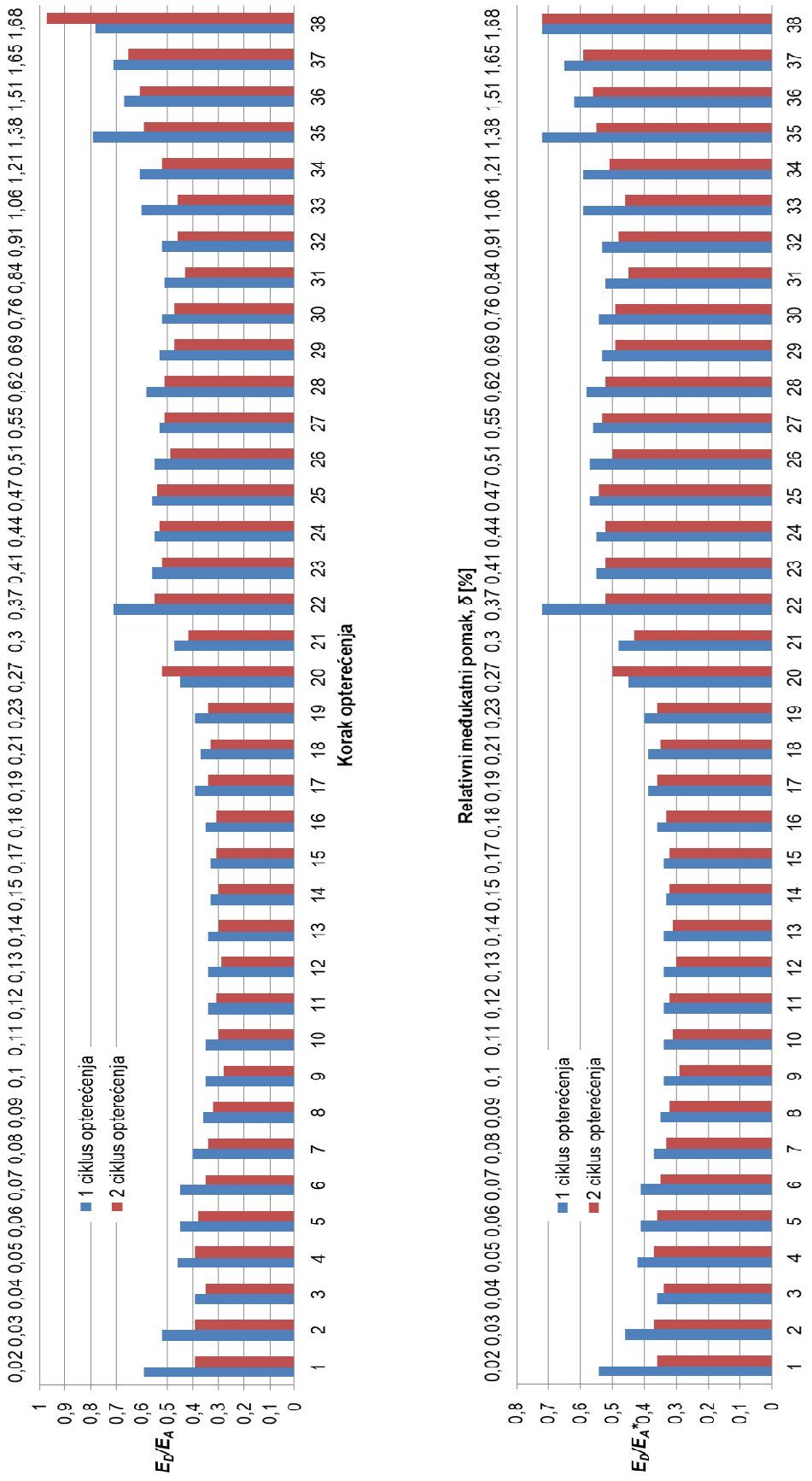
Iz usporedbe rezultata, prikazanih Slikom 6.122, vidljive su zanemarive razlike pri odgovoru ispitnog uzorka pri pozitivnom i negativnom smjeru opterećenja. Osnovna razlika očituje se u području ponašanja uzorka nakon pojave dominantnog mehanizma sloma ispune. Srednje odstupanje horizontalne nosivosti, u navedenom području, iznosi približno 5%. Navedeno odstupanje određeno je u odnosu na vrijednosti pozitivnog smjer opterećenja. Početna krutost približno je jednaka za oba smjera opterećenja kao i ovisnost sekantne krutosti o horizontalnom pomaku.

Disipacija energije ispitnog uzorka po jedinici pomaka (E_D*) prikazana je Slikom 6.123. Odnos disipirane i apsorbirane energije prikazan je Slikom 6.124 a) i b) ovisno o načinu izračuna apsorbirane energije za svaki korak opterećenja. Na Slici 124 a) apsorbirana energija određena je kao potencijalna deformacijske energija (E_A), a na Slici 6.124 b) kao uloženi rad (E_A*). Prigušenje ispitnog uzorka

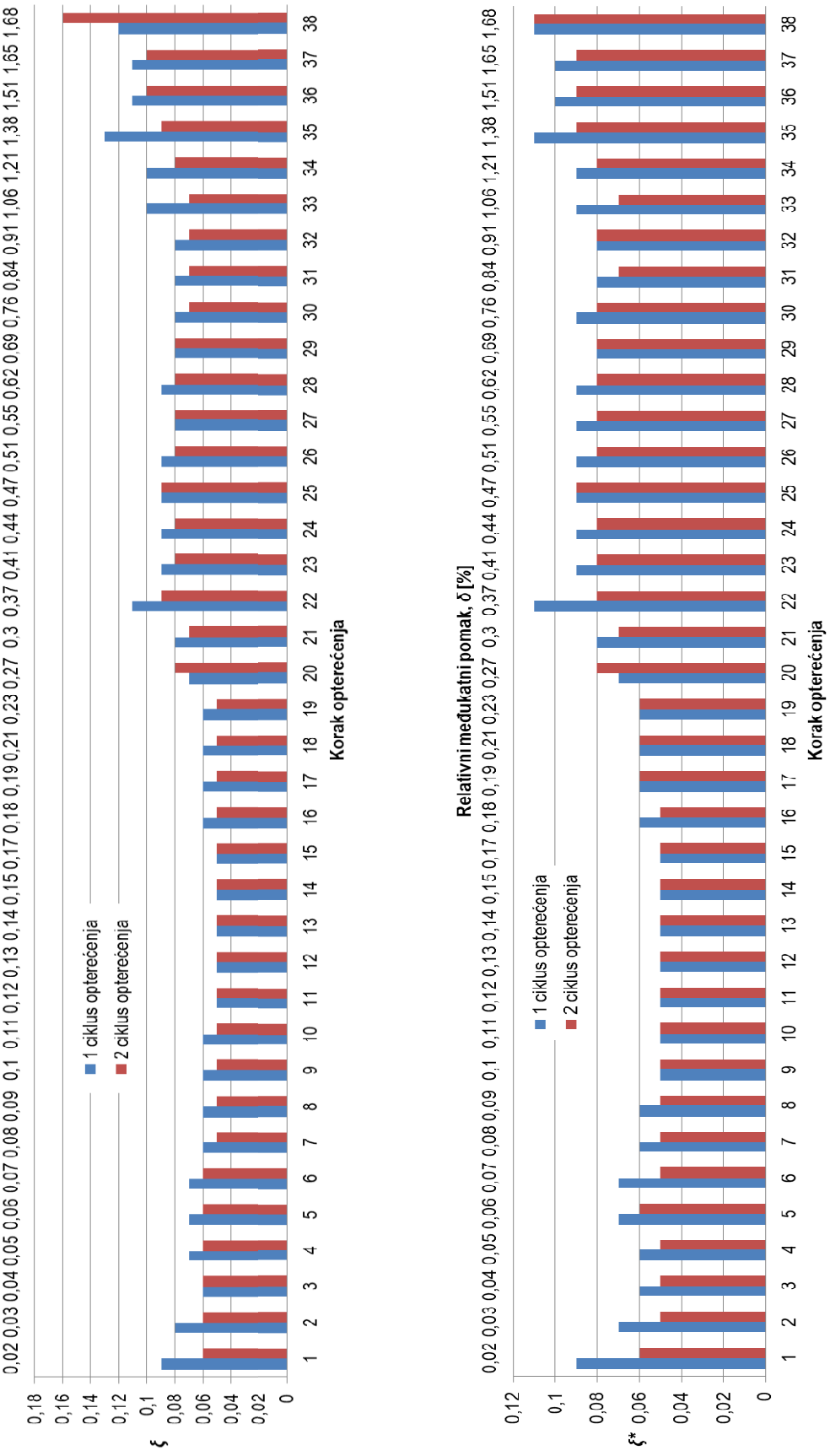
također je određeno za oba načina određivanja apsorbirane energije, a rezultati su prikazani Slikom 6.125 a) i b) za svaki korak opterećenja. Ovisnost prigušenja o pomaku dana je Slikom 6.126 za oba slučaja izračuna apsorbirane energije.



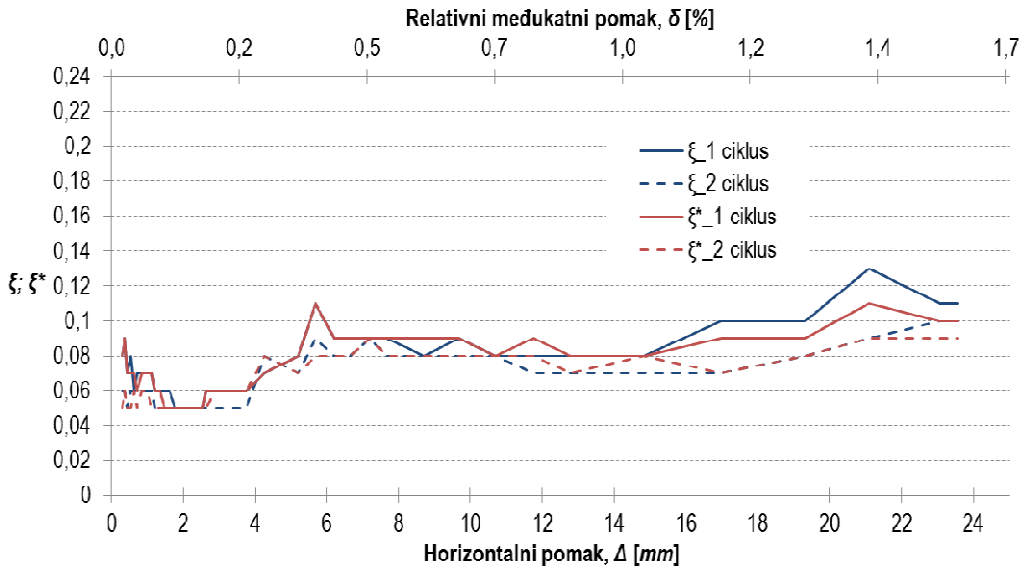
Slika 6.123 *Disipacija energije po jedinici pomaka za ispitni uzorak O4_bpm*



Slika 6.124 *Odnos disipirane i apsorbirane energije za ispitni uzorak O4_bpm*



Slika 6.125 *Prigušenje ispitnog uzorka O4_bpm u ovisnosti o načinu izračuna apsorbirane energije*



Slika 6.126 *Ovisnost prigušenja ispitnog uzorka O4_bpm o horizontalnom pomaku*

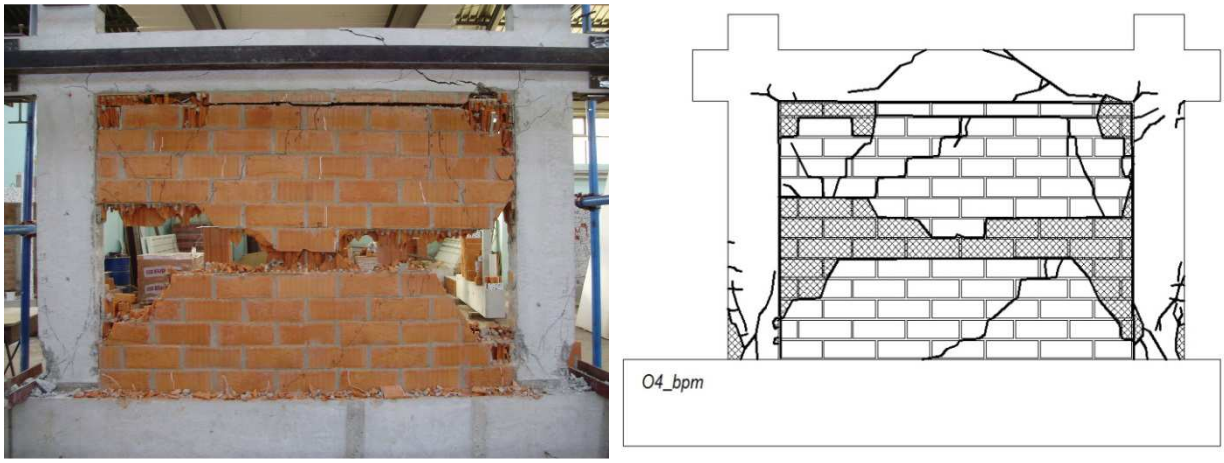
Vrijednosti disipacije energije ispitnog uzorka po jedinici pomaka, prikazane Slikom 6.124, ovisne su o koraku i ciklusu opterećenja. Srednja odstupanja vrijednosti promatrane veličine u području cijelog odgovora uzorka iznosi približno 15%. Navedeno odstupanje određeno je u odnosu na vrijednosti prvih ciklusa opterećenja. Najizražajnije odstupanje uočeno je u koraku gdje je ostvarena maksimalna vrijednost i iznosi približno 26%. Do navedenog odstupanja dolazi u koraku opterećenja neposredno prije pojave dominantnog mehanizma sloma ispune.

Vrijednosti odnosa disipirane i apsorbirane energije, prikazane Slikom 6.125, ovisne su o načinu izračuna apsorbirane energije i koraku opterećenja. Neovisno o načinu izračuna apsorbirane energije, uočene su veće vrijednosti promatranog odnosa pri prvim ciklusima opterećenja i jednak trend ovisnosti o koraku opterećenja. Vrijednosti promatranog odnosa, u slučaju gdje je apsorbirana energija određena kao potencijalna deformacijska energija, u intervalu su od 0,33 do 0,79 za prve te od 0,28 do 0,97 za druge cikluse opterećenja. U slučaju gdje je apsorbirana energija određena kao uloženi rad, vrijednosti promatranog odnosa u intervalu su od 0,33 do 0,72 za prve te od 0,29 do 0,72 za druge cikluse opterećenja.

Vrijednosti prugušenja ispitnog uzorka, prikazane Slikom 6.126, ovisne su o prethodno navedenom odnosu i koraku opterećenja prilikom čega je uočen približno jednak trend u ovisnosti o horizontalnom pomaku. Prigušenje ispitnog uzorka, u slučaju gdje je apsorbirane energija određena kao deformacijska potencijalna energija, u intervalu je od 5 do 13% za prve te od 5 do 16% kritičnog viskoznog prigušenja za druge cikluse opterećenja. U slučaju gdje je apsorbirana energija određena kao uloženi rad, vrijednosti prigušenja u intervalu su od 5 do 11% za prve te od 5 do 11% za druge cikluse opterećenja.

Vlastiti period oscilacija ispitnog uzorka pri pozitivnom smjeru opterećenja iznosi 0,146 *s*, a pri negativnom 0,159 *s*.

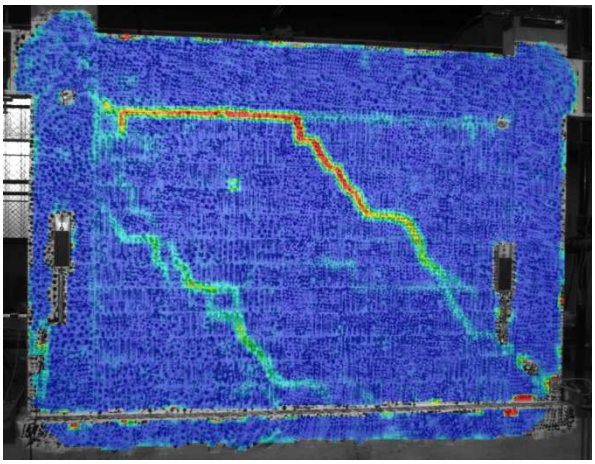
Oštećenje i pukotine ispitnog uzorka prikazane su Slikom 6.127. Do pojave prvih značajnih pukotina u ispunu uzorka dolazi u istom koraku pri pozitivnom i negativnom smjeru opterećenja s vrijednošću relativnog međukatnog pomaka u iznosu od približnih 0,2%. Prve značajne pukotine, prikazane Slikom 6.128 a), pri pozitivnom smjeru opterećenja orijentirane su dijagonalno i pružaju se od ugla u blizini spoja stupa i temeljne grede prema približno polovini raspona grede. Nagib uočene pukotine iznosi približno 45º u odnosu na horizontalu. Pri negativnom smjeru opterećenja prve pukotine lokalizirane su u području čvora gdje je ostvaren unos opterećenja pri čemu je uočen nagib od približnih 75º u odnosu na horizontalu. Iako prve značajne pukotine impliciraju pojavu drobljenja uglova, daljnjim povećanjem horizontalnog opterećenja dolazi do promjene mehanizma sloma, pri čemu se dominantni mehanizam sloma, prema klasifikaciji u *Poglavlju 3*, može definirati kao dijagonalni posmični slom. Promjena mehanizma sloma prikazana je Slikom 6.128 b), a posebno je naglašena pri negativnom smjeru opterećenja (Slika 6.128 c) i d)). Kose pukotine uzrokovane promjenom mehanizma sloma ispuna pod nagibom su od približnih 60º i pružaju se iz smjera opterećenih uglova. Oštećenje ispuna nakon pojave dominantnog mehanizma sloma lokalizirano je u području horizontalnih pukotina i uzrokovano trenjem te u području uglova uslijed pojave drobljenja. Tu je potrebno napomenuti da je, kao i kod ostalih uzoraka kod kojih je ispuna izvedena od šupljih glinenih zidnih elemenata, upitna vanravninska stabilnost ispune nakon pojave dominantnog mehanizma sloma. Oštećenje okvira lokalizirano je na krajevima stupova u blizini spoja s temeljnom gredom te na krajevima grede. Slom okvira ispitnog uzorka uzrokovan je pojavom posmičnog sloma grede dok je oštećenje stupova uzrokovano posmičnim i savojnim pukotinama te drobljenjem zaštitnog sloja betona. Prikaz oštećenja elemenata okvira dan je Slikom 6.129.



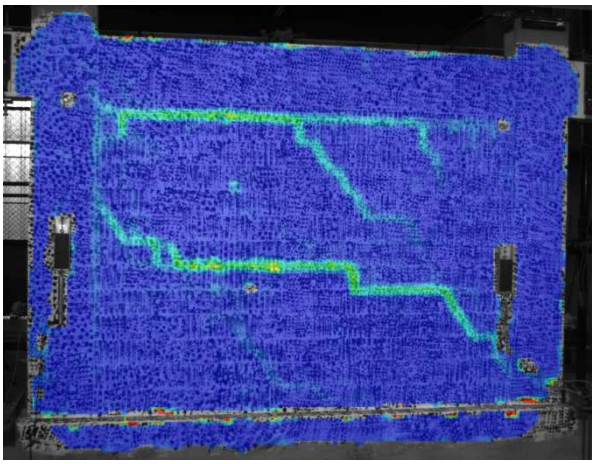
Slika 6.127 *Prikaz oštećenja i pukotina ispitnog uzorka O4_bpm*

a) *Prve značajne pukotine u ispunu*

b) *Dominantni mehanizma sloma ispuna*



c)



d)

Slika 6.128 *Prikaz promjene mehanizma sloma ispuna ispitnog uzorka O4_bpm*

a) *Desni stup okvira*

b) *Lijevi stup okvira*

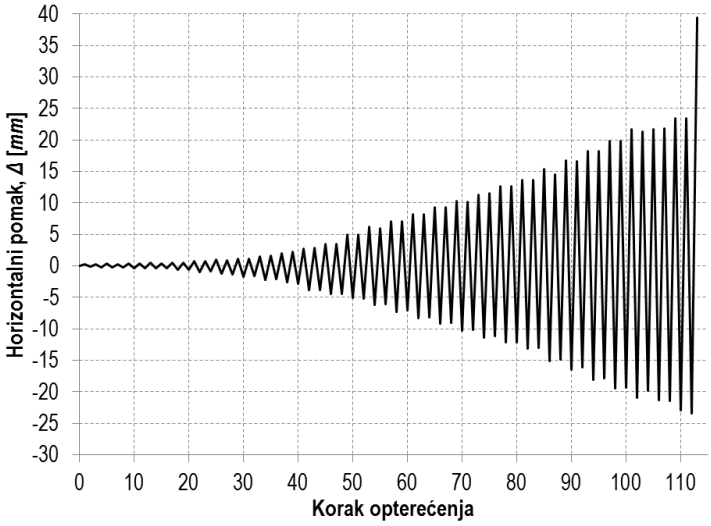
c) *Lijevi kraj grede*

d) *Desni kraj grede*

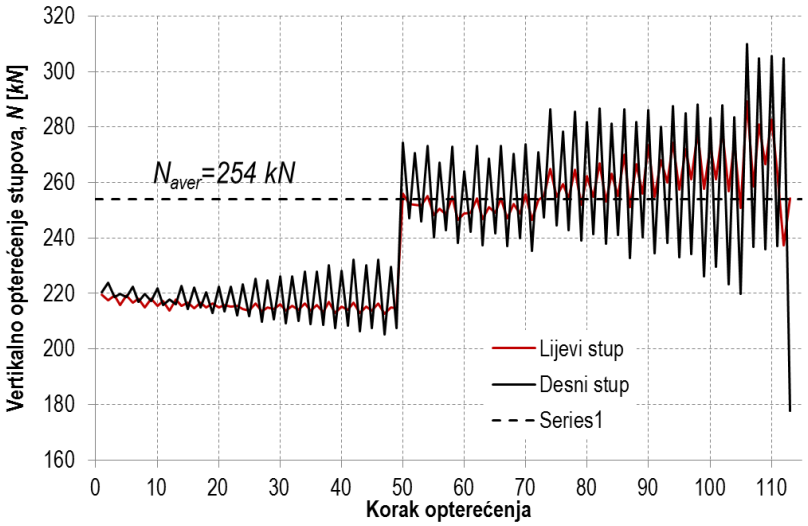
Slika 6.129 *Prikaz oštećenja elemenata okvira ispitnog uzorka O4_bpm*

6.5.3. Rezultati ispitivanja uzorka *O4_cpm*

Ispitni uzorak *O4_cpm* neduktilni je armirano-betonski okvir tipa *O4* kod kojeg je ispun izvedena od glinene opeke povezane cementno-vapnenim mortom. Karakteristike i izvedba uzorka opisana je u *Poglavlju 3*. Horizontalno opterećenje uzorka prikazano je Slikom 6.130 a), u ovisnosti o koraku opterećenja, dok je varijacija uzdužne sile u stupovima prikazana Slikom 6.130 b).



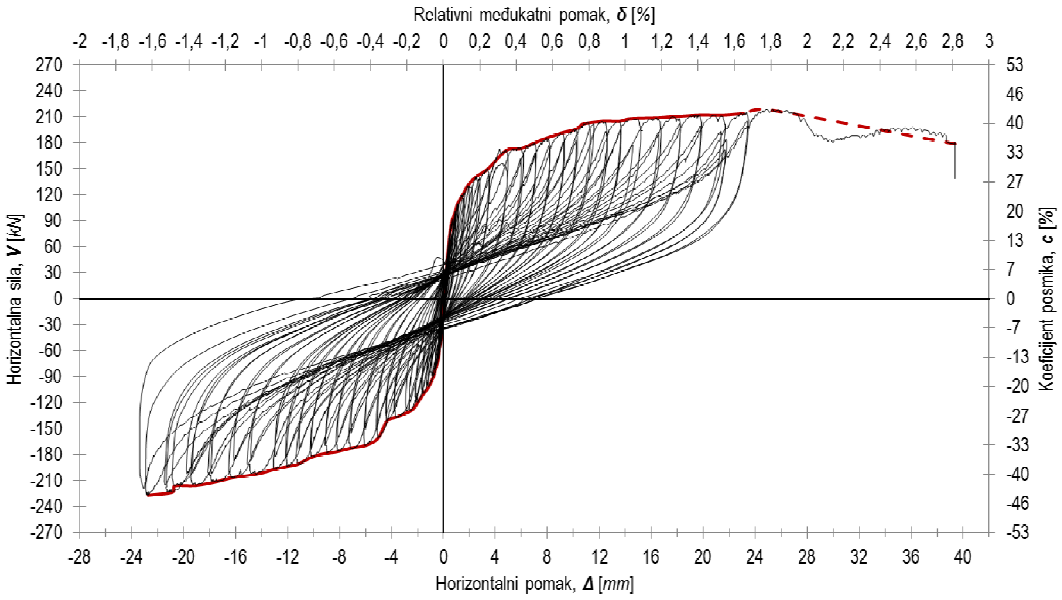
a)



b)

Slika 6.130 *Prikaz horizontalnog i vertikalnog opterećenja ispitnog uzorka O4_cpm*

Rezultati ispitivanja u obliku histerezne i primarne krivulje odgovora ispitnog uzorka prikazani su Slikom 6.131. Na sekundarnoj vertikalnoj osi dan je prikaz odnosa vertikalnog i horizontalnog opterećenja (*c*) pri svakom koraku, izražen u %, dok je na sekundarnoj horizontalnoj osi prikazan relativni međukatni pomak (*δ*).

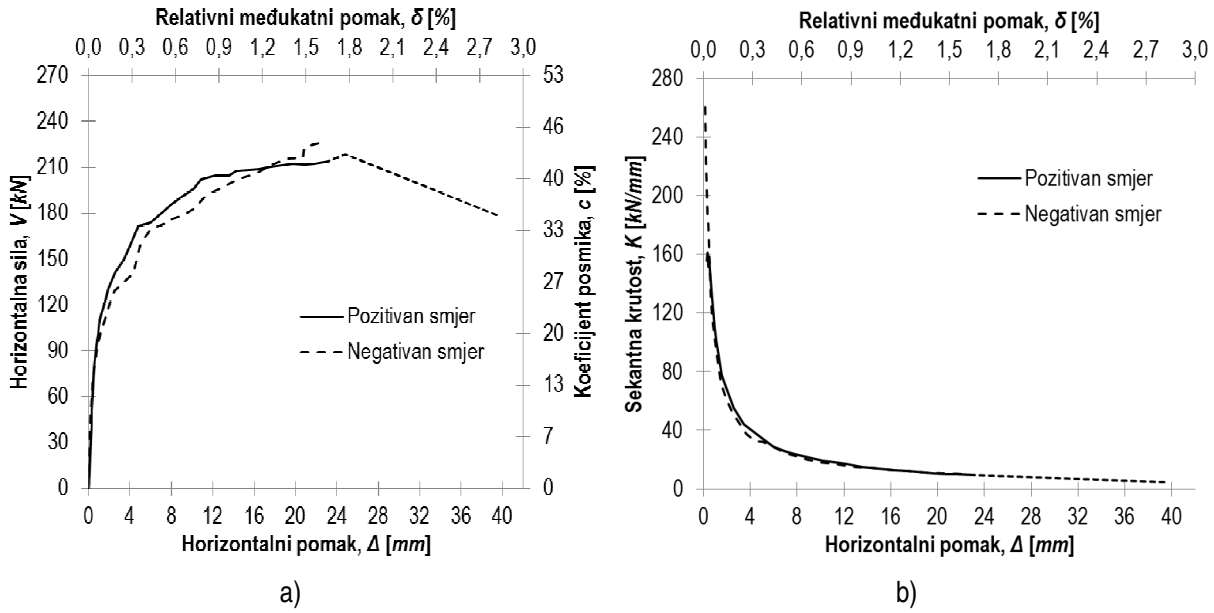


Slika 6.131 *Prikaz histerezne i primarne krivulje odgovora ispitnog uzorka O4_cpm*

Krutost i nosivost ispitnog uzorka određeni su u odabranim karakterističnim točkama odziva, a dobiveni rezultati su prikazani Tablicom 6.14. Usporedba primarnih krivulja odgovora za pozitivni i negativni smjer opterećenja prikazana je Slikom 6.132 a). Prikaz sekantne krutosti, u ovisnosti o horizontalnom pomaku, dan je Slikom 6.132 b) za oba smjera opterećenja.

Tablica 6.14 *Krutost i nosivost ispitnog uzorka O4_cpm u odabranim karakterističnim točkama odziva*

Smjer opterećenja	Pozitivni	Negativni
V_{cr} [*kN*]	149,9	-101,4
Δ_{cr} [*mm*]	3,4	-1,1
Krutost pri pojavi prve značajne pukotine u ispuni, K_i [*kN/mm*]	**44,0**	**90,6**
V_{max} [*kN*]	179,9	-169,6
Δ_{max} [*mm*]	7,0	-6,0
Krutost pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispune, K_{max} [*kN/mm*]	**25,8**	**28,1**
V_{col} [*kN*]	210,1	-206,4
Δ_{col} [*mm*]	17,6	-16,2
Krutost pri slomu okvira, K_{col} [*kN/mm*]	**11,9**	**12,7**
V_{res} [*kN*]	**210,1**	**-206,4**



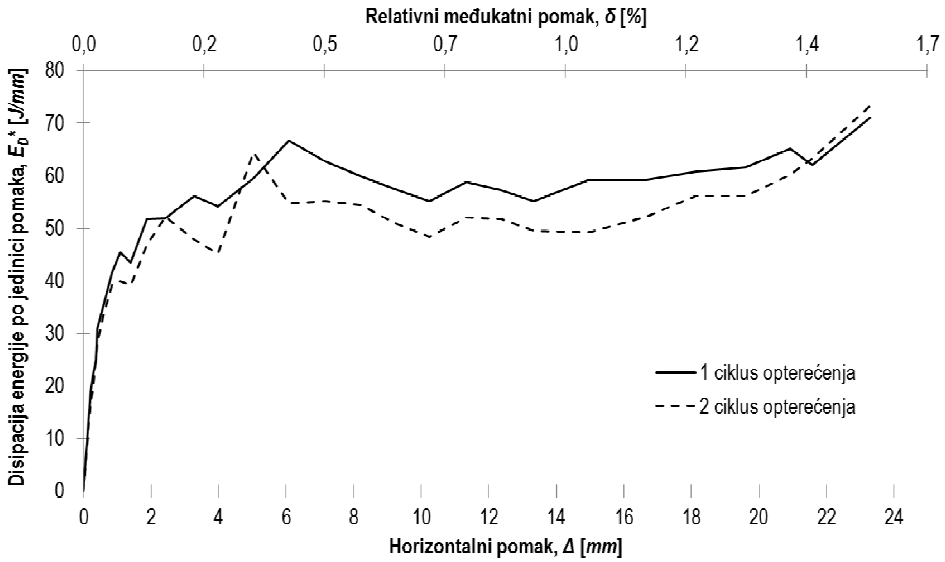
a) b)

Slika 6.132 *Prikaz primarnih krivulja odgovora i sekantne krutosti, u ovisnosti o pomaku, pri pozitivnom i negativnom smjeru opterećenja ispitnog uzorka O4_cpm*

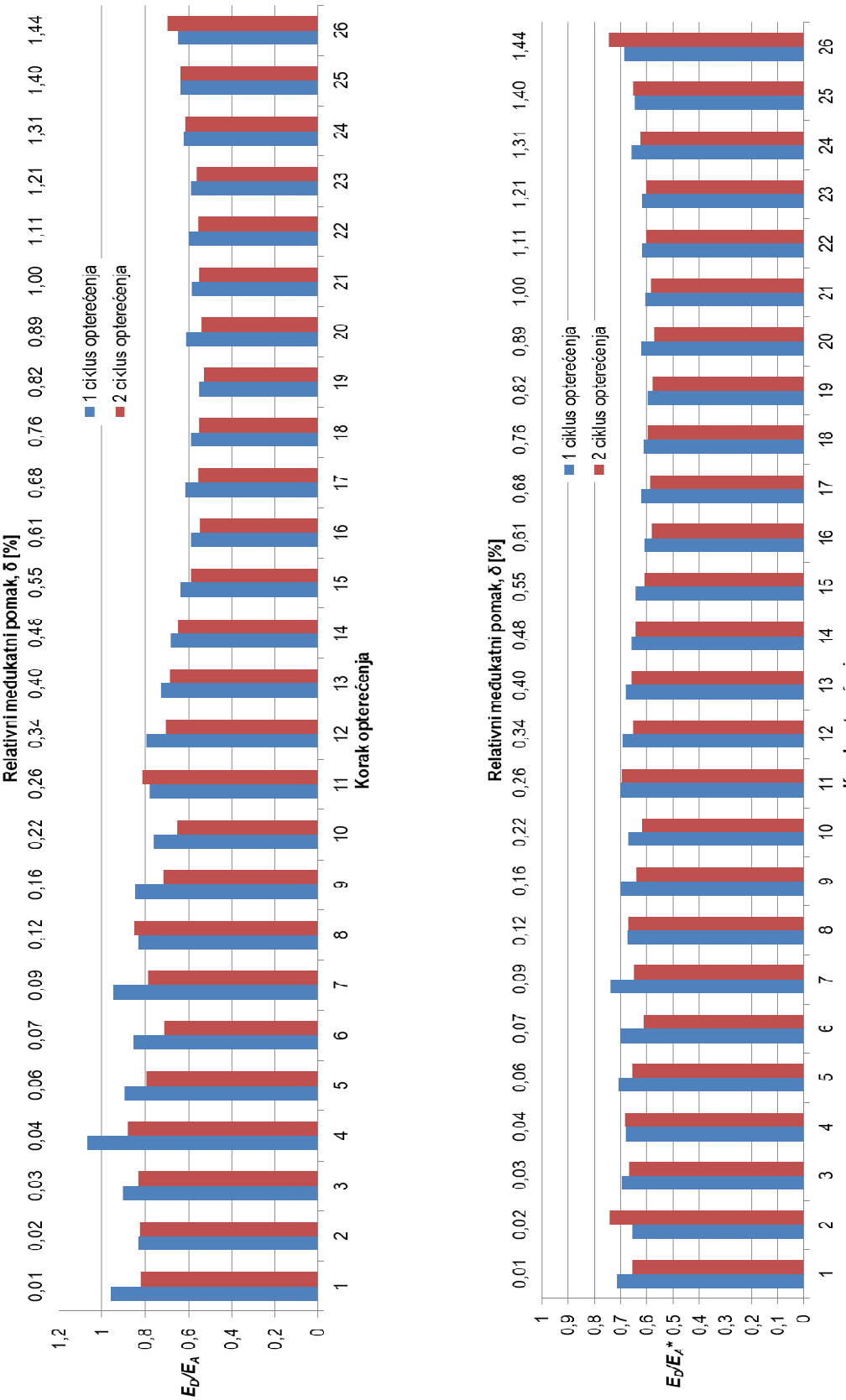
Iz usporedbe rezultata, prikazanih Slikom 6.132, vidljiv je gotovo identičan odgovor ispitnog uzorka pri pozitivnom i negativnom smjeru opterećenja. Srednje odstupanje vrijednosti horizontalne nosivosti pri pozitivnom i negativnom smjeru opterećenja, u području cijelog odgovora ispitnog uzorka, iznosi približno 2%. Osnovna razlika u odgovoru očituje se u izražajnijom očvršćivanju pri negativnom smjeru opterećenja. Početna krutost ispitnog uzorka približno je jednaka za oba smjera opterećenja kao i ovisnost sekantne krutosti o horizontalnom pomaku.

Disipacija energije po jedinici pomaka (E_D*) prikazana je Slikom 6.133. Odnos disipirane i apsorbirane energije prikazan je Slikom 6.134 a) i b) ovisno o načinu izračuna apsorbirane energije za svaki korak opterećenja. Na Slici 6.134 a) apsorbirana energija određena je kao potencijalna deformacijske energija (E_A), a na Slici 6.134 b) kao uloženi rad (E_A*). Prigušenje ispitnog uzorka

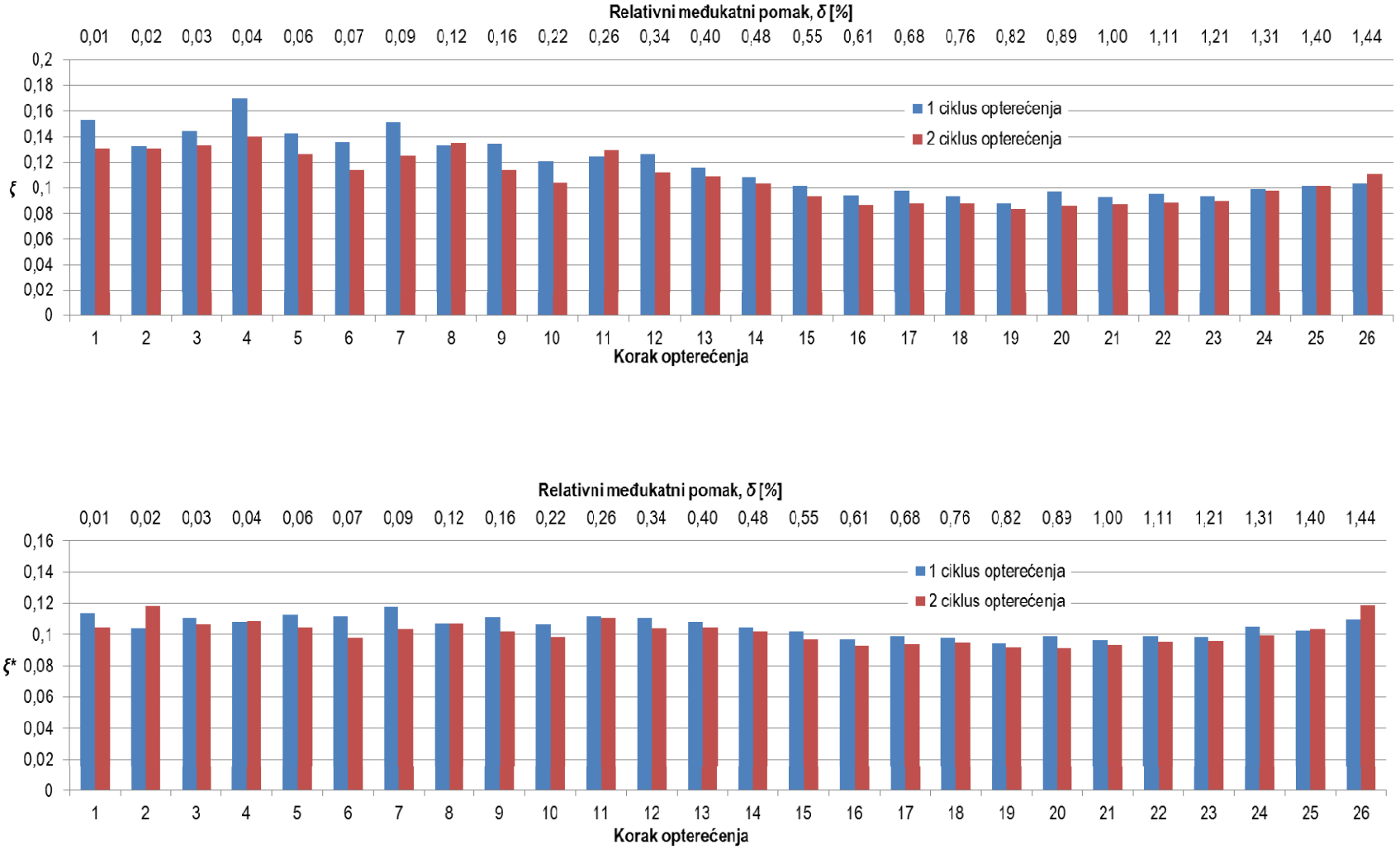
također je određeno za oba načina određivanja apsorbirane energije, a rezultati su prikazani Slikom 6.135 a) i b) za svaki korak opterećenja. Ovisnost prigušenja o horizontalnom pomaku dana je Slikom 6.136 za oba slučaja izračuna apsorbirane energije.



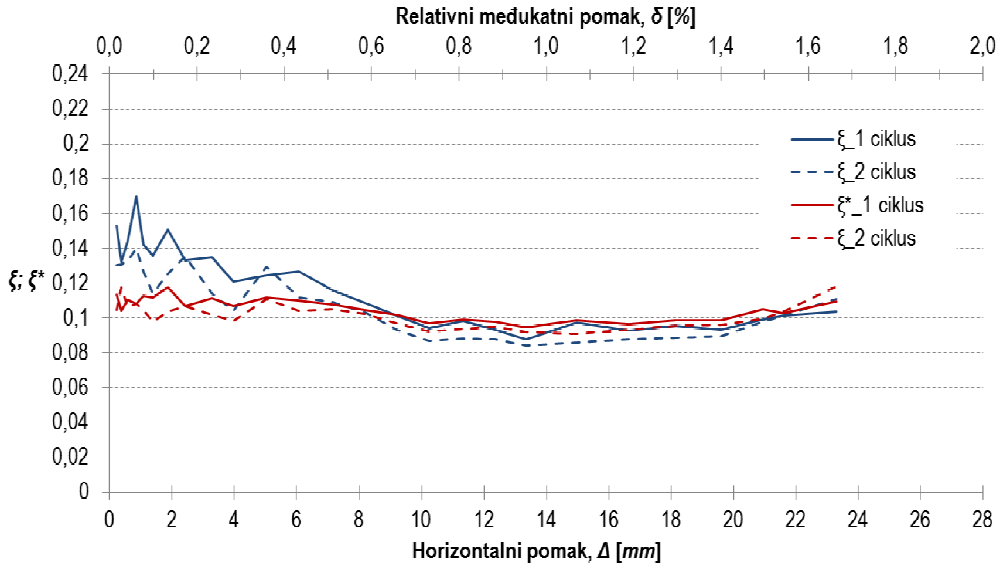
Slika 6.133 *Disipacija energije po jedinici pomaka za ispitni uzorak O4_cpm*



Slika 6.134 *Odnos disipirane i apsorbirane energije za ispitni uzorak O4_cpm*



Slika 6.135 *Prigušenje ispitnog uzorka O4_cpm u ovisnosti o načinu izračuna apsorbirane energije*



Slika 6.136 *Ovisnost prigušenja ispitnog uzorka O4_cpm o horizontalnom pomaku*

Vrijednosti disipacije energije ispitnog uzorka po jedinici pomaka, prikazane Slikom 6.133, ovisne su o ciklusu i koraku opterećenja. Neovisno o koraku uočene su veće vrijednosti promatrane veličine pri prvim ciklusima opterećenja. Pri početnim koracima opterećenja, do pojave dominantnog mehanizma sloma ispune, srednja je vrijednost odstupanja zanemariva i iznosi približno 7%. U području odgovora, nakon pojave dominantnog mehanizma sloma, dolazi do nešto izražajnijeg odstupanja sa srednjom vrijednošću u iznosu od približnih 9%. Navedena odstupanje određena su u odnosu na vrijednosti pri pozitivnom smjeru opterećenja.

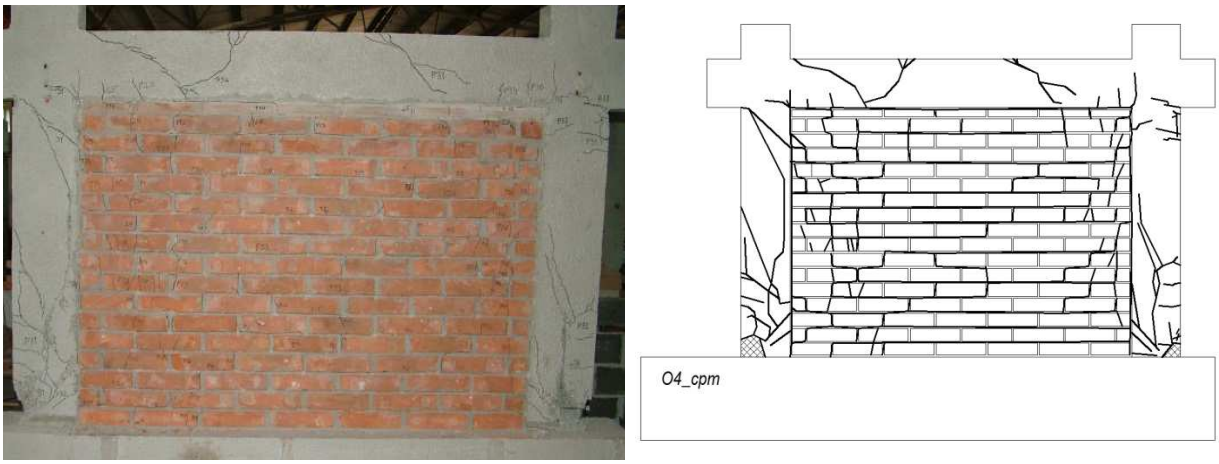
Vrijednosti odnosa disipirane i apsorbirane energije, prikazane Slikom 6.134, ovisne su o načinu izračuna apsorbirane energije i koraku opterećenja pri čemu su uočene veće vrijednosti promatranog odnosa pri prvim ciklusima opterećenja. Neovisno o načinu izračuna apsorbirane energije, uočen je približno jednak trend vrijednosti u odnosu na horizontalni pomak. Vrijednosti promatranog odnosa, u slučaju gdje je apsorbirana energija određena kao potencijalna deformacijska energija, u intervalu su od 0,55 do 1,07 za prve te od 0,52 do 0,87 za druge cikluse opterećenja. Potrebno je naglasiti da je vrijednost promatranog odnosa veća od 1 nerealna iz razloga što implicira veću disipaciju energije od prvobitno apsorbirane. U slučaju gdje je apsorbirana energija određena kao uloženi rad, vrijednosti promatranog odnosa u intervalu su od 0,53 do 0,73 za prve te od 0,57 do 0,74 za druge cikluse opterećenja.

Vrijednosti prugušenja ispitnog uzorka, prikazane Slikom 6.135, ovisne su o prethodno navedenom odnosu i koraku opterećenja prilikom čega je uočen približno jednak trend u ovisnosti o horizontalnom pomaku. Prigušenje ispitnog uzorka u slučaju gdje je apsorbirane energija određena kao deformacijska potencijalna energija, u intervalu je od 9 do 17% za prve te od 8 do 14% kritičnog

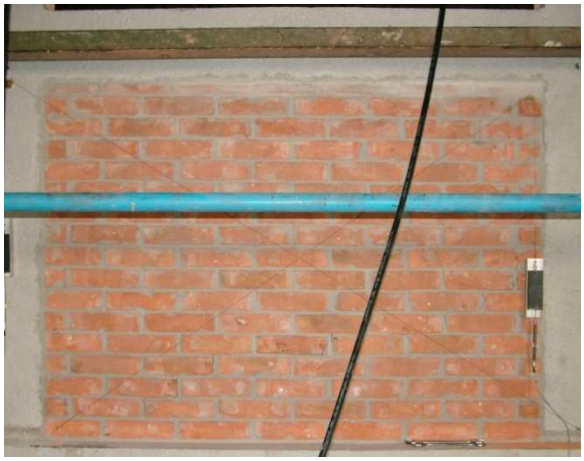
viskoznog prigušenja za druge cikluse opterećenja. Vrijednost prigušenje određena na temelju vrijednosti prethodno navedenog odnosa većeg od 1 nerealna je iz razlogâ navedenih u prethodnom odlomku. U slučaju gdje je apsorbirana energija određena kao uloženi rad, vrijednosti su prigušenja u intervalu od 9 do 12% za prve te od 9 do 11% za druge cikluse opterećenja.

Vlastiti period oscilacija ispitnog uzorka pri pozitivnom smjeru opterećenja iznosi 0,215 *s*, a pri negativnom 0,150 *s*.

Oštećenje i pukotine ispitnog uzorka prikazane su Slikom 6.137. Prva značajna pukotina u ispunu uočena je pri negativnom smjeru opterećenja dok do pojave prve značajne pukotine pri pozitivnom smjeru dolazi nakon pet koraka opterećenja. Prva značajna pukotina, pri negativnom smjeru opterećenja, dijagonalno je orijentirana pod nagibom od približnih 30º u odnosu na horizontalu i pruža se od približno polovine visine desnog stupa prema nasuprotnom uglu ispuna u blizini spoja lijevog stupa s temeljnom gredom, a uzrokovana je gubitkom veze zidni element-mort (Slika 6.138 a)). Nakon pojave prve značajne pukotine pri negativnom smjeru, a prije pojave značajne pukotine pri pozitivnom smjeru opterećenja, uočene su dodatne dvije pukotine koje su također dijagonalno orijentirane, međutim, dolazi do promjene nagiba i položaja pukotina (Slika 138 b)). Nagib prve značajne pukotine pri pozitivnom smjeru opterećenja iznosi približno 65º u odnosu na horizontalu, a pruža se iz smjera opterećenog ugla i uzrokovana je pojavom većeg broja pukotina. Pojava dominantnog mehanizma sloma ispuna također je uočena u različitim koracima opterećenja (Tablica 6.14), a može se definirati kao dijagonalno posmični slom. Nakon pojave dominantnog mehanizma sloma ispuna, oštećenje ispuna u većoj je mjeri lokalizirano na horizontalnim reškama i uzrokovano horizontalnim klizanjem (Slika 6.139). Unatoč impresivnom oštećenju i relativno velikom relativnom međukatnom pomaku (2,8%) pri posljednjem korak opterećenja, stupovi okvira ispitnog uzorka zadržali su sposobnost prijenosa vertikalnog opterećenja. Oštećenje elemenata okvira prikazano je Slikom 6.140.



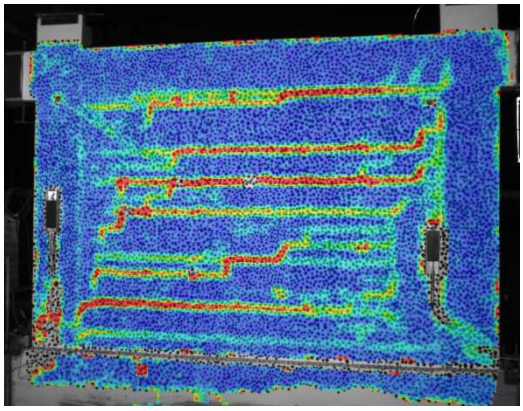
Slika 6.137 *Prikaz oštećenja i pukotina ispitnog uzorka O4_cpm*



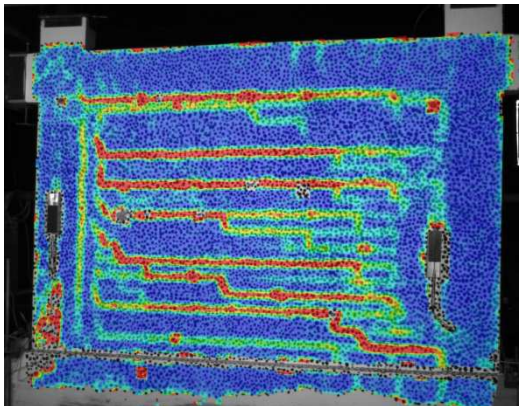
a) *Prva značajna pukotina pri negativnom smjeru opterećenja*

b) *Prve značajne pukotine pri pozitivnom smjeru opterećenja*

Slika 6.138 *Prikaz prvih značajnih pukotina ispuna ispitnog uzorka O4_cpm*



a) *Pozitivni smjer opterećenja*



b) *Negativni smjer opterećenja*

Slika 6.139 *Horizontalno klizanje ispuna ispitnog uzorka O4_cpm*

a) *Lijevi dio uzorka*

b) *Desni dio uzorka*

Slika 6.140 *Prikaz oštećenja elemenata okvira ispitnog uzorka O4_cpm*

6.6. Usporedba rezultata ispitivanja

Usporedba i analiza rezultata ispitivanja dana je po grupama uzoraka uz osvrt na promatrane konstrukcijske i dinamičke karakteristike. Znatne razlike u ponašanju praznih i okvira sa zidanim ispunom nameću potrebu sistematizacije prilikom usporedbe rezultata. Naime, iz znatnih razlika u vrijednostima relativnih međukatnih pomaka u promatranim karakterističnim točkama odgovora, proizlazi međusobna neusporedivost konstrukcijskih karakteristika ispitnih uzoraka. Međutim, ukoliko se odaberu vrijednosti relativnih međukatnih pomaka dobivene ispitivanjem okvira sa zidanim ispunom kao mjerodavne, tada je moguće dati ocjenu doprinosa pojedinog konstituenta. Navedena metodologija ocjene doprinosa kvantitativne je prirode i daje relativno veliki interval vrijednosti. Stoga je, prvo ocijenjen doprinos konstituenata za svaki uzorak, nakon čega su definirane vrijednosti intervala doprinosa u odnosu na odabrane karakteristične točke odgovora za svaku skupinu uzoraka. S obzirom na uočene razlike vrijednosti relativnog međukatnog pomaka, doprinosi konstituenata i područja graničnih stanja ponašanja određeni su u odnosu na tip ispuna. Sukladno metodologiji ocjene doprinosa konstrukcijskim karakteristikama, određen je doprinos dinamičkim karakteristikama, točnije, disipaciji energije sustava. Navedenom metodologijom nije moguće ocijeniti doprinose prigušenju i smanjenju osnovnog perioda osciliranja sustava. Ispitni uzorci *O1_bpm** i *O1_b* djelomično su izostavljeni iz usporedbe zbog nepotpunih rezultata ispitivanja.

6.6.1. Skupina uzoraka *O1*

6.6.1.1. Ocjena doprinosa konstituenata sustava konstrukcijskim karakteristikama uzoraka

Doprinos konstituenata sustava okvir sa zidanim ispunom u promatranim karakterističnim točkama odgovora ispitnih uzoraka skupine *O1* prikazan je, u ovisnosti o smjeru opterećenja, Tablicama 6.15 i 6.16. S obzirom da su područjima, tj. karakterističnim točkama ponašanja, određena granična stanja ispitnih uzoraka, promatrani su parovi vrijednosti horizontala sila – pomak koji definiraju granično stanje pojave prve značajne pukotine u ispunu (δ_{cr}, V_{cr}) i granično stanje pojave dominantnog mehanizma sloma ispuna (δ_{cr}, V_{cr}). Doprinose pri graničnom stanju pred rušenje nije moguće odrediti iz razloga što je pretpostavljeno da jedan od konstituenata sustava gubi horizontalnu nosivost.

U pogledu horizontalne nosivosti sustava, vidljiv je dominantan doprinos ispuna, međutim, u odnosu na promatrana granična stanja, doprinosi konstituenata približno su jednaki neovisno o smjeru opterećenja. Iako zanemarive, uočljive su razlike u odnosu na tip ispuna gdje su dobivene manje vrijednosti doprinosa ispuna kod ispitnih uzoraka kod kojih je isti izveden od vapnenog morta. Tako je, u

slučaju ispitnih uzoraka kod kojih je ispun izvedena od morta opće namjene, doprinos ispuna u intervalu od 81 do 83% za pozitivni te od 78 do 84% za negativni smjer opterećenja, a okvira u intervalu od 17 do 19% za pozitivni te od 16 do 22% za negativni smjer opterećenja. S druge strane, u slučaju uzoraka kod kojih je ispun izvedena od vapnenog morta, doprinos ispuna je u intervalu od 68 do 80% za pozitivni i od 72 do 80% za negativni smjer opterećenja dok je doprinos okvira u intervalu od 20 do 32% za pozitivni te od 20 do 28% za negativni smjer opterećenja.

Potrebno je istaknuti kako je vrijednost horizontalne nosivosti okvira u promatranim karakterističnim točkama odgovora sustava, u odnosu na maksimalno zabilježenu vrijednost, znatna. Tako je, pri graničnom stanju pojave prve značajne pukotine u ispunu, nosivost okvira uzoraka kod kojih je ispun izvedena od morta opće namjene, u intervalu od 37 do 54% pri pozitivnom te od 45 do 49% maksimalne horizontalne nosivosti pri negativnom smjeru opterećenja. Kod uzoraka kod kojih je ispun izvedena od vapnenog morta, nosivost okvira je u intervalu od 30 do 54% pri pozitivnom te od 33 do 48% maksimalne horizontalne nosivosti pri negativnom smjeru opterećenja. Znatno veće vrijednosti uočene su pri graničnom stanju nosivosti što je posebno izraženo kod uzoraka kod kojih je ispun izveden od morta opće namjene gdje je nosivost okvira u intervalu od 62 do 67% pri pozitivnom i od 61 do 74% maksimalne nosivosti pri negativnom smjeru opterećenja. Znatno manji rasponi vrijednosti dobiveni su kod uzoraka čiji je ispun izvedena od vapnenog morta, a u intervalu su od 37 do 54% pri pozitivnom te od 48 do 55% maksimalne horizontalne nosivosti pri negativno smjeru opterećenja.

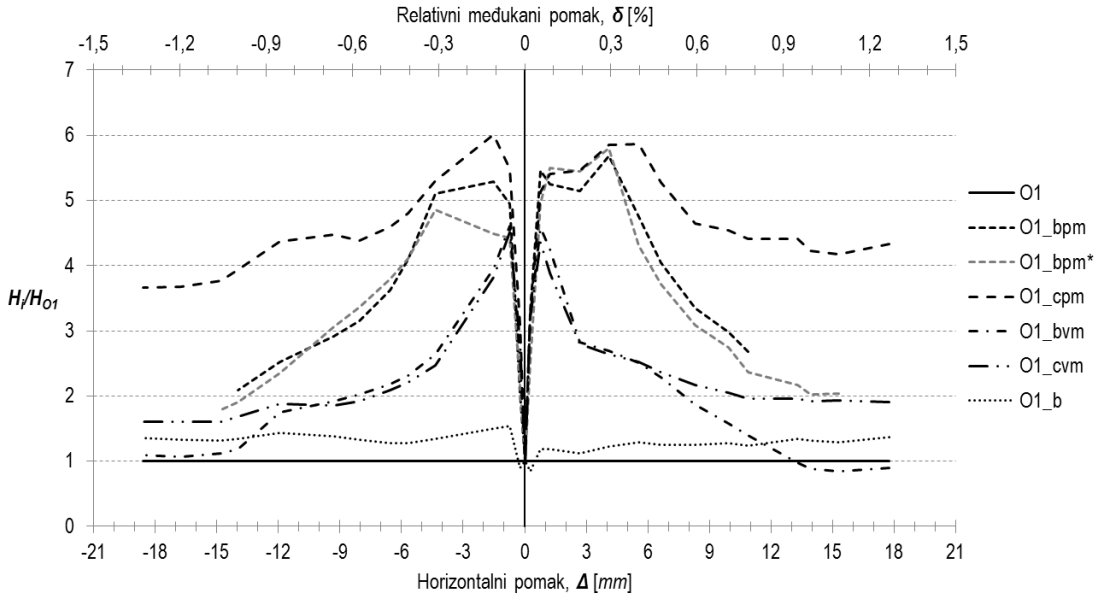
Tablica 6.15 *Prikaz doprinosa konstituenata sustava u promatranim karakterističnim točkama odgovora ispitnih uzoraka skupine O1 pri pozitivnom smjeru opterećenja*

	Ispitni uzorak				
	O1_bpm	*O1_bpm**	*O1_cpm*	*O1_bvm*	*O1_cvm*
δ_{cr} [%]	0,09	0,08	0,16	0,06	0,16
V_{cr} [*kN*]	101,5	101,6	139,7	72,0	79,1
Doprinos ispune, [%]	**81,5**	**82,9**	**82,0**	**80,3**	**68,1**
Doprinos okvira, [%]	**18,5**	**17,1**	**18,0**	**19,7**	**31,9**
δ_{max} [%]	0,27	0,27	0,39	0,08	0,16
V_{max} [*kN*]	160,0	170,6	187,2	78,7	79,1
Doprinos ispune, [%]	**81,8**	**82,9**	**83,1**	**77,9**	**68,1**
Doprinos okvira, [%]	**18,3**	**17,1**	**16,9**	**22,1**	**31,9**
δ_{col} [%]	-	1,0	1,70	1,07	1,80
V_{col} [*kN*]	-	94,2	195,5	39,7	81,2

Tablica 6.16 *Prikaz doprinosa konstituenata sustava u promatranim karakterističnim točkama odgovora ispitnih uzoraka skupine O1 pri negativnom smjeru opterećenja*

	Ispitni uzorak				
	O1_bpm	*O1_bpm**	*O1_cpm*	*O1_bvm*	*O1_cvm*
δ_{cr} [%]	0,13	0,13	0,17	0,07	0,16
V_{cr} [*kN*]	109,5	92,0	136,2	72,2	76,6
Doprinos ispune, [%]	**81,9**	**78,5**	**84,0**	**79,5**	**72,2**
Doprinos okvira, [%]	**18,1**	**21,5**	**16,0**	**20,5**	**27,8**
δ_{max} [%]	0,27	0,31	0,41	0,22	0,16
V_{max} [*kN*]	155,4	141,5	155,5	78,8	76,6
Doprinos ispune, [%]	**82,6**	**79,4**	**79,1**	**69,0**	**72,2**
Doprinos okvira, [%]	**17,4**	**20,6**	**20,9**	**31,0**	**27,8**
δ_{col} [%]	-	0,88	1,70	1,07	1,80
V_{col} [*kN*]	-	83,8	162,2	48,5	64,3

S ciljem jasnijeg raspoznavanja doprinosa konstituenata izvršenja, normalizacija je horizontalne nosivosti ispitnih uzoraka u odnosu na vrijednosti određena ispitivanjem praznog okvira (Slika 6.141). Takvim je načinom omogućena ocjena kvantitativnog doprinosa ispuna u području cijelog odgovora praznog okvira. Uključeni su i rezultati ispitivanja uzorka *O1_b*.



Slika 6.141 *Prikaz normalizirane nosivosti ispitnih uzoraka skupine O1*

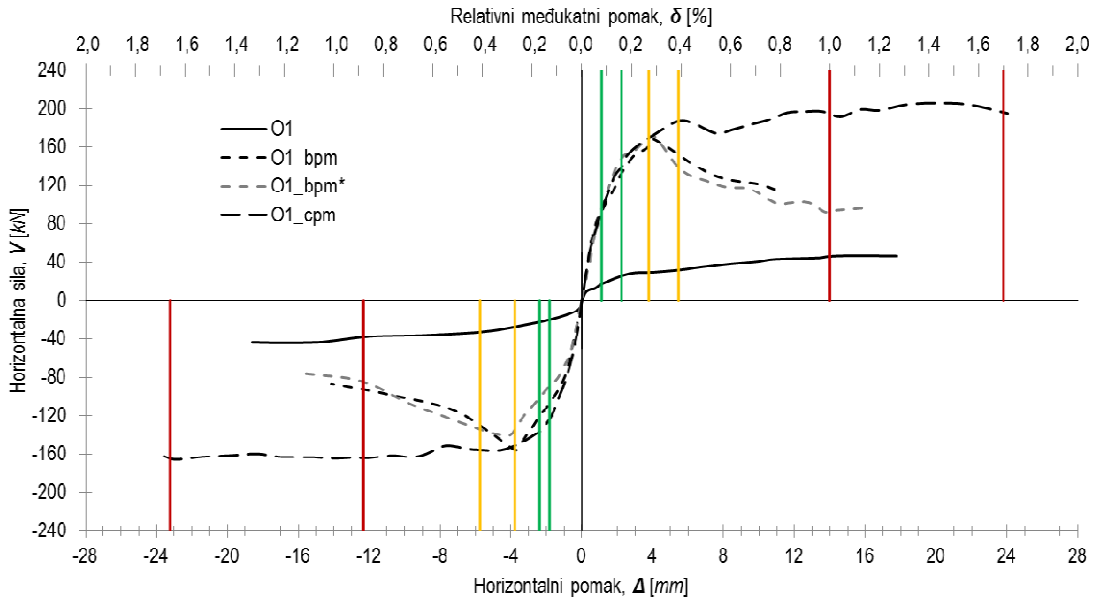
Prema prikazanoj usporedbi, vidljiv je veći doprinos ispuna izvedene od morta opće namjene horizontalnoj nosivosti uzoraka. Znatan je doprinos ispuna, neovisno o tipu i smjeru opterećenja, u području do vrijednosti relativnog međukatnog pomaka u iznosu od 0,5% što je i pokriveno promatranim graničnim stanjima. U području odgovora ispitnih uzoraka nakon vrijednosti relativnog međukatnog

pomaka u iznosu od 0,5%, doprinos ispuna i dalje je značajan, ali ne i toliko naglašen. Osim mogućnosti ocijene doprinosa ispuna horizontalnoj nosivosti sustava, pomoću prikazane normalizacije, moguće je i ocijeniti utjecaj tipa zidnog elementa na degradaciju nosivosti nakon pojave dominantnog mehanizma sloma ispune. Tako je, kod ispitnih uzoraka kod kojih je ispun izvedena od šupljih glinenih zidnih elemenata, navedena degradacija znatno izraženija što je posebno vidljivo kod ispitnih uzoraka kod kojih je ispun izvedena od morta opće namjene. Najmanji doprinos ispuna horizontalnoj nosivosti i utjecaj na degradaciju nosivosti uočen je kod ispitnog uzorka *O1_b*.

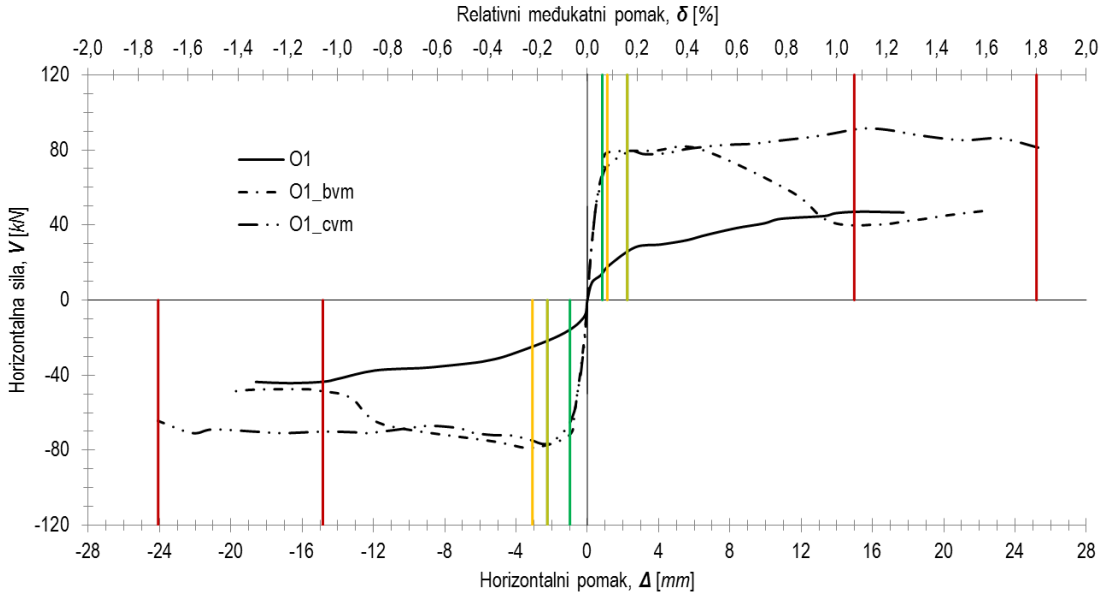
S obzirom na razlike vrijednosti relativnog međukatnog pomaka u promatranim karakterističnim točkama odgovora ispitnih uzoraka, Slikama 6.142 a) i b) shematski su prikazana područja graničnih stanja u ovisnosti o tipu ispuna. Punom zelenom linijom određeno je područje graničnog stanja pojave prve značajne pukotine u ispunu, punom narančastom linijom područje graničnog stanja pojave dominantnog mehanizma sloma ispuna, a punom crvenom linijom područje graničnog stanja pred rušenje. Vrijednosti relativnog međukatnog pomaka ispitnih uzoraka, kod kojih je ispun izvedena od morta opće namjene pri graničnom stanju pojave prve značajne pukotine, u intervalu su od 0,08 do 0,16% za pozitivni te od 0,13 do 0,17% za negativni smjer opterećenja. Pri graničnom stanju pojave dominantnog mehanizma sloma, vrijednosti relativnog međukatnog pomaka u intervalu su od 0,27 do 0,39% za pozitivni te od 0,27 do 0,41% za negativni smjer opterećenja. Najveće područje vrijednosti relativnog međukatnog pomaka je pri graničnom stanju pred rušenje. Interval je vrijednosti od 1 do 1,7% pri pozitivnom i od 0,88 do 1,66% pri negativnom smjeru opterećenja.

S druge strane, kod uzoraka kod kojih je ispun izvedena od vapnenog morta, Slika 6.142 b), vidljivo je preklapanje područja ponašanja pri graničnom stanju pojave prve značajne pukotine i pojave dominantnog mehanizma sloma ispuna. Navedena pojava može se pripisati relativno maloj čvrstoći ispuna gdje je u pravilu pojava prvih značajnih pukotina u ispunu u koraku neposredno prije ili u istom koraku opterećenja pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna što je slučaj kod ispitnog uzorka *O1_cvm*. Vrijednosti relativnih međukatnih pomaka pri graničnom stanju pojave prve značajne pukotine u intervalu su od 0,06 do 0,16% za pozitivni te od 0,07 do 0,16% za negativni smjer opterećenja. Pri graničnom stanju pojave dominantnog mehanizma sloma, vrijednosti relativnog međukatnog pomaka u intervalu su od 0,08 do ,016% za pozitivni te od 0,16 do 0,22% za negativni smjer opterećenja. Tu je također najveće područje vrijednosti relativnog međukatnog pomaka pri graničnom stanju pred rušenje. Interval je vrijednosti od 1,07 do 1,8% pri pozitivnom te od 1,06 do 1,72% pri negativnom smjeru opterećenja.

Manje vrijednosti u navedenim intervalima odnose se na uzorke kod kojih je ispun izvedena od šupljih glinenih zidnih elemenata neovisno o vrsti morta.



Slika 6.142 a) *Prikaz područja graničnih stanja ispitnih uzoraka skupine O1 kod kojih je ispun izvedena od morta opće namjene*



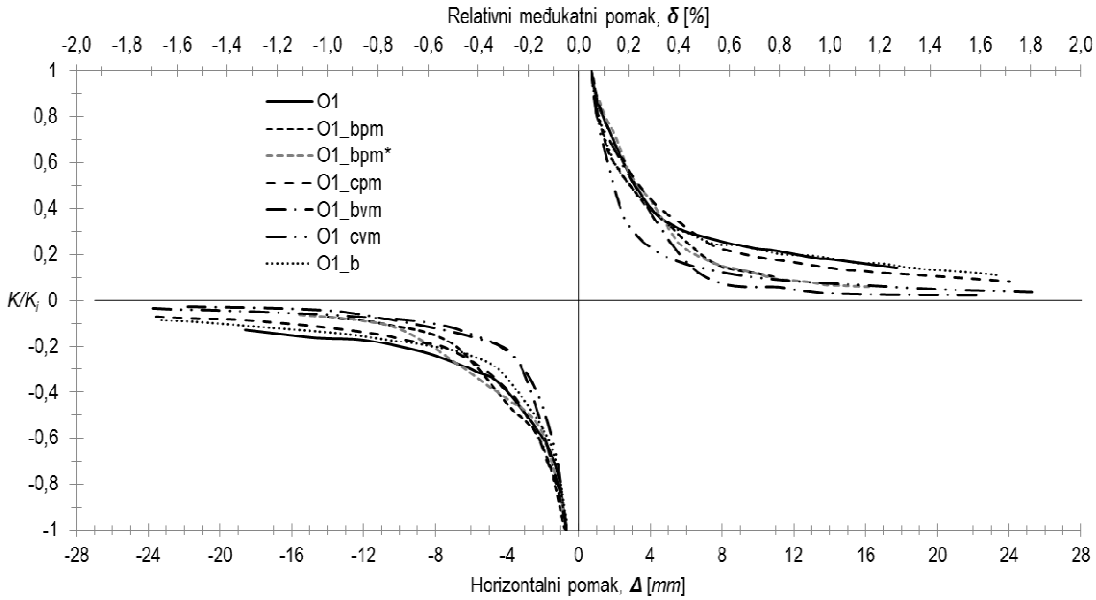
Slika 6.142 b) *Prikaz područja graničnih stanja ispitnih uzoraka skupine O1 kod kojih je ispun izvedena od vapnenog morta*

Zaključno, područja graničnih stanja ispitnih uzoraka skupine *O1*, ovisno o vrsti motra, mogu se definirati vrijednostima navedenim u Tablici 6.17. Vrijednosti prikazane tablicom određene su na temelju minimalnih i maksimalnih vrijednosti relativnog međukatnog pomaka pri pozitivnom i negativnom smjeru opterećenja.

Tablica 6.17 *Područja graničnih stanja ispitnih uzoraka skupine O1*

	Vrijednost relativnog međukatnog pomaka, δ [%]	
Granično stanje	Vapneni mort	Mort opće namjene
Granično stanje pojave prve značajne pukotine	0,06 - 0,16	0,08 - 0,17
Granično stanje pojave dominantnog mehanizma sloma	0,08 - 0,22	0,27 - 0,41
Granično stanje pred rušenje	1,06 - 1,80	0,88 - 1,70

Degradacija krutosti ispitnih uzoraka skupine *O1*, prikazana Slikom 6.143, određena je na način da je za svaki uzorak sekantna krutost pri svakom koraku opterećenja normalizirana u odnosu na početnu krutost K_i. Neovisno o tipu ispuna, vrijednosti normaliziranog odnosa asimptotički se približavaju horizontalnoj osi kojom su definirane vrijednosti horizontalnog pomaka. U odnosu na prazan okvir, u području odgovora uzoraka nakon vrijednosti relativnog međukatnog pomaka u iznosu od 0,4%, vidljiviji je naglašeniji pad krutosti kod svih uzoraka sa zidanim ispunom neovisno o smjeru opterećenja. Tu je, kao i kod horizontalne nosivosti, vidljiv utjecaj vrste morta. Naime, kod uzoraka kod kojih je ispun izvedena od vapnenog morta, neovisno o tipu zidnog elementa, pad sekantne krutosti u području cijelog odgovora izraženiji je u odnosu na prazan okvir.



Slika 6.143 *Prikaz degradacije sekantne krutosti ispitnih uzoraka skupine O1 u ovisnosti o horizontalnom pomaku*

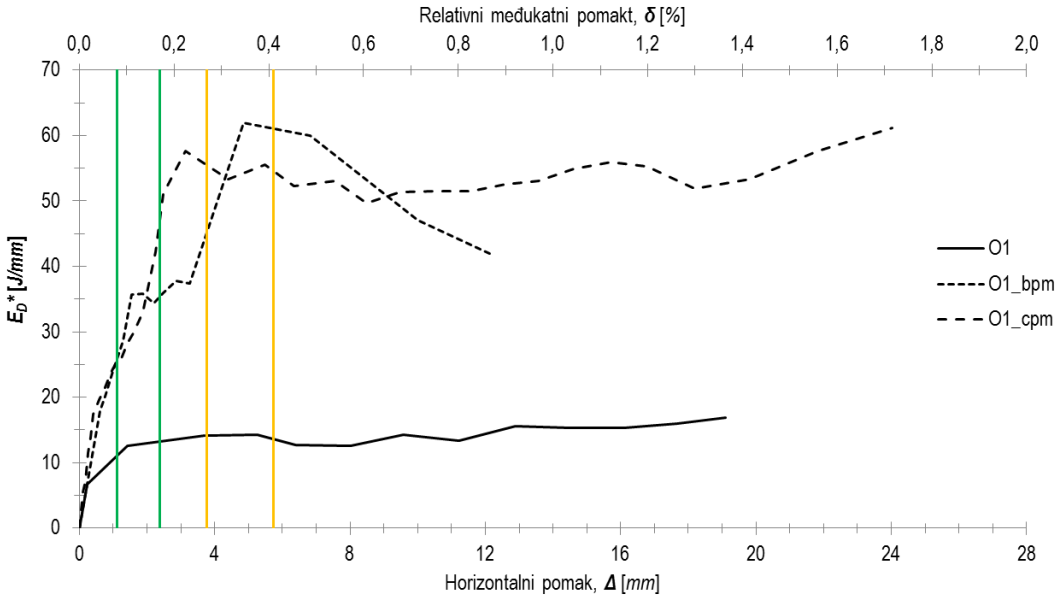
6.6.1.2. Ocjena doprinosa konstituenata sustava dinamičkim karakteristikama uzoraka

Kvantitativan doprinos konstituenata ispitnih uzoraka skupine *O1* disipaciji energije po jedinici pomaka prikazan je Tablicom 6.18 u ovisnosti o karakterističnim točkama ponašanja ispitnih uzoraka. S obzirom da je nemoguće promatrati disipaciju energije po jedinici pomaka pri pozitivnom i negativnom

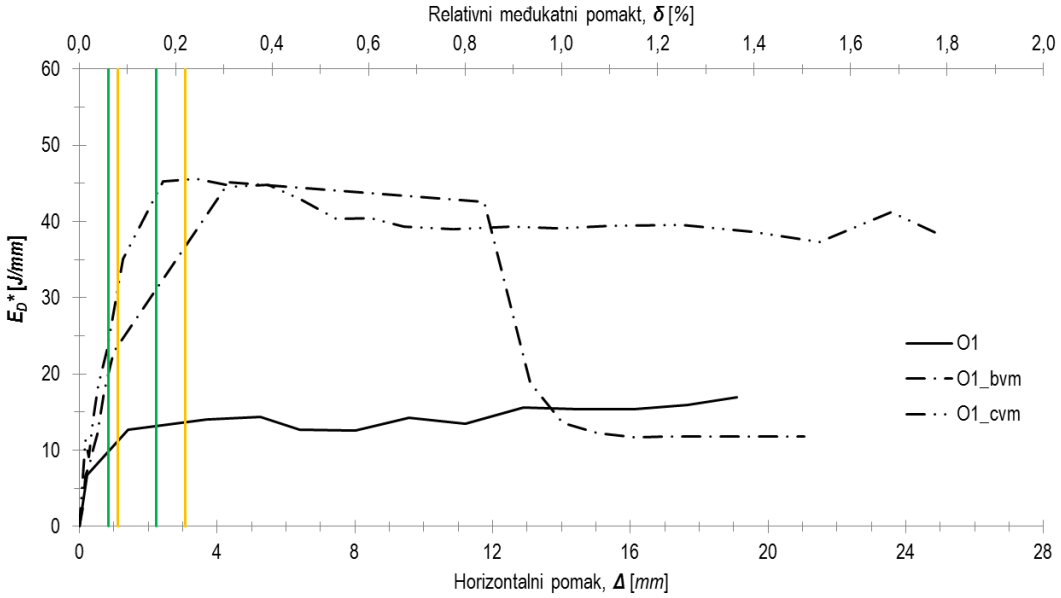
smjeru opterećenja, doprinosi pri promatranim graničnim stanjima određeni su u odnosu na vrijednosti relativnih međukatnih pomaka definiranih Tablicom 6.17 i Slikom 6.144 a) i b). Prikazane vrijednosti određene su u odnosu na tip ispuna, a promatran je samo prvi ciklus opterećenja. Iz razloga navedenih u prethodnom odlomku, tu je promatrano samo granično stanje pojave prve značajne pukotine i dominantnog mehanizma sloma ispuna.

Tablica 6.18 *Prikaz doprinosa konstituenata uzoraka skupine O1 disipaciji energije po jedinici pomaka*

Ispitni uzorak	Granično stanje pojave prve značajne pukotine	Granično stanje pojave dominantnog mehanizma sloma
O1_bpm		
Ukupna vrijednost disipirane energije po jedinici pomaka, E_D^* [*J/mm*]	26,1 - 35,4	45,3 - 61,1
Doprinos okvira, [*%*]	37,3 - 42,6	22,4 - 31,1
Doprinos ispune, [*%*]	57,4 - 62,7	68,9 - 77,6
O1_cpm		
Ukupna vrijednost disipirane energije po jedinici pomaka, E_D^* [*J/mm*]	25,2 - 47,3	54,6 - 55,4
Doprinos okvira, [*%*]	27,9 - 44,0	25,1 - 25,4
Doprinos ispune, [*%*]	56,0 - 72,1	74,6 - 74,9
O1_bvm		
Ukupna vrijednost disipirane energije po jedinici pomaka, E_D^* [*J/mm*]	23,7 - 32,0	41,3 - 44,6
Doprinos okvira, [*%*]	41,2 - 46,8	30,7 - 34,1
Doprinos ispune, [*%*]	53,2 - 58,8	65,9 - 69,3
O1_cvm		
Ukupna vrijednost disipirane energije po jedinici pomaka, E_D^* [*J/mm*]	31,3 - 44,9	44,3 - 45,3
Doprinos okvira, [*%*]	29,4 - 35,5	30,9 - 31,1
Doprinos ispune, [*%*]	64,5 - 70,6	68,9 - 69,1



Slika 6.144 a) *Prikaz disipacije energije po jedinici pomaka uzoraka skupine O1 kod kojih je ispun izvedena od morta opće namjene*

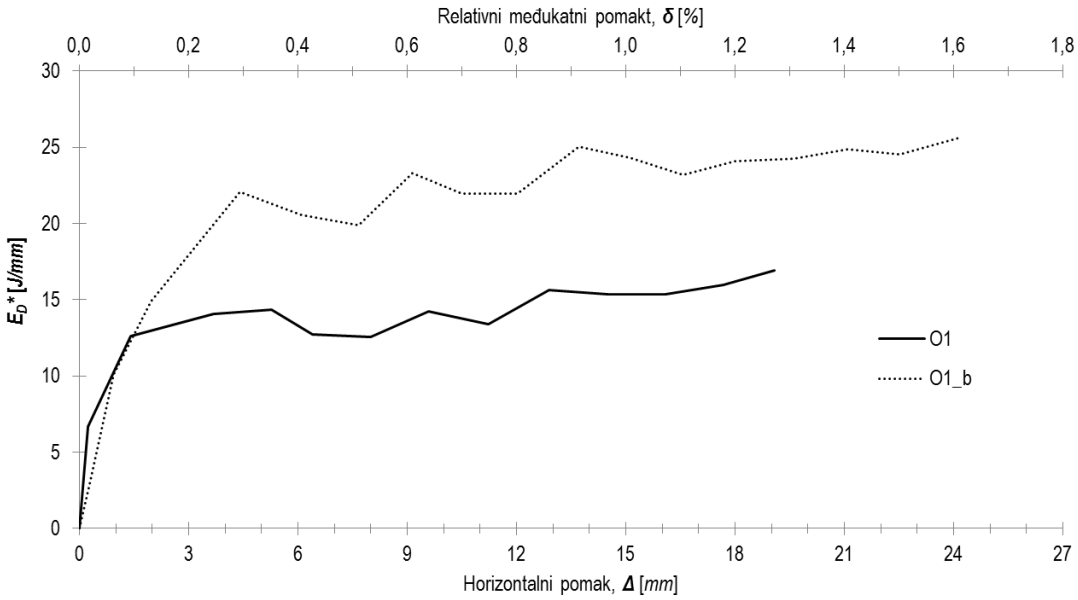


Slika 6.144 b) *Prikaz disipacije energije po jedinici pomaka uzoraka skupine O1 kod kojih je ispun izvedena od vapnenog morta*

Neovisno o vrsti ispuna, doprinosi konstituenata sustava i intervali vrijednosti približno su jednaki pri promatranim graničnim stanjima. Sukladno povećanju ukupno disipirane energije povećava se i doprinos ispuna. Međutim, kod uzoraka kod kojih je ispun izvedena od punih glinenih zidnih elemenata, interval vrijednosti doprinosa ispuna u manjem su rasponu u odnosu na ispitne uzorke kod kojih je ispun izvedena od šupljih glinenih zidnih elemenata što je posebno naglašeno pri graničnom stanju pojave dominantnog mehanizma sloma. Iako promatrana područja graničnih stanja ne otkrivaju

mnogo detalja, iz usporedbe prikazane Slikom 6.144 a) i b) vidljiv je utjecaj vrste ispuna na disipaciju energije u području odgovora nakon graničnog stanja pojave dominantnog mehanizma sloma. Naime, neovisno o vrsti morta, kod ispitnih uzoraka kod kojih je ispun izvedena od šupljih glinenih zidnih elemenata u području odgovora nakon pojave maksimalne vrijednosti promatrane veličine, uočen je postepeni pad vrijednosti. To je posebno naglašeno kod ispitnog uzorka *O1_bvm* gdje doprinos ispuna u području odgovora ispitnog uzorka nakon vrijednosti relativnog međukatnog pomaka u iznosu od 1% iščezava. Suprotno, kod uzoraka kod kojih je ispun izveden od punih glinenih zidnih elemenata, pad vrijednosti disipacije energije po jedinici pomaka u području odgovora nakon maksimalno zabilježene vrijednosti zanemariv je. Međutim, potrebno je istaknuti da je maksimalna vrijednost promatrane veličine u slučaju ispitnog uzorka *O1_cpm* dobivena u području odgovora neposredno prije sloma okvira uzorka. Općenito, ukoliko se zanemare prethodna opažanja, maksimalne vrijednosti promatrane veličine kod ispitnih uzoraka kod kojih je ispun izvedena od morta opće namjene, u području su između graničnog stanja pojave prve značajne pukotine i dominantnog mehanizma sloma kao što je u slučaju uzorka *O1_cpm* ili u području graničnog stanja dominantnog mehanizma sloma (ispitni uzorak *O1_bpm*). Međutim, navedeno djelomično vrijedi i za ispitne uzorke kod kojih je ispun izvedena od vapnenog morta. Naime, maksimalna vrijednost promatrane veličine u slučaju ispitnog uzorka *O1_cvm* u području je graničnog stanja pojave dominantnog mehanizma sloma dok je kod ispitnog uzorka *O1_bmv* u području odgovora nakon navedenog graničnog stanja.

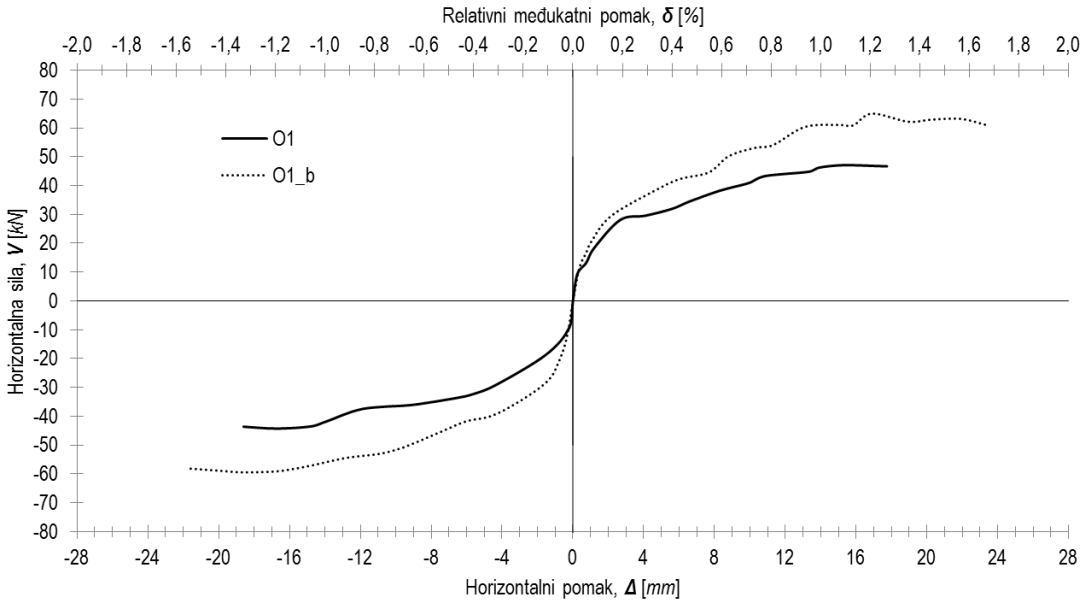
Iako, zbog nemogućnosti definiranja graničnih stanja, Tablicom 6.18 nije prikazana usporedba doprinosa konstituenata ispitnog uzorka *O1_b*, iz rezultata prikazanih Slikom 6.145, vidljivo je, u odnosu na prazan okvir, povećanje disipacije energije gotovo u području cijelog odgovora.



Slika 6.145 *Prikaz disipacije energije ispitnog uzorka O1_b*

Navedeno povećanje vrijednosti disipacije energije u području usporedivih vrijednosti (δ > 0,1 %) reda je veličine 1,4 puta.

Povećanje disipacije energije približno je jednako povećanju maksimalne horizontalne nosivosti praznog okvira koje je pri pozitivnom smjeru opterećenja reda veličine 1,4, a pri negativnom smjeru 1,3 puta. S druge strane, povećanje početne krutosti zanemarivo je. Usporedba primarnih krivulja praznog okvira i ispitnog uzorka *O1_b* prikazana je Slikom 6.146. Međutim, potrebno je napomenuti da tijekom ispitivanja uzorka *O1_b* nije uočeno značajno oštećenje okvira uzorka iako su vrijednosti relativnog međukatnog pomaka pri zadnjem koraku opterećenja veće od vrijednosti relativnog međukatnog pomaka praznog okvira pri kojem je došlo do sloma. Uočeno povećanje duktilnosti i disipacije energije te zanemarivo povećanje početne krutosti upućuje na mogućnost primjene promatrane vrste ispuna prilikom ojačanja postojećih okvirnih konstrukcija. Dodatno, uočeno povećanje horizontalne nosivosti može se promatrati kao određena razina sigurnosti u odnosu na prazan okvir. Navedeno zahtijeva dodatna ispitivanja posebno po pitanju osiguranja vanravninske stabilnost ispuna iako tijekom provedenih ispitivanja nisu uočeni problemi po tom pitanju.



Slika 6.146 *Usporedba primarnih krivulja praznog okvira i ispitnog uzorka O1_b*

Usporedba osnovnih perioda osciliranja ispitnih uzoraka prikazana je u Tablici 6.19 u ovisnosti o smjeru opterećenja. Vrijednosti promatrane veličine određene su pomoću izraza (6.4). Sukladno povećanju početne krutosti ispitnih uzoraka sa zidanim ispunom uočeno je smanjenje vrijednosti osnovnog perioda osciliranja. Navedeno smanjenje srednje je vrijednosti od približnih 2,7 puta za sve uzorke osima za *O1_b*. Kod navedenog uzorka smanjenje vrijednosti iznosi svega 1,08 puta što je

zanemarivo. Potrebno je istaknuti da, za razliku od prethodno opisanih karakteristika ispitnih uzoraka, nije uočena poveznica, tj. utjecaj vrste zidanog ispuna na vrijednosti promatrane veličine. Iako je prema Slici 6.143 vidljiv utjecaj vrste zidanog ispuna na pad sekantne krutosti ispitnih uzoraka uslijed povećanja vrijednosti horizontalnog pomaka, početna krutost određena ispitivanjem približno je jednaka za sve ispitne uzorke sa zidanim ispunom. Premda nije jasan utjecaj vrste zidanog ispuna na vrijednost početne krutosti sustava i osnovnog perioda osciliranja, uočeno je smanjenje u skladu s postojećim rezultatima ispitivanja (*Poglavlje 2*).

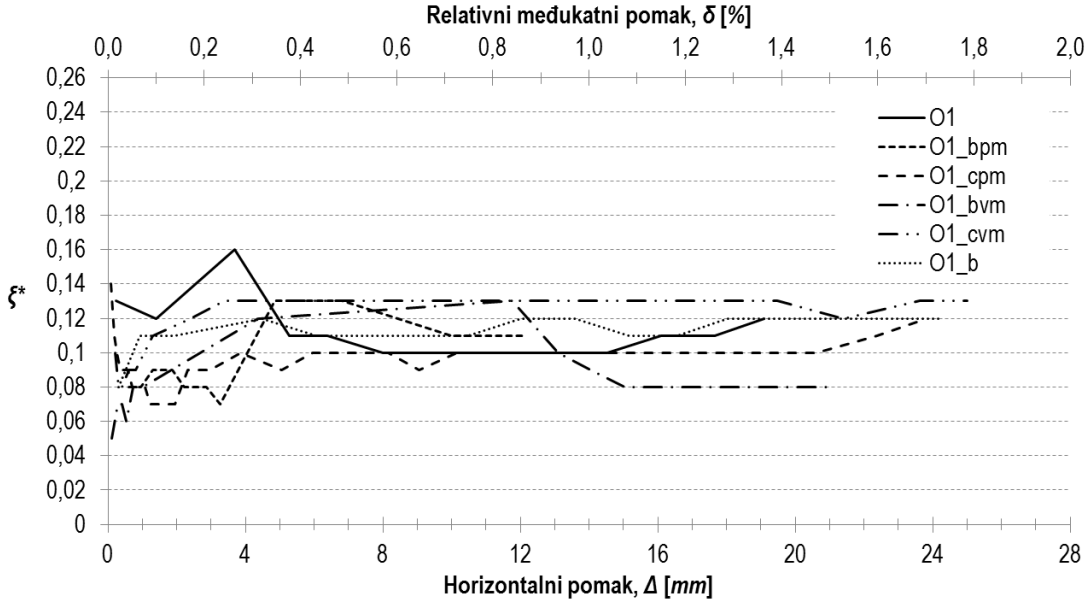
Tablica 6.18 *Usporedba osnovnih perioda osciliranja uzoraka skupine O1*

Ispitni uzorak	*Pozitivan smjer opterećenja T [s]*	*Negativan smjer opterećenja T [s]*
O1	0,353	0,441
O1_bpm	0,138	0,160
*O1_bpm**	0,122	0,161
O1_cpm	0,152	0,157
O1_bvm	0,141	0,140
O1_cvm	0,190	0,192
O1_b	0,340	0,384

Usporedba ovisnosti prigušenja ispitnih uzoraka skupine *O1* o horizontalnom pomaku prikazana je Slikom 6.147. Prikazane vrijednosti odnose se na prve cikluse opterećenja i određene su na temelju apsorbirane energije definirane kao uloženi rad pri deformiranju uzoraka. Navedeno je odabrano iz razloga što su prilikom određivanja odnosa disipirane i apsorbirane energije, u slučaju gdje je apsorbirana energija određena kao potencijalna deformacijska energija, kod pojedinih uzoraka pri određenim koracima opterećenja dobivene vrijednosti veće od 1 što nije logičan rezultat.

Iako ne postoji određena matematička veza između vrijednosti prigušenja i horizontalnog pomaka, kod ispitnih uzoraka kod kojih je ispun izvedena od šupljih glinenih zidnih elemenata u području odgovora nakon pojave dominantnog mehanizma sloma ispuna, uočeno je povećanje vrijednosti prigušenja. Navedeno povećanje vrijednosti sukladno je području odgovora do kojega ispun sudjeluje u prijenosu horizontalnog opterećenja što je posebno naglašeno kod ispitnog uzorka *O1_bvm*. Tako je, nakon vršne vrijednosti prigušenja pri relativnom međukatnom pomaku u iznosu od približnih 0,8% pa do vrijednosti od 1%, uočen značajan pad nakon čega su dobivene približno jednake vrijednosti promatrane veličine. Uočena pojava izostaje kod uzoraka kod kojih je ispun izvedena od pune glinene opeke, a vrijednosti prigušenja približnih su iznosa i nakon područja graničnog stanja pojave dominantnog mehanizma sloma. Neovisno o vrsti ispuna, a u odnosu na vrijednosti određene

ispitivanjem praznog okvira, nije uočen značajan doprinos vrijednosti promatrane veličine, posebice u području odgovora do vrijednosti relativnog međukatnog pomaka u iznosu od približnih 0,3% gdje su vrijednosti određene ispitivanjem praznog okvira najvećih iznosa.



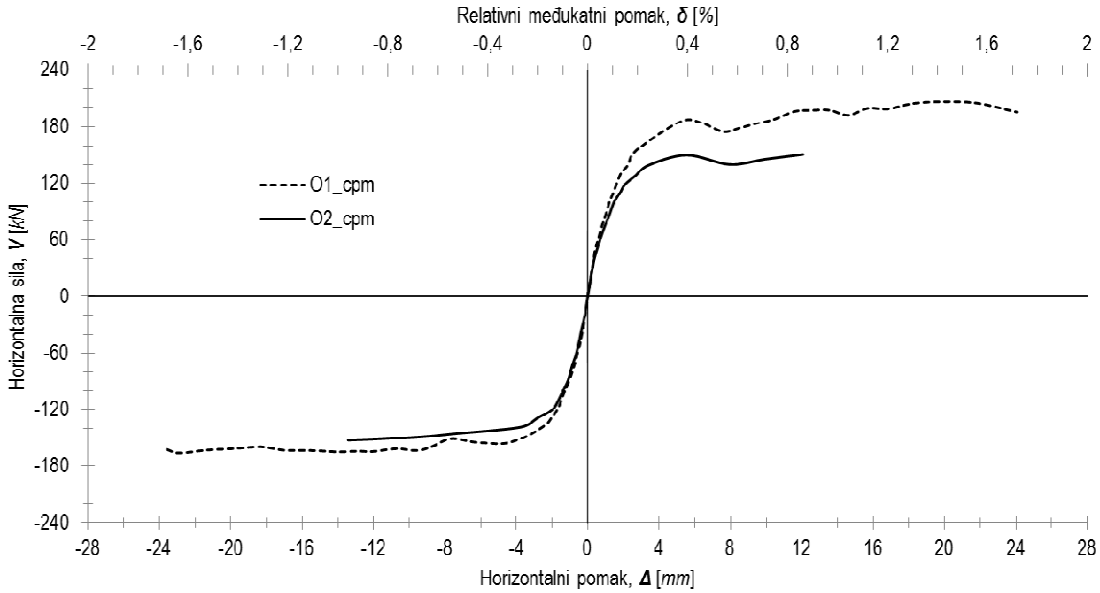
Slika 6.147 *Usporedba prigušenja uzoraka skupine O1*

6.6.2. Skupina uzoraka *O2*

S obzirom da se skupina *O2* sastoji od samo jednoga uzorka, usporedba konstrukcijskih i dinamičkih karakteristika izvršena je u odnosu na ispitni uzorak *O1_cpm*. Odabranom usporedbom omogućena je ocjena utjecaja količine poprečne armature na ponašanje uzoraka s obzirom da su svi ostali parametri identični (*Poglavlje 3*, Tablica 3.1).

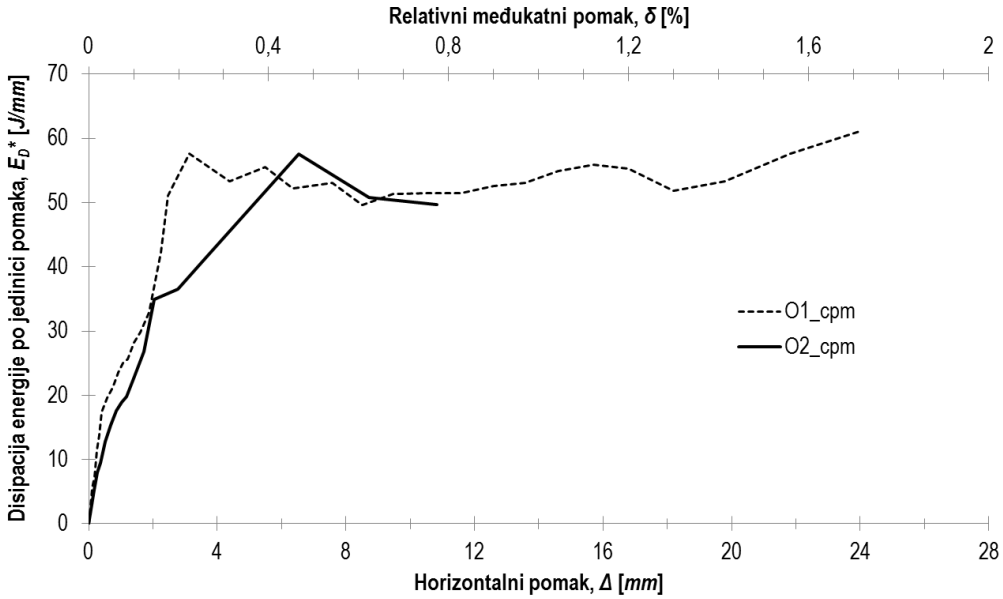
Primarne krivulje odgovora ispitnih uzoraka (Slika 6.148) slične su po pitanju početne krutosti i horizontalne nosivosti pri graničnim stanjima pojave prve značajne pukotine i pojave dominantnog mehanizma sloma ispuna s nešto naglašenijim razlikama pri pozitivnom smjeru opterećenja. Odstupanje vrijednosti horizontalne nosivosti, pri graničnom stanju pojave prve značajne pukotine, iznosi 15%, a pri graničnom stanju pojave dominantnog mehanizma sloma 20%. S druge strane, pri negativnom smjeru opterećenja, odstupanja pri graničnom stanju pojave su prve značajne pukotine 12%, a pri graničnom stanju pojave dominantnog mehanizma sloma 6%. Navedena odstupanja su određena u odnosu na vrijednosti dobivene ispitivanjem uzorka *O1_cpm*. Najznačajnija je razlika u ponašanju ispitnih uzoraka pri graničnom stanju pred rušenje, a odnosi se na vrijednosti relativnog međukatnog pomaka pri slomu okvira. Tako je, u odnosu na ispitni uzorak *O1_cpm*, slom uzorka *O2_cpm* zabilježen pri gotovo dvostruko manjoj vrijednosti relativnog međukatnog pomaka što je jasan

pokazatelj utjecaja količine poprečne armature u stupovima okvira na globalni odgovor ispitnih uzoraka. Posmični slom stupova oba uzorka dogodio se na jednakom mjestu (lijevi stup, pri čvoru okvira).

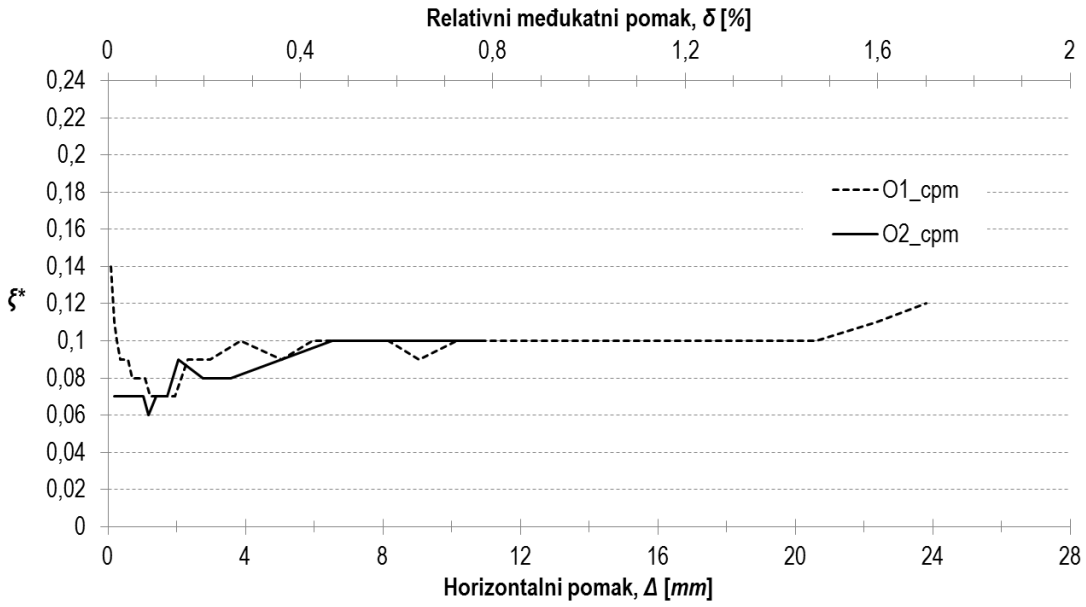


Slika 6.148 *Usporedba primarnih krivulja odgovora uzoraka O1_cpm i O2_cpm*

Disipacija energije po jedinici pomaka (Slika 6.149), kao i ovisnost prigušenja o horizontalnom pomaku (Slika 6.150), približno su jednakih iznosa u usporedivom području odgovora ispitnih uzoraka. Razlike u vrijednostima vlastitog perioda osciliranja zanemarive su gdje je navedena veličina pri pozitivnom smjeru opterećenja ispitnog uzorka *O2_cpm* u iznosu od 0,125 *s*, a pri negativnom 0,123 *s*.



Slika 6.149 *Usporedba disipacije energije po jedinici pomaka uzoraka O1_cpm i O2_cpm*



Slika 6.150 *Usporedba ovisnosti prigušenja uzoraka O1_cpm i O2_cpm o horizontalnom pomaku*

6.6.3. Skupina uzoraka *O3*

6.6.3.1. Ocjena doprinosa konstituenata sustava konstrukcijskim karakteristikama uzoraka

Doprinosi konstituenata sustava u promatranim karakterističnim točkama odgovora ispitnih uzoraka skupine *O3* prikazani su Tablicama 6.19 i 6.20 u ovisnosti o smjeru opterećenja. Tu su, kao i kod uzoraka skupine *O1*, promatrani parovi vrijednosti horizontala sila – pomak koji definiraju granično stanje pojave prve značajne pukotine (δ_{cr}, V_{cr}) i granično stanje pojave dominantnog mehanizma sloma ispuna (δ_{cr}, V_{cr}). Doprinose pri graničnom stanju pred rušenje nije moguće odrediti iz razloga što je pretpostavljeno da jedan od konstituenata sustava gubi horizontalnu nosivost.

Kao i kod ispitnih uzoraka skupine *O1*, uočen je doprinos ispuna horizontalnoj nosivosti sustava i to neovisno o tipu i smjeru opterećenja. Iako su doprinosi u odnosu na promatrana granična stanja približno jednaki, rezultati ukazuju na neznatno veći doprinos ispuna izvedenog od punih glinenih zidnih elemenata (Tablica 6.19 i 6.20). Neovisno o promatranom graničnom stanju i tipu ispuna, doprinos istog u intervalu je od 53 do 60%, a okvira od 40 do 47%. U odnosu na ispitne uzorke skupine *O1,* prethodno navedene vrijednosti upućuju na povećanje doprinosa okvira i smanjenje doprinosa ispuna horizontalnoj nosivosti sustava.

Sukladno navedenom, povećana je i vrijednost horizontalne nosivosti okvira pri promatranim graničnim stanjima u odnosu na maksimalno zabilježenu vrijednost. Tako je, pri graničnom stanju pojave prve značajne pukotine u ispunu, nosivost okvira u intervalu od 45 do 51% pri pozitivnom te od

61 do 62% maksimalno zabilježene vrijednosti pri negativnom smjeru opterećenja. Pri graničnom stanju pojave dominantnog mehanizma sloma ispuna horizontalna nosivost okvira u intervalu je od 59 do 78% pri pozitivnom te od 77 do 89% maksimalno zabilježene vrijednosti pri negativnom smjeru opterećenja. Ukoliko se, neovisno o smjeru opterećenja, usporede intervali vrijednosti horizontalne nosivosti okvira ispitnih uzoraka skupina *O1* i *O3*, kod kojih je ispun izveden mortom opće namjene, povećanje udjela horizontalne nosivosti praznog okvira, kod uzoraka skupine *O3* u području graničnog stanja pojave prvih značajnih pukotina, iznosi prosječno 8%, a pri graničnom stanju pojave dominantnog mehanizma sloma 10%.

Tablica 6.19 *Prikaz doprinosa konstituenata sustava u promatranim karakterističnim točkama odgovora uzoraka skupine O3 pri pozitivnom smjeru opterećenja*

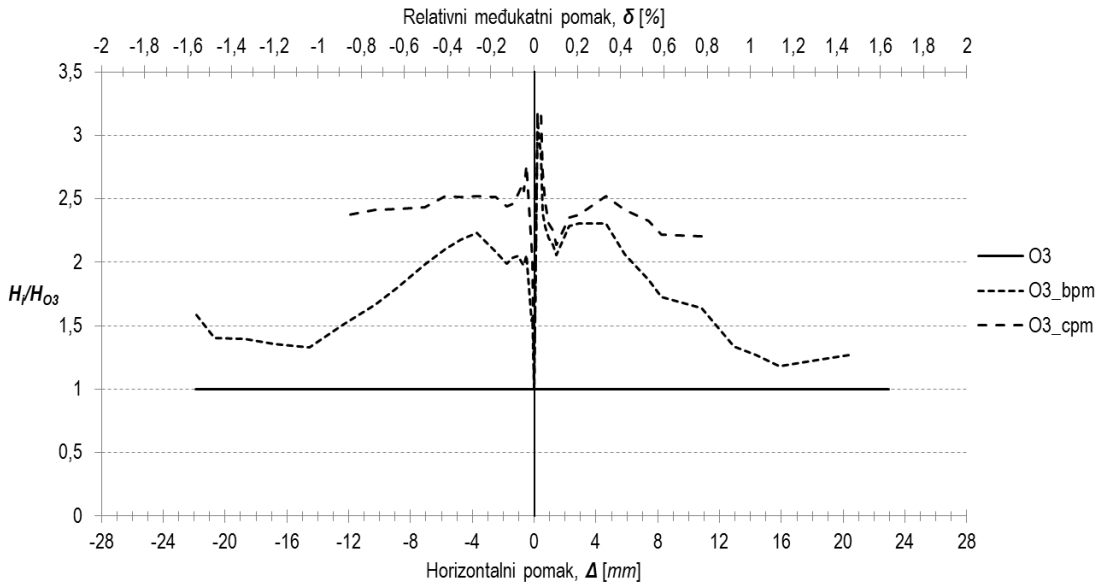
	Ispitni uzorak	
	O3_bpm	*O3_cpm*
δ_{cr} [%]	0,12	0,16
V_{cr} [kN]	152,1	189,0
Doprinos ispune, [%]	**53,4**	**57,8**
Doprinos okvira, [%]	**46,6**	**42,2**
δ_{max} [%]	0,27	0,56
V_{max} [kN]	219,2	279,9
Doprinos ispune, [%]	**57,7**	**55,8**
Doprinos okvira, [%]	**42,3**	**44,2**
δ_{col} [%]	0,89	-
V_{col} [kN]	191,1	-

Tablica 6.20 *Prikaz doprinosa konstituenata sustava u promatranim karakterističnim točkama odgovora uzoraka skupine O3 pri negativnom smjeru opterećenja*

	Ispitni uzorak	
	O3_bpm	*O3_cpm*
δ_{cr} [%]	0,19	0,18
V_{cr} [kN]	171,4	200,2
Doprinos ispune, [%]	**53,0**	**60,4**
Doprinos okvira, [%]	**47,0**	**39,6**
δ_{max} [%]	0,36	0,56
V_{max} [kN]	219,8	280,2
Doprinos ispune, [%]	**54,2**	**58,7**
Doprinos okvira, [%]	**45,8**	**41,3**
δ_{col} [%]	1,0	1,35
V_{col} [kN]	174,0	298,9

Normalizacija horizontalne nosivosti ispitnih uzoraka, u odnosu na vrijednosti određene ispitivanjem praznog okvira, prikazana je Slikom 6.151. Navedenim prikazom omogućena je

kvantitativna ocjena doprinosa ispune uzoraka horizontalnoj nosivosti sustava u području cijelog odgovora praznog okvira.

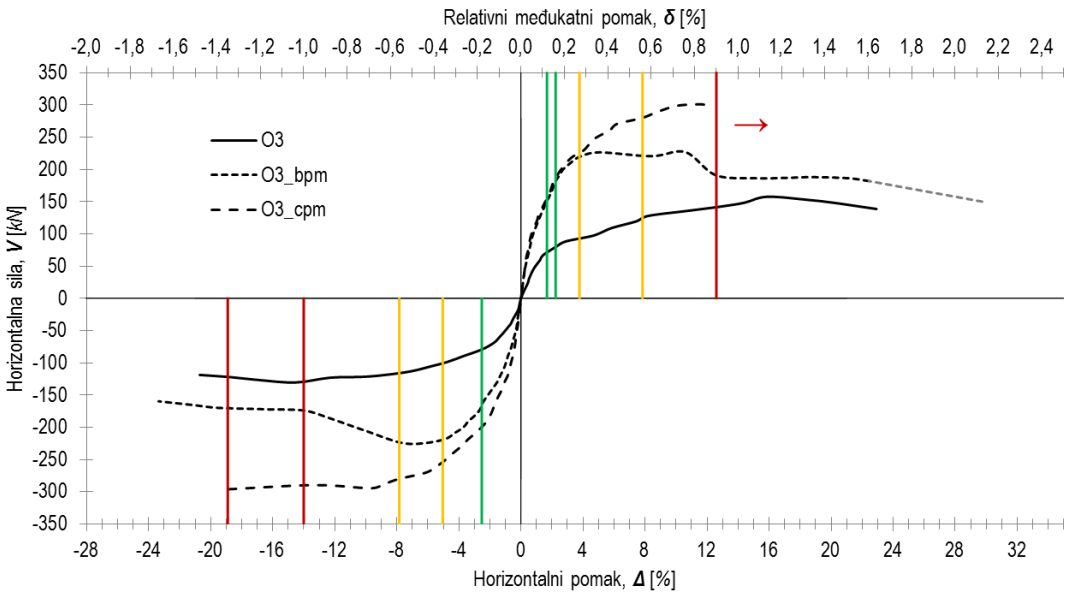


Slika 6.151 *Prikaz normalizirane nosivosti ispitnih uzoraka skupine O3*

Iz prikazane usporedbe vidljiv je značajan doprinos ispuna horizontalnoj nosivosti sustava u području odgovora ispitnih uzoraka do vrijednosti relativnog međukatnog pomaka u iznosu od 0,5%. Nakon navedene vrijednosti relativnog međukatnog pomaka doprinos ispuna je i dalje značajan, ali ne i toliko naglašen. Vršne vrijednosti normaliziranog odnosa mogu se zanemariti iz razloga što su u području odgovora ispitnih uzoraka s vrijednošću relativnog međukatnog pomaka manjom od 0,05%. Pomak ispitnih uzoraka pri navedenoj vrijednosti relativnog međukatnog pomaka iznosi svega 0,7*mm*, pri čemu se vršne vrijednosti mogu pripisati osjetljivosti mjernih instrumenata. Čini se razumnim promatrati vrijednosti normaliziranog odnosa u području odgovora ispitnih uzoraka s vrijednošću relativnog međukatnog pomaka većom od 0,1%. Tu je, kao i kod ispitnih uzoraka skupine *O1*, također vidljiv utjecaj tipa zidnog elementa na degradaciju nosivosti u području odgovora ispitnih uzoraka nakon pojave dominantnog mehanizma sloma ispuna.

Shematski prikaz područja graničnih stanja ispitnih uzoraka skupine O3 dan je Slikom 6.152, a definirana su bojama punih linija na način opisan u *Potpoglavlju 6.6.1.1*. Za razliku od skupine uzoraka *O1*, područje graničnog stanja pojave prve značajne pukotine u ispunu je u manjem, a područje graničnog stanja pojave dominantnog mehanizma sloma u približno jednakom intervalu vrijednosti. Tako je pri graničnom stanju pojave prve značajne pukotine vrijednost relativnog međukatnog pomaka u intervalu od 0,12 do 0,16% za pozitivni te od 0,18 do 0,19% za negativni smjer opterećenja. S druge strane, pri graničnom stanju pojave dominantnog mehanizma sloma ispuna, vrijednost relativnog međukatnog pomaka u intervalu je od 0,27 do 0,56% pri pozitivnom i od 0,36 do 0,56% pri negativnom

smjeru opterećenja. Područje graničnog stanja pred rušenje je moguće odrediti samo za negativni smjer opterećenja gdje su vrijednosti relativnog međukatnog pomaka u intervalu od 1,0 do 1,35%. Za pozitivni smjer opterećenja pretpostavljeno je da su vrijednosti relativnog međukatnog pomaka ≥ 0,9%. Sažeti prikaz područja graničnih stanja ispitnih uzoraka skupine *O3* dan je Tablicom 6.21, neovisno o smjeru opterećenja i tipu zidnog elementa.

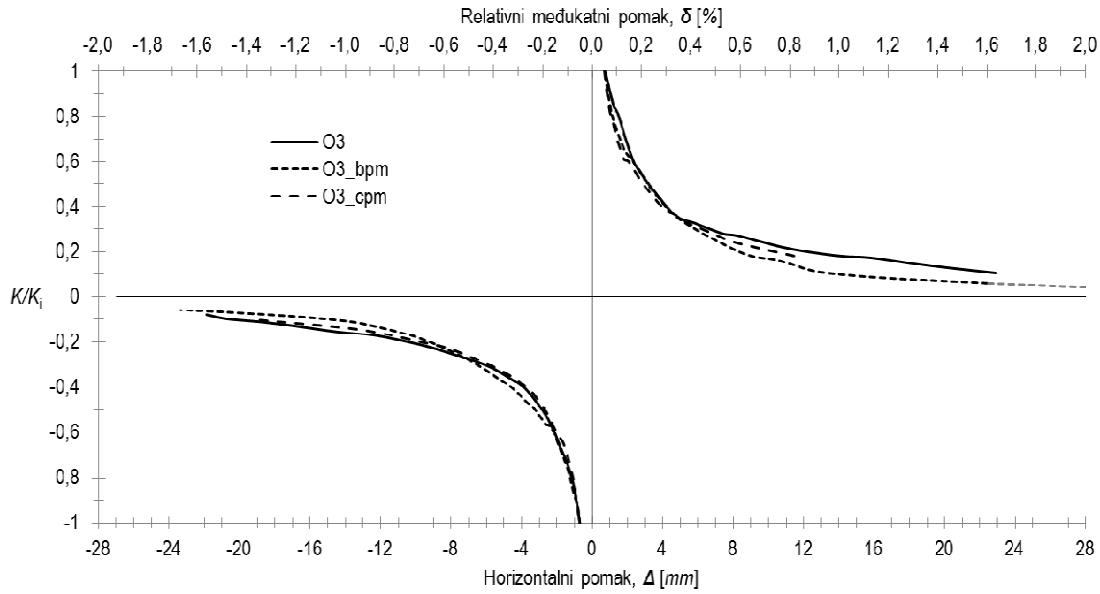


Slika 6.152 *Prikaz područja graničnih stanja ispitnih uzoraka skupine O3*

Tablica 6.21 *Područja graničnih stanja uzoraka skupine O3*

Granično stanje	Vrijednost relativnog međukatnog pomaka, δ [%]
Granično stanje pojave prve značajne pukotine u ispunu	0,12 - 0,19
Granično stanje pojave dominantnog mehanizma sloma ispuna	0,27 - 0,56
Granično stanje pred rušenje	0,9 - 1,3

Degradacija krutosti ispitnih uzoraka skupine *O3* prikazana je Slikom 6.153 i određena na način da je za svaki uzorak sekantna krutost pri svakom koraku opterećenja normalizirana u odnosu na početnu krutost K_i. Neovisno o tipu zidnog elementa, vrijednosti normaliziranog odnosa asimptotički se približavaju horizontalnoj osi kojom su definirane vrijednosti horizontalnog pomaka. Jednako kao i kod skupine uzoraka *O1*, u području odgovora ispitnih uzoraka nakon vrijednosti relativnog međukatnog pomaka u iznosu od 0,4%, pad sekantne krutosti uzoraka s ispunom izraženiji je u odnosu na prazan okvir. Navedeno vrijedi samo za pozitivni smjer opterećenja dok je pri negativnom smjeru pad sekantne krutosti svih uzoraka uključujući i prazan okvir približno jednak.



Slika 6.153 *Prikaz degradacije sekantne krutosti ispitnih uzoraka skupine O3 u ovisnosti o horizontalnom pomaku*

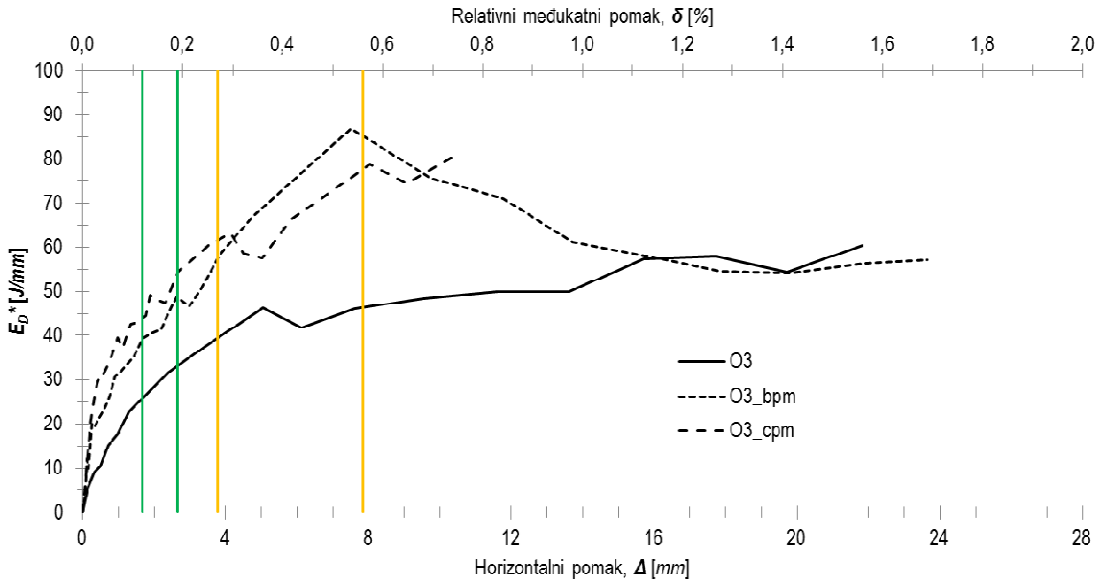
6.6.3.2. Ocjena doprinosa konstituenata sustava dinamičkim karakteristikama uzoraka

Kvantitativan doprinos konstituenata ispitnih uzoraka skupine *O3* disipaciji energije, po jedinici pomaka, prikazan je Tablicom 6.22 u ovisnosti o promatranim graničnim stanjima i u odnosu na vrijednosti relativnih međukatnih pomaka definiranih Tablicom 6.21. Prikazane vrijednosti odnose se na prve cikluse opterećenja, a određene su za granično stanje pojave prve značajne pukotine i dominantnog mehanizma sloma ispuna. Granično je stanje pred rušenje izostavljeno iz razloga što je pretpostavljeno da jedan od elemenata sustava gubi nosivost. Intervali vrijednosti disipirane energije, po jedinici pomaka uzoraka skupine *O3,* prikazani su Slikom 6.154 u ovisnosti o područjima graničnih stanja.

Tablica 6.22 *Prikaz doprinosa konstituenata uzoraka skupine O3 disipaciji energije po jedinici pomaka*

Ispitni uzorak	Granično stanje pojave prve značajne pukotine	Granično stanje pojave dominantnog mehanizma sloma
O3_bpm		
Ukupna vrijednost disipirane energije po jedinici pomaka, E_D^* [*J/mm*]	39,3 - 48,7	57,3 - 85,3
Doprinos okvira, [*%*]	65,6 - 68,2	58,5 - 61,2
Doprinos ispune, [*%*]	31,8 - 34,4	38,2 - 41,5
O3_cpm		
Ukupna vrijednost disipirane energije po jedinici pomaka, E_D^* [*J/mm*]	44,1 - 54,2	61,5 - 77,6
Doprinos okvira, [*%*]	54,3 - 68,7	59,8 - 64,0

Doprinos ispune, [%]	31,3 - 45,7	36,0 - 40,2



Slika 6.154 *Prikaz disipacije energije po jedinici pomaka uzoraka skupine O3 u odnosu na područja promatranih graničnih stanja*

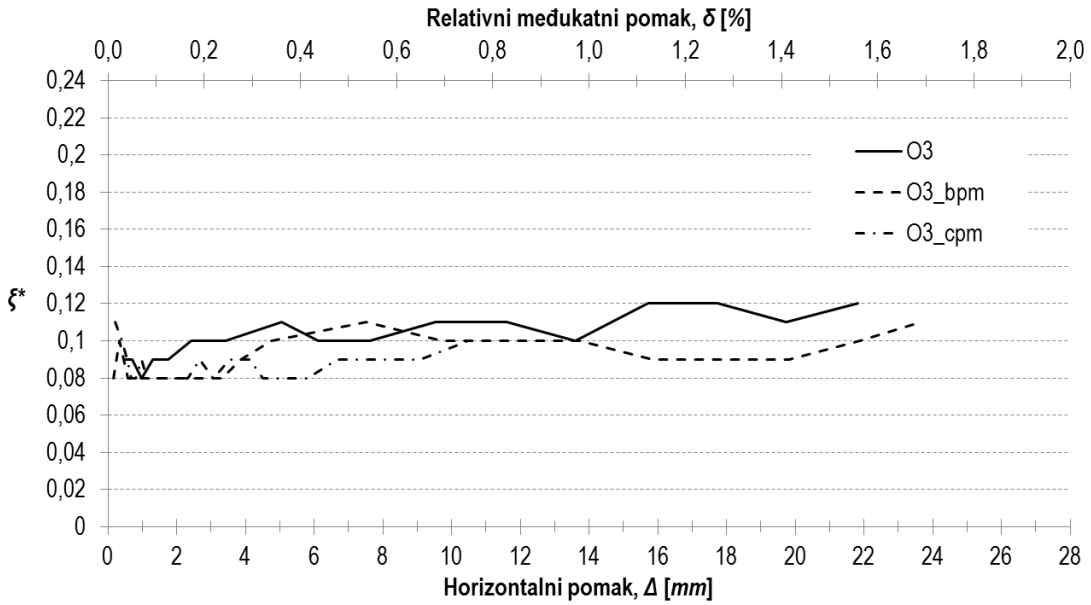
Neovisno o vrsti ispuna, tj. tipu zidnog elementa i promatranog graničnog stanja, intervali vrijednosti promatrane veličine približno su jednakih iznosa. Za razliku od skupine uzoraka *O1,* uočen je dominantan doprinos okvira promatranoj veličini neovisno o graničnom stanju sustava. S obzirom da nije moguće usporediti vrijednosti disipirane energije po jedinici pomaka u području cijelog odgovora praznog okvira, promatrat će se samo odnosi vrijednosti određeni ispitivanjem praznog okvira i ispitnog uzorka *O3_bpm*. Kao i kod uzoraka skupine *O1*, kod kojih je ispun izvedena od šupljih glinenih zidnih elemenata, tu je također uočeno smanjenje doprinosa ispuna u području odgovora nakon pojave dominantnog mehanizma sloma istog. Vršna vrijednost promatrane veličine kod ispitnog uzorka *O3_bpm* nalazi se u području odgovora koje odgovara području graničnog stanja pojave dominantnog mehanizma sloma, a doprinos ispuna u potpunosti iščezava pri vrijednosti relativnog međukatnog pomaka u iznosu od približnih 1,1%. Navedena degradacija vrijednosti disipirane energije, po jedinici pomaka, u skladu je s opaženim oštećenjem ispitnog uzorka. Naime, navedena vrijednost relativnog međukatnog pomaka približno je jednaka vrijednosti pri kojoj se doprinos ispuna horizontalnoj nosivosti sustava može zanemariti. Navedeno jasno ukazuje na utjecaj tipa zidnog elementa na vrijednosti promatrane veličine.

Usporedba osnovnih perioda osciliranja ispitnih uzoraka prikazana je u Tablici 6.23. Prikazane vrijednosti određene su pomoću izraza (6.3) i dane za oba smjera opterećenja. Smanjenje promatrane veličine, kod ispitnih uzoraka sa zidanim ispunom, sukladno je povećanju početne krutosti, a reda je veličine od približnih 2 puta.

Tablica 6.23 *Usporedba osnovnih perioda osciliranja uzoraka skupine O3*

Ispitni uzorak	*Pozitivan smjer opterećenja T [s]*	*Negativan smjer opterećenja T [s]*
O3	0,323	0,347
O3_bpm	0,160	0,183
O3_cpm	0,165	0,167

Usporedba ovisnosti prigušenja ispitnih uzoraka skupine *O3* o horizontalnom pomaku dana je Slikom 6.155. Prikazane vrijednosti odnose se na prve cikluse opterećenja i određene su na temelju apsorbirane energije, određene kao uloženi rad pri deformiranju uzoraka. Vrijednost promatrane veličine, određene ispitivanjem praznog okvira, gotovo su u području cijelog odgovora veće od vrijednosti određenih ispitivanjem uzoraka sa zidanim ispunom. Navedeno nije u skladu s rezultatima skupine uzoraka *O1* niti s postojećim rezultatima ispitivanja (*Poglavlje 2*) gdje je zabilježeno povećanje vrijednosti promatrane veličine kod uzoraka sa zidanim ispunom.



Slika 6.155 *Usporedba prigušenja uzoraka skupine O3*

6.6.4. Skupina uzoraka *O4*

6.6.4.1. Ocjena doprinosa konstituenata sustava konstrukcijskim karakteristikama uzoraka

Doprinosi konstituenata sustava u promatranim karakterističnim točkama odgovora ispitnih uzoraka skupine *O4* prikazani su Tablicama 6.24 i 6.25 u ovisnosti o smjeru opterećenja. Tu su, kao i kod prethodnih skupina uzoraka, promatrani parovi vrijednosti horizontala sila – pomak koji definiraju granično stanje pojave prve značajne pukotine (δ_{cr}, V_{cr}) i granično stanje pojave dominantnog mehanizma sloma ispuna (δ_{cr}, V_{cr}). Doprinose pri graničnom stanju pred rušenje nije moguće odrediti iz razloga što je pretpostavljeno da jedan od konstituenata sustava gubi horizontalnu nosivost.

Za razliku od prethodnih skupina ispitnih uzoraka dominantan je doprinos pojedinog konstituenta određen vrstom ispuna, tj. tipom zidnog elementa. Tako je, kod uzorka kod kojeg je ispun izvedena od pune glinene opeke, doprinos okvira dominantan, a kod uzorka kod kojeg je ispun izvedena od šupljih glinenih zidnih elemenata, doprinos ispuna također je dominantan. Intervali vrijednosti doprinosa konstituenata, u odnosu na promatrana granična stanja, približno su jednaki uz nešto izraženije razlike kod ispitnog uzorka *O4_cpm*. Uočena promjena dominantnog konstituenta pri negativnom smjeru opterećenja ispitnog uzorka *O4_cpm* može se pripisati relativno maloj vrijednosti relativnog međukatnog pomaka te se može zanemariti s obzirom na trend odnosa doprinosa pri pozitivnom smjeru opterećenja i činjenicu da je pri graničnom stanju pojave prve značajne pukotine u ispunu doprinos konstituenata približno jednak. Doprinos ispuna kod ispitnog uzorka *O4_bpm*, neovisno o promatranom graničnom stanju i smjeru opterećenja, u intervalu je od 69 do 72%, a okvira od 28 do 31%.

Vrijednosti horizontalne nosivosti praznog okvira pri graničnom stanju pojave prve značajne pukotine u ispunu u intervalu su od 53 do 61% pri pozitivnom te od 41 do 60% maksimalno zabilježene vrijednosti pri negativnom smjeru opterećenja. Udio horizontalne nosivosti praznog okvira pri graničnom stanju pojave dominantnog mehanizma sloma ispuna u intervalu je od 66 do 90% pri pozitivnom i od 69 do 84% maksimalno zabilježene vrijednosti pri negativnom smjeru opterećenja. U odnosu na skupinu uzoraka *O1,* povećanje udjela horizontalne nosivosti praznog okvira, neovisno o smjeru opterećenja pri graničnom stanju pojave prve značajne pukotine, iznosi prosječno 7%, a pri graničnom stanju pojave dominantnog mehanizma sloma ispuna 11%. U usporedbi sa skupinom uzoraka *O3*, udio horizontalne nosivosti praznog okvira približno je jednak unatoč povećanju koeficijenta armiranja uzdužne armature u stupovima.

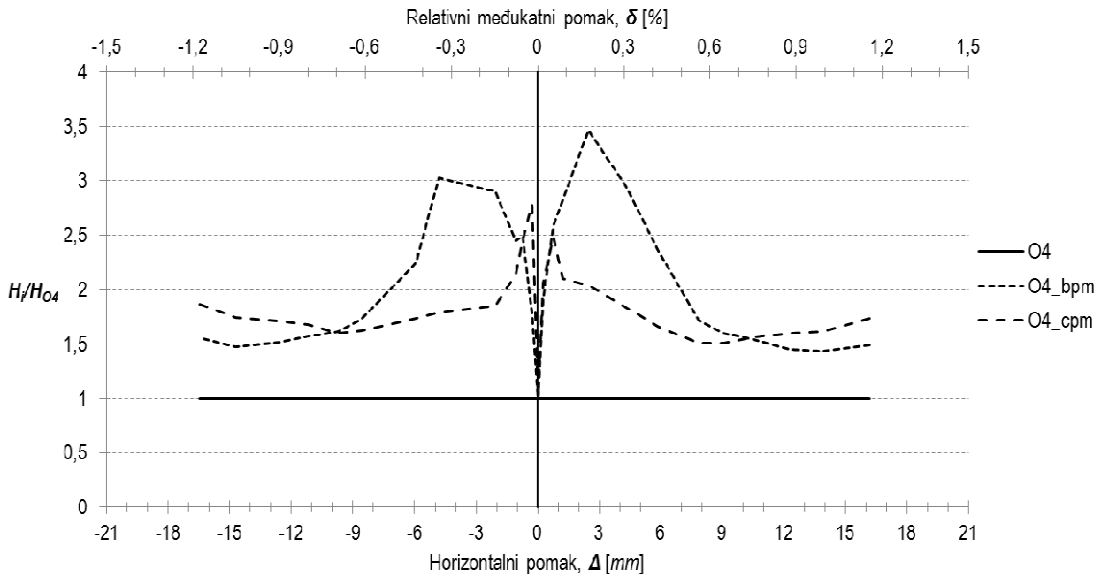
Tablica 6.24 *Prikaz doprinosa konstituenata sustava u promatranim karakterističnim točkama odgovora uzoraka skupine O4 pri pozitivnom smjeru opterećenja*

	Ispitni uzorak	
	O4_bpm	*O4_cpm*
δ_{cr} [%]	0,17	0,24
V_{cr} [kN]	239,0	149,9
Doprinos ispune, [%]	**71,7**	**47,5**
Doprinos okvira, [%]	**28,3**	**52,5**
δ_{max} [%]	0,28	0,50
V_{max} [kN]	258,5	179,9
Doprinos ispune, [%]	**67,1**	**36,0**
Doprinos okvira, [%]	**32,9**	**64,0**
δ_{col} [%]	0,93	-
V_{col} [kN]	184,7	-

Tablica 6.25 *Prikaz doprinosa konstituenata sustava u promatranim karakterističnim točkama odgovora uzoraka skupine O4 pri negativnom smjeru opterećenja*

	Ispitni uzorak	
	O4_bpm	*O4_cpm*
δ_{cr} [%]	0,19	0,08
V_{cr} [kN]	229,6	101,4
Doprinos ispune, [%]	**69,4**	**53,1**
Doprinos okvira, [%]	**30,6**	**46,9**
δ_{max} [%]	0,29	0,43
V_{max} [kN]	258,8	169,9
Doprinos ispune, [%]	**68,7**	**42,5**
Doprinos okvira, [%]	**31,3**	**57,4**
δ_{col} [%]	0,94	-
V_{col} [kN]	172,0	-

Prikaz normalizirane horizontalne nosivosti uzoraka u odnosu na vrijednosti određene ispitivanjem praznog okvira dan je Slikom 6.156.

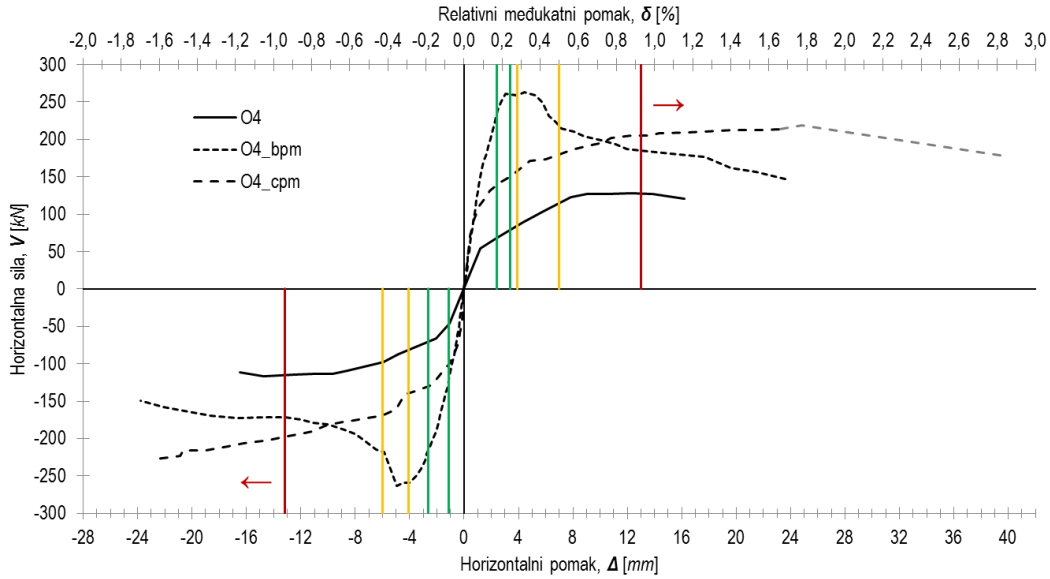


Slika 6.156 *Prikaz normalizirane nosivosti uzoraka skupine O4*

U odnosu na prethodne skupine ispitnih uzoraka, gdje je doprinos ispuna horizontalnoj nosivosti uzoraka približno jednak neovisno o tipu zidnog elementa, uočen je znatno manji doprinos ispuna izvedene od punih glinenih zidnih elemenata. Područje značajnog doprinosa ispuna, neovisno o tipu elementa, može se definirati s vrijednošću relativnog međukatnog pomaka u iznosu od 0,5% kao i kod prethodnih skupina uzoraka. Nakon navedene vrijednosti relativnog pomaka, doprinos ispuna i dalje je značajan (povećanje nosivosti je reda veličine 2 puta), ali ne i toliko naglašen. Tu je također jasno vidljiv utjecaj tipa zidnog elementa na degradaciju nosivosti ispitnih uzoraka nakon pojave dominantnog mehanizma sloma ispuna.

Shematski prikaz područja graničnih stanja ispitnih uzoraka skupine *O4* dan je Slikom 6.157, a definirana su bojama punih linija na način opisan u *Potpoglavlju 6.6.1.1.* U odnosu na skupinu uzoraka *O3*, područje graničnog stanja pojave prve značajne pukotine u većem je intervalu vrijednosti dok je područje graničnog stanja pojave dominantnog mehanizma sloma ispuna u manjem intervalu vrijednosti relativnog međukatnog pomaka. Tako je pri graničnom stanju pojave prvih značajnih pukotina u ispunu vrijednost relativnog međukatnog pomaka u intervalu od 0,17 do 0,24% za pozitivni te od 0,08 do 0,19% za negativni smjer opterećenja. S druge strane, interval je vrijednosti relativnog međukatnog pomaka pri graničnom stanju dominantnog mehanizma sloma od 0,28 do 0,5% za pozitivni te od 0,29 do 0,43% za negativni smjer opterećenja. S obzirom da je granično stanje pred rušenje bilo moguće odrediti samo za ispitni uzorak *O4_bpm*, pretpostavljene su minimalne vrijednosti intervala relativnog međukatnog pomaka sukladno rezultatima ispitivanja, tj. pri pozitivnom smjeru opterećenja granično

stanje pred rušenje određeno je s vrijednošću relativnog međukatnog pomaka u iznosu ≥ 0,93%, a za negativni smjer opterećenja s vrijednošću u iznosu ≥ 0,94%. Sažeti prikaz područja graničnih stanja ispitnih uzoraka skupine *O4* dan je Tablicom 6.26 neovisno o smjeru opterećenja i tipu zidnog elementa.

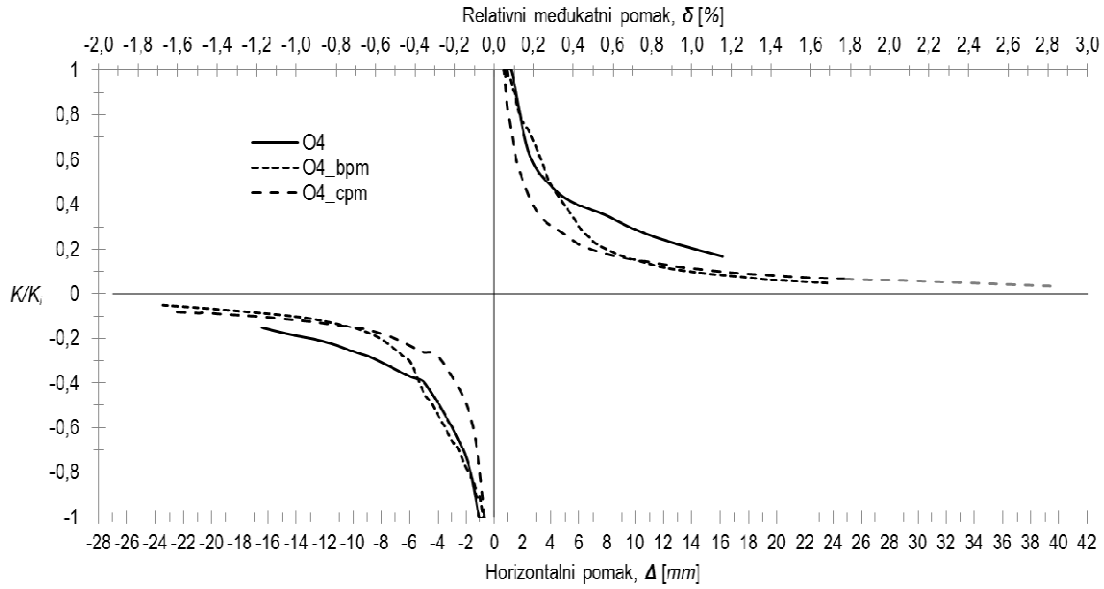


Slika 6.157 *Prikaz područja graničnih stanja uzoraka skupine O4*

Tablica 6.26 *Područja graničnih stanja uzoraka skupine O4*

Granično stanje	Vrijednost relativnog međukatnog pomaka, δ [%]
Granično stanje uporabljivosti	0,08 - 0,24
Granično stanje nosivosti	0,28 - 0,50
Granično stanje pred rušenje	≥ 0,9

Degradacija krutosti ispitnih uzoraka skupine *O4* prikazana je Slikom 6.158 i određena na način da je za svaki uzorak sekantna krutost pri svakom koraku opterećenja normalizirana u odnosu na početnu krutost K_i. Neovisno o tipu zidnog elementa, vrijednosti normaliziranog odnosa asimptotički se približavaju horizontalnoj osi kojom su definirane vrijednosti horizontalnog pomaka. Međutim, tu je za razliku od prethodnih skupina uzoraka uočen izraženiji pad sekantne krutosti uzorka kod kojeg je ispun izvedena od punih glinenih zidnih elemenata i to u području cijelog odgovora pri pozitivnom i negativnom smjeru opterećenja. S druge strane, jednako kao i kod prethodnih skupina uzoraka, u slučaju uzorka kod kojeg je ispun izvedena od šupljih glinenih zidnih elemenata do razlika vrijednosti sekantne krutosti, u odnosu na prazan okvir, dolazi tek nakon vrijednosti relativnog međukatnog pomaka u iznosu od 0,4% neovisno o smjeru opterećenja.



Slika 6.158 *Prikaz degradacije sekantne krutosti ispitnih uzoraka skupine O4 u ovisnosti o horizontalnom pomaku*

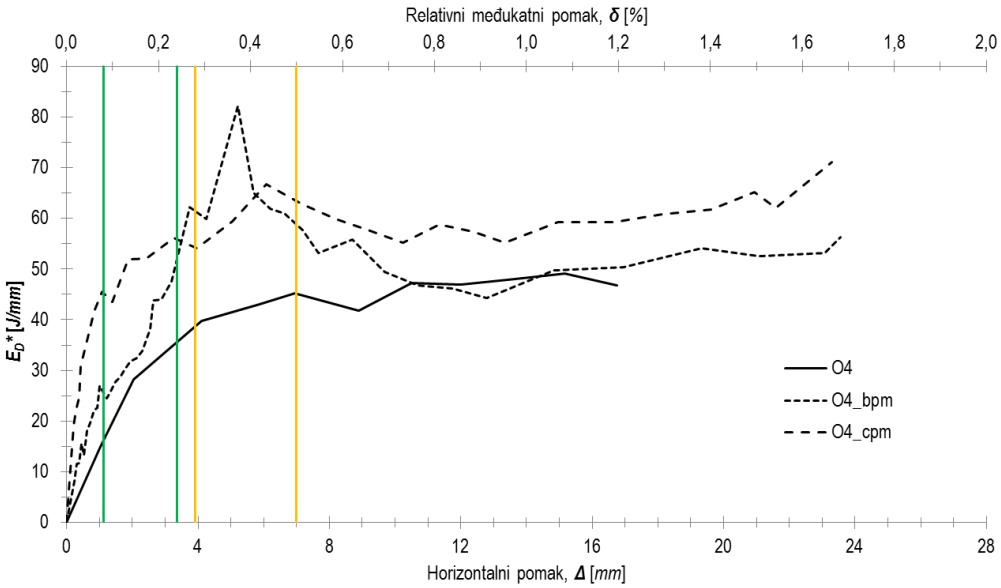
6.6.4.2. Ocjena doprinosa konstituenata sustava dinamičkim karakteristikama uzoraka

Kvantitativan doprinos konstituenata ispitnih uzoraka skupine *O4* disipaciji energije po jedinici pomaka prikazan je Tablicom 6.27 u ovisnosti o promatranim graničnim stanjima i u odnosu na vrijednosti relativnih međukatnih pomaka definiranih Tablicom 6.26. Prikazane vrijednosti odnose se na prve cikluse opterećenja, a određene su za granično stanje pojave prve značajne pukotine i pojave dominantnog mehanizma sloma ispuna. Granično stanje pred rušenje izostavljeno je iz razloga što je pretpostavljeno da jedan od elemenata sustava gubi nosivost. Intervali vrijednosti disipirane energije, po jedinici pomaka ispitnih uzoraka skupine *O4* u ovisnosti o područjima graničnih stanja, prikazani su shematski Slikom 6.159.

Tablica 6.27 *Prikaz doprinosa konstituenata uzoraka skupine O4 disipaciji energije po jedinici pomaka*

Ispitni uzorak	Granično stanje pojave prve značajne pukotine	Granično stanje pojave dominantnog mehanizma sloma
O4_bpm		
Ukupna vrijednost disipirane energije po jedinici pomaka, E_D^* [*J/mm*]	25,5 - 52,1	45,3 - 55,9
Doprinos okvira, [*%*]	63,1 - 68,3	35,6 - 63,7
Doprinos ispune, [*%*]	31,7 - 36,9	36,3 - 64,4
O4_cpm		
Ukupna vrijednost disipirane energije po jedinici pomaka, E_D^* [*J/mm*]	58,8 - 61,4	54,3 - 63,3

Doprinos okvira, [%]	63,2 - 76,6	71,2 - 71,5
Doprinos ispune, [%]	23,4 - 36,8	28,5 - 28,8



Slika 6.159 *Prikaz disipacije energije po jedinici pomaka uzoraka skupine O4 u odnosu na područja promatranih graničnih stanja*

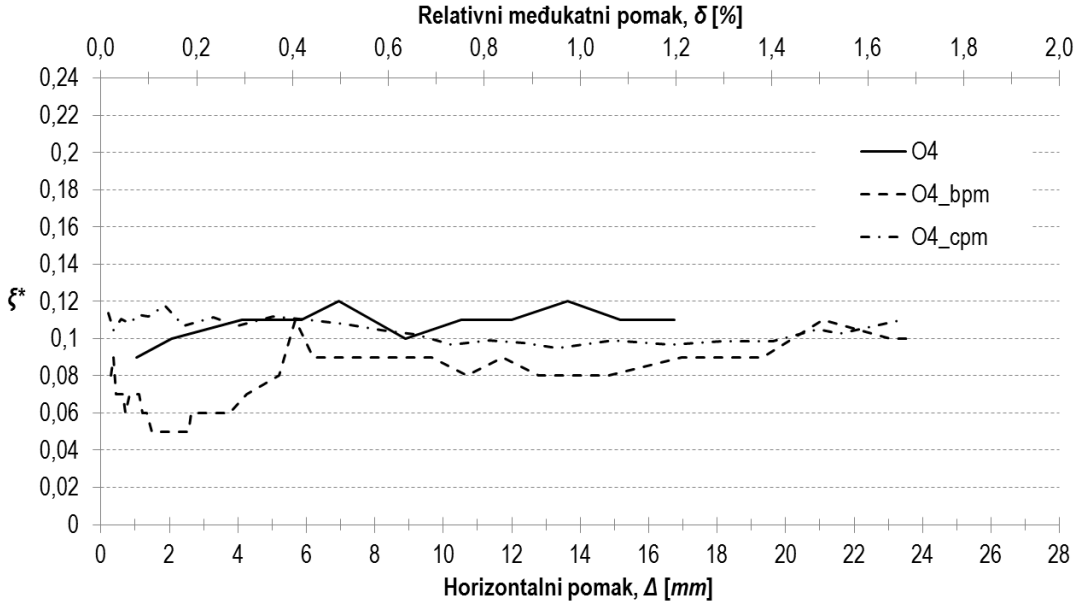
Neovisno o vrsti ispuna, tj. tipu zidnog elementa i promatranog graničnog stanja, intervali vrijednosti promatrane veličine približno su jednakih iznosa uz naglašeniji raspon u slučaju ispitnog uzorka *O4_cpm* pri graničnom stanju pojave prve značajne pukotine u ispunu. Kao i kod skupine uzoraka *O3,* također je uočen dominantnii doprinos okvira promatranoj veličini neovisno o graničnom stanju. Osim povećanja doprinosa okvira disipaciji energije po jedinici pomaka, također dolazi do izražaja ovisnost degradacije vrijednosti promatrane veličine o tipu zidnog elementa. Maksimalna vrijednost disipacije energije, po jedinici pomaka ispitnog uzorka *O4_bpm,* uočena je u području graničnog stanja pojave dominantnog mehanizma sloma ispuna dok doprinos istog promatranoj veličini u potpunosti iščezava u području odgovora uzorka s vrijednošću relativnog međukatnog pomaka većom ili jednakom 0,8%. Navedena pojava izostaje u slučaju ispitnog uzorka *O4_cpm* gdje je maksimalna vrijednost promatrane veličine u posljednjem koraku opterećenja.

Usporedba osnovnih perioda osciliranja ispitnih uzoraka skupine *O4* prikazana je Tablicom 6.28. Prikaze vrijednosti određene su pomoću izraza (6.3) i dane za oba smjera opterećenja. Smanjenje osnovnog perioda osciliranja kod ispitnih uzoraka sa zidanim ispunom sukladno je povećanju početne krutosti i reda je veličine od približnih 2,2 puta.

Tablica 6.28 *Usporedba osnovnih perioda osciliranja ispitnih uzoraka skupine O4*

Ispitni uzorak	*Pozitivan smjer opterećenja T [s]*	*Negativan smjer opterećenja T [s]*
O4	0,371	0,362
O4_bpm	0,145	0,159
O4_cpm	0,215	0,150

Usporedba ovisnosti prigušenja o horizontalnom pomaku ispitnih uzoraka skupine *O4* dana je Slikom 6.160. Prikazane vrijednosti odnose se na prve cikluse opterećenja i određene su na temelju apsorbirane energije određene kao uloženi rad pri deformiranju uzoraka. Vrijednosti prigušenje određene ispitivanjem praznog okvira gotovo su u području cijelog odgovora uzorka veće od vrijednosti dobivenih ispitivanjem uzoraka sa zidanim ispunom. Navedeno je posebno istaknuto pri usporedbi rezultata dobivenih ispitivanjem praznog okvira i ispitnog uzorka *O4_bpm*. Kao i kod skupine uzoraka *O3*, dobiveni rezultati nisu u skladu s postojećim rezultatima ispitivanja (*Poglavlje 2*).



Slika 6.160 *Usporedba prigušenja ispitnih uzoraka skupine O4*

6.7. Područja graničnih stanja sustava uokvireno ziđe

U prethodnim potpoglavljima granična stanja uzoraka definirana su u odnosu na vrstu morta i pripadnu skupinu uzoraka. S ciljem generalizacije područja graničnih stanja, čini se prikladnim odabrati jednu od karakteristika ispuna kao mjerodavnu veličinu s obzirom da je provedenim ispitivanjima ustanovljen dominantan utjecaj ispuna na ponašanje uzoraka. Sukladno uobičajenoj podjeli ispuna u

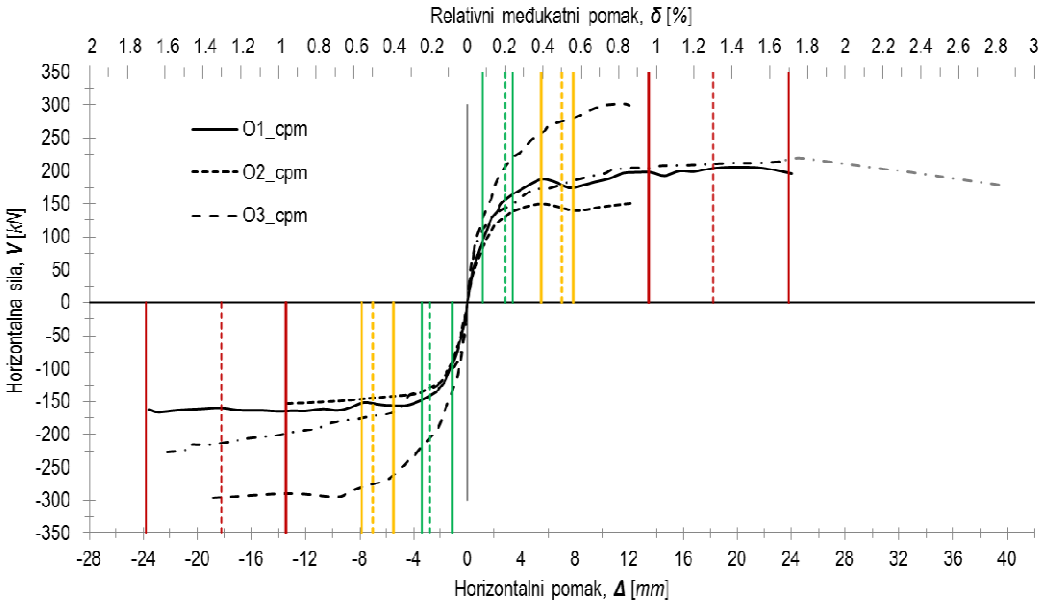
literaturi, gdje se ona definira kao jaka i slaba, odabrana je tlačna čvrstoća istog kao mjerodavna veličina.

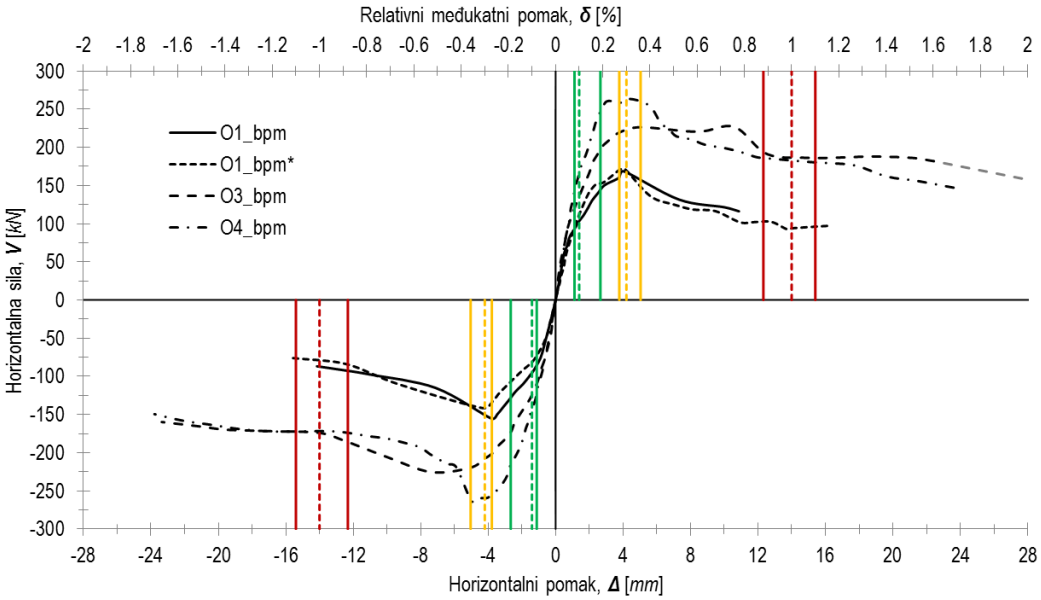
Terminom uokvireno ziđe pokušava se ustvrditi zaseban konstrukcijski sustava. Potreba definiranja zasebnog konstrukcijskog sustava proizlazi iz činjenice da se neduktilni armirano-betonski okviri sa zidanim ispunom ne mogu svrstati niti u omeđeno ziđe, niti u seizmički projektirane okvire s ispunom.

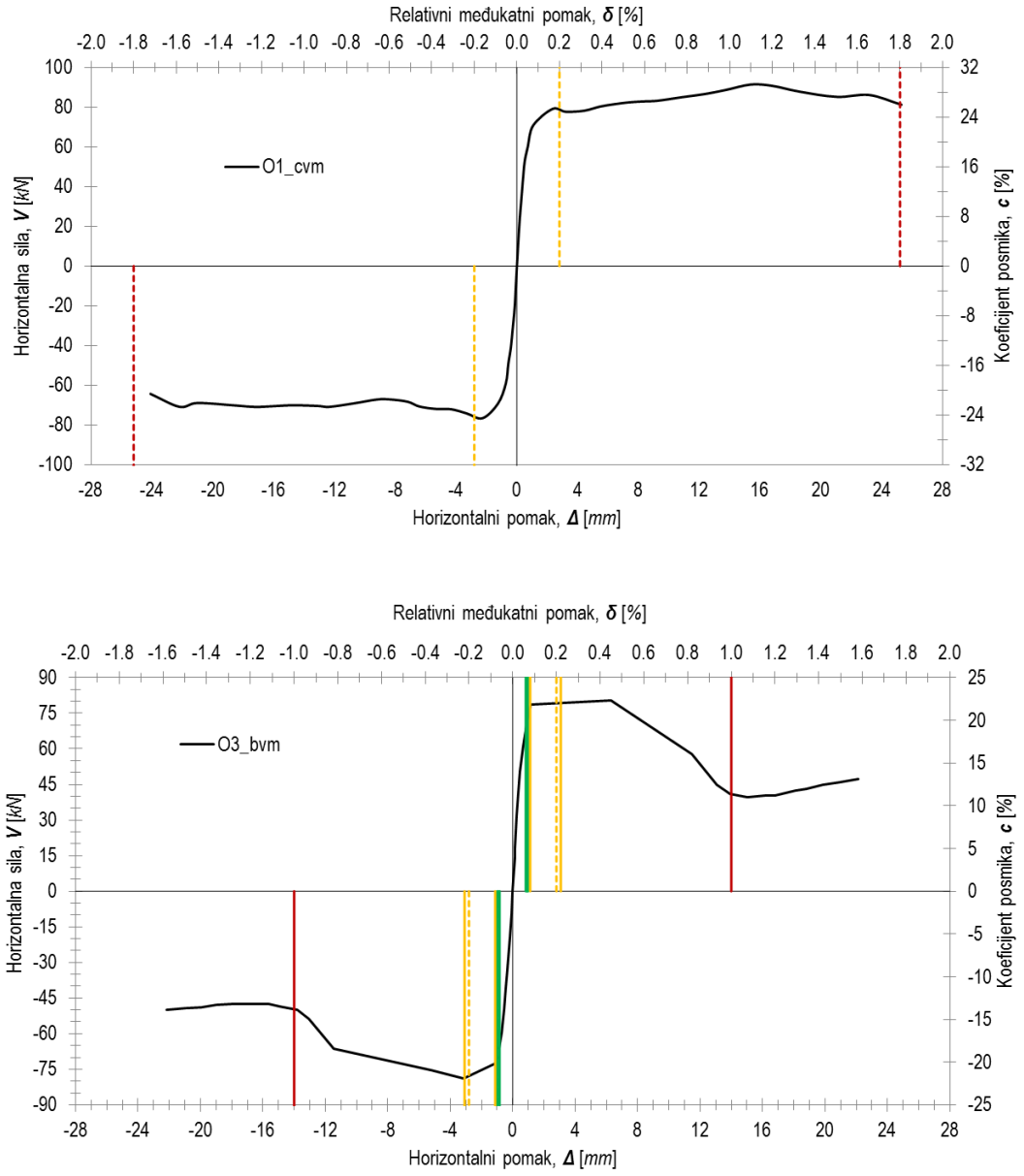
Područja graničnih stanja ispitnih uzoraka prikazana su Slikom 6.161. Punim linijama i pripadnim bojama naznačeni su intervali vrijednosti relativnih međukatnih pomaka pri pojedinim graničnim stanjima dok su isprekidanim linijama naznačene odabrane mjerodavne vrijednosti. Zelene linije označavaju granično stanje pojave prve značajne pukotine u ispunu, narančaste granično stanje pojave dominantnog mehanizma sloma ispuna i crvene granično stanje pred rušenje. Odabir mjerodavnih vrijednosti izvršen je na način da je srednja vrijednost intervala zaokružena na najbliži jednodecimalni broj. Navedeno vrijedni za sve vrste ispuna i sva granična stanja osim za ispun *bvm* gdje je granično stanje pojave prve značajne pukotine u ispunu određeno dvodecimalnim brojem zbog relativno malog intervala vrijednosti relativnog međukatnog pomaka. Prikaz vrijednosti relativnih međukatnih pomaka pri pojedinim graničnim stanjima dan je Tablicom 6.29 u ovisnosti o tlačnoj čvrstoći ispuna. Do pojave graničnog stanja pojave prve značajne pukotine i pojave dominantnog mehanizma sloma ispuna uzorka *O1_cvm* došlo je pri istoj vrijednosti relativnog međukatnog pomaka, tj. prva je značajna pukotina u ispunu ujedno označavala i pojavu dominantnog mehanizma sloma. Stoga je za granično stanje pojave prve značajne pukotine u ispunu, odabrano područje vrijednosti relativnog međukatnog pomaka manje od vrijednosti koja definira granično stanje pojave dominantnog mehanizma sloma ispuna.

Tablica 6.29 *Prikaz područja graničnih stanja u ovisnosti o tlačnoj čvrstoći ispuna*

	Vrijednost relativnog međukatnog pomaka, [%]		
Tlačna čvrstoća ispune	Granično stanje pojave prve značajne pukotine	Granično stanje pojave dominantnog mehanizma sloma	Granično stanje pred rušenje
f_i = 5,2 *N/mm²* (*cpm*)	0,2	0,5	1,3
f_i = 4,6 *N/mm²* (*bpm*)	0,1	0,3	1,0
f_i = 3,5 *N/mm²* (*cvm*)	0,2 <	0,2	1,8
f_i = 0,8 *N/mm²* (*bvm*)	0,06	0,2	1,0


Relativni međukatni pomak, δ [%]
2 1.8 1.6 1.4 1.2 1 0.8 0.6 0.4 0.2 0 0.2 0.4 0.6 0.8 1 1.2 1.4 1.6 1.8 2 2.2 2.4 2.6 2.8 3
350 300 250 200 150 100 50 0 -50 -100 -150 -200 -250 -300 -350
O1_cpm
O2_cpm
O3_cpm
Horizontalna sila, V [kN]
-28 -24 -20 -16 -12 -8 -4 0 4 8 12 16 20 24 28 32 36 40
Horizontalni pomak, Δ [mm]


Relativni međukatni pomak, δ [%]
-2 -1.8 -1.6 -1.4 -1.2 -1 -0.8 -0.6 -0.4 -0.2 0 0.2 0.4 0.6 0.8 1 1.2 1.4 1.6 1.8 2
300 250 200 150 100 50 0 -50 -100 -150 -200 -250 -300
O1_bpm
O1_bpm*
O3_bpm
O4_bpm
Horizontalna sila, V [kN]
-28 -24 -20 -16 -12 -8 -4 0 4 8 12 16 20 24 28
Horizontalni pomak, Δ [mm]



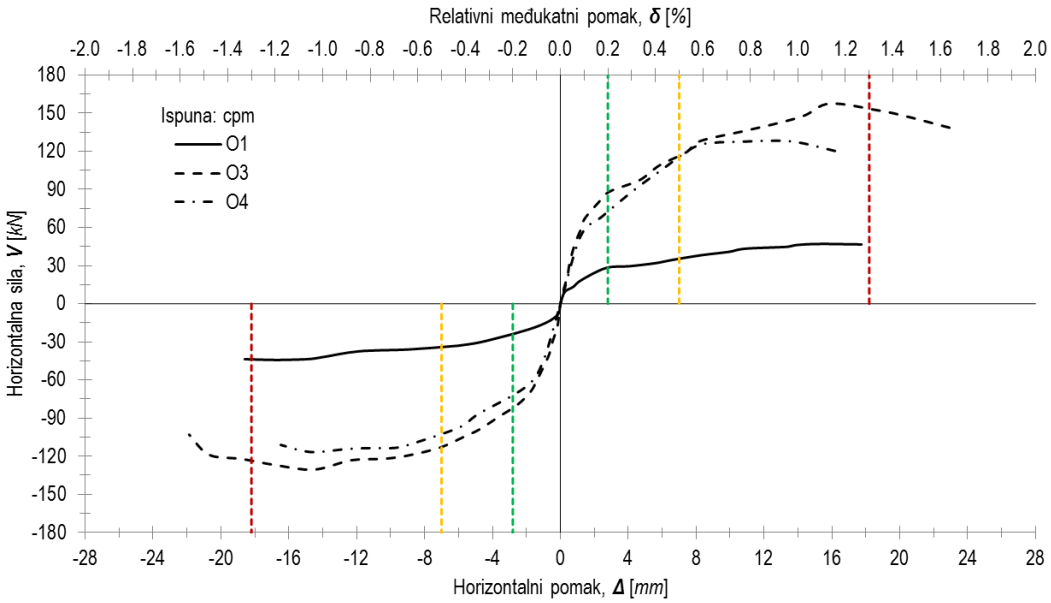
Slika 6.161 *Shematski prikaz graničnih stanja ispitnih uzoraka skupine O1 u ovisnosti o tlačnoj čvrstoći ispune*

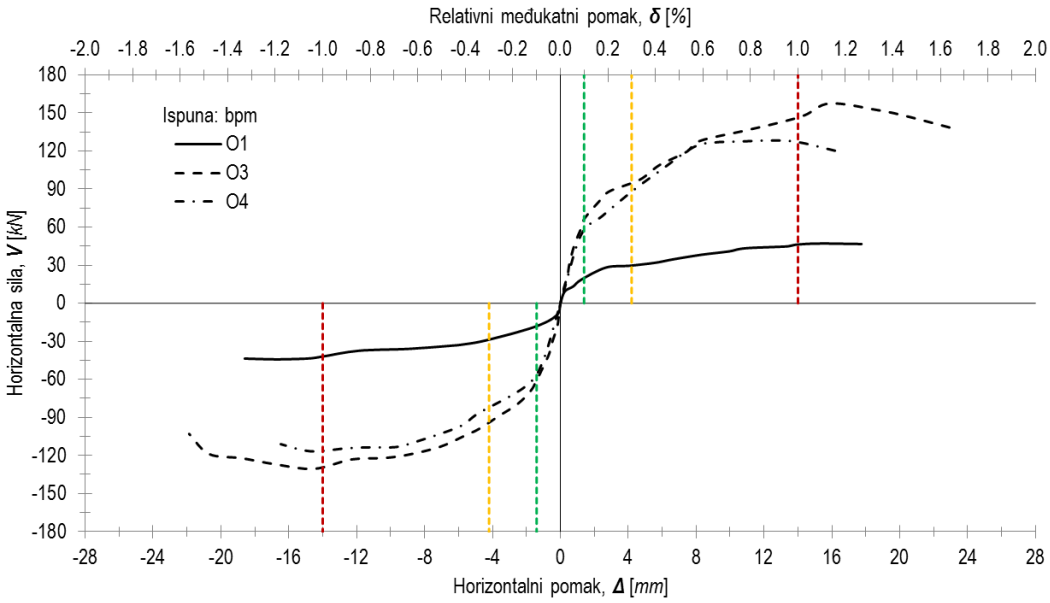
Doprinos okvira horizontalnoj nosivosti sustava pri pojedinim graničnim stanjima definiran je u odnosu na maksimalno zabilježenu nosivost istog, ($V_{i,fl}/V_{f,max}$) kao i u prethodnim potpoglavljima i u odnosu na tlačnu čvrstoću ispuna. Prilikom definiranja doprinosa okvira kod uzorka *O1_cvm*, a s obzirom na pojavu prve značajne pukotine i dominantnog mehanizma sloma ispuna pri jednakoj vrijednosti relativnog međukatnog pomaka, usvojene su jednake vrijednosti. Shematski prikaz doprinosa okvira horizontalnoj nosivosti sustava prikazan je Slikom 6.162 dok su vrijednosti doprinosa dane u Tablici 6.30. Vrijednosti prikazane tablicom naknadno su korištene prilikom definiranja analitičkog modela procjene ponašanja uokvirenog ziđa gdje su promatrani doprinosi pri graničnom stanju pojave prve značajne pukotine i pojave dominantnog mehanizma sloma ispuna. Granično stanje

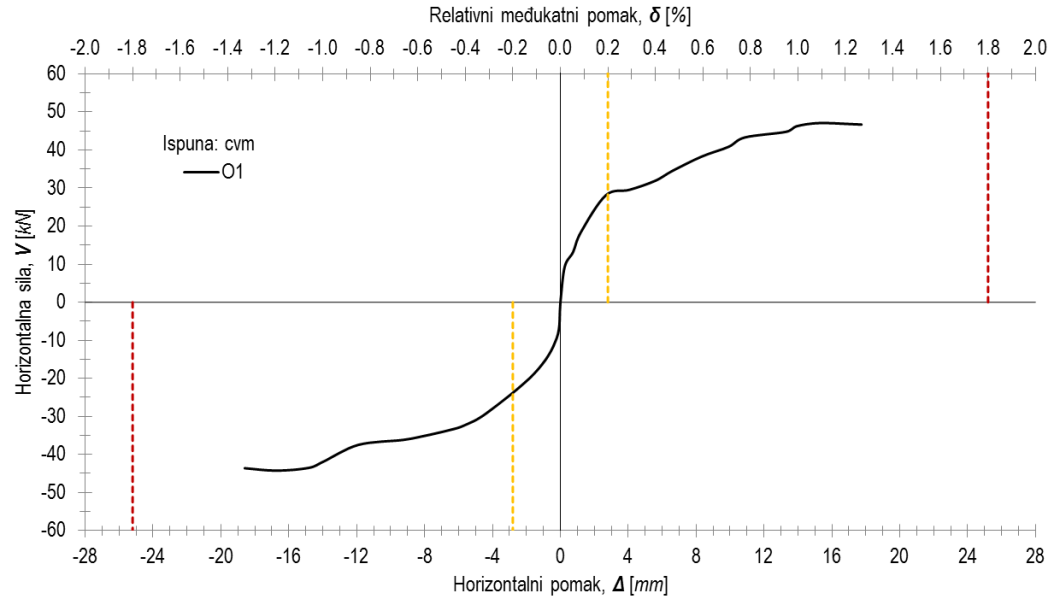
pred rušenje izostavljeno je iz razloga što kod pojedinih tipova okvira i ispune nije moguće procijeniti doprinos. Naime, u pojedinim slučajevima vrijednost je relativnog međukatnog pomaka praznog okvira pri slomu manja od vrijednosti dobivene kod uzoraka s ispunom.

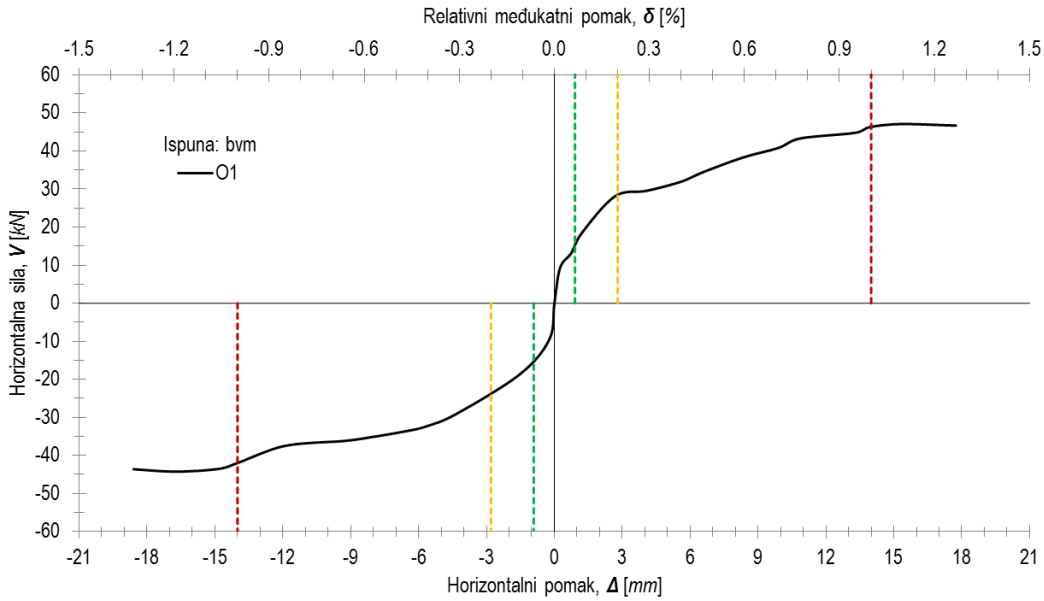
Tablica 6.30 *Prikaz doprinosa okvira horizontalnoj nosivosti sustava u ovisnosti o tlačnoj čvrstoći ispune*

Tlačna čvrstoća ispune	f_i = 5,2 N/mm^2 (*cpm*)	
Granično stanje	Pojave prve značajne pukotine	Pojave dominantnog mehanizma sloma
Doprinos okvira O1, $V_{i,fl}/V_{f,max}$, [%]	0,51	0,75
Doprinos okvira O3, $V_{i,fl}/V_{f,max}$, [%]	0,54	0,78
Doprinos okvira O4, $V_{i,fl}/V_{f,max}$, [%]	0,54	0,87
Tlačna čvrstoća ispune	f_i = 4,6 N/mm^2 (*bpm*)	
Granično stanje	Pojave prve značajne pukotine	Pojave dominantnog mehanizma sloma
Doprinos okvira O1, $V_{i,fl}/V_{f,max}$, [%]	0,47	0,65
Doprinos okvira O3, $V_{i,fl}/V_{f,max}$, [%]	0,5	0,66
Doprinos okvira O4, $V_{i,fl}/V_{f,max}$, [%]	0,51	0,71
Tlačna čvrstoća ispune	f_i = 3,5 N/mm^2 (*cvm*)	
Granično stanje	Pojave prve značajne pukotine	Pojave dominantnog mehanizma sloma
Doprinos okvira O1, $V_{i,fl}/V_{f,max}$, [%]	0,32	0,49
Tlačna čvrstoća ispune	f_i = 0,8 N/mm^2 (*bvm*)	
Granično stanje	Pojave prve značajne pukotine	Pojave dominantnog mehanizma sloma
Doprinos okvira O1, $V_{i,fl}/V_{f,max}$, [%]	0,51	0,51




Relativni međukatni pomak, δ [%]
-2.0 -1.8 -1.6 -1.4 -1.2 -1.0 -0.8 -0.6 -0.4 -0.2 0.0 0.2 0.4 0.6 0.8 1.0 1.2 1.4 1.6 1.8 2.0
Ispuna: bpm
O1
O3
O4
Horizontalna sila, V [kN]
180 150 120 90 60 30 0 -30 -60 -90 -120 -150 -180
-28 -24 -20 -16 -12 -8 -4 0 4 8 12 16 20 24 28
Horizontalni pomak, Δ [mm]


Relativni međukatni pomak, δ [%]
-2.0 -1.8 -1.6 -1.4 -1.2 -1.0 -0.8 -0.6 -0.4 -0.2 0.0 0.2 0.4 0.6 0.8 1.0 1.2 1.4 1.6 1.8 2.0
Ispuna: cvm
O1
Horizontalna sila, V [kN]
60 50 40 30 20 10 0 -10 -20 -30 -40 -50 -60
-28 -24 -20 -16 -12 -8 -4 0 4 8 12 16 20 24 28
Horizontalni pomak, Δ [mm]

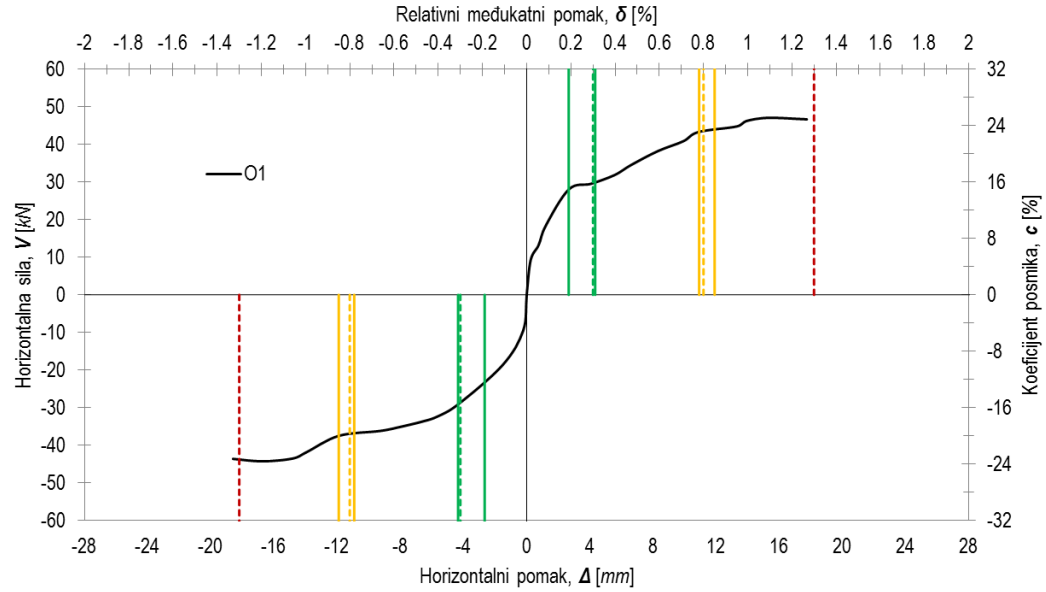


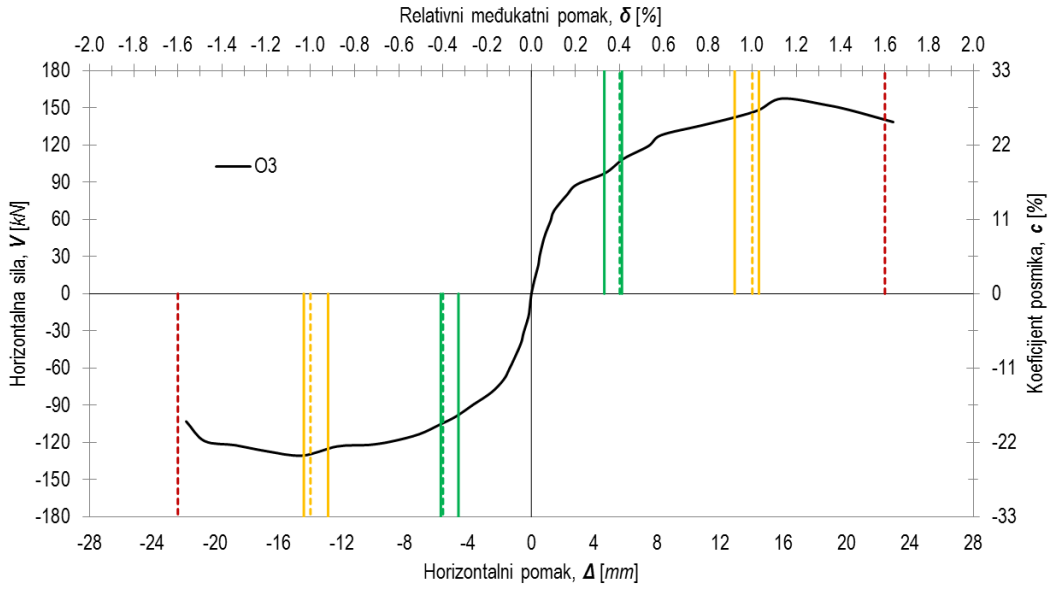
Slika 6.162 *Shematski prikaz doprinosa okvira pri pojedinim graničnim stanjima*

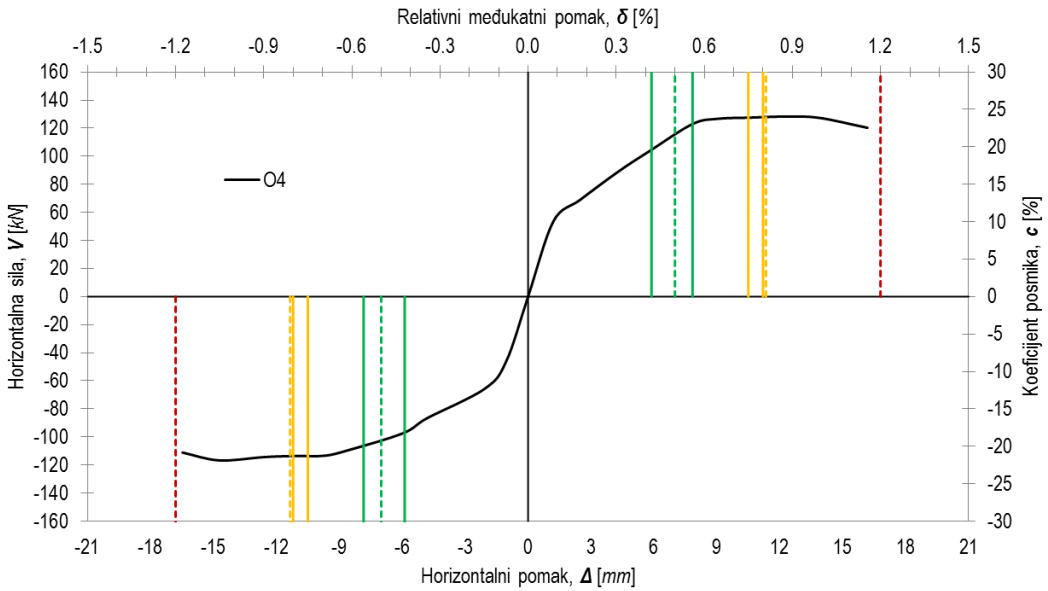
S ciljem ocjene utjecaja karakteristika ispuna na razinu oštećenja sustava pri djelovanju potresa i usporedbe u odnosu na prazne okvirne konstrukcije (*Poglavlje 8*), definirana su područja graničnih stanja uzoraka praznih okvira. Vrijednosti relativnih međukatnih pomaka pri pojedinim graničnim stanjima prikazani su u Tablici 6.31, u ovisnosti o tipu okvira, i predstavljaju odabrane mjerodavne vrijednosti. Prikazane mjerodavne vrijednosti definirane su na osnovi intervala vrijednosti relativnih međukatnih pomaka pri pojedinim graničnim stanjima, a predstavljaju najbližu srednju vrijednost zaokruženu na jednodecimalni broj. Međutim, s obzirom na relativno male intervale vrijednosti relativnih međukatnih pomaka, i navedeni kriterij odabira mjerodavnih vrijednosti, kod pojedinih je uzoraka odabrana gornja ili donja granica intervala. Intervali vrijednosti relativnih međukatnih pomaka, pri pojedinim graničnim stanjima, određeni su u odnosu na pozitivan i negativan smjer opterećenja. Za razliku od uzoraka s ispunom, kod praznih okvira pojava je graničnog stanja pojave prve značajne pukotine definirana prvom pukotinom koja prolazi kroz minimalno pola visine stupa okvira dok je granično stanje pojave dominantnog mehanizma sloma određeno pojavom prve pukotine koja prolazi punom visinom stupa neovisno radi li se o jednoj pukotini ili spajanju dviju pukotina iz suprotnih smjerova. Granično je stanje pred rušenje definirano za trenutak pojave posmičnog sloma jednog od stupova ili grede okvira. Shematski prikaz graničnih stanja uzoraka praznih okvira prikazan je Slikom 6.163. Punim linijama i pripadnim bojama naznačeni su intervali vrijednosti relativnih međukatnih pomaka pri pojedinim graničnim stanjima dok su isprekidanim linijama naznačene odabrane mjerodavne vrijednosti. Zelene linije označavaju granično stanje pojave prve značajne pukotine, narančaste granično stanje pojave dominantnog mehanizma sloma i crvene granično stanje pred rušenje.

Tablica 6.31 *Područja graničnih stanja uzoraka praznih okvira*

Tip okvira	Vrijednost relativnog međukatnog pomaka, [%]		
	Granično stanje pojave prve značajne pukotine	Granično stanje pojave dominantnog mehanizma sloma	Granično stanje pred rušenje
O1	0,3	0,8	1,3
O3	0,4	1,0	1,6
O4	0,5	0,8	1,2







Slika 6.163 *Shematski prikaz graničnih stanja uzoraka praznih okvira*

7. ANALITIČKA PROCJENA PONAŠANJA SUSTAVA UOKVIRENO ZIĐE

Procjena ponašanja armirano-betonskih okvirnih konstrukcija sa zidanim ispunom pri djelovanju horizontalnog opterećenja predstavlja složen zadatak s obzirom na izrazito nelinearnu prirodu ponašanja sustava. U literaturi se mogu pronaći dva općenita pristupa procjene ponašanja koja se mogu podijeliti na numeričke modele i modele prema graničnim stanjima. Prilikom numeričkog modeliranja razlikuju se dva pristupa, mikro i makro modeliranje. Mikro modeliranje podrazumijeva prostornu i materijalnu diskretizaciju sustava metodom konačnih elemenata. Prostornom diskretizacijom sustav se dijeli na određeni broj podelemenata kojima se pridružuju određeni stupnjevi slobode, pri čemu aproksimiramo polje pomaka konstrukcije s neizmjerno mnogo stupnjeva slobode konačnim brojem. Materijalna diskretizacija podrazumijeva definiranje mehaničkih karakteristika i zakona ponašanja (materijalna nelinearnost) primijenjenih materijala i njihove međusobne interakcije. Iako se u literaturi može pronaći niz istraživanja provedenih metodom konačnih elemenata [12], [62], [3], [19], [63], gdje je postignuta zadovoljavajuća točnost u usporedbi s eksperimentalnim rezultatima, komercijalno dostupni programski paketi u većini slučajeva nisu prikladni za modeliranje sustava okvir s ispunom usljed nedostatka karakterističnih konstitutivnih modela ponašanja materijala kao što je ziđe koje je izrazito nelinearna i ortotropan materijal. Osim toga, mikro modeliranje zahtijeva definiranje velikog broja parametara čije vrijednosti, osim što variraju u velikom rasponu, ponekad nije moguće odrediti uobičajenim metodama ispitivanja mehaničkih karakteristika materijala.

Makro modeliranje podrazumijeva diskretizaciju zidanog ispuna pomoću jedne ili više zamjenskih tlačnih dijagonala. Formiranje tlačne dijagonale u zidanom ispunu prilikom horizontalnog opterećenja primijećeno je već u ranim fazama istraživanja ponašanja sustava. Među prvima koji su analizirali mogućnosti primjene zamjenske tlačne dijagonale ističu se istraživanja [64], [34], [26], [35]. Osnovni koncept primjene zamjenske tlačne dijagonale temelji se na pretpostavci da su mehaničke karakteristike i debljina zamjenske dijagonale jednake mehaničkim karakteristikama i debljini zidanog ispuna, pri čemu je jedina nepoznanica širina dijagonale. Iako je koncept zamjenske tlačne dijagonale zbog svoje relativne jednostavnosti primjene opće prihvaćen model prilikom statičke i/ili dinamičke analize ponašanja, procjena širine dijagonale većinom se temelji na empirijskim izrazima ili izrazima definiranim na pojedinim slučajevima ponašanja uočenim prilikom eksperimentalnih istraživanja čime se ograničava primjena metode prilikom procjene ponašanja postojećih okvirnih konstrukcija sa zidanim ispunom. Osim toga, nosivost zamjenske tlačne dijagonale određuje se prema pretpostavljenom mehanizmu sloma ispuna, a s obzirom na broj i uobičajenu pojavu višestrukih mehanizama sloma

ispuna metoda zahtijeva *a priori* poznavanje dominantnog mehanizma sloma što u većini slučajeva nije moguće. Za praktičnu primjenu, nosivost dijagonale može se procijeniti na način da se odredi nosivost ispuna za svaki pojedini mehanizam sloma gdje se usvaja najniža vrijednost čvrstoće što ujedno predstavlja i najvjerojatniji oblik sloma ispuna. Međutim, provedena ispitivanja upućuju da hijerarhija čvrstoća ispuna ponekad i nije mjerodavna. Iako je odnos krutosti elemenata okvira prepoznat kao značajan čimbenik formiranja pojedinih mehanizama sloma ispune, u literaturi još uvijek nedostaju preporuke graničnih vrijednosti navedenog odnosa.

Procjena ponašanja prema graničnim stanjima sustava okvir s ispunom temelji se na matematičkim izrazima, fizikalne ili empirijske prirode, određenih na temelju opaženih mehanizama sloma sustava. Iako su pojedini izrazi definirani za određene slučajeva otkazivanja nosivosti elemenata ili sustava u cjelini, pregledom literature i na osnovi provedenih eksperimentalnih istraživanja, moguće je definirati određeni slijed pojave pojedinih mehanizama sloma elemenata sustava. Kako primjena matematičkih modela graničnih stanja daje ograničene informacije o ponašanju sustava u odnosu na numeričke modela, njihovom je primjenom moguće na relativno brz i jednostavan način odrediti osnovne karakteristike odziva sustava potrebne za nelinearnu statičku analizu primjenom metode postupnog guranja (*pushover analysis*) ili nelinearnu dinamičku analizu. U nastavku teksta dan je pregled pojedinih postojećih analitičkih metoda procjene ponašanja sustava okvir s ispunom prema graničnim stanjima te je dana ocjena primjene istih u odnosu na rezultate provedenih eksperimentalnih istraživanja.

7.1. Procjena ponašanja sustava prema graničnim stanjima

Prilikom definiranja idealizirane nelinearne primarne krivulje ponašanja sustava okvir s ispunom uobičajeno se promatraju tri granična stanja kojima se ujedno i definiraju karakteristike odgovora sustava. Parovi vrijednosti kojima se definiraju granična stanja, tj. karakteristične točke odgovora promatranog sustava, određeni su na temelju fizikalnih ili empirijskih odnosa u ovisnosti o opaženim mehanizmima sloma elemenata sustava pri pojedinim graničnim stanjima. Pojava pojedinog mehanizma sloma ispuna okvira u izravnoj je vezi s mehaničkim i geometrijskim karakteristikama ispuna te interakcijom okvir – ispun koja se u literaturi uobičajeno promatra kroz parametar relativnog odnosa krutosti ispuna i okvira. Sukladno vlastitim rezultatima ispitivanja i podjeli u dostupnoj literaturi, opažena se granična stanja mogu definirati kao: (1) granično stanje pojave prve značajne pukotne u ispunu, (2) granično stanje pojave dominantnog mehanizma sloma ispuna i (3) granično stanje pred

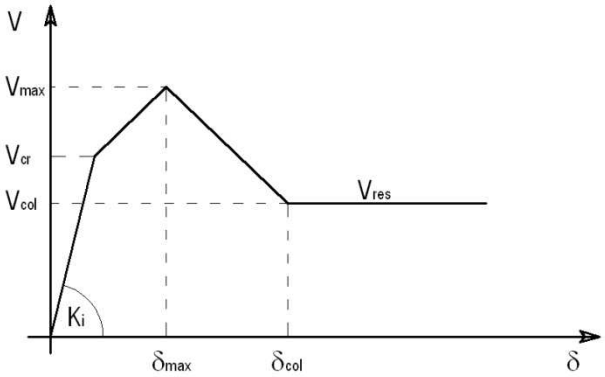
rušenje sustava. U ovisnosti o graničnim stanjima, idealizirani četverolinearni odnos sile i pomaka može se shematski prikazati Slikom 7.1.

Granično stanje pojave prve značajne pukotine u ispunu, što se očituje kao prvi (značajniji) pad krutosti sustava, definirano je parom vrijednosti $V_{cr} - K_i$, gdje je K_i početna krutost, a V_{cr} horizontalna nosivost sustava pri promatranom graničnom stanju. Iako je uobičajena pojava odvajanja ispuna od okvira u neopterećenim uglovima prije pojave prve značajne pukotine u ispunu, što se može opisati kao zasebno granično stanje, istraživanja upućuju da navedeno nema značajnog utjecaja na promjenu početne krutosti sustava te se u pravilu zanemaruje prilikom definiranja idealiziranog odnosa sila – pomak.

Granično stanje pojave dominantnog mehanizma sloma ispuna u literaturi se uobičajeno definira kao maksimalna nosivost sustava. Međutim, provedeno istraživajne upućuje da pojava dominantnog mehanizma sloma ne predstavlja u svim slučajevima i maksimalnu nosivost sustava. Naime, maksimalna nosivosti sustava pod izravnim je utjecaje nosivosti ispuna dok je ponašanje nakon pojave dominatnog mehanizma sloma ispuna pod izravnim utjecajem tip primjenjenih zidnih elemenata. Tako je, naprimjer, kod ispitnih uzoraka gdje je ispun izveden od šupljih glinenih zidnih elemenata uočena znatna degradacija nosivosti sustava usljed koje, u konačnici, potpuno iščezava doprinos ispuna nosivosti i krutosti sustava. S druge strane, kod ispitnih uzoraka gdje je ispun izveden od glinene opeke navedena degradacija nosivosti izostaje, pri čemu je uočeno neznatno povećanje iste koje se u konačnici može i zanemariti radi jednostavnijeg analitčkog opisa ponašanja sustava. Zanemarivanje povećenja nosivosti sustava nakon pojave dominantnog mehanizma sloma ispuna može se, u praksi, promatrati i kao rješenje na strani sigurnosti. Navedeno granično stanje određeno je parom vrijednosti $V_{max} - \delta_{Vmax}$, gdje je δ_{Vmax} relativni međukatni pomak, a V_{max} horizontalna nosivost sustava pri promatranom graničnom stanju. Pojava graničnog stanja pojave dominantnog mehanizma sloma ispuna pod dominantnim je utjecajem ispuna uz napomenu da slom istog ne označava i potpuni slom, tj. rušenje sustava.

Granično stanje pred rušenje sustava definirano je parom vrijednosti $V_{col} - \delta_{col}$, gdje je δ_{col} relativni međukatni pomak, a V_{col} horizontalna nosivost sustava pri navedenom graničnom stanju. Vrijednosti navedenih veličina također su pod izravnim utjecajem tipa ispuna, tj. tipa zidnog elementa. Naime, znatna degradacija nosivosti uzoraka kod kojih je ispun izveden od šupljih glinenih zidnih elemenata upućuje na potrebu definiranja zasebnih modela ponašanja sustava temeljenih na robusnosti ispuna koji se mogu promatrati kroz robusnost zidnih elemenata, a mogu se definirati kao omjer neto i bruto površine poprečnog presjeka zidnih elemenata. U literaturi se navedeno granično stanje uobičajeno definira pojavom savojnog ili posmičnog sloma stupa okvira. Međutim, ukoliko se

sustav okvir s ispunom promatra kao cjelina, tada se čini razumnim definirati granično stanje pred rušenje uslijed otkazivanja nosivosti jednog od elemenata sustava dok se nosivost preostalog elementa može definirati kao rezidualna nosivost.



Slika 7.1 *Idealizirani četverolinearni odnos sile i pomaka*

7.2. Granično stanje pojave prve značajne pukotine u ispunu

7.2.1. Procjena početne krutosti sustava prema postojećim analitičkim modelima

Prilikom procjene početne krutosti sustava okvir s ispunom u literaturi se mogu pronaći dva općenita pristupa. Prvi pristup temeljen je na konceptu zamjenske tlačne dijagonale dok se drugi pristup temelji na tzv. *modelu posmične grede* (*shear beam model*).

Za procjenu početne krutosti okvira s ispunom pomoću zamjenske tlačne dijagonale u literaturi se može pronaći niz predloženih modela koji se u osnovi razlikuju u ovisnosti o predloženom proračunu širine dijagonale. Odabir postojećih modela temeljen je na kriteriju točnosti, jednostavnosti i preporuka u literaturi, pri čemu se ističu tri metode: dvije metode razvijene od strane Stafford Smitha (u daljnjem tekstu označene kao *SS1* i *SS2*) te Holmesova metoda.

Prvi Stafford Smithov model (*SS1*) [35], definiran je u odnosu na krutost čvora, pri čemu se razlikuje upeta i zglobna veza između elemenata okvira. Metoda se temelji na zbroju deformacijskih energija okvira i ispuna primjenom izraza (7.1):

$$K_i = \frac{A+B+C}{C\cdot(A+B)} \tag{7.1}$$

gdje *A* predstavlja horizontalnu fleksibilnost sustava u odnosu na aksijalnu deformaciju vlačnog stupa (stup u čijem čvoru dijeluje horizontalna sila), *B* iskazuje horizontalnu fleksibilnost sustava u odnosu na zamjensku tlačnu dijagonalu, a *C* predstavlja horizontalnu fleksibilnost sustava uzrokovanu savojnim deformacijama okvira:

$$A = \frac{H \cdot (tg\theta)^2}{A_c \cdot E_c} \tag{7.2}$$

$$B = \frac{d}{w \cdot t \cdot E_i \cdot (\cos\theta)^2} \tag{7.3}$$

$$C = \frac{H^3 \cdot (3 \cdot I_b \cdot H + 2 \cdot I_c \cdot L)}{12 \cdot E_c \cdot I_c \cdot (6 \cdot I_b \cdot H + I_c \cdot L)} \tag{7.4}$$

pri čemu su H i L visina i raspon okvira (mjereno od osi elemenata), A_c ploština poprečnog presjeka stupa okvira, t debljina ispuna, w širina dijagonale, E_i i E_c modul elastičnosti ispuna i betona, I_c i I_b momenti tromosti stupa i grede okvira i θ nagib zamjenske tlačne dijagonale u odnosu na horizontalu. Izrazom (7.1) pretpostavlja se upeta veza između elemenata okvira. Ukoliko se pretpostavi zglobna veza, tada se početna krutost sustava određuje pomoću izraza (7.5). Pretpostavka upete ili zglobne veze ovisi o karakteristikama okvira gdje se u literaturi uobičajeno koriste termini jaki i slabi okvir bez jasno definirane granice između navedenog. Prilikom usporedbe analitičkih i eksperimentalnih rezultata promatrane su obje pretpostavke. Širina zamjenske tlačne dijagonale w je definirana pomoću izraza (7.6):

$$K_i = \frac{1}{(A+B)} \tag{7.5}$$

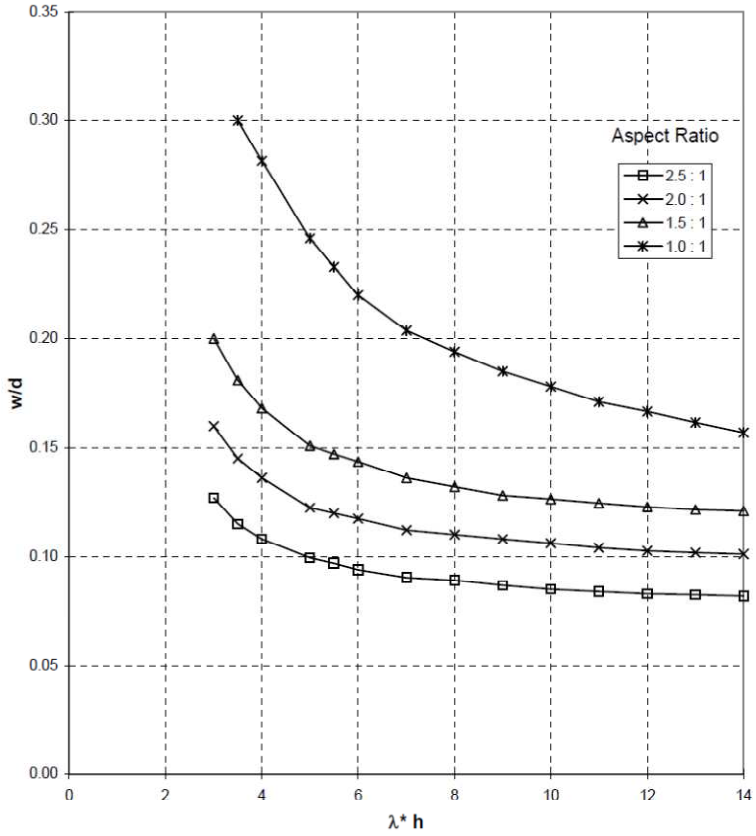
$$w = \left[0{,}2314 - 0{,}0914 \cdot \ln\left(\frac{L}{H}\right) \right] \cdot d \tag{7.6}$$

Osnovna razlika između metode *SS1* i *SS2* očituje se u proračunu širine zamjenske tlačne dijagonale w. Naknadnim je istraživanjima Stafford Smith [27] uočio da širina dijagonale ovisi o duljini kontakta između okvira i ispuna koja pak ovisi o relativnom odnosu krutosti ispuna i okvira iskazanom pomoću bezdimenzionalnog parametra λ, izraz (7.7):

$$\frac{z}{H} = \frac{\pi}{2 \cdot \lambda \cdot H} = \frac{\pi}{H} \cdot \sqrt[4]{\frac{E_c \cdot I_c \cdot h}{4 \cdot E_i \cdot t \cdot \sin\theta}} \tag{7.7}$$

gdje je z duljina kontakta između okvira i ispuna, a h visina ispuna. Osnovna prednost modela *SS2* u odnosu na model *SS1* očituje se u mogućnosti direktnog očitavanja vrijednosti širine zamjenske tlačne dijagonale pomoću dijagrama prikazanih Slikom 7.2, nakon čega se početna krutost sustava određuje pomoću izraza (7.1) ili (7.5). Veza između duljine kontakta okvira i ispuna z te širine dijagonale w određena je na temelju kompatibilnosti dijagonalne tlačne deformacije ispuna primjenom teorije

elastičnosti. Međutim, potrebno je naglasiti da su dijagrami prikazani Slikom 7.2 određeni na temelju eksperimentalnih razultata dobivenih ispitivanjem čeličnih okvira ispunjenih mortom izvedenih u malom mjerilu s relativnom krutošću λH u intervalu od 3 do 14. Relativna krutost λH ispitanih uzoraka nalazi se u intervalu od 2,3 do 5 čime se, uz razliku materijala okvira, nameće pitanje mogućnosti primjene navedenog modela. Prilikom određivanja širine zamjenske tlačne dijagonale u područjima koja nisu pokrivena dijagramima prikazanim Slikom 7.2, pretpostavljena je linearna interpolacija vrijednosti u susjednom intervalu.



Slika 7.2 *Odnos w/d – λH u ovisnosti o odnosu H/L prema Stafford Smithu*

Holmes [34] definira početnu krutost sustava kao zbroj horizontalne krutosti okvira i ispuna pomoću izraza (7.8). Model je razvijen na temelju rezultata ispitivanja čeličnih i armirano-betonskih okvira s ispunom izvedenih u različitim mjerilima. Prvi član izraza određuje doprinos okvira dok drugi član definira doprinos ispuna u ovisnosti o tlačnoj deformaciji pri slomu. Prema izrazu (7.8) početna krutost sustava prvenstveno ovisi o geometrijskim karkteristikama okvira i šire ispune uz mehaničke karakteristike primjenjenih materijala. Za površinu zamjenske tlačne dijagonale utvrđeno je da dominantno ovisi o debljini t i odnosu visine i duljine zidanog ispuna gdje je širina dijagonale w definirana kao konstantna vrijednost u iznosu od 1/3 duljine dijagonale ispuna:

$$K_i = \frac{24 \cdot E_c \cdot I_c}{H^3 \cdot \left(1 + \frac{I_c}{I_b} \cdot \cot\theta\right)} + \frac{t \cdot f_i}{3 \cdot \varepsilon_i} \tag{7.8}$$

gdje je f_i tlačna čvrstoća ispuna, a ε_i tlačna deformacija ispuna pri slomu. Iako je model relativno jednostavan, ostaje upitna vrijednost deformacije ispuna pri slomu ε_i. Prema rezultatima ispitivanja mehaničkih karakteristika primjenjenih tipova ispuna, prikazanih u *Poglavlju 5*, vidljivo je znatno odstupanje u mjerenim vrijednostima ε_i pri slomu što znatno otežava primjenu izraza (7.8). Prilikom proračuna početne krutosti, primijenjene su vrijednosti ε_i određene vlastitim ispitivanjima (*Poglavlje 5*).

Proračun početne krutosti sustava okvir s ispunom pomoću modela posmične grede (*shear beam model*) prvi je predložio Fiorato [34]. Zbog svoje relativne jednostavnosti model je usvojen od strane mnogih istraživača, a definiran je kao zbroj savojne i posmične krutosti sustava pomoću izraza (7.9). Prilikom određivanja savojne krutosti sustav se promatra kao kompozit sastavljen od ispuna i stupova okvira uz primjenu metode ekvivalentnog poprečnog presjeka. Međutim, prilikom definiranja posmične krutosti sustava samo se doprinos ispuna uzima u obzir. Pregledom literature uočeno je da navedeni model u pravilu precjenjuje početnu krutost što se može pripisati pretpostavci idealne veze između okvira i ispuna i idealne izvedbe ispuna (potpuna ispunjenost horizontalnih i vertikalnih reški):

$$K_i = \left(K_{cs} + K_i\right)^{-1} = \left(\frac{H^3}{\beta^* \cdot E_c \cdot I_e} + \frac{h}{G_i \cdot A_i}\right)^{-1} \tag{7.9}$$

gdje je

$$I_e = \frac{E_i}{E_c} I_i + 2 \cdot \left[I_c + A_c \cdot \left(\frac{L}{2}\right)^2\right] \tag{7.10}$$

pri čemu su I_i i I_e momenti tromosti ispuna i ekvivalentnog poprečnog presjeka sustava, A_i ploština poprečnog presjeka ispuna, a G_i modul posmika ispuna. Koeficijent β^* ovisi o rubnim uvjetima sustava prilikom horizontalnog opterećenja, a vrijednost mu je u intervalu od 3 do 12, pri čemu vrijednost 3 predstavlja jednostranu upetost (konzola) dok vrijednost 12 predstavlje obostranu upetost. Izazom (7.10) poprečni presjek sustav prikazan je kao ekvivalentni betonski presjek. Alternativno, moguće je primijeniti i ekvivalentni zidani presjek uz prilagodbu izraza (7.9) i (7.10).

Žarnić [65], prilikom određivanja početne krutosti primjenjuje modificirani model posmične grede definiran izrazom (7.11). Iako je konceptualno model istovjetan prethodnom, osnovna se razlika očituje u primjeni koeficijenta C_E prilikom definiranja geometrijskih karakteristika kompozitnog poprečnog presjeka sustava kojim se u osnovi definira stupanj veze okvira i ispuna. Vrijednost

koeficijenta C_E u intervalu je od 0 do 1, pri čemu vrijednost 0 predstalja slučaj kod kojeg ne postoji veza između okvira i ispuna na punoj visini stupova dok vrijednost 1 predstavlja idealnu vezu. Za praktičnu primjenu preporučuje se vrijednost koeficijenta C_E u iznosu od 0,5 [50]. Osim toga, autor prilikom proračuna posmične krutosti uzima u obzir cijeli poprečni presjek, tj. uzima u obzir i doprinos stupova okvira. Prilikom idealizacije sustava pretpostavljena je jednostrana upetost (konzolni sustav), odnosno vrijednost koeficijenta β^* u iznosu od 3:

$$K_i = \left(\frac{H^3}{3 \cdot E \cdot I_e} + \frac{1{,}2 \cdot h}{G \cdot A_e} \right)^{-1} \tag{7.11}$$

gdje je

$$A_e = A_i + 2 \cdot C_E \cdot A_c \cdot \frac{G_c}{G_i} \tag{7.12}$$

$$I_e = I_i + 2 \cdot C_E \cdot \frac{E_c}{E_i} \cdot \left[I_c + A_c \cdot \left(\frac{L}{2} \right)^2 \right] \tag{7.13}$$

pri čemu su A_e i I_e ploština i moment tromosti ekvivalentnog zidanog poprečnog presjeka sustava.

Wei [66], na temelju vlastitih rezultata istraživanja predlaže procjenu početne krutosti pomoću izraza (7.14). Iako je izraz polu empirijske prirode i ne može se svrstati niti u metodu zamjenske tlačne dijagonale niti u metodu posmične grede, model je odabran zbog svoje jedinstvenosti. Naime, model pruža mogućnost sagledavanja utjecaja otvora u ispunu na početnu krutost sustava pomoću koeficijenta γ^*. Kako predmet istraživanja nije utjecaj otvora u ispunu na ponašanje sustava, pregledom literature uočen je nedostatak empririjskih izraza za procjenu početne krutosti što je dodatni razlog provjere mogućnosti primjene predloženog modela:

$$K_i = \left[0{,}55 + 0{,}15 \cdot \left(\frac{l}{h} - 1 \right) \right] \cdot \frac{E_i \cdot t \cdot l}{2.35 \cdot h \cdot \left(\frac{1}{1 - \gamma^*} + \frac{11 \cdot A_e \cdot h^2}{7 \cdot I_e} \right)} \tag{7.14}$$

gdje je

$$I_e = 0{,}52 \cdot \frac{E_c}{E_i} \cdot A_c \cdot \left(\frac{l}{2} \right)^2 + \frac{t \cdot l^3}{12} \tag{7.15}$$

$$\gamma^* = a \cdot \frac{t}{A_e} \tag{7.16}$$

pri čemu je *a* duljina otvora, a A_e ekvivalentna ploština poprečnog presjeka sustava definirana u iznosu od $1{,}1 \cdot t \cdot l$.

7.2.1.1. Usporedba i analiza postojećih modela procjene početne krutosti

Usporedba eksperimentalno određene vrijednosti početne krutosti ispitnih uzoraka (K_i^e), s rezultatima postojećih analitičkih modela procjene (K_i^a), prikazana je u Tablicama 7.1 i 7.2 u ovisnosti o smjeru opterećenja te Tablicom 7.3 u odnosu na srednju eksperimentalnu vrijednost. Koeficijenti odstupanja određen je kao količnik dijeljenja analitičkih i eksperimentalnih rezultata.

SS1 i *SS2* modeli, temeljeni na idealizaciji ispuna pomoću zamjenske tlačne dijagonale neovisno o promatranom smjeru opterećenja i vezi elemenata okvira, kod većine ispitnih uzoraka kod kojih je ispun izveden od šupljih zidnih elemenata precjenjuju vrijednost početne krutosti. Navedeno posebno dolazi do izražaja u slučaju *SS1* modela. Neovisno o modelu, dobivene su veće vrijednosti početne krutosti u slučaju pretpostavke upete veze između elemenata okvira. Manja odstupanja dobivena su pri pozitivnom smjeru opterećenja gdje se koeficijent odstupanja nalazi u intervalu od idealnih 1 pa do 1,53. Pri negativnom smjeru opterećenja vrijednosti koeficijenta odstupanja nalaze se u intervalu od 1,11 do 2,40. U odnosu na srednju eksperimentalnu vrijednost početne krutosti, koeficijent odstupanja u intervalu je od 1,01 do 1,77. Suprotno, kod uzoraka kod kojih je ispun izvedena od punih zidnih elemenata oba modela podcjenjuju vrijednost početne krutosti. Jednako kao i kod ispuna izvedenog od šupljih zidnih elemenata, modelom *SS2* dobivene su veće vrijednosti promatrane veličine neovisno o pretpostavljenoj vezi elemenata okvira. Tu nisu uočene značajne razlike u odstupanjima u ovisnosti o smjeru opterećenja. Tako su pri negativnom smjeru opterećenja vrijednosti koeficijenta odstupanja u intervalu od 0,31 do 0,97, a pri pozitivnom u intervalu od 0,32 do 0,96. U odnosu na srednju eksperimentalnu vrijednost, koeficijenti odstupanja u intervalu su od 0,31 do 0,97. Premda u pojedinim slučajevima modeli *SS1* i *SS2* procjenjuju početnu krutost sa zadovoljavajućom točnošću, iz širokih intervala vrijednosti koeficijenta odstupanja može se zaključiti da modeli nisu prikladni za procjenu početne krutosti.

Rezultati procjene početne krutosti primjenom Holmsova modela također su pod utjecajen vrste ispuna, tj. tipa zidnog elementa. Tu su, kao i kod prethodna dva modela, uočene precijenjene vrijednosti početne krutosti kod uzoraka kod kojih je ispun izveden od šupljih zidnih elemenata i podcijenjene vrijednosti kod uzoraka kod kojih je ispun izveden od punih zidnih elemenata neovisno o smjeru opterećenja. Tako su pri pozitivnom smjeru opterećenja vrijednosti koeficijenta odstupanja, u slučaju uzoraka kod kojih je ispun izveden od šupljih zidnih elemenata, u intervalu od 2,44 do 2,87, a

pri negativnom od 2,92 do 4,64. Tu nisu uključene vrijednosti koeficijenta odstupanja za uzorak *O1_bvm* gdje navedeni model precjenjuje eksperimentalnu vrijednost s koeficijentom odstupanja pri pozitivnom i negativnom smjeru opterećenja u iznosu od 0,63. U odnosu na srednju eksperimantalnu vrijednost, koeficijent odstupanja u intervalu je od 2,66 do 3,37. Kod uzoraka kod kojih je ispun izveden od punih zidnih elemenata pri pozitivnom smjeru opterećenja, vrijednosti koeficijenta odstupanja u intervalu su od 0,64 do 0,83, a pri negativnom od 0,65 do 0,83. U odnosu na srednju eksperimentalnu vrijednost, koeficijenti odstupanja u intervalu su od 0,66 do 0,81. Kao i kod prethodne skupine uzoraka, također je uočena razlika u trendu odstupanja u slučaju jednog uzorka, uzorka *O1_cvm*, gdje je vrijednost koeficijenta odstupanja pri pozitivnom smjeru opterećenja 1,01, a pri negativnom 1,03. Isto je uočeno i kod uzorka *O4_cpm*, ali samo pri negativnom smjeru opterećenja gdje je vrijednost koeficijenta odstupanja u iznosu od 1,34. S obzirom na znatno precijenjene i u nekim slučajevima znatno podcijenjene vrijednosti, može se zaključiti da promatrani model nije pogodan za procjenu početne krutosti.

Modeli temeljeni na idealizaciji okvira s ispunom pomoću posmične grede (Fiorato i Žarnić), neovisno o smjeru opterećenja i vrsti zidanog ispuna, precjenjuju vrijednost početne krutosti uzoraka gdje su veća odstupanja uočena kod Žarnićevog modela. Međutim, i tamo do izražaja dolazi utjecaj tipa zidnog elementa ispuna gdje su manja odstupanja kod uzoraka kod kojih je ispun izveden od punih zidnih elemenata. Navedeno se ne odnosi na uzorke *O1_bvm* i *O1_cvm* gdje je uočen suprotan trend. Vrijednosti koeficijenta odstupanja kod Fioratovog modela pri pozitivnom smjeru opterećenja u intervalu su od 1,23 do 5,29, a pri negativnom u intervalu od 1,15 do 7,17. U odnosu na srednju eksperimentalnu vrijednost, koeficijent odstupanja u intervalu je od 1,26 do 6,21. Iako su navedene donje granice vrijednosti koeficijenta odstupanja prihvatljive, kod natpolovične većine uzoraka dobivene su vrijednosti veće od 2. Kod Žarnićevog modela, pri pozitivnom smjeru opterećenja, vrijednosti koeficijenta odstupanja u intervalu su od 4,25 do 10,50, a pri negativnom u intervalu od 4,21 do 10,26. U odnosu na srednju eksperimentalnu vrijednost, koeficijenti odstupanja u intervalu su od 4,23 do 9,02. Navedene relativno izražene vrijednosti koeficijenta odstupanja također ukazuju da navedeni modeli nisu prikladni za procjenu početne krutosti sustava okvir s ispunom. Naime, ukoliko se planira procjena ponašanja i/ili izvedba ojačanja postojeće konstrukcije, nerealno veliko potresno opterećenje, kao posljedica primjene promatranih modela, može dovesti do znatnih nepotrebnih troškova.

Poluempirijski izraz predložen od strane Weia u svim slučajevima podcjenjuje vrijednost početne krutosti neovisno o smjeru opterećenja i tipu ispuna. Tu su također uočena veća odstupanja kod uzoraka kod kojih je ispun izveden od punih zidnih elemenata. Tako su, pri pozitivnom smjeru opterećenja, vrijednosti koeficijenta odstupanja u intervalu od 0,26 do 0,59, a pri negativnom u intervalu

od 0,25 do 0,95. U odnosu na srednju eksperimentalnu vrijednost, koeficijent odstupanja u intervalu je od 0,26 do 0,69. Iako se u pojedinim slučajevima može smatrati da Weijev model sa zadovoljavajućom točnošću procjenjuje početnu krutost, kod natpolovične većine uzoraka dobivene su vrijednosti koeficijenta odstupanja manje od 0,6 u odnosu na srednju eksperimentalnu vrijednost. Navedeno upućuje da i Weijev model nije prikladan za procjenu početne krutosti sustava okvir s ispunom.

Tablica 7.1 *Usporedba analitički i eksperimentalno određene vrijednosti početne krutosti za pozitivan smjer opterećenja*

		SS1		SS2		Holmes	Fiorato	Žarnić	Wei
		u.v.	z.v.	u.v.	z.v.				
O1_bpm	K_i^a [kN/mm]	116,4	109,3	92,4	85,3	224,4	412,8	523,4	46,0
	K_i^e [kN/mm]	78,1							
	Odstupanje	1,49	1,40	1,18	1,09	2,87	5,29	6,70	0,59
O1_bpm*	K_i^a [kN/mm]	116,4	109,3	92,4	85,3	224,4	412,8	523,4	46,0
	K_i^e [kN/mm]	84,7							
	Odstupanje	1,37	1,29	1,09	1,01	2,65	4,87	6,18	0,54
O1_cpm	K_i^a [kN/mm]	32,8	25,7	30,4	23,3	47,9	104,3	300,3	18,7
	K_i^e [kN/mm]	61,8							
	Odstupanje	0,53	0,42	0,49	0,38	0,77	1,69	4,86	0,30
O1_bvm	K_i^a [kN/mm]	31,5	24,2	29,9	22,6	45,3	98,8	303,9	18,4
	K_i^e [kN/mm]	71,5							
	Odstupanje	0,44	0,34	0,42	0,32	0,63	1,38	4,25	0,26
O1_cvm	K_i^a [kN/mm]	33,0	25,7	30,7	23,3	34,8	104,5	307,6	19,0
	K_i^e [kN/mm]	34,4							
	Odstupanje	0,96	0,75	0,89	0,68	1,01	3,04	8,94	0,55
O2_cpm	K_i^a [kN/mm]	32,8	25,7	30,4	23,3	47,6	104,3	300,3	18,7
	K_i^e [kN/mm]	57,0							
	Odstupanje	0,58	0,45	0,53	0,41	0,83	1,83	5,27	0,33
O3_bpm	K_i^a [kN/mm]	137,1	115,6	110,6	89,1	227,2	423,5	670,7	48,0
	K_i^e [kN/mm]	89,5							
	Odstupanje	1,53	1,29	1,24	1,00	2,54	4,73	7,49	0,54
O3_cpm	K_i^a [kN/mm]	47,4	26,0	54,0	32,6	53,0	101,9	455,0	22,2
	K_i^e [kN/mm]	82,9							
	Odstupanje	0,57	0,31	0,65	0,39	0,64	1,23	5,49	0,27
O4_bpm	K_i^a [kN/mm]	142,2	115,6	115,7	89,1	233,4	430,4	680,3	51,0
	K_i^e [kN/mm]	95,6							
	Odstupanje	1,49	1,21	1,21	0,93	2,44	4,50	7,12	0,53
O4_cpm	K_i^a [kN/mm]	52,5	26,0	59,1	32,6	59,2	103,8	462,0	23,4
	K_i^e [kN/mm]	44,0							
	Odstupanje	1,19	0,59	1,34	0,74	1,34	2,36	10,50	0,53

Tablica 7.2 *Usporedba analitički i eksperimentalno određene vrijednosti početne krutosti za negativni smjer opterećenja*

		SS1		SS2		Holmes	Fiorato	Žarnić	Wei
		u.v.	z.v.	u.v.	z.v.				
O1_bpm	K_i^a [kN/mm]	116,4	109,3	92,4	85,3	224,4	412,8	523,4	46,0
	K_i^e [kN/mm]	57,6							
	Odstupanje	2,02	1,90	1,60	1,48	3,89	7,17	9,09	0,80
O1_bpm*	K_i^a [kN/mm]	116,4	109,3	92,4	85,3	224,4	412,8	523,4	46,0
	K_i^e [kN/mm]	48,4							
	Odstupanje	2,40	2,26	1,91	1,76	4,64	8,53	10,81	0,95
O1_cpm	K_i^a [kN/mm]	32,8	25,7	30,4	23,3	47,9	104,3	300,3	18,7
	K_i^e [kN/mm]	57,7							
	Odstupanje	0,57	0,45	0,53	0,40	0,83	1,81	5,20	0,32
O1_bvm	K_i^a [kN/mm]	31,5	24,2	29,9	22,6	45,3	98,8	303,9	18,4
	K_i^e [kN/mm]	72,2							
	Odstupanje	0,44	0,34	0,41	0,31	0,63	1,37	4,21	0,25
O1_cvm	K_i^a [kN/mm]	33,0	25,7	30,7	23,3	34,8	104,5	307,6	19,0
	K_i^e [kN/mm]	33,9							
	Odstupanje	0,97	0,76	0,91	0,69	1,03	3,08	9,07	0,56
O2_cpm	K_i^a [kN/mm]	32,8	25,7	30,4	23,3	47,6	104,3	300,3	18,7
	K_i^e [kN/mm]	60,1							
	Odstupanje	0,55	0,43	0,51	0,39	0,79	1,74	5,00	0,31
O3_bpm	K_i^a [kN/mm]	137,1	115,6	110,6	89,1	227,2	423,5	670,7	48,0
	K_i^e [kN/mm]	65,4							
	Odstupanje	2,10	1,77	1,69	1,36	3,47	6,48	10,26	0,73
O3_cpm	K_i^a [kN/mm]	47,4	26,0	54,0	32,6	53,0	101,9	455,0	22,2
	K_i^e [kN/mm]	78,5							
	Odstupanje	0,60	0,33	0,69	0,42	0,67	1,30	5,80	0,28
O4_bpm	K_i^a [kN/mm]	142,2	115,6	115,7	89,1	233,4	430,4	680,3	51,0
	K_i^e [kN/mm]	80,0							
	Odstupanje	1,78	1,45	1,45	1,11	2,92	5,38	8,50	0,64
O4_cpm	K_i^a [kN/mm]	52,5	26,0	59,1	32,6	59,2	103,8	462,0	23,4
	K_i^e [kN/mm]	90,6							
	Odstupanje	0,58	0,29	0,65	0,36	0,65	1,15	5,10	0,26

Tablica 7.3 *Usporedba analitički određene vrijednosti početne krutosti u odnosu na srednju eksperimentalnu vrijednost*

		SS1		SS2		Holmes	Fiorato	Žarnić	Wei
		u.v.	z.v.	u.v.	z.v.				
O1_bpm	K_i^a [kN/mm]	116,4	109,3	92,4	85,3	224,4	412,8	523,4	46,0
	K_i^e [kN/mm]	67,8							
	Odstupanje	1,72	1,61	1,36	1,26	3,31	6,09	7,72	0,68
O1_bpm*	K_i^a [kN/mm]	116,4	109,3	92,4	85,3	224,4	412,8	523,4	46,0
	K_i^e [kN/mm]	66,5							
	Odstupanje	1,75	1,64	1,39	1,28	3,37	6,21	7,87	0,69
O1_cpm	K_i^a [kN/mm]	32,8	25,7	30,4	23,3	47,9	104,3	300,3	18,7
	K_i^e [kN/mm]	59,7							
	Odstupanje	0,55	0,43	0,51	0,39	0,80	1,75	5,03	0,31

O1_bvm	K_i^a *[kN/mm]*	31,5	24,2	29,9	22,6	45,3	98,8	303,9	18,4
	K_i^e *[kN/mm]*	71,8							
	Odstupanje	0,43	0,34	0,42	0,31	0,63	1,38	4,23	0,26
O1_cvm	K_i^a *[kN/mm]*	33,0	25,7	30,7	23,3	34,8	104,5	307,6	19,0
	K_i^e *[kN/mm]*	34,1							
	Odstupanje	0,97	0,75	0,90	0,68	1,02	3,06	9,02	0,56
O2_cpm	K_i^a *[kN/mm]*	32,8	25,7	30,4	23,3	47,6	104,3	300,3	18,7
	K_i^e *[kN/mm]*	58,5							
	Odstupanje	0,56	0,44	0,52	0,40	0,81	1,78	5,13	0,32
O3_bpm	K_i^a *[kN/mm]*	137,1	115,6	110,6	89,1	227,2	423,5	670,7	48,0
	K_i^e *[kN/mm]*	77,4							
	Odstupanje	1,77	1,49	1,43	1,15	2,94	5,47	8,67	0,62
O3_cpm	K_i^a *[kN/mm]*	47,4	26,0	54,0	32,6	53,0	101,9	455,0	22,2
	K_i^e *[kN/mm]*	80,7							
	Odstupanje	0,59	0,32	0,67	0,40	0,66	1,26	5,64	0,28
O4_bpm	K_i^a *[kN/mm]*	142,2	115,6	115,7	89,1	233,4	430,4	680,3	51,0
	K_i^e *[kN/mm]*	87,8							
	Odstupanje	1,62	1,32	1,32	1,01	2,66	4,90	7,75	0,58
O4_cpm	K_i^a *[kN/mm]*	52,5	26,0	59,1	32,6	59,2	103,8	462,0	23,4
	K_i^e *[kN/mm]*	67,3							
	Odstupanje	0,78	0,39	0,88	0,48	0,88	1,54	6,86	0,35

7.2.2. Procjena horizontalne nosivosti sustava pri pojavi prve značajne pukotine u ispunu

Prilikom procjene horizontalne nosivosti sustava okvir s ispunom, pri pojavi prve značajne pukotine u ispuni, u literaturi se mogu pronaći dva različita pristupa koja se u osnovi razlikuju u pretpostavci mehanizma sloma.

Prema Žarniću, horizontalna nosivost sustava okvir s ispunom, pri pojavi prve značajne pukotine u ispunu V_{cr}, određena je prekoračenjem vlačne čvrstoće. Autor na temelju vlastitih rezultata ispitivanja predlaže procjenu nosivosti V_{cr} pomoću izraza (7.17). Izrazom se pretpostavlja pojava dijagonalne pukotine u ispunu dok se doprinos okvira promatrane veličine u potpunosti zanemaruje:

$$V_{cr} = C_R \cdot \frac{A_i \cdot f_t}{C_I \cdot b} \cdot \left\{ 1 + \sqrt{C_I^2 \cdot \left(1 + \frac{\sigma_{o,i}}{f_t} \right) + 1} \right\} \tag{7.17}$$

gdje je f_t vlačna čvrstoća ispuna, $\sigma_{o,i}$ tlačno naprezanje u zidanom ispunu uzrokovano vertikalnim (gravitacijskim) opterećenjem, a određuje se proporcionalno aksijalnim krutostima elemenata sustava. Vrijednost tlačnog naprezanja u zidanom ispunu ovisi o tehnologiji izvedbe sustava. U slučaju kada se ispun izvodi nakon okvira, što je i uobičajeno u praksi, sva se vertikalna opterećenja prenose preko stupova okvira dok je tlačno naprezanje u ispunu uzrokovano isključivo interakcijom okvir – ispun. Koeficijent C_I definiran je kao koeficijent interakcije pomoću izraz (7.18) kojim se uzima u obzir

pretpostavljeni oblik raspodjele sila interakcije i posmičnog naprezanja u ispunu uslijed pojave tlačne dijagonale. Koeficijent C_l u suštini predstavlja odnos maksimalnog posmičnog i normalnog naprezanja na poprečnom presjeku u polovini visine ispuna. Na temelju eksperimentalnih rezultata autor predlaže vrijednost koeficijenata a^* i b u iznosu od 7/8 i 1,1. Vrijednost koeficijenta C_R određena je eksperimentalno i u izravnoj je ovisnosti o tipu ispuna, odnosno o vrsti materijala od kojeg su izvedeni zidni elementi. Tako se za glinene zidne elementa preporučuje primjena vrijednosti koeficijenta C_R u iznosu od 0,9:

$$C_l = 2 \cdot a^* \cdot b \cdot \frac{l}{h} \tag{7.18}$$

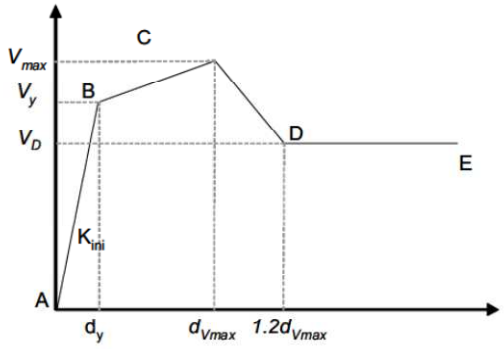
Flores [67] na temelju vlastitih istraživanja predlaže proračun horizontalne nosivosti sustava pri pojavi prve značajne pukotine u ispunu pomoću izraza (7.19). Za razliku od Žarnića, autor pretpostavlja pojavu dijagonalne pukotine u ispunu uslijed prekoračenja posmične čvrstoće. Predloženi model temeljen je na osnovi Mohr-Coulombovog zakona:

$$V_{cr} = 0{,}5 \cdot f_v \cdot A_i + 0{,}3 \cdot P \leq 1{,}5 \cdot f_v \cdot A_i \tag{7.19}$$

gdje je f_v posmična čvrstoća ispuna određena dijagonalnim tlačnim ispitivanjem, a P ukupno vertikalno (gravitacijsko) opterećenje sustava.

Stavridis [19] na temelju vlastitih eksperimentalnih istraživanja te naknadne opsežne numeričke analize primjenom metode konačnih elemenata predlaže nelinearni model koji predviđa četverolinearni odnos sile i pomaka. Model je po karakteristikama sličan modelima sadržanim u *ASCE 41-06* [68] i *FEMA 306* [69]. Idealizirana krivulja odnosa sila – relativni međukatni pomak prikazana je Slikom 7.3. Horizontalna nosivosti sustava pri pojavi prve pukotine definirana je pomoću izraza (7.20). Iako autor definiranu vrijednost ne naziva decidirano silom pri pojavi prve pukotine gdje koristi izraz sila pri pojavi tečenja sustava, prema obliku idealizacije odgovora da se zaključiti da se radi o istoj sili:

$$V_y = \frac{2}{3} \cdot V_{\max} \tag{7.20}$$



Slika 7.3 *Idealizirani četverolinearni odnos sila – pomak prema Stavridisu* [19]

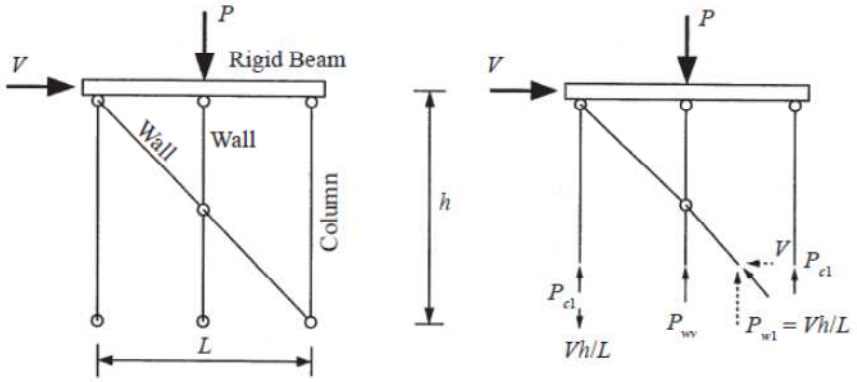
Maksimalna nosivost sustava, odnosno nosivost pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna, definirana je kao zbroj posmične nosivosti stupova okvira i ispuna pomoću izraza (7.21). Nosivost ispuna određuje se na temelju Mohr-Coulombova zakona pod pretpostavkom raspodjele vertikalnog (gravitacijskog) opterećenja između elemenata sustava proporcionalno aksijalnim krutostima. Koeficijent ψ definiran je kao koeficijent redukcije posmične nosivosti stupova (V_{lc} i V_{rc}) i vrijednost mu je $0 \leq \psi \leq 1$. Za praktičnu primjenu preporučuje se vrijednost koeficijenta ψ u iznosu od 0. U tom je slučaju maksimalna nosivost sustava jednaka posmičnoj čvrstoći ispuna što je logična pretpostavka s obzirom da je maksimalna nosivost sustava u većini slučajeva određena pojavom dominantnog mehanizma sloma ispuna. Osim toga, rezultati provedenih i dostupnih ispitivanja u literaturi ukazuju na znatnu preostalu nosivost praznog okvira pri relativnim međukatnim pomacima koji uzrokuju maksimalnu nosivosti ispuna, tj. pojavu dominantnog mehanizma sloma. Iako se nosivost sustava okvir s ispunom ne može odrediti superpozicijom doprinosa konstituenata, zanemarivanje doprinosa okvira, tj. odabirom $\psi = 0$, ostvaruje se pretpostavka na strani sigurnosti:

$$V_{max} = \psi \cdot \left(V_{lc} + V_{rc}\right) + c_0 \cdot A_i + \mu \cdot P_i \tag{7.21}$$

gdje je P_i vertikalno opterećenje ispune.

Fiorato, i kasnije Meharbi [34], predlaže proračun horizontalne nosivosti sustava pri pojavi prve značajne pukotine u ispunu pomoću izraza (7.22). Izrazom se pretpostavlja pojava pukotine uslijed otkazivanja posmične nosivosti ispuna, a temeljen je, kao i prethodni model, na Mohr-Coulombovom zakonu. Za razliku od Stavridisovog i Floresovog modela gdje je pretpostavljeno da je tlačno naprezanje u ispunu uzrokovano vertikalnim (gravitacijskim) opterećenjem, izrazom (7.22) uzima se u obzir tlačno naprezanje uzrokovano i interakcijom kao i kod Žarnićevog modela. Međutim, za razliku od Žarnića, Fioratov model definiran je na jasnoj geometrijskoj idealizaciji sustava čime su izbjegnute nejasnoće vezane uz varijable Žarnićevog modela. Ukupna tlačna sila (naprezanje) u ispunu određena je pomoću geometrijske idealizacije sustava prikazane Slikom 7.4 gdje je ispun predstavljen pomoću

dvaju zamjenskih štapova (vertikalnih i dijagonalnih) međusobno povezanih zglobnom vezom, pri čemu se vrijednosti pojedinih komponenti ukupne tlačne sile u ispunu određuju na temelju ravnoteže prikazanog modela:



Slika 7.4 *Model raspodijele vertikalnog opterećenje prema Fioratu* [65]

$$V_{cr} = A_i \cdot \frac{c_0 + \frac{\mu \cdot P}{A_e}}{1 - \mu \cdot \frac{H}{L}} \tag{7.22}$$

gdje je

$$A_e = A_i + 2 \cdot A_c \cdot \frac{E_c}{E_i} \tag{7.23}$$

$$A_c = h_c \cdot b_c + A_s \cdot \left(\frac{E_s}{E_c} - 1 \right) \tag{7.24}$$

pri čemu je A_s ploština, a E_s modul elastičnosti uzdužne armature u stupovima okvira.

7.2.2.1. Usporedba i analiza postojećih modela procjene horizontalne nosivosti sustava pri pojavi prve značajne pukotine u ispunu

Usporedba eksperimentalno određene vrijednosti horizontalne nosivosti ispitnih uzoraka pri pojavi prve značajne pukotine u ispuni (V_{cr}^e) s rezultatima postojećih analitičkih modela procjene (V_{cr}^a) prikazana je u Tablicama 7.4 i 7.5 u ovisnosti o smjeru opterećenja te Tablicom 7.6 u odnosu na srednju eksperimentalnu vrijednost. Koeficijent odstupanja određen je kao količnik dijeljenja analitičkih i eksperimentalnih rezultata.

Žarnićev model, neovisno o promatranom smjeru opterećenja, podcjenjuje vrijednost horizontalne nosivosti sustava pri pojavi prve značajne pukotine u ispunu kod svih ispitnih uzoraka. Vrijednost koeficijenta odstupanja, pri pozitivnom smjeru opterećenja, u intervalu je od 0,37 do 0,87, a pri negativnom u intervalu od 0,38 do 0,96. Iako gornje vrijednosti koeficijenta odstupanja upućuju na zadovoljavajuću točnost procjene promatrane veličine, model kod natpolovične većine uzoraka daje procjenu s vrijednostima koeficijenta odstupanja manjim od 0,6 (odstupanja veća od 40%). U odnosu na srednje eksperimentalne vrijednosti, koeficijenti odstupanja u intervalu su od 0,37 do 0,92.

Floresov model pri pozitivnom smjeru opterećenja također podcjenjuje vrijednosti horizontalne nosivosti pri pojavi prve značajne pukotine u ispunu kod svih ispitnih uzoraka. Pri negativnom smjeru opterećenja navedeni model precjenjuje promatranu veličinu samo u slučaju ispitnog uzorka *O1_bpm** s koeficijentom odstupanja u iznosu od 1,03. U odnosu na tip ispuna, model daje manja odstupanja u slučaju uzoraka kod kojih je ispun izveden od šupljih glinenih blokova. Vrijednosti koeficijenta odstupanja, pri pozitivnom smjeru opterećenja, u intervalu su od 0,33 do 0,93, a pri negativnom u intervalu od 0,31 do 1,03. Tu su kao i kod Žarnićevog modela kod natpolovične većine uzoraka dobiveni koeficijenti odstupanja s vrijednostima manjim od 0,6. U odnosu na srednju eksperimentalnu vrijednost, koeficijenti odstupanja u intervalu su od 0,32 do 0,98.

Stavridisov model podcjenjuje vrijednost horizontalne nosivosti pri pojavi prve značajne pukotine u ispunu, neovisno o smjeru opterećenja, kod svih uzoraka osim *O1_bpm* i *O1_bpm**. Vrijednost koeficijenta odstupanja kod navedenih uzoraka iznosi 1,07 pri pozitivnom smjeru opterećenja, a pri negativnom 0,99 za uzorak *O1_bpm* i 1,18 za uzorak *O1_bpm**. Kod ostalih uzoraka vrijednost koeficijenta odstupanja, pri pozitivnom smjeru opterećenja, u intervalu je od 0,32 do 0,76, a pri negativnom u intervalu od 0,30 do 0,67. Kao i kod prijašnja dva modela, promatrani model također kod natpolovične većine procijenjuje promatranu veličinu s vrijednostima koeficijenta odstupanja manjim od 0,6. U odnosu na srednju eksperimentalnu vrijednost, koeficijenti odstupanja u intervalu su od 0,31 do 1,12.

S druge strane, Fioratov model kod natpolovične većine uzoraka, neovisno o smjeru opterećenja, precjenjuje vrijednost horizontalne nosivosti sustava pri pojavi prve značajne pukotine. Kod uzoraka kod kojih je precijenjena vrijednost promatrane veličine, vrijednosti koeficijenta odstupanja pri pozitivnom smjeru opterećenja u intervalu su od 1,09 do 2,07, a pri negativnom u intervalu od 1,17 do 2,28. U slučaju uzoraka kod kojih su podcjenjene vrijednosti horizontalne nosivosti, vrijednosti koeficijenta odstupanja pri pozitivnom smjeru opterećenja u intervalu su od 0,74 do 0,96, a pri negativnom u intervalu od 0,70 do 0,91. U odnosu na srednju eksperimentalnu vrijednost, koeficijenti odstupanja u intervalu su od 0,79 do 2,17.

Potrebno je naglasiti da ne postoji dogovor među istraživačima oko značenja pojma prva značajna pukotina što je vidljivo i iz opisanih modela gdje su, ovisno o autoru, pretpostavljeni različiti uzroci pojave pukotine kao što su prekoračenje vlačne ili posmične čvrstoće ispuna. Naime, trenutak je, tj. sila koja uzrokuje pojavu prve značajne pukotine, u „oku promatrača" što je podložno različitim tumačenjima. U provedenom istraživanju definirano je da termin prva značajna pukotina u ispunu označava pukotinu koja prolazi kroz minimalno četiri reda ispuna po visini ili minimalno tri reda po duljini. Jednaka ili slična definicija pojma prve značajne pukotine nedostaje u radovima autora promatranih modela što je moguća posljedica odstupanja rezultata.

Tablica 7.4 *Usporedba analitički i eksperimentalno određene vrijednosti horizontalne nosivosti sustava pri pojavi prve značajne pukotine u ispunu za pozitivni smjer opterećenja*

		Žarnić	*Flores*	*Stavridis*	*Fiorato*
O1_bpm	V_{cr}^a *[kN]*	88,6	94,6	108,6	210,1
	V_{cr}^e *[kN]*	101,5			
	Odstupanje	0,87	0,93	1,07	2,07
*O1_bpm**	V_{cr}^a *[kN]*	88,6	94,6	108,6	210,1
	V_{cr}^e *[kN]*	101,6			
	Odstupanje	0,87	0,93	1,07	2,07
O1_cpm	V_{cr}^a *[kN]*	79,8	64,1	66,8	152,8
	V_{cr}^e *[kN]*	139,7			
	Odstupanje	0,57	0,46	0,48	1,09
O1_bvm	V_{cr}^a *[kN]*	30,2	35,3	30,3	53,4
	V_{cr}^e *[kN]*	72,0			
	Odstupanje	0,42	0,49	0,42	0,74
O1_cvm	V_{cr}^a *[kN]*	46,6	28,0	35,8	89,5
	V_{cr}^e *[kN]*	79,1			
	Odstupanje	0,59	0,36	0,45	1,14
O2_cpm	V_{cr}^a *[kN]*	78,9	62,9	60,2	149,0
	V_{cr}^e *[kN]*	118,6			
	Odstupanje	0,67	0,53	0,51	1,26
O3_bpm	V_{cr}^a *[kN]*	91,9	106,7	115,0	226,3
	V_{cr}^e *[kN]*	152,1			
	Odstupanje	0,60	0,70	0,76	1,49
O3_cpm	V_{cr}^a *[kN]*	77,5	62,1	60,2	154,7
	V_{cr}^e *[kN]*	189,0			
	Odstupanje	0,41	0,33	0,32	0,82
O4_bpm	V_{cr}^a *[kN]*	87,5	95,7	107,2	209,7
	V_{cr}^e *[kN]*	239,0			
	Odstupanje	0,37	0,40	0,45	0,88
O4_cpm	V_{cr}^a *[kN]*	75,3	59,2	56,7	143,6
	V_{cr}^e *[kN]*	149,9			
	Odstupanje	0,50	0,39	0,38	0,96

Tablica 7.5 *Usporedba analitički i eksperimentalno određene vrijednosti horizontalne nosivosti sustava pri pojavi prve značajne pukotine u ispunu za negativni smjer opterećenja*

		Žarnić	Flores	Stavridis	Fiorato
O1_bpm	V_{cr}^a [kN]	88,6	94,6	108,6	210,1
	V_{cr}^e [kN]	109,6			
	Odstupanje	0,81	0,86	0,99	1,92
O1_bpm*	V_{cr}^a [kN]	88,6	94,6	108,6	210,1
	V_{cr}^e [kN]	92,0			
	Odstupanje	0,96	1,03	1,18	2,28
O1_cpm	V_{cr}^a [kN]	79,8	64,1	66,8	152,8
	V_{cr}^e [kN]	136,2			
	Odstupanje	0,59	0,47	0,49	1,12
O1_bvm	V_{cr}^a [kN]	30,2	35,3	30,3	53,4
	V_{cr}^e [kN]	72,2			
	Odstupanje	0,42	0,49	0,42	0,74
O1_cvm	V_{cr}^a [kN]	46,6	28,0	35,8	89,5
	V_{cr}^e [kN]	76,6			
	Odstupanje	0,61	0,37	0,47	1,17
O2_cpm	V_{cr}^a [kN]	78,9	62,9	60,2	149,0
	V_{cr}^e [kN]	120,1			
	Odstupanje	0,66	0,52	0,50	1,24
O3_bpm	V_{cr}^a [kN]	91,9	106,7	115,0	226,3
	V_{cr}^e [kN]	171,4			
	Odstupanje	0,54	0,62	0,67	1,32
O3_cpm	V_{cr}^a [kN]	77,5	62,1	60,2	154,7
	V_{cr}^e [kN]	200,2			
	Odstupanje	0,39	0,31	0,30	0,70
O4_bpm	V_{cr}^a [kN]	87,5	95,7	107,2	209,7
	V_{cr}^e [kN]	229,6			
	Odstupanje	0,38	0,42	0,47	0,91
O4_cpm	V_{cr}^a [kN]	75,3	59,2	56,7	143,6
	V_{cr}^e [kN]	101,4			
	Odstupanje	0,74	0,58	0,56	1,42

Tablica 7.6 *Usporedba analitički određene vrijednosti horizontalne nosivosti sustava pri pojavi prve značajne pukotine u ispunu u odnosu na srednju eksperimentalnu vrijednost*

		Žarnić	Flores	Stavridis	Fiorato
O1_bpm	V_{cr}^a [kN]	88,6	94,6	108,6	210,1
	V_{cr}^e [kN]	105,5			
	Odstupanje	0,84	0,90	1,03	1,99
O1_bpm*	V_{cr}^a [kN]	88,6	94,6	108,6	210,1
	V_{cr}^e [kN]	96,8			
	Odstupanje	0,92	0,98	1,12	2,17
O1_cpm	V_{cr}^a [kN]	79,8	64,1	66,8	152,8
	V_{cr}^e [kN]	137,9			
	Odstupanje	0,58	0,46	0,48	1,11
O1_bvm	V_{cr}^a [kN]	30,2	35,3	30,3	53,4

	V_{cr}^{e} [kN]	72,1			
	Odstupanje	0,42	0,49	0,42	0,74
O1_cvm	V_{cr}^{a} [kN]	46,6	28,0	35,8	89,5
	V_{cr}^{e} [kN]	77,8			
	Odstupanje	0,60	0,36	0,46	1,15
O2_cpm	V_{cr}^{a} [kN]	78,9	62,9	60,2	149,0
	V_{cr}^{e} [kN]	119,3			
	Odstupanje	0,66	0,53	0,50	1,25
O3_bpm	V_{cr}^{a} [kN]	91,9	106,7	115,0	226,3
	V_{cr}^{e} [kN]	161,7			
	Odstupanje	0,57	0,66	0,71	1,40
O3_cpm	V_{cr}^{a} [kN]	77,5	62,1	60,2	154,7
	V_{cr}^{e} [kN]	194,6			
	Odstupanje	0,40	0,32	0,31	0,79
O4_bpm	V_{cr}^{a} [kN]	87,5	95,7	107,2	209,7
	V_{cr}^{e} [kN]	234,2			
	Odstupanje	0,37	0,41	0,46	0,90
O4_cpm	V_{cr}^{a} [kN]	75,3	59,2	56,7	143,6
	V_{cr}^{e} [kN]	125,6			
	Odstupanje	0,60	0,47	0,45	1,14

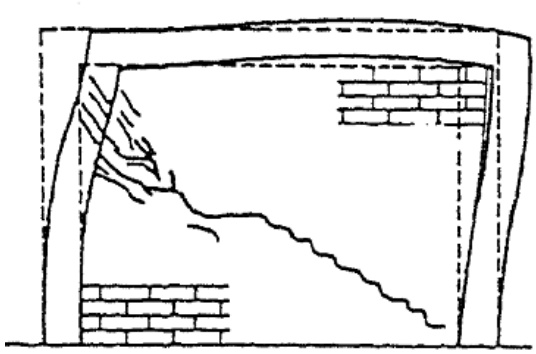
7.3. Granično stanje pojave dominantnog mehanizma sloma ispuna

7.3.1. Procjena horizontalne nosivosti sustava pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna prema postojećim analitičkim modelima

Žarnić definira maksimalnu nosivost sustava kao zbroj reducirane nosivosti ispuna i nosivosti okvira pomoću izraza (7.25). Vrijednost koeficijenta redukcije nosivosti okvira C_F određena je eksperimentalno, a predstavlja stupanj prethodnog oštećenja okvira uzoraka prilikom provedbe ponovljenih ispitivanja. U slučaju neoštećenih okvira, preporučuje se vrijednost u iznosu od 1, suprotno vrijednost u iznosu od 0,85.

$$V_{\max} = C_F \cdot V_f + C_R \cdot V_{cr} \tag{7.25}$$

Nosivost okvira V_f određuje se na temelju očekivanog mehanizma sloma. Pretpostavljeni mehanizam sloma prikazan je Slikom 7.5 gdje je lijevi stup poduprt donjim trokutnim dijelom ispuna dok se desni stup slobodno deformira. Posljedično, kod lijevog stupa dolazi do smanjenja slobodne visine te pojave efekta kratkog stupa što vodi ka posmičnom slomu dok slom desnog stupa nastaje razvojem plastičnih zglobova na krajevima elementa. Za navedeni primjer mehanizma sloma, nosivost okvira definirana je izrazom (7.26):



Slika 7.5 *Mehanizam sloma okvira pri graničnom stanju pojave dominatnog mehanizma sloma ispuna* [65]

$$V_f = 2 \cdot \frac{M_u}{H} + V_u \tag{7.26}$$

gdje je M_u moment savijanja poprečnog presjeka stupa pri pojavi savojnog sloma (pretpostavlja se otkazivanje nosivosti uslijed otkazivanja armature u stupovima), a V_u posmična nosivost stupa definirana izrazom (7.27):

$$V_u = V_c + V_s \tag{7.27}$$

gdje je

$$V_c = 0{,}167 \cdot \sqrt{f_c} \cdot A_d \cdot \left[1 + 0{,}073 \cdot \frac{N_c - 4 \cdot N_t}{A_c} \right] \tag{7.28}$$

$$V_s = \frac{A_s \cdot f_{ys} \cdot d}{s} \tag{7.29}$$

pri čemu je V_c posmična nosivost betona, a V_s nosivost poprečne armature. A_d je ploština poprečnog presjeka stupa definirana kao umnožak širine presjeka b_c i statičke visine d, N_c i N_t, tlačne i vlačne sile koje djeluju na poprečnom presjeku stupa, s je razmak poprečne armature, a f_{ys} čvrstoća poprečne armature na granici popuštanja.

Flores također definira maksimalnu nosivost okvira s ispunom kao zbroj nosivosti ispuna i okvira pomoću izraza (7.30). Za razliku od prethodnog modela, predloženi je izraz izveden na temelju rezultata ispitivanja uokvirenog ziđa što nije predmet istraživanja, međutim, zbog sličnosti mehanizma prijenosa sila i idealizacije odnosa sila – pomak, navedeni je model uzet u razmatranje:

$$V_{\max} = V_{cr} + \eta \cdot V_u \quad \text{ili} \quad V_{\max} = 1{,}25 \cdot V_{cr} \tag{7.30}$$

gdje je

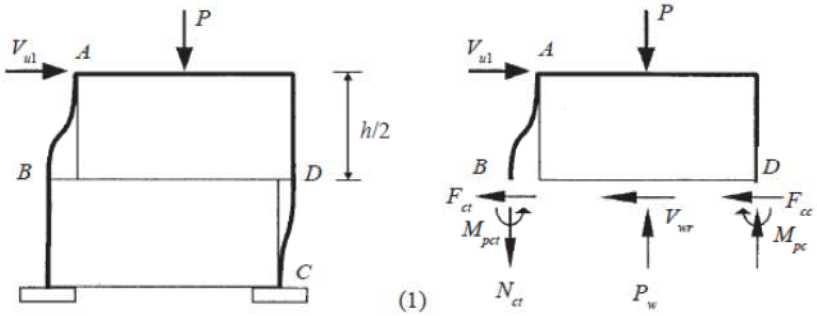
$$V_u = 1{,}26 \cdot d_b^2 \cdot \sqrt{f_c \cdot f_y} \tag{7.31}$$

pri čemu je d_b promjer uzdužne armature vertikalnog serklaža, f_c tlačna čvrstoća betona i f_y čvrstoća uzdužne armature na granici popuštanja. Vrijednost faktora η pretpostavljen je u iznosu od 0,3.

Stavridisov model određivanja maksimalne nosivosti okvira s ispunom opisan je u prethodnom potpoglavlju.

Mehrabi [12] definira maksimalnu nosivost okvira s ispunom u ovisnosti o mehanizmu sloma sustava. Na temelju vlastitih eksperimentalnih rezultata i opsežne analize rezultata dostupnih u literaturi, autor izdvaja pet najvjerojatnih mehanizama sloma (Slika 2.1).

Maksimalna nosivost sustava u slučaju 1. mehanizam sloma određena je kao zbroj posmičnih nosivosti stupova okvira i posmične otpornosti ispuna pomoću izraza (7.32). Vrijednosti pojedinih članova izraza (7.32) određeni su na temelju uvjeta ravnoteže modela prikazanog Slikom 7.6. Otpornost okvira definirana je razvojem plastičnih zglobova na krajevima i polovini visine stupova. Međutim, do pojave plastičnih zglobova na stupovima okvira dolazi pri relativno velikim međukatnim pomacima, pri čemu se ispun nalazi u raspucanoj fazi, stoga je prilikom određivanja posmične otpornosti ispuna potrebno promatrati njegovu rezidualnu nosivost, izraz (7.33):



Slika 7.6 *Prikaz unutarnjih sila za 1. mehanizam* [12]

$$V_{u1} = V_{i,res} + F_{cc} + F_{ct} \tag{7.32}$$

gdje je

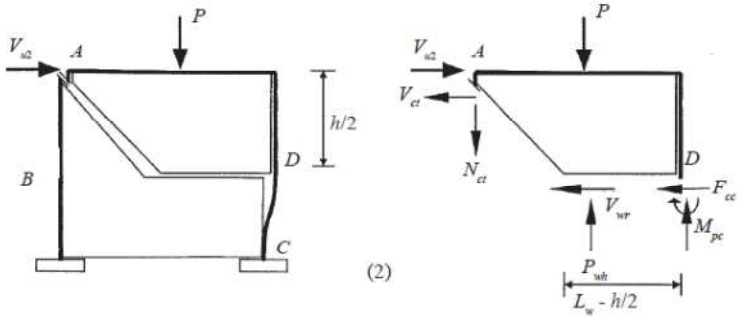
$$V_{i,res} = A_i \cdot \frac{\dfrac{\mu_r \cdot P}{A_e}}{1 - \mu_r \cdot \dfrac{H}{L}} \tag{7.33}$$

$$F_{cc} = \frac{4 \cdot M_{pc}}{H} \tag{7.34}$$

$$F_{ct} = \frac{4 \cdot M_{pct}}{H} \tag{7.35}$$

pri čemu je M_{pc} moment savijanja poprečnog presjeka tlačnog stupa, a M_{pct} moment savijanja poprečnog presjeka vlačnog stupa pri savojnom slomu. Vrijednost M_{pc} određuje se zanemarujući uzdužnu silu dok se M_{pct} određuje uzimajući u obzir utjecaj uzdužne sile u stupu.

Maksimalna nosivost sustava okvir s ispunom u slučaju 2. mehanizma sloma određena je kao zbroj posmične otpornosti lijevog stupa okvira, rezidualne posmične otpornosti ispuna i posmične sile u desnom stupu okvira, izraz (7.36). Vrijednosti pojedinih članova izraza (7.36) određuju se na temelju uvjeta ravnoteže modela prikazanog Slikom 7.7:



Slika 7.7 *Prikaz unutarnjih sila za 2. mehanizam* [12]

$$V_{u2} = V'_{i,res} + F_{cc} + V_{ct} \tag{7.36}$$

gdje je

$$V'_{i,res} = A_i \cdot \frac{\frac{\mu_r \cdot P}{A_e}}{1 - 0{,}5 \cdot \mu_r \cdot \frac{H}{L}} \tag{7.37}$$

$$F_{cc} = \frac{4 \cdot M_{pc}}{H} \tag{7.38}$$

$$V_{ct} = 0{,}8 \cdot V_s + V_c \tag{7.39}$$

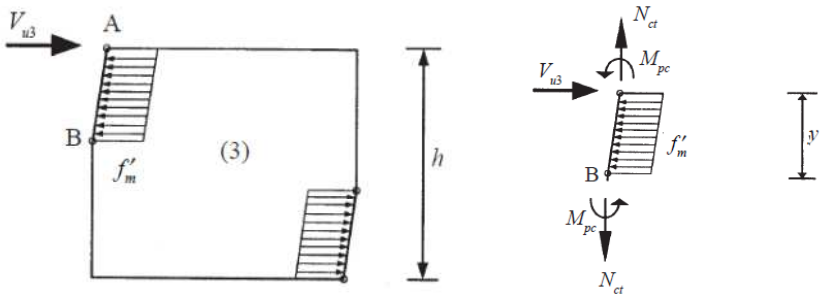
$$V_s = f_{yh} \cdot A_{sh} \cdot \frac{d}{s} \tag{7.40}$$

$$V_c = 2 \cdot \left(1 + \frac{N_{ct}}{500 \cdot A_c}\right) \cdot \sqrt{f_c} \cdot b_c \cdot d \tag{7.41}$$

$$N_{ct} = V_{u2} \cdot \frac{H}{L} + P_{c1} \tag{7.42}$$

Prilikom određivanja rezidualne nosivosti ispuna pretpostavljeno je da je dijagonalna tlačna sila u ispunu podijeljena podjednako između dvaju segmenata određenih dijagonalnom pukotinom, stoga je rezidualni koeficijent trenja pomnožen s faktorom 0,5. V_{ct} predstavlja posmičnu otpornost stupa koja je definirana kao zbroj posmične otpornosti betona V_c i poprečne armature V_s, izrazi (7,40) i (7,41). Otpornost poprečne armature umanjenja je za koeficijent 0,8 s obzirom na činjenicu da sva poprečna armatura koja se nalazi u području posmične pukotine betona nema dovoljnu duljinu potrebnu da bi došlo do plastifikacije. f_{yh} i A_{sh} predstavljaju granicu tečenja i ploštinu poprečne armature dok se vrijednost uzdužne sile u stupovima P_{c1} (Slika 7.3) određuje na temelju relativnog odnosa aksijalnih krutosti ispuna i stupova okvira. Prilikom proračuna posmične otpornosti stupova potrebno je koristiti anglosaksonski mjerni sustav.

U slučaju 3. mehanizma sloma pretpostavlja se da je naprezanje u ispunu na kontaktnoj duljini *z* okvira i ispuna doseglo tlačnu čvrstoću istog te da je došlo do formiranja plastičnih zglobova na stupovima okvira u području u blizini čvorova i u točkama *B* (Slika 7.8). Jednolika raspodjela kontaktnog naprezanja podrazumjeva da je naznačeno područje ispuna u potpunosti doseglo stanje plastifikacije. Točka *B* predstavlja mjesto na kojem moment savijanja ima maksimalnu vrijednost, a posmična sila vrijednost jednaku nuli. Taj mehanizam, koji je temeljen na plastičnoj analizi, prvobitno je definiran od strane [70].



Slika 7.8 *Prikaz unutarnjih sila za 3. mehanizam sloma* [12]

Iz ravnoteže momenata s obzirom na točku *A* segmenta *AB* stupa okvira slijedi:

$$\frac{f_i \cdot t \cdot y}{2} = 2 \cdot M_{pc} \tag{7.43}$$

gdje je f_i tlačna čvrstoća ispuna. Moment plastičnosti stupa M_{pc} određen je ne uzimajući u obzir uzdužnu silu u stupu. Iz jednadžbe (7.43) slijedi duljina kontakta okvira i spuna:

$$y = \sqrt{\frac{4 \cdot M_{pc}}{f_i \cdot t}} \tag{7.44}$$

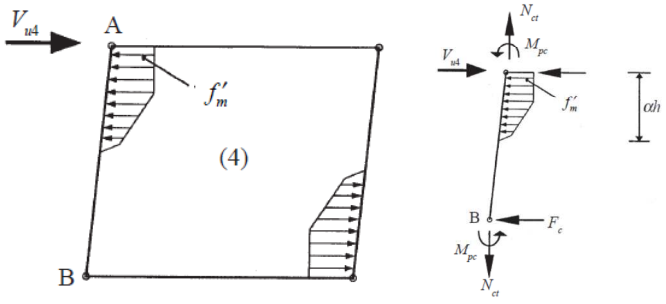
Iz ravnoteže horizontalnih sila, koje dijeluju na segmentu *AB* stupa okvira, slijedi vrijednost horizontalne sile pri slomu sustava:

$$V_{u3} = y \cdot f_i \cdot t = m_c \cdot f_i \cdot t \cdot h_c \tag{7.45}$$

gdje je

$$m_c = \sqrt{\frac{4 \cdot M_{pc}}{f_i \cdot t \cdot h_c^2}} \tag{7.46}$$

Kod 4. mehanizma sloma pretpostavlja se parabolična raspodjela kontaktnih naprezanja na duljini kontakta *zH* s maksimalnim tlačnim naprezanjem u uglovima okvira uz razvoj plastičnih zglobova na krajevima stupova (Slika 7.9). Parabolična raspodjela tlačnih kontaktnih naprezanja temeljena je na pretpostavci da se uslijed rotacije stupova okvira javlja linearna raspodjela tlačnih naprezanja u ispunu. Navedeni, kao i prethodni, mehanizam sloma prvobitno je definiran od strane [70] i temeljen je na plastičnoj analizi.



Slika 7.9 Prikaz unutarnjih sila za 4. mehanizam sloma, [12].

Iz ravnoteže momenata s obzirom na točku *A* segmenta *AB* stupa okvira slijedi:

$$F_c \cdot h + 0{,}25 \cdot f_i \cdot t \cdot (zH)^2 = 2 \cdot M_{pc} \tag{7.47}$$

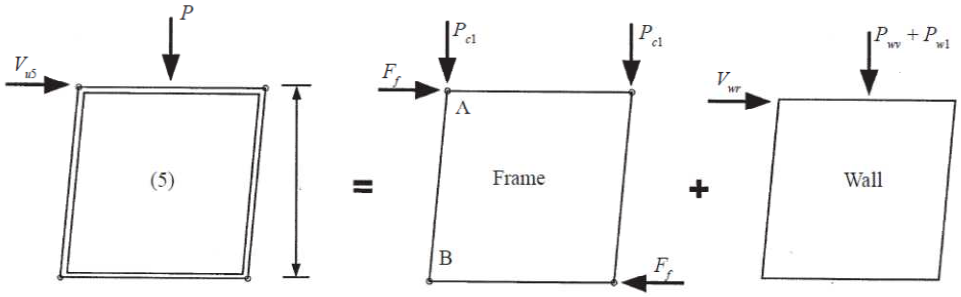
gdje je F_c posmična sila na krajevima stupova okvira koja se određuje pomoću izraza (7.34). Moment plastičnosti stupa okvira M_{pc} i u navedenom se slučaju određuje bez uzimanja u obzir uzdužnu silu u stupu. Iz ravnoteže horizontalnih sila slijedi vrijednost horizontalne sile pri slomu sustava:

$$V_{u4} = 0{,}67 \cdot f_i \cdot t \cdot zH + 2 \cdot F_c = \left(m_c^2 + 0{,}67 \cdot z - 0{,}5 \cdot z^2 \right) \cdot f_i \cdot t \cdot h \tag{7.48}$$

Duljina kontakta ispuna i stupova okvira *zH* određuje se pomoću izraza (7.49):

$$zH = \pi \cdot \sqrt[4]{\frac{E_c \cdot I_c \cdot H}{4 \cdot E_i \cdot t \cdot \sin 2\theta}} \tag{7.49}$$

U slučaju 5. mehanizma sloma, okvir se i ispun promatraju kao dva paralelna sustava s kompatibilnim pomacima u glovima gdje se javljaju tlačna naprezanja (Slika 7.10). Horizontalna sila pri slomu sustava određena je kao zbroj rezidualne posmične nosivosti ispuna i savojne otpornosti okvira, izraz (7.50):



Slika 7.10 *Prikaz unutarnjih sila za 5. mehanizam sloma* [12]

$$V_{u5} = V_{i,res} + F_f \tag{7.50}$$

gdje se $V_{i,res}$ određuje primjenom izraza (7.33). Otpornost okvira F_f određuje se iz uvjeta pojave plastičnih zglobova na krajevima oba stupa okvira pomoću izraza (7.51). Prilikom proračuna momenta savijanja pri slomu stupova M_{pc} zanemaren je utjecaj uzdužne sile. Raspodjela vertikalnog opterećenja određuje se pomoću modela prikazanog Slikom 7.9.

$$F_f = \frac{4 \cdot M_{pc}}{H} \tag{7.51}$$

7.3.1.1. Usporedba i analiza postojećih modela procjene horizontalne nosivosti sustava okvir s ispunom pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna

Usporedba eksperimentalno određene vrijednosti horizontalne nosivosti ispitnih uzoraka pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna (V_{max}^{e}), s rezultatima postojećih analitičkih modela procjene (V_{max}^{a}), prikazana je u Tablicama 7.7 i 7.8 u ovisnosti o smjeru opterećenja te Tablicom 7.9 u

odnosu na srednju eksperimentalnu vrijednost. Koeficijent odstupanja određen je kao količnik dijeljenja analitičkih i eksperimentalnih rezultata.

Usporedbom rezultata vidljivo je da svi promatrani modeli u pravilu, neovisno o smjeru opterećenja, podcjenjuju horizontalnu nosivost sustava pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna. Žarnićev i Floresov model kod svih uzoraka podcjenjuju dok Stavridisov i Mehrabijev model samo u slučaju uzoraka *O1_bpm* i *O1_bpm** precijenjuju vrijednost promatrane veličine. Neovisno o modelu uočena su manja odstupanja pri pozitivnom smjeru opterećenja.

Žarnićev model daje vrijednosti koeficijenta odstupanja pri pozitivnom smjeru opterećenja u intervalu od 0,43 do 0,88, a pri negativnom u intervalu od 0,43 do 0,79. U odnosu na srednju eksperimentalnu vrijednost, koeficijenti su odstupanja u intervalu od 0,43 do 0,89.

Vrijednosti koeficijenta odstupanja kod Floresovog modela pri pozitivnom smjeru opterećenja u intervalu su od 0,28 do 0,74, a pri negativnom u intervalu od 0,28 do 0,84. U odnosu na srednju eksperimentalnu vrijednost, model daje vrijednosti koeficijenta odstupanja u intervalu od 0,28 do 0,76.

Starvidisov model kod uzorka *O1_bpm* precjenjuje horizontalnu nosivost s vrijednošću koeficijenta odstupanja u iznosu od 1,02 pri pozitivnom i 1,09 pri negativnom smjeru opterećenja. Kod uzorka *O1_bpm** vrijednost koeficijenta odstupanja pri pozitivnom smjeru iznosi 0,95, a pri negativnom 1,15. Kod svih ostalih uzoraka, a u odnosu na srednju eksperimentalnu vrijednost, koeficijenti odstupanja u intervalu su od 0,32 do 0,79. Iako u pojedinim slučajevima promatrani model daje zadovoljavajuće rezultate, kod četiriju uzoraka (trećina od ukupnog broja) dobivene su vrijednosti koeficijenta odstupanja manje od 0,60.

Trend odstupanja Mehrabijevih modela jednak je trendu Stavridisovog modela uz nešto izraženija odstupanja pri oba smjera opterećenja. Iako su vrijednosti horizontalnog opterećenja određene u skladu s preporučenim modelima ovisnim o mehanizmima sloma elemenata sustava, rezultati procjene kod natpolovične većine uzoraka odstupaju od eksperimentalnih rezultata s koeficijentom manjim od 0,6. Ako se izuzmu precijenjene vrijednosti, pri pozitivnom smjeru opterećenja dobivene su vrijednosti koeficijenta odstupanja u intervalu od 0,18 do 0,61, a pri negativnom u intervalu od 0,21 do 0,63. U odnosu na srednju eksperimentalnu vrijednost, koeficijenti odstupanja u intervalu su od 0,19 do 0,62.

Potrebno je naglasiti da su Stavridisov i Mehrabijevi modeli izvedeni pod pretpostavkom vrijednosti kohezije i kuta unuranjeg trenja. Stavridis pretpostavlja vrijednost kohezije u iznosu od 0,7 N/mm^2 i kuta unutarnjeg trenja u iznosu od 0,8. S druge su strane, Mehrabijevi modeli izvedeni pod pretpostavkom vrijednosti kohezije u iznosu 0,45 N/mm^2 i kuta unutarnjeg trenja u iznosu od 0,9.

Navedene vrijednosti nisu u skladu s rezultatima provedenih ispitivanja od strane navedenih autora gdje je Mehrabi kod jedne vrste ispuna dobio čak i negativnu vrijednost kohezije. Navedene vrijednosti mehaničkih karakteristika ispuna, kod Mehrabijevih modela, preuzete su iz ispitivanja provedenih od strane Fiorata koji je i idejni začetnik analize sustava okvir s ispunom prema graničnim stanjima. Mogući razlog usvajanja Fioratovih rezultata upravo je navedena negativna vrijednost kohezije iako sam autor decidirano ne navodi razloge. Stavridis također ne navodi razloge usvajanja odabranih vrijednosti mehaničkih karakteristika ispuna. S obzirom da navedeni modeli pretpostavljaju jednaku vrijednost mehaničkih karakteristika za sve vrste ispuna, postavlja se pitanje opravdanosti primjene modela. Prilikom proračuna horizontalne nosivosti pomoću navedenih modela, korištene su vrijednosti mehaničkih karakteristika određenih ispitivanjima.

Tablica 7.7 *Usporedba analitički i eksperimentalno određene vrijednosti horizontalne nosivosti sustava pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna za pozitivni smjer opterećenja*

		Žarnić	*Flores*	*Stavridis*	*Mehrabi*
O1_bpm	V_{max}^a *[kN]*	112,2	118,2	162,9	184,7
	V_{max}^e *[kN]*	160,0			
	Odstupanje	0,70	0,74	1,02	1,15
*O1_bpm**	V_{max}^a *[kN]*	112,2	118,2	162,9	184,7
	V_{max}^e *[kN]*	170,6			
	Odstupanje	0,66	0,69	0,95	1,08
O1_cpm	V_{max}^a *[kN]*	94,8	80,2	92,7	33,2
	V_{max}^e *[kN]*	187,2			
	Odstupanje	0,51	0,43	0,50	0,18
O1_bvm	V_{max}^a *[kN]*	53,1	44,1	45,5	47,2
	V_{max}^e *[kN]*	78,7			
	Odstupanje	0,67	0,56	0,58	0,60
O1_cvm	V_{max}^a *[kN]*	66,1	35,0	53,7	48,4
	V_{max}^e *[kN]*	79,1			
	Odstupanje	0,83	0,44	0,68	0,61
O2_cpm	V_{max}^a *[kN]*	96,4	78,6	90,4	43,1
	V_{max}^e *[kN]*	149,6			
	Odstupanje	0,64	0,53	0,60	0,29
O3_bpm	V_{max}^a *[kN]*	133,1	133,4	172,5	77,0
	V_{max}^e *[kN]*	219,2			
	Odstupanje	0,61	0,61	0,79	0,35
O3_cpm	V_{max}^a *[kN]*	119,3	77,6	90,4	72,4
	V_{max}^e *[kN]*	280,2			
	Odstupanje	0,43	0,28	0,32	0,26
O4_bpm	V_{max}^a *[kN]*	137,2	119,6	160,8	97,9
	V_{max}^e *[kN]*	258,5			
	Odstupanje	0,53	0,46	0,62	0,38
O4_cpm	V_{max}^a *[kN]*	125,0	74,0	85,0	104,0
	V_{max}^e *[kN]*	179,9			

	Odstupanje	0,69	0,41	0,47	0,58

Tablica 7.8 *Usporedba analitički i eksperimentalno određene vrijednosti horizontalne nosivosti sustava pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna za negativni smjer opterećenja*

		Žarnić	*Flores*	*Stavridis*	*Mehrabi*
O1_bpm	V_{max}^a *[kN]*	112,2	118,2	162,9	184,7
	V_{max}^e *[kN]*	149,8			
	Odstupanje	0,75	0,79	1,09	1,23
*O1_bpm**	V_{max}^a *[kN]*	112,2	118,2	162,9	184,7
	V_{max}^e *[kN]*	141,5			
	Odstupanje	0,79	0,84	1,15	1,31
O1_cpm	V_{max}^a *[kN]*	94,8	80,2	92,7	33,2
	V_{max}^e *[kN]*	155,5			
	Odstupanje	0,61	0,52	0,60	0,21
O1_bvm	V_{max}^a *[kN]*	53,1	44,1	45,5	47,2
	V_{max}^e *[kN]*	78,8			
	Odstupanje	0,67	0,56	0,58	0,6
O1_cvm	V_{max}^a *[kN]*	66,1	35,0	53,7	48,4
	V_{max}^e *[kN]*	76,6			
	Odstupanje	0,86	0,46	0,70	0,63
O2_cpm	V_{max}^a *[kN]*	96,4	78,6	90,4	43,1
	V_{max}^e *[kN]*	138,6			
	Odstupanje	0,70	0,57	0,65	0,31
O3_bpm	V_{max}^a *[kN]*	133,1	133,4	172,5	77,0
	V_{max}^e *[kN]*	219,8			
	Odstupanje	0,61	0,61	0,78	0,35
O3_cpm	V_{max}^a *[kN]*	119,3	77,6	90,4	72,4
	V_{max}^e *[kN]*	279,9			
	Odstupanje	0,43	0,28	0,32	0,26
O4_bpm	V_{max}^a *[kN]*	137,2	119,6	160,8	97,9
	V_{max}^e *[kN]*	259,6			
	Odstupanje	0,53	0,46	0,62	0,38
O4_cpm	V_{max}^a *[kN]*	125,0	74,0	85,0	104,0
	V_{max}^e *[kN]*	169,6			
	Odstupanje	0,74	0,44	0,50	0,61

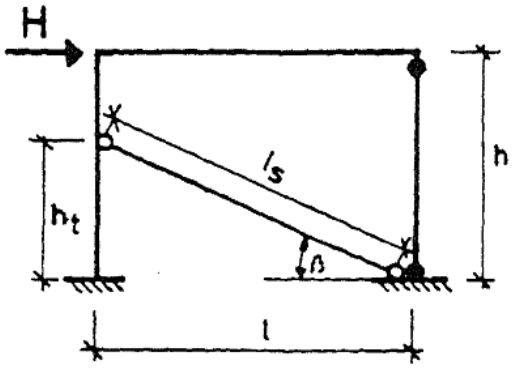
Tablica 7.9 *Usporedba analitički određene vrijednosti horizontalne nosivosti sustava pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna u odnosu na srednju eksperimentalnu vrijednost*

		Žarnić	*Flores*	*Stavridis*	*Mehrabi*
O1_bpm	V_{max}^a *[kN]*	112,2	118,2	162,9	184,7
	V_{max}^e *[kN]*	154,9			
	Odstupanje	0,72	0,76	1,05	1,19
*O1_bpm**	V_{max}^a *[kN]*				
	V_{max}^e *[kN]*	156,1			
	Odstupanje	0,72	0,76	1,04	1,18
O1_cpm	V_{max}^a *[kN]*	94,8	80,2	92,7	33,2
	V_{max}^e *[kN]*	171,3			

	Odstupanje	0,55	0,47	0,54	0,19
O1_bvm	V_{max}^{a} *[kN]*	53,1	44,1	45,5	47,2
	V_{max}^{e} *[kN]*	78,8			
	Odstupanje	0,67	0,56	0,58	0,60
O1_cvm	V_{max}^{a} *[kN]*	66,1	35,0	53,7	48,4
	V_{max}^{e} *[kN]*	77,8			
	Odstupanje	0,85	0,45	0,69	0,62
O2_cpm	V_{max}^{a} *[kN]*	96,4	78,6	90,4	43,1
	V_{max}^{e} *[kN]*	144,1			
	Odstupanje	0,67	0,55	0,63	0,30
O3_bpm	V_{max}^{a} *[kN]*	133,1	133,4	172,5	77,0
	V_{max}^{e} *[kN]*	219,5			
	Odstupanje	0,61	0,61	0,79	0,35
O3_cpm	V_{max}^{a} *[kN]*	111,6	77,6	90,4	72,4
	V_{max}^{e} *[kN]*	280			
	Odstupanje	0,43	0,28	0,32	0,26
O4_bpm	V_{max}^{a} *[kN]*	137,2	119,6	160,8	97,9
	V_{max}^{e} *[kN]*	259,0			
	Odstupanje	0,53	0,46	0,62	0,38
O4_cpm	V_{max}^{a} *[kN]*	125,0	74,0	85,0	104,0
	V_{max}^{e} *[kN]*	174,7			
	Odstupanje	0,72	0,42	0,49	0,60

7.3.2. Procjena relativnog međukatnog pomaka sustava pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna prema postojećim analitičkim modelima

Žarnić u području nakon pojave prve značajne pukotine predlaže procjenu krutosti sustava K_{max} primjenom modela s ekscentričnom zamjenskom tlačnom dijagonalom (Slika 7.11). Krutost zamjenske tlačne dijagonale K_t određena je kao posmično savojna krutost donjeg trokutnog dijela ispuna iz čega slijedi površina poprečnog presjeka dijagonale, izraz (7.52):



Slika 7.11 *Model sa zamjenskom tlačnom dijagonalom prema Žarniću* []

$$A_s = K_t \cdot \frac{l_s}{E_i} \tag{7.52}$$

$$K_t = \left(\frac{5 \cdot h_t^3}{12 \cdot E \cdot I} + \frac{0{,}6 \cdot h_t}{G \cdot A} \right)^{-1} \tag{7.53}$$

gdje je h_t pridržana visina stupa pretpostavljena u iznosu od 2/3 visine ispuna, a l_s duljina dijagonale ispuna. Prikazani model implicira izvedbu modela sa zamjenskom tlačnom dijagonalom, što nije predmet istraživanja, zbog čega je navedeni model zanemaren prilikom usporedbe analitičkih i eksperimentalnih rezultata.

Međutim, Sorić na temelju Žarnićevog modela predlaže proračun sekantne krutosti K_{max} pri slomu ispuna pomoću izraza (7.54) [50]. Modul posmika G_p pretpostavljen je za ispun u stanju manjeg oštećenja, a određuje se pomoću izraza (7.55):

$$K_{\max} = \left(\frac{5 \cdot h_t^3}{12 \cdot E_i \cdot I_i} + \frac{1{,}2 \cdot h_t}{G_p \cdot A_i} \right)^{-1} \tag{7.54}$$

$$G_p = \frac{1.2}{\frac{A_i}{h \cdot K_m} - \frac{h^2}{E_i \cdot I^2}} \tag{7.55}$$

gdje je K_m računska krutost ispuna definirana izrazom (7.56). Vrijednost relativnog međukatnog pomaka pri promatranom graničnom stanju određuje se pomoću izraza (7.57). Prilikom usporedbe analitičkih i eksperimentalnih rezultata, korišten je Sorićev model s obzirom da proizlazi iz Žarnićevih pretpostavki međudjelovanja konstituenata i ponašanja sustava.

$$K_m = \left(\frac{h^3}{3 \cdot E_i \cdot I_i} + \frac{1{,}2 \cdot h}{G_i \cdot A_i} \right)^{-1} \tag{7.56}$$

$$\delta_{V\max} = \left(\frac{V_{\max}}{K_{\max} \cdot H} \right) \cdot 100 \tag{7.57}$$

Flores predlaže vrijednost relativnog međukatnog pomaka pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna u iznosu od 0,3%.

Stavridis daje procjenu relativnog međukatnog pomak sustava pri slomu ispuna δ_{Vmax} u ovisnosti o geometrijskim karakteristikama okvira pomoću izraza (7.58). Kao alternativno rješenje, autor navodi preporuke dane u *ASCE 41-06* (Tablica 7.9) [68] gdje je vrijednost δ_{Vmax} definirana u ovisnosti o

odnosu *L/H* i odnosu posmične nosivosti ispuna i stupova okvira. Izrazi (7.58) i (7.59) izvedeni su za odnos posmične čvrstoće ispuna i stupova okvira u iznosu ≤ 0,7:

$$\delta_{V\max} = 0{,}75 - \frac{H}{3 \cdot L} \quad \text{za} \quad L/H < 2{,}15$$
$$\delta_{V\max} = 0{,}15 \quad \text{za} \quad L/H \geq 2{,}15 \tag{7.58}$$

Mehrabijev model ne sadrži preporuke vezane uz procjenu relativnog međukatnog pomaka sustava pri pojavi dominantnog sloma ispuna zbog čega je navedeni model isključen iz usporedbe analitičkih i eksperimentalnih rezultata.

7.3.2.1. Usporedba i analiza postojećih modela procjene relativnog međukatnog pomaka sustava pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna

Usporedba eksperimentalno određene vrijednosti relativnog međukatnog pomaka ispitnih uzoraka pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispune (δ_{Vmax}^{e}), s rezultatima postojećih analitičkih modela procjene (δ_{Vmax}^{a}), prikazana je u Tablicama 7.10 i 7.11 u ovisnosti o smjeru opterećenja te Tablicom 7.12 u odnosu na srednju eksperimentalnu vrijednost. Koeficijent odstupanja određen je kao količnik dijeljenja analitičkih i eksperimentalnih rezultata.

Sorićev model procjene relativnog međukatnog pomaka sustava pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna, temeljen na pretpostavkama Žarnićevog analitičkog modela, u svim promatranim slučajevima znatno podcjenjuje promatranu veličinu s najvećom vrijednošću koeficijenta odstupanja u iznosu od 0,63. Kod svih ostalih uzoraka dobiveni koeficijenti odstupanja vrijednosti su manje od 0,35. Prethodno navedene vrijednosti koeficijenta odstupanja odnose se na uzorke kod kojih je ispun izveden od vapnenog morta gdje su ispitivanjem dobivene znatno manje vrijednosti promatrane veličine u odnosu na uzorke kod kojih je ispun izveden mortom opće namjene. Mogući je uzrok navedenih odstupanja trend Žarnićevog modela da znatno precjenjuje vrijednost početne krutosti, sustava čime se s obzirom na relativno neznatnu promjenu vrijednosti modula posmika ispuna primjenom Sorićevih pretpostavki, nasljeđuje jednak trend. S obzirom na navedeno, ne preporučuje se primjena navedenog modela prilikom procjene relativnog međukatnog pomaka sustava pri promatranom graničnom stanju.

Floresova pretpostavka vrijednosti relativnog međukatnog pomaka sustava u iznosu od 0,3% ima tendenciju precjenjivanja promatrane veličine kod uzoraka kod kojih je ispun izveden od šupljih zidnih elemenata i podcjenjivanja u slučaju uzoraka kod kojih je ispun izveden od punih zidnih

elemenata. Manja odstupanja rezultata dobivena su u slučaju uzoraka kod kojih je ispun izveden od šupljih glinenih zidnih elemenata s vrijednostima koeficijenata odstupanja u intervalu od 1,07 do 3,75 pri pozitivnom smjeru opterećenja te u intervalu od 0,83 do 1,36 pri negativnom smjeru opterećenja. Gornje granice vrijednosti koeficijenta odstupanja odnose se na jedan uzorak, uzorak *O1_bvm*. Kod uzoraka kod kojih je ispun izveden od punih zidnih elemenata, vrijednosti koeficijenta odstupanja u intervalu su od 0,54 do 1,74 pri pozitivnom smjeru opterećenja te u intervalu od 0,54 do 1,36 pri negativnom smjeru opterećenja. Obje navedene gornje vrijednosti koeficijenta odstupanja odnose se na ispitni uzorak *O1_cvm*. Ukoliko se izostavi navedeni uzorak, gornja granica intervala koeficijenta odstupanja, pri pozitivnom smjeru opterećenja, iznosi 0,77, a pri negativnom 0,73.

S druge strane, Stavridisov model daje manja odstupanja u slučaju uzoraka kod kojih je ispun izveden od glinene opeke s tendencijom precjenjivanja promatranog relativnog međukatnog pomaka. Najmanja odstupanja dobivena su kod uzorka *O2_cpm* s koeficijentom u iznosu od 0,98 pri negativnom smjeru opterećenja te kod uzorka *O3_cpm* s koeficijentom odstupanja u iznosu od 0,93 za oba smjera opterećenja. S druge strane, najveća odstupanja dobivena su kod uzorka *O1_bvm* s koficijentom u iznosu od 6,50 pri pozitivnom smjeru te kod uzorka *O1_cvm* s koeficijentom odstupanja u iznosu od 3,06 također pri pozitivnom smjeru opterećenja. S obzirom da je promatrani analitički model isključivo vezan za geometrijske odnose okvira, što neovisno o tipu ispuna daje jednake rezultate za sve ispitne uzorke, postavlja se pitanje opravdanosti primjene navedenog modela prilikom procjene promatrane veličine.

Tablica 7.10 *Usporedba analitički i eksperimentalno određene vrijednosti relativnog međukatnog pomaka sustava pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna za pozitivni smjer opterećenja*

		Sorić	*Flores*	*Stavridis*
O1_bpm	δ_{Vmax}^{a} *[%]*	0,02	0,3	0,52
	δ_{Vmax}^{e} *[%]*	0,27		
	Odstupanje	0,07	1,11	1,93
*O1_bpm**	δ_{Vmax}^{a} *[%]*	0,02	0,3	0,52
	δ_{Vmax}^{e} *[%]*	0,27		
	Odstupanje	0,07	1,11	1,93
O1_cpm	δ_{Vmax}^{a} *[%]*	0,09	0,3	0,52
	δ_{Vmax}^{e} *[%]*	0,39		
	Odstupanje	0,23	0,77	1,33
O1_bvm	δ_{Vmax}^{a} *[%]*	0,05	0,3	0,52
	δ_{Vmax}^{e} *[%]*	0,08		
	Odstupanje	0,63	3,75	6,50
O1_cvm	δ_{Vmax}^{a} *[%]*	0,06	0,3	0,52
	δ_{Vmax}^{e} *[%]*	0,17		
	Odstupanje	0,35	1,76	3,06
O2_cpm	δ_{Vmax}^{a} *[%]*	0,09	0,3	0,52
	δ_{Vmax}^{e} *[%]*	0,39		

	Odstupanje	0,23	0,77	1,33
O3_bpm	$\delta_{Vmax}{}^{a}$ *[%]*	0,03	0,3	0,52
	$\delta_{Vmax}{}^{e}$ *[%]*	0,27		
	Odstupanje	0,11	1,11	1,93
O3_cpm	$\delta_{Vmax}{}^{a}$ *[%]*	0,12	0,3	0,52
	$\delta_{Vmax}{}^{e}$ *[%]*	0,56		
	Odstupanje	0,21	0,54	0,93
O4_bpm	$\delta_{Vmax}{}^{a}$ *[%]*	0,03	0,3	0,52
	$\delta_{Vmax}{}^{e}$ *[%]*	0,28		
	Odstupanje	0,11	1,07	1,86
O4_cpm	$\delta_{Vmax}{}^{a}$ *[%]*	0,13	0,3	0,52
	$\delta_{Vmax}{}^{e}$ *[%]*	0,5		
	Odstupanje	0,26	0,60	1,04

Tablica 7.11 *Usporedba analitički i eksperimentalno određene vrijednosti relativnog međukatnog pomaka sustava pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna za negativni smjer opterećenja*

		Sorić	*Flores*	*Stavridis*
O1_bpm	$\delta_{Vmax}{}^{a}$ *[%]*	0,02	0,3	0,52
	$\delta_{Vmax}{}^{e}$ *[%]*	0,27		
	Odstupanje	0,07	1,11	1,93
*O1_bpm**	$\delta_{Vmax}{}^{a}$ *[%]*	0,02	0,3	0,52
	$\delta_{Vmax}{}^{e}$ *[%]*	0,31		
	Odstupanje	0,06	0,97	1,68
O1_cpm	$\delta_{Vmax}{}^{a}$ *[%]*	0,09	0,3	0,52
	$\delta_{Vmax}{}^{e}$ *[%]*	0,41		
	Odstupanje	0,22	0,73	1,27
O1_bvm	$\delta_{Vmax}{}^{a}$ *[%]*	0,05	0,3	0,52
	$\delta_{Vmax}{}^{e}$ *[%]*	0,22		
	Odstupanje	0,23	1,36	2,36
O1_cvm	$\delta_{Vmax}{}^{a}$ *[%]*	0,06	0,3	0,52
	$\delta_{Vmax}{}^{e}$ *[%]*	0,16		
	Odstupanje	0,38	1,88	3,25
O2_cpm	$\delta_{Vmax}{}^{a}$ *[%]*	0,09	0,3	0,52
	$\delta_{Vmax}{}^{e}$ *[%]*	0,53		
	Odstupanje	0,17	0,57	0,98
O3_bpm	$\delta_{Vmax}{}^{a}$ *[%]*	0,03	0,3	0,52
	$\delta_{Vmax}{}^{e}$ *[%]*	0,36		
	Odstupanje	0,08	0,83	1,44
O3_cpm	$\delta_{Vmax}{}^{a}$ *[%]*	0,12	0,3	0,52
	$\delta_{Vmax}{}^{e}$ *[%]*	0,56		
	Odstupanje	0,21	0,54	0,93
O4_bpm	$\delta_{Vmax}{}^{a}$ *[%]*	0,03	0,3	0,52
	$\delta_{Vmax}{}^{e}$ *[%]*	0,29		
	Odstupanje	0,10	1,03	1,79
O4_cpm	$\delta_{Vmax}{}^{a}$ *[%]*	0,13	0,3	0,52
	$\delta_{Vmax}{}^{e}$ *[%]*	0,43		
	Odstupanje	0,30	0,70	1,21

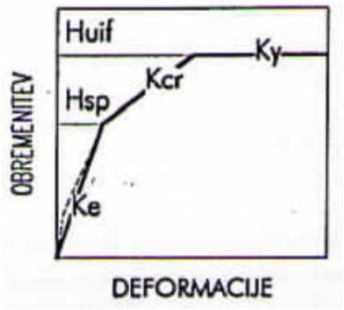
Tablica 7.12 *Usporedba analitički određene vrijednosti relativnog međukatnog pomaka sustava pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna u odnosu na srednju eksperimentalnu vrijednost*

		Sorić	Flores	Stavridis
O1_bpm	$\delta_{Vmax}{}^{a}$ [%]	0,02	0,3	0,52
	$\delta_{Vmax}{}^{e}$ [%]	0,27		
	Odstupanje	0,07	1,11	1,93
O1_bpm*	$\delta_{Vmax}{}^{a}$ [%]	0,02	0,3	0,52
	$\delta_{Vmax}{}^{e}$ [%]	0,29		
	Odstupanje	0,07	1,03	1,79
O1_cpm	$\delta_{Vmax}{}^{a}$ [%]	0,09	0,3	0,52
	$\delta_{Vmax}{}^{e}$ [%]	0,40		
	Odstupanje	0,23	0,75	1,30
O1_bvm	$\delta_{Vmax}{}^{a}$ [%]	0,05	0,3	0,52
	$\delta_{Vmax}{}^{e}$ [%]	0,15		
	Odstupanje	0,33	2,00	3,47
O1_cvm	$\delta_{Vmax}{}^{a}$ [%]	0,06	0,3	0,52
	$\delta_{Vmax}{}^{e}$ [%]	0,16		
	Odstupanje	0,38	1,88	3,25
O2_cpm	$\delta_{Vmax}{}^{a}$ [%]	0,09	0,3	0,52
	$\delta_{Vmax}{}^{e}$ [%]	0,46		
	Odstupanje	0,19	0,65	1,13
O3_bpm	$\delta_{Vmax}{}^{a}$ [%]	0,03	0,3	0,52
	$\delta_{Vmax}{}^{e}$ [%]	0,31		
	Odstupanje	0,10	0,97	1,68
O3_cpm	$\delta_{Vmax}{}^{a}$ [%]	0,12	0,3	0,52
	$\delta_{Vmax}{}^{e}$ [%]	0,56		
	Odstupanje	0,21	0,54	0,93
O4_bpm	$\delta_{Vmax}{}^{a}$ [%]	0,03	0,3	0,52
	$\delta_{Vmax}{}^{e}$ [%]	0,28		
	Odstupanje	0,11	1,07	1,86
O4_cpm	$\delta_{Vmax}{}^{a}$ [%]	0,13	0,3	0,52
	$\delta_{Vmax}{}^{e}$ [%]	0,46		
	Odstupanje	0,28	0,65	1,13

7.4. Granično stanje pred rušenje sustava

7.4.1. Procjena horizontalne nosivosti sustava pri graničnom stanju pred rušenje prema postojećim analitičkim modelima

Žarnićev model predviđa da je horizontalna nosivost sustava pri graničnom stanju pred rušenje jednaka horizontalnoj nosivosti pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna. Odnosno, autor predviđa vrijednost krutosti sustava nakon pojave dominantnog mehanizma sloma ispuna u iznosu nule (Slika 7.12).



Slika 7.12 *Trolinearni odnos sile i pomaka prema Žarniću* [65]

Flores predviđa vrijednost horizontalne nosivosti sustava pri graničnom stanju pred rušenje pomoću izraza (7.59) gdje je promatrana vrijednost definirana pomoću horizontalne nosivosti pri graničnom stanju pojave prve značajne pukotine u ispunu:

$$V_{col} = 1{,}12 \cdot V_{cr} \tag{7.59}$$

Stavridis procjenjuje horizontalnu nosivost sustava pri graničnom stanju pred rušenje kao zbroj rezidualnih nosivosti ispuna i stupova okvira pomoću izraza (7.60) čime je promatrana vrijednost jednaka rezidualnoj nosivosti sustava. Horizontalna nosivost pojedinog elementa određena je pod pretpostavkom raspucanog stanja gdje se doprinos ispuna $V_{i,res}$ promatra kroz silu trenja koja se javlja u horizontalnim reškama dok se doprinos okvira $V_{f,res}$ promatra kroz nosivost poprečne armature koja se nalazi u području posmičnih pukotina stupova, izraz (7.40). Rezidualna nosivost stupova okvira može se zanemariti budući da se nakon pojave posmičnih pukotina smatra kako okvir više ne posjeduje horizontalnu nosivost dok se prilikom određivanja rezidualne nosivosti ispuna pretpostavlja da ispun prenosi sva vertikalna opterećenja uslijed značajnog smanjenja aksijalne krutosti stupova nakon pojave posmičnog sloma:

$$V_{col} = V_{res} = 2 \cdot V_{f,res} + V_{i,res} \tag{7.60}$$

Mehrabijev model ne sadrži preporuke vezane uz procjenu horizontalne nosivosti sustava pri graničnom stanju pred rušenje zbog čega je navedeni model isključen iz usporedbe analitičkih i eksperimentalnih rezultata.

7.4.1.1. Usporedba i analiza postojećih modela procjene horizontalne nosivosti sustava pri graničnom stanju pred rušenje.

Usporedba eksperimentalno određene vrijednosti horizontalne nosivosti ispitnih uzoraka pri graničnom stanju pred rušenje (V_{col}^{e}), s rezultatima postojećih analitičkih modela procjene (V_{col}^{a}), prikazana je u Tablicama 7.13 i 7.14 u ovisnosti o smjeru opterećenja te Tablicom 7.15 u odnosu na

srednju eksperimentalnu vrijednost. Koeficijent odstupanja određen je kao količnik dijeljenja analitičkih i eksperimentalnih rezultata.

Žarnićev model procjene horizontalne nosivosti sustava pri graničnom stanju pred rušenje podcjenjuje vrijednost promatrane veličine u svim slučajevima osim kod ispitnih uzoraka *O1_bpm*, *O1_bpm** i O1_bvm. Odstupanja modela u pravilu su manja u slučaju uzoraka kod kojih je ispun izveden od šupljih glinenih zidnih elemenata gdje su vrijednosti koeficijenta odstupanja u intervalu od 0,7 do 1,34 pri pozitivnom smjeru opterećenja te u intervalu od 0,76 do 1,47 pri negativnom smjeru opterećenja. Kod uzoraka kod kojih je ispun izveden od punih zidnih elemenata, vrijednosti koeficijenta odstupanja u intervalu su od 0,40 do 0,85, u odnosu na srednje eksperimentalne vrijednosti. Iako su odstupanja promatranog modela kod natpolovične većine uzoraka u zadovoljavajućim granicama, model ne prepoznaje razliku između horizontalne nosivosti pri graničnom stanju pojave dominantnog mehanizma sloma ispuna i graničnog stanja pred rušenje što je osnovni nedostatak uslijed kojeg je upitna mogućnost primjene modela pri procjeni horizontalne nosivosti.

Floresov model procjene također podcjenjuje vrijednost promatrane veličine. Jednako kao i kod prethodnog modela, odstupanja su manja u slučaju ispitnih uzoraka kod kojih je ispun izveden od šupljih glinenih zidnih elemenata s vrijednostima koeficijenta odstupanja u intervalu od 0,58 do 1,39, u odnosu na srednje eksperimentalne vrijednosti. Kod uzoraka kod kojih je ispun izveden od punih zidnih elemenata, vrijednosti koeficijenta odstupanja intervalu su od 0,23 do 0,46.

S druge strane, Stavridisov model u pravilu precjenjuje promatranu veličinu. Međutim, neovisno o tome radi li se o podcijenjenoj ili precijenjenoj vrijednosti, odstupanja navedenog modela u prihvatljivom su intervalu koeficijenta odstupanja od 0,86 do 1,38, osim u slučaju ispitnih uzoraka *O1_bvm* i *O1_cvm*. Iako navedeni model daje zadovoljavajuća odstupanja rezultata, potrebno je naglasiti kako je izveden pod pretpostavkom kuta unutarnjeg trenja u iznosu od 0,8 što nije sukladno rezultatima autorovih istraživanja. Rezultati prikazani u tablici određeni su na temelju vlastitih rezultata ispitivanja mehaničkih karakteristika ispuna gdje je vrijednost kuta unutarnjeg trenja u slučaju sva četiri tipa ispuna manja od 0,8.

Tablica 7.13 *Usporedba analitički i eksperimentalno određene vrijednosti horizontalne nosivosti sustava pri graničnom stanju pred rušenje za pozitivni smjer opterećenja*

		Zarnić	*Flores*	*Stavridis*
O1_bpm	V_{col}^{a} *[kN]*	112,2	105,9	117,5
	V_{col}^{e} *[kN]*	116,2		
	Odstupanje	0,97	0,91	1,01
*O1_bpm**	V_{col}^{a} *[kN]*	112,2	105,9	117,5
	V_{col}^{e} *[kN]*	94,2		
	Odstupanje	1,19	1,12	1,25

O1_cpm	V_{col}^a *[kN]*	94,8	71,8	199,1
	V_{col}^e *[kN]*	-		
	Odstupanje	-	-	-
O1_bvm	V_{col}^a *[kN]*	53,1	39,5	74,2
	V_{col}^e *[kN]*	39,7		
	Odstupanje	1,34	0,99	1,87
O1_cvm	V_{col}^a *[kN]*	69,5	31,4	202,7
	V_{col}^e *[kN]*	81,2		
	Odstupanje	0,85	0,39	2,50
O2_cpm	V_{col}^a *[kN]*	96,4	70,4	192,1
	V_{col}^e *[kN]*	-		
	Odstupanje	-	-	-
O3_bpm	V_{col}^a *[kN]*	133,1	119,5	183,2
	V_{col}^e *[kN]*	191,1		
	Odstupanje	0,70	0,62	0,96
O3_cpm	V_{col}^a *[kN]*	119,3	69,5	284,8
	V_{col}^e *[kN]*	-		
	Odstupanje	-	-	-
O4_bpm	V_{col}^a *[kN]*	137,2	107,2	159,1
	V_{col}^e *[kN]*	184,7		
	Odstupanje	0,74	0,58	0,86
O4_cpm	V_{col}^a *[kN]*	125,0	66,3	284,8
	V_{col}^e *[kN]*	210,1		
	Odstupanje	0,59	0,31	1,35

Tablica 7.14 *Usporedba analitički i eksperimentalno određene vrijednosti horizontalne nosivosti sustava pri graničnom stanju pred rušenje za negativni smjer opterećenja*

		Zarnić	*Flores*	*Stavridis*
O1_bpm	V_{col}^a *[kN]*	112,2	105,9	117,5
	V_{col}^e *[kN]*	86,8		
	Odstupanje	1,29	1,22	1,35
*O1_bpm**	V_{col}^a *[kN]*	112,2	105,9	117,5
	V_{col}^e *[kN]*	76,1		
	Odstupanje	1,47	1,39	1,54
O1_cpm	V_{col}^a *[kN]*	94,8	71,8	199,1
	V_{col}^e *[kN]*	162,2		
	Odstupanje	0,58	0,44	1,23
O1_bvm	V_{col}^a *[kN]*	53,1	39,5	74,2
	V_{col}^e *[kN]*	48,5		
	Odstupanje	1,09	0,81	1,53
O1_cvm	V_{col}^a *[kN]*	69,5	31,4	202,7
	V_{col}^e *[kN]*	-		
	Odstupanje	-	-	-
O2_cpm	V_{col}^a *[kN]*	96,4	70,4	192,1
	V_{col}^e *[kN]*	152,7		
	Odstupanje	0,63	0,46	1,26
O3_bpm	V_{col}^a *[kN]*	133,1	119,5	183,2

	V_{col}^{e} [kN]	174,0		
	Odstupanje	0,76	0,68	1,05
O3_cpm	V_{col}^{a} [kN]	119,3	69,5	284,8
	V_{col}^{e} [kN]	296,2		
	Odstupanje	0,40	-76,5	-3,8
O4_bpm	V_{col}^{a} [kN]	137,2	107,2	159,1
	V_{col}^{e} [kN]	172,0		
	Odstupanje	0,80	0,62	0,93
O4_cpm	V_{col}^{a} [kN]	125,0	66,3	284,8
	V_{col}^{e} [kN]	206,4		
	Odstupanje	0,60	0,32	1,38

Tablica 7.15 *Usporedba analitički određene vrijednosti horizontalne nosivosti sustava pri graničnom stanju pred rušenje u odnosu na srednju eksperimentalnu vrijednost*

		Zarnić	Flores	Stavridis
O1_bpm	V_{col}^{a} [kN]	112,2	105,9	117,5
	V_{col}^{e} [kN]	101,5		
	Odstupanje	1,10	1,04	1,16
O1_bpm*	V_{col}^{a} [kN]	112,2	105,9	117,5
	V_{col}^{e} [kN]	85,1		
	Odstupanje	1,32	1,24	1,38
O1_cpm	V_{col}^{a} [kN]	94,8	71,8	199,1
	V_{col}^{e} [kN]	(162,2)		
	Odstupanje	0,58	0,44	1,23
O1_bvm	V_{col}^{a} [kN]	53,1	39,5	74,2
	V_{col}^{e} [kN]	44,1		
	Odstupanje	1,19	0,89	1,67
O1_cvm	V_{col}^{a} [kN]	69,5	31,4	202,7
	V_{col}^{e} [kN]	(82,1)		
	Odstupanje	0,85	0,38	2,47
O2_cpm	V_{col}^{a} [kN]	96,4	70,4	192,1
	V_{col}^{e} [kN]	(152,7)		
	Odstupanje	0,63	0,46	1,26
O3_bpm	V_{col}^{a} [kN]	133,1	119,5	183,2
	V_{col}^{e} [kN]	182,5		
	Odstupanje	0,73	0,65	1,00
O3_cpm	V_{col}^{a} [kN]	119,3	69,5	284,8
	V_{col}^{e} [kN]	(296,2)		
	Odstupanje	0,40	0,23	0,96
O4_bpm	V_{col}^{a} [kN]	137,2	107,2	159,1
	V_{col}^{e} [kN]	178,3		
	Odstupanje	0,77	0,60	0,89
O4_cpm	V_{col}^{a} [kN]	125,0	66,3	284,8
	V_{col}^{e} [kN]	208,2		
	Odstupanje	0,60	0,38	1,37

7.4.2. Procjena relativnog međukatnog pomaka sustava pri graničnom stanju pred rušenje prema postojećim analitičkim modelima

Flores predlaže vrijednost relativnog međukatnog pomaka sustava okvir s ispunom pri graničnom stanju pred rušenje u iznosu od 0,5%.

Stavridis predlaže procjenu relativnog međukatnog pomaka sustava pri promatranom graničnom stanju pomoću izraza (7.61) gdje je promatrana veličina određena kao 20% povećanje relativnog međukatnog pomaka pri graničnom stanju nosivosti:

$$\delta_{Vcol} = 1{,}2 \cdot \delta_{V\max} \tag{7.61}$$

Žarnićev i Mehrabijev modeli ne sadrže preporuke vezane uz procjenu relativnog međukatnog pomaka sustava pri promatranom graničnom stanju, uslijed čega su modeli isključeni iz usporedbe analitičkih i eksperimentalnih rezultata.

7.4.2.1. Usporedba i analiza postojećih modela procjene relativnog međukatnog pomaka sustava pri graničnom stanju pred rušenje

Usporedba eksperimentalno određene vrijednosti relativnog međukatnog pomaka ispitnih uzoraka pri graničnom stanju pred rušenje (δ_{Vcol}^{e}), s rezultatima postojećih analitičkih modela procjene (δ_{Vcol}^{a}), prikazana je u Tablici 7.16 u ovisnosti o smjeru opterećenja te Tablicom 7.17 u odnosu na srednju eksperimentalnu vrijednost. Koeficijent odstupanja određen je kao količnik dijeljenja analitičkih i eksperimentalnih rezultata.

Promatrani modeli, neovisno o smjeru opterećenja, podcjenjuju vrijednost promatrane veličine. Odstupanja Floresovog modela veća su u odnosu na Stavridisov model neovisno o smjeru opterećenja i vrsti ispuna. Međutim, odstupanja oba modela u većini su slučajeva značajnijih odstupanja s vrijednostima koeficijenta manjim od 0,69 čime se postavlja pitanje opravdanosti njihove primjene. Uzrok značajnih odstupanja rezultata proizlazi iz činjenice da oba modela daju jednake vrijednosti promatrane veličine neovisno o geometrijskim i materijalnim karakteristikama sustava. Iako je Stavridisov model definiran na osnovi geometrijskih karakteristika okvira, u promatranom slučaju gdje je odnos visine i raspona okvira jednak kod svih ispitnih uzoraka, navedeni model također daje jednaku vrijednost relativnog međukatnog pomaka za sve uzorke što nije u skladu s rezultatima ispitivanja. Naime, uočeno je da su vrijednosti relativnog međukatnog pomak pri graničnom stanju pred rušenje veće u slučaju ispitnih uzoraka kod kojih je ispun izveden od glinene opeke neovisno o promatranom smjeru opterećenja i karakteristikama okvira ispitnih uzoraka.

Tablica 7.16 *Usporedba analitički i eksperimentalno određene vrijednosti relativnog međukatnog pomaka sustava pri graničnom stanju pred rušenje*

		Pozitivan smjer opterećenja		*Negativan smjer opterećenja*	
		Flores	*Stavridis*	*Flores*	*Stavridis*
O1_bpm	δ_{Vcol}^{a} *[%]*	0,5	0,62	-0,5	-0,62
	δ_{Vcol}^{e} *[%]*	0,8		-1	
	Odstupanje	0,63	0,78	0,50	0,62
*O1_bpm**	δ_{Vcol}^{a} *[%]*	0,5	0,62	-0,5	-0,62
	δ_{Vcol}^{e} *[%]*	1		-1,1	
	Odstupanje	0,50	0,62	0,45	0,56
O1_cpm	δ_{Vcol}^{a} *[%]*	0,5	0,62	-0,5	-0,62
	δ_{Vcol}^{e} *[%]*	-		-1,7	
	Odstupanje	-	-	0,29	0,36
O1_bvm	δ_{Vcol}^{a} *[%]*	0,5	0,62	-0,5	-0,62
	δ_{Vcol}^{e} *[%]*	1,1		-1,1	
	Odstupanje	0,45	0,56	0,45	0,56
O1_cvm	δ_{Vcol}^{a} *[%]*	0,5	0,62	-0,5	-0,62
	δ_{Vcol}^{e} *[%]*	1,8		-	
	Odstupanje	0,28	0,34	-	-
O2_cpm	δ_{Vcol}^{a} *[%]*	0,5	0,62	-0,5	-0,62
	δ_{Vcol}^{e} *[%]*	-		-0,9	
	Odstupanje	-	-	0,56	0,69
O3_bpm	δ_{Vcol}^{a} *[%]*	0,5	0,62	-0,5	-0,62
	δ_{Vcol}^{e} *[%]*	0,9		-1,0	
	Odstupanje	0,56	0,69	0,50	0,62
O3_cpm	δ_{Vcol}^{a} *[%]*	0,5	0,62	-0,5	-0,62
	δ_{Vcol}^{e} *[%]*	-		-1,3	
	Odstupanje	-	-	0,38	0,48
O4_bpm	δ_{Vcol}^{a} *[%]*	0,5	0,62	-0,5	-0,62
	δ_{Vcol}^{e} *[%]*	0,9		-0,9	
	Odstupanje	0,56	0,69	0,56	0,69
O4_cpm	δ_{Vcol}^{a} *[%]*	0,5	0,62	-0,5	-0,62
	δ_{Vcol}^{e} *[%]*	1,3		-1,2	
	Odstupanje	0,38	0,48	0,42	0,52

Tablica 7.17 *Usporedba analitički određene vrijednosti relativnog međukatnog pomaka sustava pri graničnom stanju pred rušenje u odnosu na srednju eksperimentalnu vrijednost*

		Flores	*Stavridis*
O1_bpm	δ_{Vcol}^{a} *[%]*	0,5	0,62
	δ_{Vcol}^{e} *[%]*	0,9	
	Odstupanje	0,56	0,69
*O1_bpm**	δ_{Vcol}^{a} *[%]*	0,5	0,62
	δ_{Vcol}^{e} *[%]*	1	
	Odstupanje	0,50	0,62
O1_cpm	δ_{Vcol}^{a} *[%]*	0,5	0,62
	δ_{Vcol}^{e} *[%]*	(1,7)	
	Odstupanje	0,29	0,36

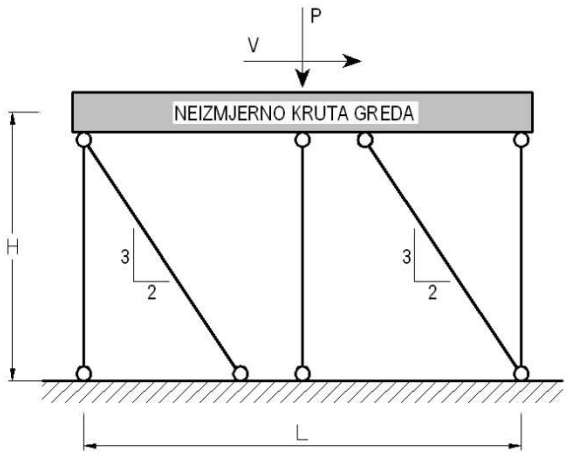
O1_bvm	δ_{Vcol}^{a} *[%]*	0,5	0,62
	δ_{Vcol}^{e} *[%]*	1,1	
	Odstupanje	0,45	0,56
O1_cvm	δ_{Vcol}^{a} *[%]*	0,5	0,62
	δ_{Vcol}^{e} *[%]*	(1,8)	
	Odstupanje	0,28	0,34
O2_cpm	δ_{Vcol}^{a} *[%]*	0,5	0,62
	δ_{Vcol}^{e} *[%]*	0,9	
	Odstupanje	0,56	0,69
O3_bpm	δ_{Vcol}^{a} *[%]*	0,5	0,62
	δ_{Vcol}^{e} *[%]*	0,9	
	Odstupanje	0,56	0,69
O3_cpm	δ_{Vcol}^{a} *[%]*	0,5	0,62
	δ_{Vcol}^{e} *[%]*	(1,3)	
	Odstupanje	0,38	0,48
O4_bpm	δ_{Vcol}^{a} *[%]*	0,5	0,62
	δ_{Vcol}^{e} *[%]*	0,9	
	Odstupanje	0,56	0,62
O4_cpm	δ_{Vcol}^{a} *[%]*	0,5	0,62
	δ_{Vcol}^{e} *[%]*	1,2	
	Odstupanje	0,42	0,52

7.5. Prijedlog metode procjene ponašanja sustava uokvireno ziđe prema graničnim stanjima

Predložena metoda procjene ponašanja sustava uokvireno ziđe prema graničnim stanjima konceptualno se oslanja na postojeće analitičke modele gdje je ukupna nosivost sustava okvir s ispunom definirana kao zbroj doprinosa okvira i ispuna. Doprinos okvira definiran je koeficijentom Ψ, a ispuna pretpostavljenim mehanizmom sloma čija je pojava ovisna o promatranom graničnom stanju. Osnovna razlika, u odnosu na postojeće analitičke modele, proizlazi iz geometrijske idealizacije sustava gdje je pretpostavljeno da je greda neizmjerno krut element dok su stupovi okvira i ispun prikazani pomoću štapova povezanih zglobnom vezom. Idealizacija grede, kao neizmjerno krutog elementa, odnosi se samo na granično stanje pojave prve značajne pukotine i pojave dominantnog mehanizma sloma ispuna. Ispun je idealizirana pomoću triju štapova od kojih vertikalni štap prenosi gravitacijsko opterećenje dok kosi štapovi prenose isključivo tlačnu silu uzrokovanu interakcijom okvir – ispun. Nagib kosih štapova određen je na temelju provedenih ispitivanja gdje je uočeno kako je nagib pukotina u ispunu u intervalu između 45° i 60°. Iz praktičnih razloga odabran je nagib u iznosu od 3/2. Zglobna veza između elemenata pretpostavljena je radi ostvarenja rešetkastog sustava kako bi se dobio što jasniji uvid u raspodjelu sila po elementima sustava. Geometrijska idealizacija sustava, prikazana Slikom 7.13, čini osnovu predloženog analitičkog modela.

S obzirom da je predloženi analitički model temeljen na vlastitim rezultatima ispitivanjima, potrebno je naglasiti kako postoje određena ograničena primjene. Ograničenja se odnose na geometrijske i mehaničke karakteristike konstituenata sustava. Preporuka je da se predloženi analitički model primjenjuje za sljedeće geometrijske i mehaničke karakteristike:

- Odnos visine i raspona okvira i momenta tromosti stupa i grede: $0{,}36 \leq \alpha/\beta \leq 1{,}67$
- Robusnost zidnih elemenata: $0{,}5 \leq \gamma \leq 1$
- Odnos tlačne i posmične čvrstoće zidane ispune: $6{,}2 \leq f_i/f_v \leq 87{,}5$

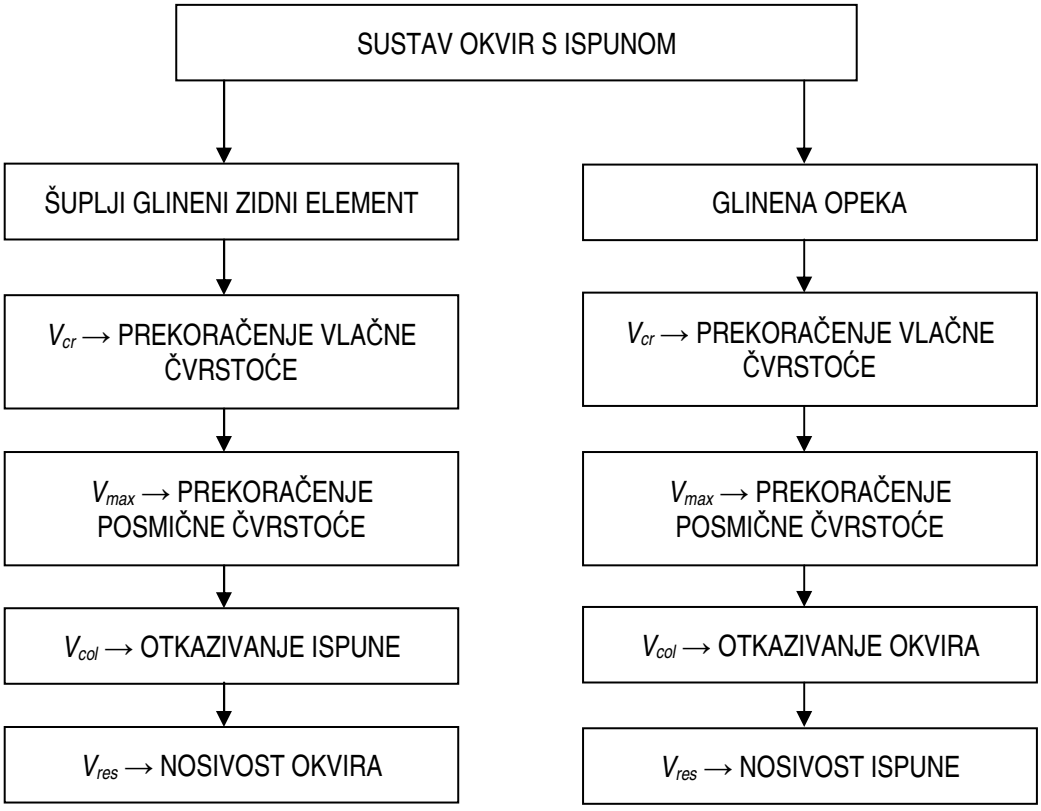


Slika 7.13 *Geometrijska idealizacija sustava uokvireno zide*

Definiranje analitičkih izraza, koji odgovaraju pojedinim graničnim stanjima, temeljeno je na uočenom slijedu pojave pojedinih mehanizama sloma elemenata sustava tijekom provedenih ispitivanja. S obzirom da je odgovor sustava pod dominantnim utjecajem ispuna, odnosno tipu zidnih elemenata, predloženi model proračuna karakterističnih točaka odgovora sustava može se shematski prikazati pomoću Slike 7.14. Pojava prve značajne pukotine u ispunu uvjetovana je prekoračenjem vlačne dok je pojava dominantnog mehanizma sloma uvjetovana prekoračenjem posmične čvrstoće neovisno o vrsti ispuna. Navedeni slijed odabran je na temelju hijerarhije čvrstoća ispuna. Naime, tijekom provedenih ispitivanja uočeno je da prve značajne pukotine u ispunu nastaju u smjeru približno jednakom nagibu kosih štapova idealiziranog sustava nakon čega dolazi do formiranja pukotine ili pukotina na približno pola vise ispuna u smjeru horizontalnih reški. Nakon formiranja horizontalnih pukotina, dolazi do spajanja nasuprotnih kosih pukotina čime je inicirana pojava mehanizma sloma uzrokovana prekoračenjem posmične čvrstoće u obliku dijagonalnog posmičnog sloma. Nakon dosezanja graničnog stanja pojave dominantnog mehanizma sloma, ponašanje sustava značajno ovisi o tipu zidnog elementa što se očituje kroz degradaciju nosivosti i krutosti. Izražena degradacija nosivosti kod ispitnih uzoraka kod kojih je ispun izveden od šupljih glinenih zidnih elemenata uvjetuje pojavu graničnog stanja pred rušenje u vidu otkazivanja nosivosti ispuna. Samo otkazivanje nosivosti

ispuna uzrokovano je pojavom drobljena na kontaktu s okvirom gdje uslijed povećanja oštećenja slobodna visina stupa teži ka punoj visini što u konačnici dovodi do slobodnog deformiranja okvira. Slobodno deformiranje okvira upućuje na nepostojanje sile interakcije uslijed čega okvir preuzima cjelokupno horizontalno opterećenje. S druge strane, kod uzoraka gdje je ispun izveden od glinene opeke, degradacija nosivosti izostaje, a pojava graničnog stanja pred rušenje uvjetovana je pojavom posmičnog sloma jednog od elemenata okvira. Naime, drobljenje ispuna, koje je uočeno kod šupljih zidnih elemenata, tu izostaje, a ispun zadržava relativno dobru kompaktnost u području cijelog odgovora. Za razliku od uzoraka kod kojih je ispun izveden od šupljih zidnih elemenata, slobodna visina stupa uvijek je manja od pune visine uslijed čega se povećavaju zahtjevi nosivosti okvira.

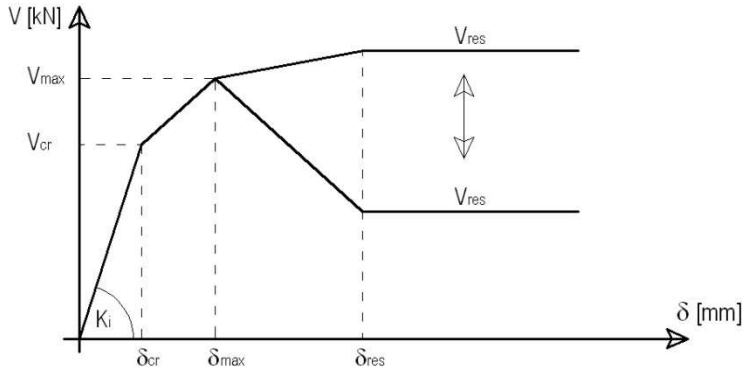
Sukladno povećanju oštećenja elemenata okvira dolazi do preraspodjele opterećenja u sustavu. Tako raspucavanjem stupova, što uzrokuje smanjenje aksijalne krutosti, dolazi do povećanja tlačne sile u ispunu. Posljedično, povećava se i horizontalna nosivost ispuna u obliku sile trenja. Nakon pojave graničnog stanja pred rušenje, odnosno, nakon otkazivanja nosivosti jednog od elemenata sustava, preostali element osigurava rezidualnu nosivost. Tako, u slučaju uzoraka kod kojih je ispun izveden od šupljih glinenih elemenata, rezidualnu nosivost osigurava okvir. Suprotno, u slučaju uzoraka kod kojih je ispun izveden od glinene opeke, a nakon otkazivanja nosivosti okvira, rezidualnu nosivost osigurava ispun povećanjem sile trenja na horizontalnim reškama.



Slika 7.14 *Slijed mehanizama sloma okvira s ispunom u ovisnosti o tipu zidnog elementa*

Idealizacija odgovora sustava predviđa četverolinearni odnos sile i pomaka, a oblik idealizirane krivulje može se shematski prikazati pomoću Slike 7.15. Idealizacija odgovara sustava u skladu je s uočenim slijedom mehanizama sloma elemenata, prikazanim Slikom 7.14, a po karakteristikama slična je idealizaciji Stavridisovog modela. Osnovna se razlika u odnosu na navedeni model očituje u promjenjivoj vrijednosti rezidualne nosivosti koja ovisi o mehanizmima sloma elemenata sustava. Detaljan opis utjecaja mehanizmama sloma sustava, na vrijednost rezidualne nosivosti, dan je u *Potpoglavlju 7.5.6*.

Prikazana idealizacija odgovora pogodna je za nelinearnu statičku analizu metodom postupnog guranja i predstavlja alat za nelinearnu procjenu ponašanja postojećih okvirnih konstrukcija sa zidanim ispunom. Osim toga, idealizirani odgovor može se primijeniti kao primarna krivulja histereznog modela prilikom provedbe nelinearne dinamičke analize.



Slika 7.15 *Idealizirani odnos sile – pomaka prema predloženoj analitičkoj metodi proračuna*

7.5.1. Procjena početne krutosti sustava

Početna krutost sustava definirana je odnosom sile i pomaka pri pojavi prve značajne pukotine u ispunu, $K_i = V_{cr}/\Delta_{cr}$. Vrijednosti navedenih veličina V_{cr} i Δ_{cr} pod izravnim su utjecajem geometrijskih i mehaničkih karakteristika konstituenata sustava. S obzirom da procjena početne krutosti zahtijeva prethodno definiranje vrijednosti pripadne sile i pomaka, a koji su analitički definirani u nastavku teksta, čini se prikladnim prvo prikazati postupak određivanja navedenih veličina. U nastavku teksta dan je detaljan opis metodologije analitičke procjene vrijednosti V_{cr} i Δ_{cr}, nakon čega je, u tabličnom obliku, prikazana vrijednost i usporedba procijenjene vrijednosti početne krutosti u odnosu na postojeće modele i rezultate ispitivanja (*Potpoglavlje 7.6.1.*).

7.5.2. Procjena horizontalne nosivosti sustava pri pojavi prve značajne pukotine u ispunu

Prilikom procjene horizontalne nosivosti sustava uokvireno zide, pri pojave prve značajne pukotine u ispunu, predlaže se primjena izraza (7.62). Izrazom se pretpostavlja da je promatrana horizontalna nosivost jednaka zbroju doprinosa okvira i ispuna:

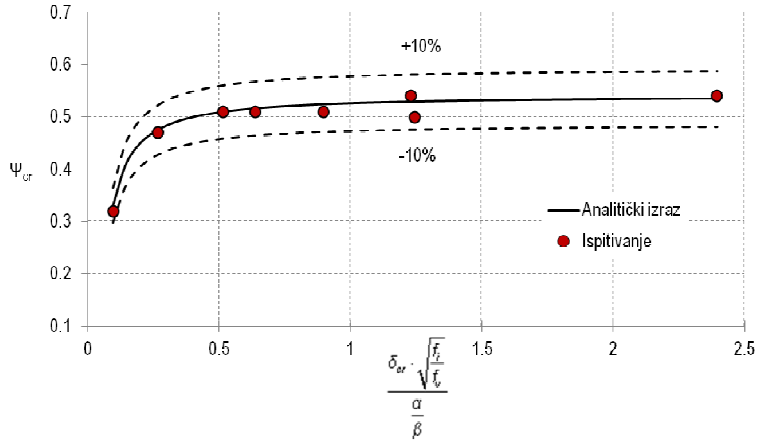
$$V_{cr} = \psi_{cr} \cdot V_f + V_{i,cr} = \psi_{cr} \cdot V_f + \frac{f_t \cdot A_i}{4} \cdot \left[3 \cdot \alpha + \sqrt{9 \cdot \alpha^2 + 16 \cdot \left(1 + \frac{P}{A_e \cdot f_t} \right)} \right] \tag{7.62}$$

$$A_e = A_i + 2 \cdot A_c \cdot \frac{E_c}{E_i} \tag{7.63}$$

gdje je Ψ_{cr} koeficijent doprinosa horizontalne nosivost okvira V_f, α omjer visine i raspona okvira ($\alpha=H/L$), P gravitacijsko opterećenje, A_i ploština poprečnog presjeka ispuna, A_e ploština ekvivalentnog presjeka sustava okvir s ispunom i f_t vlačna čvrstoća ispuna. Prilikom proračuna ploštine ekvivalentnog poprečnog presjeka A_e predlaže se zanemarivanje uzdužne armature u stupovima.

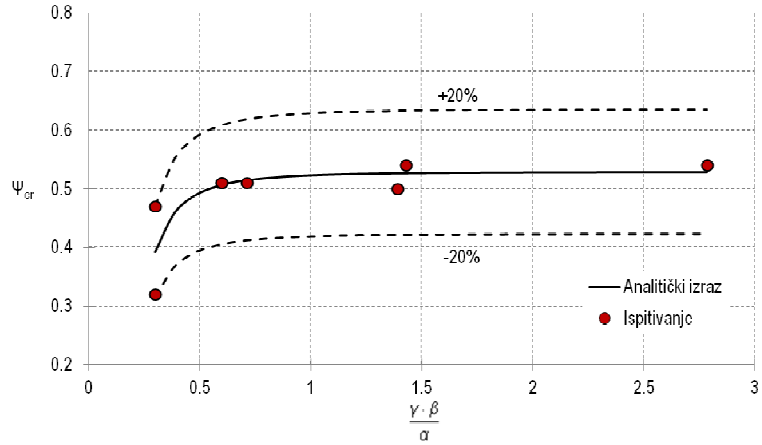
Doprinos okvira određen je koeficijentom Ψ_{cr} što je konceptualno jednako Stavridisovom modelu, a definira horizontalnu nosivosti okvira pri promatranom graničnom stanju u odnosu na maksimalnu nosivost. Vrijednost koeficijenta Ψ_{cr} pod izravnim je utjecajem vrijednosti relativnog međukatnog pomaka pri promatranom graničnom stanju, δ_{cr}. Drugim riječima, definiranje doprinosa okvira zahtijeva prethodnu procijenu relativnog međukatnog pomaka δ_{cr} čija je metodologija procjene definirana u sljedećem potpoglavlju. Eksperimentalne vrijednosti koeficijenta Ψ_{cr} određene su na način opisan u *Potpoglavlju 6.7*. Set eksperimentalnih rezultata, zajedno s analitičkom procijenom vrijednosti, prikazan je Slikom 7.16. Analitički izraz procjene temeljen je na regresijskoj analizi pomoću eksponencijalne funkcije gdje su svi koeficijenti prikazani u bez dimenzinalnom obliku. Slikom 7.16 prikazana su i odstupanja s gornjom i donjom granicom u iznosu od 10% procijenjene vrijednosti. Predloženi izraz aproksimira eksperimentalne rezultate sa srednjom kvadratnom pogreškom u iznosu od 0,97 što se može smatrati izvrsnom aproksimacijom. Najveće odstupanje iznosi 3% i odnosi se na ispitni uzorak *O1_bvm*. Predložena analitička procjena doprinosa okvira dana je izrazom (7.64).

$$\psi_{cr} = 0{,}54 - 0{,}014 \cdot \left(\frac{\frac{\alpha}{\beta}}{\delta_{cr} \cdot \sqrt{\frac{f_i}{f_v}}} \right)^{1{,}2} \tag{7.64}$$



Slika 7.16 *Usporedba eksperimentalnih i analitičkih vrijednosti procjene koeficijenta* Ψ_{cr}

Doprinos okvira može se procijeniti i na osnovi geometrijskih karakteristika konstituenata sustava primjenom izraza (7.65). Navedeni izraz također je temeljen na regresijskoj analizi pomoću eksponencijalne funkcije, međutim, u odnosu na izraz (7.64) uočeno je nešto veće odstupanje. Srednja kvadratna pogreška aproksimacije eksperimentalnih rezultata iznosi 0,65. Unatoč relativno velikoj srednjoj kvadratnoj pogrešci, može se smatrati da izraz (7.65) dobro aproksimira eksperimentalne vrijednosti s obzirom da najveće odstupanje iznosi 22% (ispitni uzorak *O1_bvm*) u odnosu na eksperimentalnu vrijednost dok su sva ostala odstupanja manja od 12%. Usporedba eksperimentalnih i analitičkih rezultata procjene Ψ_{cr}, na osnovi izraza (7.65), dana je Slikom 7.17 uz naznačenu donju i gornju granicu odstupanja u iznosu od 20% u odnosu na procijenjenu vrijednost.



Slika 7.17 *Usporedba eksperimentalnih i analitičkih rezultata procjene koeficijenta* Ψ_{cr} *na osnovi geometrijskih karakteristika*

$$\psi_{cr} = 0{,}53 - 0{,}006 \cdot \left(\frac{\alpha}{\beta \cdot \gamma} \right)^{2{,}6} \tag{7.65}$$

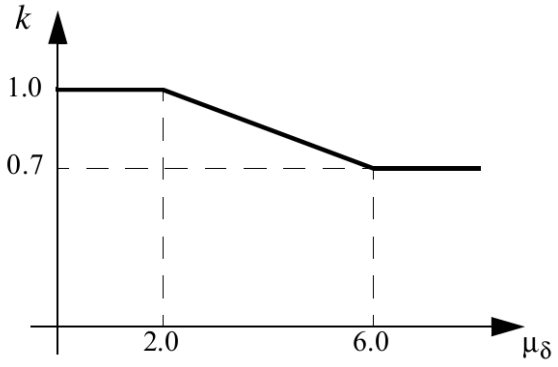
Značanje pojedinih koeficijenata izraza (7.64) i (7.65) opisano je u *Potpoglavlju 7.5*.

Vrijednost horizontalne nosivosti okvira V_f pod dominantnim je utjecajem mehanizma sloma stupova. Stoga, predlaže se procjena nosivosti na osnovi posmičnog ili savojnog sloma stupova, pri čemu je mjerodavna manja vrijednost.

Horizontalna nosivost okvira pod pretpostavkom posmičnog sloma stupova može se odrediti pomoću izraza (7.66) [71]:

$$V_f = V_{lc} + V_{rc} = 2 \cdot k \cdot \left[\left(\frac{0{,}5 \cdot \sqrt{f_c}}{\frac{L_v}{d}} \cdot \sqrt{1 + \frac{P}{0{,}5 \cdot \sqrt{f_c} \cdot A_c}} \right) \cdot 0{,}8 \cdot A_c + \frac{A_{sh} \cdot f_{yh} \cdot d}{s} \right] \tag{7.66}$$

gdje je L_v posmična visina stupa (*shear span*), d statička visina poprečnog presjeka stupa, f_c tlačna čvrstoća betona, A_{sh} ploština poprečne armature, f_{yh} granica tečenja poprečne armature i s razmak poprečne armature. Koeficijentom 2 na početku izraza definiran je broj stupova. Koeficijentom k definiran je utjecaj degradacija posmične nosivosti uslijed povećanja zahtjevanog pomaka stupa. Vrijednost koficijenta određena je u ovisnosti o duktilnosti presjeka, Slika 7.18, uz pretpostavku smanjenja kapaciteta posmične nosivosti betona usljed nastanka pukotina i gubitka unutarnjih veza. Smanjenje nosivosti poprečne armature proizlazi iz pretpostavke gubitka veze beton – armatura. Prilikom proračuna horizontalne nosivosti okvira, a primjenom izraza (7.66), predlaže se usvajanje vrijednost koeficijenta k u iznosu od 1 s obzirom da pri promatranom graničnom stanju nisu uočena oštećenja okvira ispitnih uzoraka.



Slika 7.18 *Vrijednost koeficijenta k u ovisnosti o duktilnosti presjeka elementa* [71]

Horizontalna nosivost okvira pod pretpostavkom savojnog sloma stupova može se odrediti prema izrazu (7.67):

$$V_f = \frac{4 \cdot M_u}{H} \tag{7.67}$$

Granični moment nosivosti presjeka stupa M_u određuje se u ovisnosti o intenzitetu aksijalne sile, pri čemu se razlikuju tri razine [72],:

(a) intenzitet aksijalne sile u području između balansne točke sloma i maksimalne aksijalne sile, tj. u području:

$$0{,}4 \cdot b_c \cdot h_c \cdot f_c \le N \le N_{\max}$$

$$M_u = \left(0{,}8 \cdot A_s \cdot f_y \cdot h_c + 0{,}12 \cdot b_c \cdot h_c^2 \cdot f_c\right) \cdot \left(\frac{N_{\max} - N}{N_{\max} - 0{,}4 \cdot b_c \cdot h_c \cdot f_c}\right) \tag{7.68}$$

(b) intenzitet aksijalne sile u području između balansne točke sloma i 0, tj. u području:

$$0 \le N \le 0{,}4 \cdot b_c \cdot h_c \cdot f_c$$

$$M_u = 0{,}8 \cdot A_s \cdot f_y \cdot h_c + 0{,}5 \cdot N \cdot h_c \cdot \left(1 - n_0\right) \tag{7.69}$$

(c) intenzitet aksijalne sile u području između:

$$N_{\min} \le N \le 0$$

$$M_u = 0{,}8 \cdot A_s \cdot f_y \cdot h_c + 0{,}4 \cdot N \cdot h_c \tag{7.70}$$

gdje je:

$$N_{\max} = b_c \cdot h_c \cdot f_c + \left(A_s + A_s^{/}\right) \cdot f_y \tag{7.71}$$

$$N_{\min} = -\left(A_s + A_s^{/}\right) \cdot f_y \tag{7.72}$$

$$n_0 = \frac{N}{b_c \cdot h_c \cdot f_c} \tag{7.73}$$

pri čemu su h_c i b_c visina i širina poprečnog presjeka stupa, A_s i $A_s^{/}$ ploština uzdužne armature stupa u vlačnom i tlačnom području presjeka, f_y granica tečenja uzdužne armature, f_c tlačna čvrstoća betona i N aksijalno opterećenje stupa.

Doprinos ispuna definiran je u odnosu na geometrijske i mehaničke karakteristike konstituenata sustava, a predviđa pojavu prve značajne pukotine u ispunu uslijed prekoračenja vlačne čvrstoće istog te je izveden na osnovi teorije elastičnosti uz pretpostavku jednolike raspodjele posmičnih naprezanja na poprečnom presjeku u polovini visine ispuna. Opterećenje pojedinih elemenata ispuna određeno je na temelju uvjeta ravnoteže geometrijske idealizacije prikazane Slikom 7.13. Iako je predloženi izraz

konceptualno jednak Žarnićevom, izraz (7.17), osnovna prednost predloženog izraza proizlazi iz direktnog uključivanja sila interakcije okvir – ispuna pomoću geometrijskih karakteristika okvira što čini model prikladnijim za primjenu u praksi. Osim toga, Žarnićev model zahtijeva definiranje niza parametara čije su vrijednosti određene eksperimentalno i definirane karakteristikama ispitnih uzoraka. U konačnici, Žarnić predlaže primjenu konstantnih vrijednosti gotovo svih koeficijenata u izrazu, neovisno o geometrijskim karakteristikama, što je poprilično nejasno s obzirom na relativnu složenost definiranja istih.

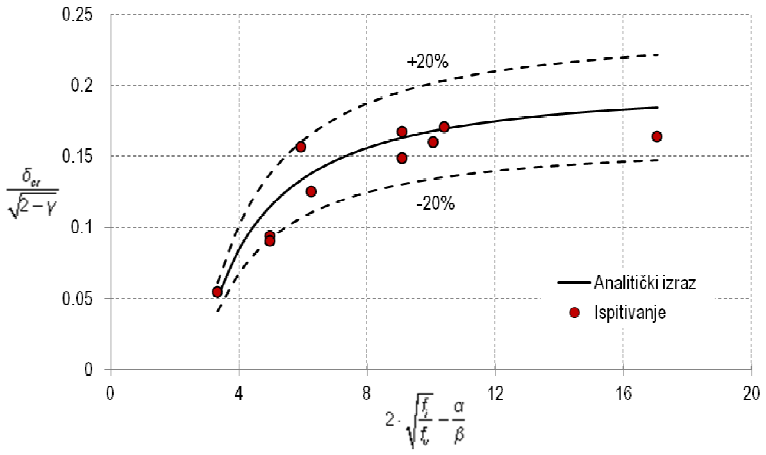
Potrebno je naglasiti da predloženi izraz isključivo vrijedi za pretpostavljenu geometrijsku idealizaciju sustava, u suprotnom, potrebno je izvršiti prilagodbu izraza uzimajući u obzir pretpostavljeni nagib kosih štapova ispuna. Pretpostavka pojave tlačne sile u ispunu uslijed gravitacijskog opterećenja i interakcije okvir – ispun proizlazi iz metodologije provođenja ispitivanja uzoraka gdje je vertikalno (gravitacijsko) opterećenje nanošeno na uzorak nakon što je ispun izveden. S obzirom na tehnologiju izvedbe okvirnih konstrukcija sa zidanim ispunom, gdje se ispun u pravilu izvodi nakon potpunog završetka nosive konstrukcije, tlačno naprezanje u ispunu uzrokovano gravitacijskim opterećenjem ne može se odrediti sa zadovoljavajućom točnošću. Stoga se, za praktičnu primjenu, predlaže zanemarivanje utjecaja gravitacijskog opterećenja, pri čemu se promatrana horizontalna nosivost može odrediti pomoću izraza (7.74). Zanemarivanje utjecaja gravitacijskog opterećenja na horizontalnu nosivost predstavlja rješenje na strani sigurnosti ukoliko se uzme u obzir da povećanje tlačnog naprezanja u ispunu pri dvoosnom stanju naprezanja doprinosi vlačnoj čvrstoći. Izvod predloženih izraza prikazan je u dodatku A:

$$V_{i,cr} = \psi_{cr} \cdot V_f + \frac{f_t \cdot A_i}{4} \cdot \left(3 \cdot \alpha + \sqrt{9 \cdot \alpha^2 + 16}\right) \tag{7.74}$$

7.5.3. Procjena relativnog međukatnog pomaka sustava uokvireno zide pri pojavi prve značajne pukotine u ispunu

Za procjenu relativnog međukatnog pomaka sustava pri pojavi prve značajne pukotine u ispunu predlaže se primjena izraza (7.75). U predloženom izrazu sadržane su geometrijske i mehaničke karakteristike konstituenata sustava, a temeljen je na vlastitim rezultatima ispitivanja. Pri provedbi regresijske analize, pomoću eksponencijalne funkcije, svi su koeficijenti predloženog izraza prikazani u bezdimenzionalnim veličinama kako bi se omogućila praktična primjena. Prilikom formiranja seta mjerodavnih eksperimentalnih rezultata, promatrane su srednje vrijednosti pozitivnog i negativnog smjera opterećenja. Prikaz mjerodavnog seta rezultata, uz aproksimirane vrijednosti predloženog izraza, dan je Slikom 7.19. Uz aproksimirane vrijednosti prikazano je i područje odstupanja s gornjom i

donjom granicom u iznosu od 20% procijenjene vrijednosti. Predloženi izraz aproksimira eksperimentalne vrijednosti sa srednjom kvadratnom pogreškom u iznosu od 0,86 što se može smatrati vrlo dobrom aproksimacijom s obzirom na kompozitnu prirodu sustava. Maksimalno odstupanje procjene uočeno je kod ispitnog uzorka *O1_bpm** i iznosi 27% u odnosu na izmjerenu vrijednost.

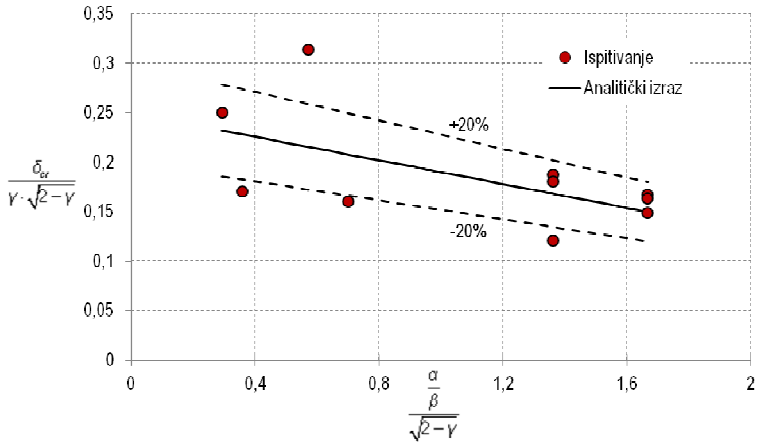


Slika 7.19 *Prikaz usporedbe eksperimentalnih i analitičkih rezultata procjene* δ_{cr}

$$\delta_{cr} = 0{,}2 \cdot \sqrt{2-\gamma} - \frac{0{,}8 \cdot \sqrt{2-\gamma}}{\left(2 \cdot \sqrt{\frac{f_i}{f_v}} - \frac{\alpha}{\beta}\right)^{1{,}4}} \tag{7.75}$$

Unatoč relativno velikoj robusnosti predloženog izraza, većina parametara može se odrediti s relativnom jednostavnošću. Parametri kojima je opisan utjecaj geometrijskih karakteristika okvira, α i β, određuju se mjerenjem dimenizija elemenata okvira s obzirom da je zanemarena uzdužna armatura prilikom definiranja momenata tromosti. Iako se geometrijski parametar ispuna može odrediti bez pretjerane destrukcije istog (dovoljno je izdvojiti jedan zidni element), određivanje tlačne i vlačne čvrstoće zahtijeva provedbu razornih ispitivanja.

Relativni međukatni pomak pri pojavi prve značajne pukotine u ispunu može se procijeniti i na temelju samih geometrijskih veličina, naravno uz smanjenu točnost. Usporedba eksperimentalnih rezultata normaliziranih u odnosu na geometrijske karakteristike i procjene na osnovi izraza (7.76), prikazana je Slikom 7.20 uz naznačena područja odstupanja s gornjom i donjom granicom u iznosu od 20% procijenjene vrijednosti.



Slika 7.20 *Prikaz usporedbe eksperimentalnih i analitičkih rezultata procjene δ_{cr} na osnovi geometrijskih karakteristika*

$$\delta_{cr} = 0{,}25 \cdot \sqrt{2-\gamma} - 0{,}06 \cdot \gamma \cdot \frac{\alpha}{\beta} \tag{7.76}$$

Iako predloženi izraz aproksimira eksperimentalne vrijednosti sa srednjom kvadratnom pogreškom u iznosu od 0,32, može se smatrati da je aproksimacija zadoljavajuća. Navedeni zaključak proizlazi iz činjenice da je najveće odstupanje 53% (precijenjena vrijednost odnosi se na ispitni uzorak *O1_bvm*) dok su sva ostala odstupanja manja od 35%. Unatoč ekstremnom odstupanja, može se zaključiti da je predloženi izraz (7.76) također pogodan za inženjersku praksu s obzirom na relativnu jednostavnost i brzinu određivanja parametara izraza.

7.5.4. Procjena horizontalne nosivosti sustava uokvireno zide pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna

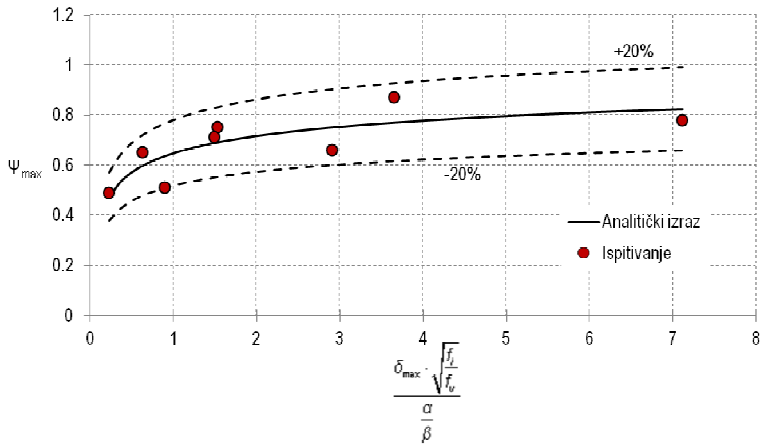
Prilikom procjene horizontalne nosivosti sustava pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna V_{max} predlaže se primjena izraza (7.77) gdje je vrijednost promatrane veličine definirana kao zbroj horizontalne nosivosti okvira i ispuna. Doprinos okvira definiran je koeficijentom Ψ_{max} dok je doprinos ispuna određen na temelju geometrijskih i mehaničkih karakteristika konstituenata sustava gdje su vrijednosti opterećenja pojedinih elemenata ispuna određene iz uvjeta ravnoteže geometrijske idealizacije prikazane Slikom 7.13. Horizontalna nosivost ispuna određena je na temelju pretpostavke pojave dominantnog mehanizma sloma uslijed prekoračenja posmične čvrstoće u obliku dijagonalnog posmičnog sloma. Predloženi izraz proizlazi iz kombinacije Stavridisovog i Mehrabijovog modela, a osnovna razlika proizlazi iz same geometrijske idealizacije sustava. Potrebno je naglasiti da predloženi izraz isključivo vrijedi za pretpostavljenu geometrijsku idealizaciju, u suprotnom, potrebno je izvršiti prilagodbu ukoliko se pretpostavi drugačije. S obzirom da pravac djelovanja gravitacijskog opterećenja

izlazi iz jezgre ekvivalentnog poprečnog presjeka sustava, pretpostavljeno je da samo jedan kosi štap ispuna prenosi tlačna naprezanja. Pretpostavka se dodatno može opravdati i činjenicom da pri pojavi dominantnog sloma ispuna tlačno naprezanje u samo jednom kosom štapu ispuna pridonosi horizontalnoj nosivosti u pogledu sile trenja. Izvod predloženog izraza prikazan je u dodatku A:

$$V_{\max} = \psi_{\max} \cdot V_f + V_{i,\max} = \psi_{\max} \cdot V_f + A_i \cdot \frac{c_0 + \mu \cdot \dfrac{P}{A_e}}{1 - \mu \cdot \dfrac{3}{4} \cdot \alpha} \tag{7.77}$$

pri čemu je c_0 kohezija, μ kut unutarnjeg trenja, P gravitacijsko opterećenje, a A_e ekvivalentni poprečni presjek sustava. Vrijednost A_e određuje se pomoću izraza (7.63) uz zanemarivanje uzdužne armature u stupovima okvira.

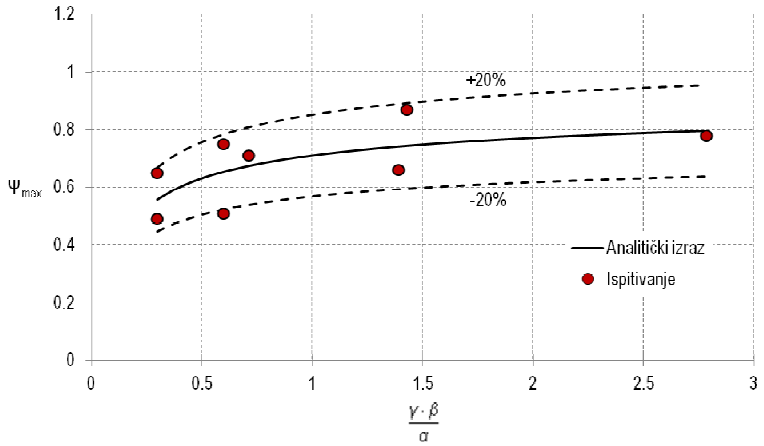
Koeficijent doprinosa okvira Ψ_{max} određen je na temelju eksperimentalnih rezultata pomoću regresijske analize primjenom eksponencijalne funkcije. Eksperimentalne vrijednosti koeficijenta Ψ_{max} određene su na način opisan u *Potpoglavlju 6.7*. Kao i kod koeficijenta doprinosa okvira Ψ_{cr}, tu je također potrebno prvo procijeniti vrijednost relativnog međukatnog pomaka pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna, δ_{max}. Metodologija procjene vrijednosti δ_{max} prikazana je u *Potpoglavlju 7.5.4*. Usporedba eksperimentalnih i procijenjenih vrijednost dana je Slikom 7.21 uz naznačenu donju i gornju granicu odstupanja u iznosu od 20% procijenjene vrijednosti. Procjena koeficijenta doprinosa okvira određena je pomoću izraza (7.78). Srednja kvadradna pogreška aproksimacije eksperimentalnih rezultata iznosi 0,64, a najveće odstupanje 14% u odnosu na eksperimentalnu vrijednost i uočeno je kod ispitnog uzorka *O3_bpm*. S obzirom na navedeno odstupanje, može se zaključiti da izraz (7.78) vrlo dobro aproksimira eksperimentalne rezultate.



Slika 7.21 *Usporedba eksperimentalnih i analitičkih rezultata procjene koeficijenta Ψ_{max}*

$$\psi_{\max} = 1{,}3 - 0{,}65 \cdot \left(\frac{\frac{\alpha}{\beta}}{\delta_{\max} \cdot \sqrt{\frac{f_i}{f_v}}} \right)^{0{,}16} \tag{7.78}$$

Vrijednost koeficijenta Ψ_{max} može se odrediti i na osnovi geometrijskih karakteristika konstituenata sustava pomoću izraza (7.79). Usporedba eksperimentalnih i analitičkih rezultata procjene vrijednosti koeficijenta doprinosa okvira dana je Slikom 7.22 uz naznačenu donju i gornju granicu odstupanja u iznosu od 20% procijenjene vrijednosti. Predloženi izraz određen je na temelju regresijske analize primjenom eksponencijalne funkcije. Srednja kvadratna pogreška aproksimacije iznosi 0,43 uz maksimalno odstupanje u iznosu od 28% u odnosu na eksperimentalnu vrijednost. Unatoč tome, može se smatrati da predloženi izraz dobro aproksimira eksperimentalne vrijednosti s obzirom na to da su sva ostala odstupanja manja od 15%.



Slika 7.22 *Usporedba eksperimentalnih i analitički procijenjenih vrijednosti koeficijenta Ψ_{max} na osnovi geometrijskih karakteristika*

$$\psi_{\max} = 0{,}98 - 0{,}27 \cdot \left(\frac{\alpha}{\beta \cdot \gamma} \right)^{0{,}37} \tag{7.79}$$

S obzirom na navedeno, može se zaključiti da su oba izraza procjene doprinosa okvira horizontalnoj nosivosti sustava pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna pogodna za inženjersku primjenu. Procjena horizontalne nosivosti okvira opisana je u *Potpoglavlju 7.5.2*.

Drobljenje uglova uočeno prilikom ispitivanja uzoraka *O1_bpm* i *O1_bpm** ukazuje na potrebu sagledavanja hijerarhije čvrstoće ispuna prilikom određivanja horizontalne nosivosti pri promatranom graničnom stanju. Horizontalna nosivost sustava pri pojavi drobljenja uglova ispuna može se odrediti pomoću izraza (7.80), a određena je kao zbroj doprinosa okvira i ispuna. Tlačna čvrstoća ispuna

određena je na temelju modela zamjenske tlačne dijagonle prema preporukama danim u [35] gdje je za širinu dijagonale *w* usvojen iznos od 1/3 [34] duljine kosih štapova ispuna geometrijski idealiziranog sustava:

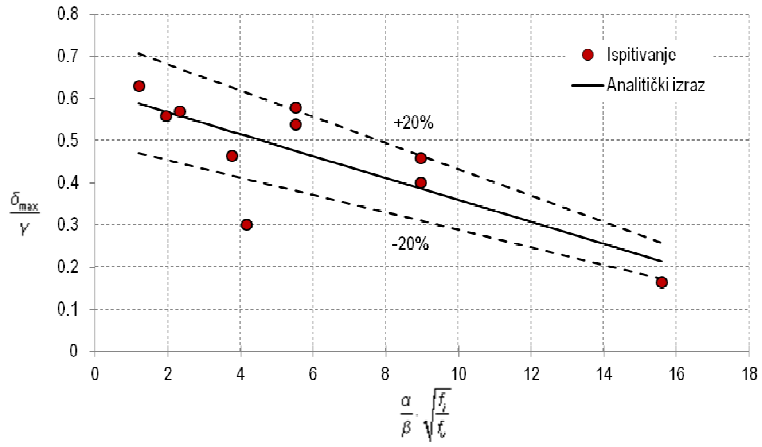
$$V_{crash} = \psi_{\max} \cdot V_f + V_{i,\max} = \psi_{\max} \cdot V_f + \left(w \cdot t \cdot f_i \cdot \cos\theta \right) \tag{7.80}$$

Prema prikazanom izrazu, koji je opće prihvaćen u istraživačkoj zajednici, drobljenje uglova predstavlja dominantan mehanizam sloma, tj. vrijednost horizontalne nosivosti pri pojavi drobljenja uglova kod svih je uzoraka sa šupljim glinenim zidnim elementima manja od vrijednosti određene na temelju pretpostavke dijagonalnog posmičnog sloma. Navedeno nije u skladu s mehanizmima sloma uočenim tijekom provedenih ispitivanja gdje je kod uzoraka skupine *O3* i *O4* pojava drobljenja uglova uočena nakon dijagonalnog posmičnog sloma ispuna čime se postavlja pitanje opravdanosti primjene navedenog izraza. Međutim, a sukladno pregledu literature gdje se pojava drobljenja ispuna pripisuje okvirima sa slabim stupovima i jakim gredama, čini se prikladnim definirati određenu vrijednost odnosa momenata tromosti stupa i grede okvira koja će odrediti pojavu određenog mehanizma sloma ispuna. Tako je, isključivo na vlastitim rezultatima ispitivanja uz grubu procjenu, usvojeno da do drobljenja uglova ispuna dolazi pri vrijednosti odnosa momenata tromosti stupa i grede manjem od 0,5. Navedenu vrijednost treba uzeti s rezervom, a točnija procjena zahtijeva dodatna ispitivanja.

7.5.5. Procjena relativnog međukatnog pomaka sustava uokvireno ziđe pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna

Za procjene relativnog međukatnog pomaka sustava uokvireno ziđe pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna predlaže se primjena izraza (7.81). Predloženi izraz izveden je na temelju vlastitih rezultata ispitivanja primjenom regresijske analize pomoću linearne funkcije. Prethodno su koeficijenti predloženog izraza prikazani u bezdimenzionalnim veličinama čime je omogućena praktična primjena. S obzirom na uočene razlike u odgovoru ispitnih uzoraka, prilikom formiranja seta eksperimentalnih podataka, promatrana je srednja vrijednost pozitivnog i negativnog smjera opterećenja. Usporedba eksperimentalnih i analitičkih vrijednosti procjene relativnog međukatnog pomaka δ_{Vmax} prikazana je Slikom 7.23 uz naznačenu donju i gornju granicu odstupanja u iznosu od 20% procijenjene vrijednosti. Srednja kvadratna pogreška aproksimacije iznosi 0,62, a najveće odstupanje iznosi 71% u odnosu na eksperimentalnu vrijednost. Navedeno odstupanje uočeno je kod uzorka *O1_cvm*, međutim, sva ostala odstupanja manja su od 30% eksperimentalne vrijednosti. Osim toga, kod navedenog je uzorka pojava prve značajne pukotine ujedno značila i pojavu dominantnog mehanizma sloma ispuna čime se navedeno odstupanje može zanemariti s obrirom na to da je

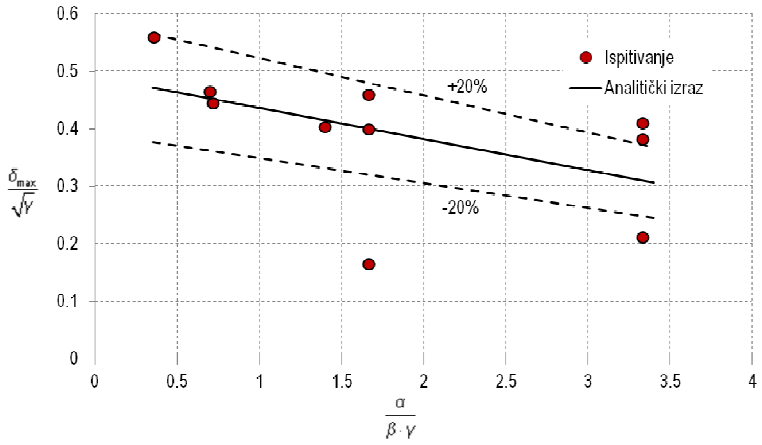
procjena relativnog međukatnog pomaka pri graničnom stanju pojave prve značajne pukotine dana u *Potpoglavlju 7.5.3*. S obzirom na navedeno, može se zaključiti da predloženi izraz aproksimira eksperimentalne rezultate sa zadovoljavajućom točnošću te da je primjenjiv u inženjerskoj praksi. Svi koeficijenti predloženog izraza prethodno su opisani (vidi *Potpoglavlje 7.5.*).



Slika 7.23 *Usporedba eksperimentalnih i analitički procijenjenih vrijednosti* δ_{max}

$$\delta_{V\max} = \gamma \cdot \left[0{,}62 - 0{,}026 \cdot \left(\frac{\alpha}{\beta} \cdot \sqrt{\frac{f_j}{f_v}} \right) \right] \tag{7.81}$$

Procjena relativnog međukatnog pomaka pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna δ_{Vmax} moguća je i na osnovi geometrijskih karakteristika konstituenata sustava pomoću izraza (7.82). Prodloženi izraz također je definiran na temelju regresijske analize primjenom linearne funkcije. Srednja kvadratna pogreška aproksimacije eksperimentalnih rezultata iznosi 0,27, a najveće odstupanje 2,4 puta precjenjuje eksperimentalnu vrijednost (ispitni uzorak *O1_cvm*). Osim navedenog, kod uzorka *O1_bvm* uočeno je još jedno relativno veliko odstupanje u iznosu od 46% eksperimentalne vrijednosti. Sva ostala odstupanja manja su od 25%. Unatoč dvama ekstremnim odstupanjima, predloženi izraz relativno zadovoljavajuće aproksimira eksperimentalne vrijednosti te može pronaći primjenu i u praksi. Usporedba eksperimentalnih i analitički procijenjenih vrijednost relativnog međukatnog pomaka δ_{Vmax} prikazana je Slikom 7.24 uz naznačenu donju i gornju granicu odstupanja u iznosu od 20% procijenjene vrijednosti.



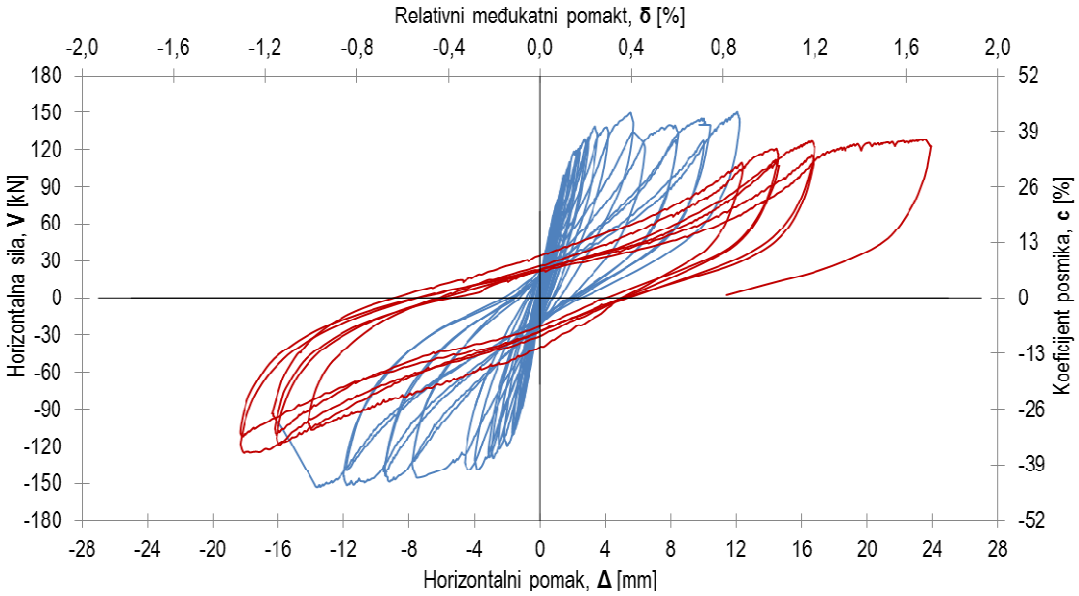
Slika 7.24 *Usporedba eksperimentalnih i analitički procijenjenih vrijednosti δ_{Vmax} na osnovi geometrijskih karakteristika*

$$\delta_{V\max} = \sqrt{\gamma} \cdot \left[0{,}49 - 0{,}054 \cdot \frac{\alpha}{\beta \cdot \gamma} \right] \tag{7.82}$$

7.5.6. Procjena horizontalne nosivosti sustava uokvireno zide pri graničnom stanju pred rušenje

Sukladno slijedu mehanizama sloma sustava, prikazanog Slikom 7.14, horizontalna nosivost pri promatranom graničnom stanju određuje su u ovisnosti o rezidualnoj nosivosti sustava. Vrijednost rezidualne nosivosti ovisi o vrsti ispuna, odnosno o tipu zidnog elementa te o odnosu posmičnih čvrstoća stupa i grede okvira, a određuje se za trenutak u kojem horizontalna nosivost jednog od elemenata iščezava. Tako, s obzirom na ponašanje ispitnih uzoraka, u slučaju ispuna izvedenog od šupljih zidnih elemenata nosivost okvira predstavlja rezidualnu nosivost dok u slučaju ispuna izvedenog od glinene opeke ispun osigurava rezidualnu nosivost. Rezidualna nosivost može se promatrati kao određena razina sigurnosti u odnosu na gubitak stabilnosti konstrukcije što je i uočeno tijekom provedenih ispitivanja. Naime, prilikom ispitivanja uzorka *O2_cpm*, kod kojeg je promatran utjecaj količine poprečne armature u stupovima na ponašanje sustava, posmični slom jednog od stupova okvira nastupio je pri relativno malom relativnom međukatnom pomaku, međutim, očekivano je značajno smanjenje horizontalne nosivosti izostalo (Slika 7.25). Navedeni izostanak značajnog smanjenja horizontalne nosivosti može se pripisati raspodjeli gravitacijskog opterećenja gdje nakon sloma stupa dolazi do povećanja tlačne sile u ispunu, odnosno povećanja sile trenja. Suprotno, kod svih uzoraka kod kojih je ispun izveden od šupljih glinenih zidnih elemenata, neovisno o vrsti primijenjenog morta, uočeno je da nakon dosezanja određenog relativnog međukatnog pomaka, a

uslijed znatnog oštećenja ispuna, horizontalna nosivost sustava postaje istovjetna horizontalnoj nosivosti okvira.



Slika 7.25 *Prikaz histerezne krivulje ispitnog uzorka O2_cpm (punom crvenom linijom naznačeno je područje odgovora nakon pojave posmičnog sloma stupa okvira)*

Navedene razlike u ponašanju ispitnih uzoraka onemogućuju jedinstvenu analitičku generalizaciju procjene vrijednosti rezidualne nosivosti. Stoga se predlaže procjena rezidualne nosivosti pomoću triju izraza, ovisno u tipu zidnih elemenata i odnosu posmične nosivosti stupa i grede ispitnih uzoraka. Odnos posmične nosivosti stupa i grede okvira promatran je u odnosu na sile uzrokovane interakcijom okvir – ispun, tj. projekcijom tlačne sile u dijagonali ispuna.

Prvi izraz (7.83) definira rezidualnu nosivost u slučaju kada je ispun izvedena od šupljih glinenih zidnih elemenata. S obzirom da u navedenom slučaju doprinos ispuna iščezava pri određenoj vrijednosti relativnog međukatnog pomaka, rezidualna nosivost definirana je horizontalnom nosivošću okvira. Utjecaj odnosa posmične nosivosti stupa i grede zanemariv je s obzirom da ispun gubi kontakt s okvirom. Izraz (7.83) istovjetan je izrazu (7.66) ili (7.67) ovisno o tome koji daje rješenje na strani sigurnosti (mjerodavna je manja vrijednost). Postupak i opis metodologije procjene horizontalne nosivosti okvira, sukladno izrazima (7.66) i (7.67), dan je u *Potpoglavlju 7.5.2*.

Drugi izraz (7.84) definira rezidualnu nosivost uzoraka kod kojih je ispun izveden od punih zidnih elemenata i kod kojih je posmična čvrstoća grede veća od posmične čvrstoće stupa. Kod uzoraka s navedenim karakteristikama uočeno je tijekom ispitivanja da okvir gubi nosivost uslijed otkazivanja posmične čvrstoće stupa. Navedeno uzrokuje preraspodjelu sila u ispunu, tj. uzrokuje povećanje tlačnog naprezanja u istom što dovodi do povećanja sile trenja. Rezidualna nosivost ispitnih uzoraka u navedenom je slučaju isključivo definirana nosivošću ispuna. Preraspodjela, odnosno

povećanje sile trenja u ispunu, određena je pomoću izraza (7.85) gdje je raspodjela gravitacijskog opterećenja određena na temelju preostale aksijalne krutosti okvira (gravitacijsko opterećenje preuzima samo jedan stup). Doprinos kohezije zanemaren je usljed pojave oštećenja ispuna. Kao i kod procjene horizontalne nosivosti, pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna, prepostavljeno je da samo jedan kosi štap ispuna preuzima tlačno naprezanje uzrokovano interakcijom okvir – ispun. Navedena pretpostavka logična je s obzirom na to da jedan od kosih štapova gubi uporište u stupu uslijed njegovog posmičnog sloma.

Treći izraz (7.86) definira rezidualnu nosivost ispitnih uzoraka kod kojih je ispun izveden od punih zidnih elemenata i kod kojih je posmična čvrstoća stupa veća od posmične čvrstoće grede. Kod navedenih je uzoraka tijekom provedenih ispitivanja uočeno da dolazi do sloma grede uslijed čega rezidualnu nosivost definiraju ispun i stupovi okvira. Međutim, potrebno je naglasiti da su i stupovi okvira neposredno prije pojave posmičnog sloma grede pretrpjeli znatna oštećenja uslijed čega također dolazi do smanjenja aksijalne krutosti istih, a samim time i do povećanja sile trenja u ispunu. Povećanje sile trenja u ispunu također se može odrediti pomoću izraza (7.85) uz pretpostavku preostale aksijalne krutosti stupova u iznosu od 1/2 početne. Navedena vrijednost određena je na temelju rezultata i predstavlja grubu pretpostavku. Rezidualna nosivost okvira može se odrediti pomoću izraza (7.83), a rezidualna nosivost ispuna pomoću izraza (7.84). Tu je također pretpostavljeno da samo jedan kosi štap ispuna preuzima tlačna naprezanja uzrokovana interakcijom okvir – ispun i vrijednost koeficijenta *k* u iznosu od 0,7. Pretpostavka se može opravdati činjenicom da jedan od kosih štapova ispuna gubi uporište u gredi:

$$V_{res,1} = 2 \cdot k \cdot \left[\left(\frac{0{,}5 \cdot \sqrt{f_c}}{\frac{L_v}{d}} \cdot \sqrt{1 + \frac{P}{0{,}5 \cdot \sqrt{f_c} \cdot A_c}} \right) \cdot 0{,}8 \cdot A_c + \frac{A_{sh} \cdot f_{yh} \cdot d}{s} \right] \tag{7.83}$$

ili

$$V_{res,1} = \frac{4 \cdot M_u}{H}$$

$$V_{res,2} = A_i \cdot \frac{\frac{\mu \cdot P}{A_e}}{1 - \mu \cdot \frac{3}{4} \cdot \alpha} \tag{7.84}$$

$$A_e = A_i + A_c \cdot \frac{E_c}{E_i} \tag{7.85}$$

$$V_{res,3} = 2 \cdot k \cdot \left[\left(\frac{0{,}5 \cdot \sqrt{f_c}}{\frac{L_v}{d}} \cdot \sqrt{1 + \frac{P}{0{,}5 \cdot \sqrt{f_c} \cdot A_c}} \right) \cdot 0{,}8 \cdot A_c + \frac{A_{sh} \cdot f_{yh} \cdot d}{s} \right] + A_i \cdot \frac{\frac{\mu \cdot P}{A_e}}{1 - \mu \cdot \frac{3}{4} \cdot \alpha}$$

ili

$$V_{res,3} = \frac{4 \cdot M_u}{H} + A_i \cdot \frac{\frac{\mu \cdot P}{A_e}}{1 - \mu \cdot \frac{3}{4} \cdot \alpha} \tag{7.86}$$

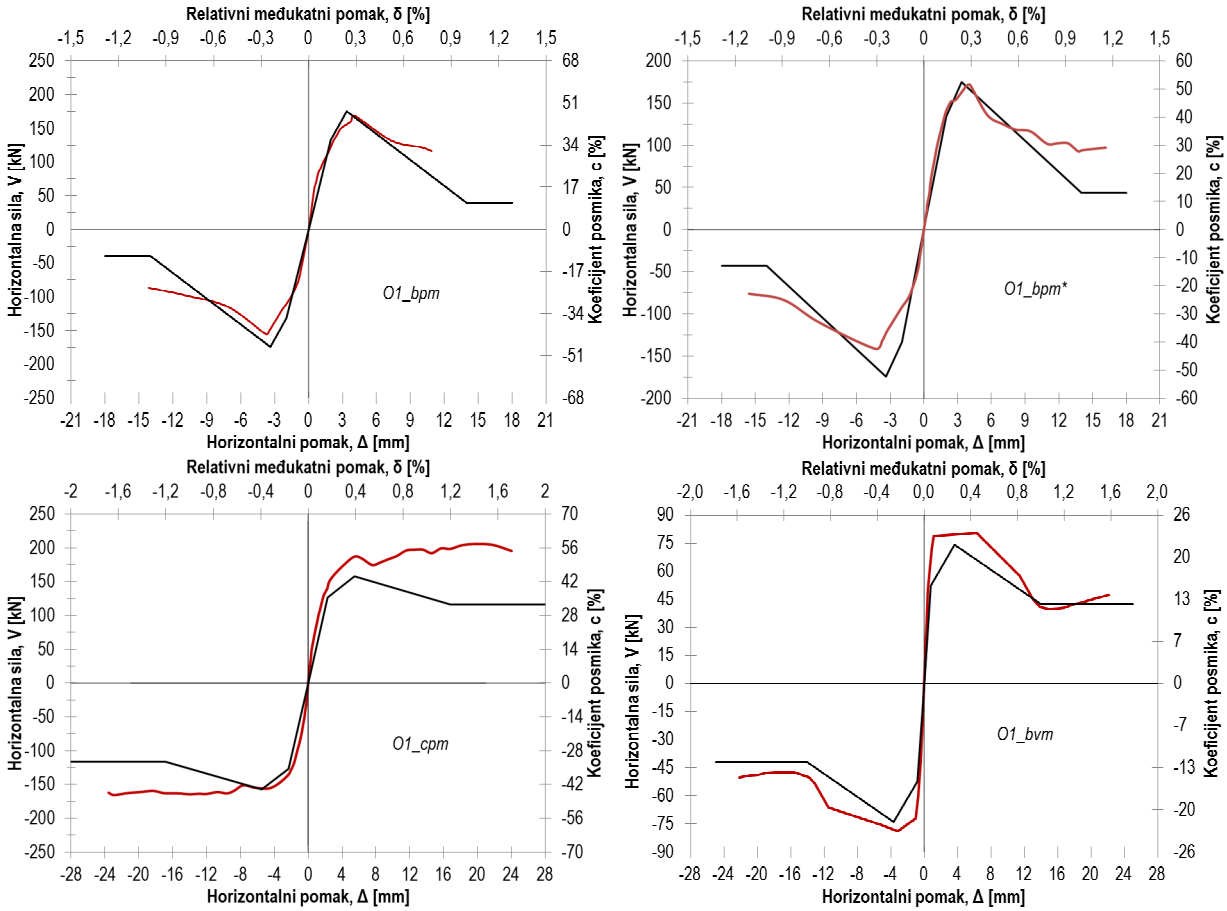
7.5.7. Procjena relativnog međukatnog pomaka sustava uokvireno zide pri graničnom stanju pred rušenje

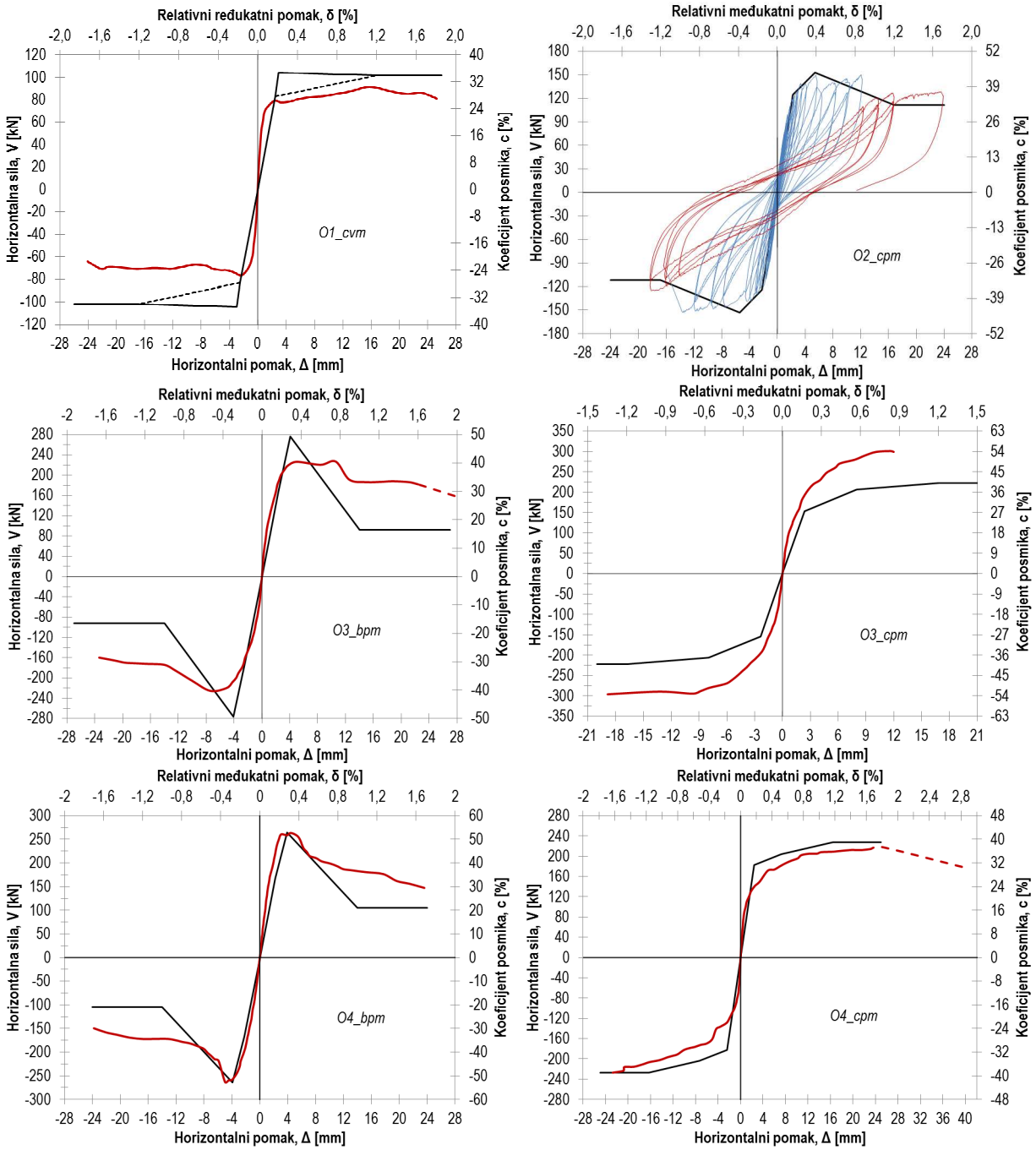
Prilikom analize rezultata ispitivanja nije uočena fizikalna ili empirijska veza između relativnog međukatnog pomaka sustava uokvireno zide pri promatranom graničnom stanju s geometrijskim ili mehaničkim karakteristikama konstituenata. Međutim, uočeno je da u slučaju uzoraka kod kojih je ispun izveden od šupljih glinenih zidnih elemenata, neovisno o vrsti primijenjenog morta, doprinos ispuna horizontalnoj nosivosti iščezava pri približno jednakim relativnim međukatnim pomacima. Sukladno podijeli područja ponašanja prema graničnim stanjima i pripadnim vrijednostima relativnih međukatnih pomaka, prikazanim u *Potpoglavlju 6.7.*, predlaže se usvajanja vrijednosti u iznosu od 1%.

Kod ispitnih uzoraka gdje je ispun izveden od glinene opeke, također nije uočena fizikalna veza između promatrane veličine i geometrijskih ili mehaničkih karakteristika konstituenata sustava. Međutim, čini se prikladnim, prema podjeli prikazanoj u *Potpoglavlju 6.7.*, navedenu veličinu procijeniti u iznosu od 1,3%. Navedena je vrijednost, kao i prethodna, određena u skladu s podjelom područja ponašanja prema graničnim stanjima. Kao alternativno rješenje, predlaže se proračun ovisnosti moment savijanja – rotacija elementa, sukladno metodi kompatibilnosti deformacija, gdje se za iznos relativnog međukatnog pomaka sustava pred rušenje preporuča primjena vrijednosti koja odgovara rotaciji elementa pri dosezanju granice tečenja uzdužne armature.

7.6. Usporedba predložene metode procjene ponašanja sustava uokvireno zide s rezultatima ispitivanja

Usporedba predložene metode procjene ponašanja sustava uokvireno zide s rezultatima ispitivanjaje dana je u odnosu na primarne krivulje uzoraka i prikazana Slikom 7.26. Najveća odstupanja u pogledu procjene nosivosti uočena su kod uzoraka *O1_cpm*, *O1_bvm* i *O3_cpm*. S druge strane, područja ponašanja navedenih uzoraka procijenjena su sa zadovoljavajućom točnošću. Osim toga, vidljiva su i odstupanja pri procjeni početne krutosti uzoraka gdje je tendencija predloženog modela da podcjenjuje eksperimentalne vrijednosti. Unatoč tome, ostvareno je zadovoljavajuće podudaranje predloženog analitičkog modela s rezultatima ispitivanja što ga čini prikladnim za primjenu u praksi. U nastavku teksta prikazana je usporedba rezultata po pojedinim graničnim stanjima uz osvrt na dobivene razlike.





Slika 7.26 *Usporedba primarnih krivulja*

7.6.1. Usporedba procjene početne krutosti sustava uokvireno zide

Usporedba eksperimentalno određene vrijednosti početne krutosti ispitnih uzoraka (K_i^e), s rezultatima predloženog i postojećih analitičkih modela procjene (K_i^a), prikazana je u Tablicama 7.18 i 7.19 u ovisnosti o smjeru opterećenja te Tablicom 7.20 u odnosu na srednju eksperimentalnu vrijednost. Koeficijent odstupanja određen je kao količnik dijeljenja analitičkih i eksperimentalnih vrijednosti.

Iz prikazanih rezultata vidljivo je da predložena metoda procjene početne krutosti sustava u pravilu podcjenjuje promatranu veličinu. Precijenjene vrijedosti dobivene su jedino u slučaju uzorka *O4_cpm* pri pozitivnom smjeru opterećenja i *O1_bpm* te *O1_bpm** pri negativnom smjeru opterećenja. U odnosu na srednju vrijednost model precijenjuje početnu krutost samo kod uzoraka *O1_bpm** i *O4_cpm*. Vrijednost koeficijenta odstupanja kod uzorka *O1_bpm** iznosi 1,02, a kod *O4_cpm* 1,15. Kod podcjenjih vrijednosti, a u odnosu na srednju ekspeimentalnu vrijednost, koeficijenti odstupanja su u intervalu od 0,80 do 1,00. Navedene vrijednosti koeficijenata odstupanja upućuju da predloženi model podcjenjuje početnu krutost s maksimalnim odstupanjem u iznosu od 20% i precijenjuje s maksimalnim odstupanjem u iznosu od 15% u odnosu na eksperimentalne vrijednosti.

Iako kod pojedinih uzoraka postojeći modeli procjene daju manja odstupanja od predložene metode, pogotovo pri pozitivnom smjeru opterećenja, može se primijetiti da kod niti jednog postojećeg modela nije dobivena zadovoljavajuća vrijednost koeficijenta odstupanja kod svih uzoraka. U odnosu na srednju eksperimentalnu vrijednost, samo u slučaju dvaju ispitnih uzoraka postojeći modeli procijenjuju početnu krutost s manjom vrijednošću koeficijenta odstupanja. S obzirom na navedeno i intervale vrijednosti koeficijenata odstupanja, može se zaključiti da predloženi model bolje procijenjuje početnu krutost sustava od postojećih modela te da je kao takav primijenjiv u praksi.

Tablica 7.18 *Usporedba analitički i eksperimentalno određene vrijednosti početne krutosti uzoraka za pozitivan smjer opterećenja*

		SS1		*SS2*		*Holmes*	*Fiorato*	*Žarnić*	*Wei*	*Predloženi model*
		u.v.	*z.v.*	*u.v.*	*z.v.*					
O1_bpm	K_i^a *[kN/mm]*	116,4	109,3	92,4	85,3	224,4	412,8	523,4	46,0	67,8
	K_i^e *[kN/mm]*	78,1								
	Odstupanje	1,49	1,40	1,18	1,09	2,87	5,29	6,70	0,59	0,87
*O1_bpm**	K_i^a *[kN/mm]*	116,4	109,3	92,4	85,3	224,4	412,8	523,4	46,0	67,8
	K_i^e *[kN/mm]*	84,7								
	Odstupanje	1,37	1,29	1,09	1,01	2,65	4,87	6,18	0,54	0,80
O1_cpm	K_i^a *[kN/mm]*	32,8	25,7	30,4	23,3	47,9	104,3	300,3	18,7	55,3
	K_i^e *[kN/mm]*	61,8								
	Odstupanje	0,53	0,42	0,49	0,38	0,77	1,69	4,86	0,30	0,89
O1_bvm	K_i^a *[kN/mm]*	31,5	24,2	29,9	22,6	45,3	98,8	303,9	18,4	59,6
	K_i^e *[kN/mm]*	71,5								
	Odstupanje	0,44	0,34	0,42	0,32	0,63	1,38	4,25	0,26	0,83
O1_cvm	K_i^a *[kN/mm]*	33,0	25,7	30,7	23,3	34,8	104,5	307,6	19,0	32,1
	K_i^e *[kN/mm]*	34,4								
	Odstupanje	0,96	0,75	0,89	0,68	1,01	3,04	8,94	0,55	0,93
O2_cpm	K_i^a *[kN/mm]*	32,8	25,7	30,4	23,3	47,6	104,3	300,3	18,7	54,4
	K_i^e *[kN/mm]*	57,0								
	Odstupanje	0,58	0,45	0,53	0,41	0,83	1,83	5,27	0,33	0,95
O3_bpm	K_i^a *[kN/mm]*	137,1	115,6	110,6	89,1	227,2	423,5	670,7	48,0	70,4
	K_i^e *[kN/mm]*	89,5								

	Odstupanje	1,53	1,29	1,24	1,00	2,54	4,73	7,49	0,54	0,79
O3_cpm	K_i^a *[kN/mm]*	47,4	26,0	54,0	32,6	53,0	101,9	455,0	22,2	64,4
	K_i^e *[kN/mm]*	82,9								
	Odstupanje	0,57	0,31	0,65	0,39	0,64	1,23	5,49	0,27	0,78
O4_bpm	K_i^a *[kN/mm]*	142,2	115,6	115,7	89,1	233,4	430,4	680,3	51,0	72,9
	K_i^e *[kN/mm]*	95,6								
	Odstupanje	1,49	1,21	1,21	0,93	2,44	4,50	7,12	0,53	0,76
O4_cpm	K_i^a *[kN/mm]*	52,5	26,0	59,1	32,6	59,2	103,8	462,0	23,4	77,2
	K_i^e *[kN/mm]*	44,0								
	Odstupanje	1,19	0,59	1,34	0,74	1,34	2,36	10,50	0,53	1,75

Tablica 7.19 *Usporedba analitički i eksperimentalno određene vrijednosti početne krutosti uzoraka za negativan smjer opterećenja*

		SS1		*SS2*		*Holmes*	*Fiorato*	*Žarnić*	*Wei*	*Predloženi model*
		u.v.	*z.v.*	*u.v.*	*z.v.*					
O1_bpm	K_i^a *[kN/mm]*	116,4	109,3	92,4	85,3	224,4	412,8	523,4	46,0	67,8
	K_i^e *[kN/mm]*	57,6								
	Odstupanje	2,02	1,90	1,60	1,48	3,89	7,17	9,09	0,80	1,18
*O1_bpm**	K_i^a *[kN/mm]*	116,4	109,3	92,4	85,3	224,4	412,8	523,4	46,0	67,8
	K_i^e *[kN/mm]*	48,4								
	Odstupanje	2,40	2,26	1,91	1,76	4,64	8,53	10,81	0,95	1,40
O1_cpm	K_i^a *[kN/mm]*	32,8	25,7	30,4	23,3	47,9	104,3	300,3	18,7	55,3
	K_i^e *[kN/mm]*	57,7								
	Odstupanje	0,57	0,452	0,53	0,40	0,83	1,81	5,20	0,32	0,96
O1_bvm	K_i^a *[kN/mm]*	31,5	24,2	29,9	22,6	45,3	98,8	303,9	18,4	59,6
	K_i^e *[kN/mm]*	72,2								
	Odstupanje	0,44	0,34	0,41	0,31	0,63	1,37	4,21	0,25	0,82
O1_cvm	K_i^a *[kN/mm]*	33,0	25,7	30,7	23,3	34,8	104,5	307,6	19,0	32,1
	K_i^e *[kN/mm]*	33,9								
	Odstupanje	0,97	0,76	0,91	0,69	1,03	3,08	9,07	0,56	0,95
O2_cpm	K_i^a *[kN/mm]*	32,8	25,7	30,4	23,3	47,6	104,3	300,3	18,7	54,4
	K_i^e *[kN/mm]*	60,1								
	Odstupanje	0,55	0,43	0,51	0,39	0,83	1,74	5,00	0,31	0,90
O3_bpm	K_i^a *[kN/mm]*	137,1	115,6	110,6	89,1	227,2	423,5	670,7	48,0	70,4
	K_i^e *[kN/mm]*	65,4								
	Odstupanje	2,10	1,77	1,69	1,36	3,47	6,48	10,26	0,73	1,08
O3_cpm	K_i^a *[kN/mm]*	47,4	26,0	54,0	32,6	53,0	101,9	455,0	22,2	64,4
	K_i^e *[kN/mm]*	78,5								
	Odstupanje	0,60	0,33	0,69	0,42	0,67	1,30	5,80	0,28	0,82
O4_bpm	K_i^a *[kN/mm]*	142,2	115,6	115,7	89,1	233,4	430,4	680,3	51,0	72,9
	K_i^e *[kN/mm]*	80,0								
	Odstupanje	1,78	1,45	1,45	1,11	2,92	5,38	8,50	0,64	0,91
O4_cpm	K_i^a *[kN/mm]*	52,5	26,0	59,1	32,6	59,2	103,8	462,0	23,4	77,2
	K_i^e *[kN/mm]*	90,6								
	Odstupanje	0,58	0,29	0,65	0,36	0,65	1,15	5,10	0,26	0,85

Tablica 7.20 *Usporedba analitički određene vrijednosti početne krutosti uzoraka u odnosu na srednju eksperimentalnu vrijednost*

		SS1		SS2		Holmes	Fiorato	Žarnić	Wei	Predloženi model
		u.v.	z.v.	u.v.	z.v.					
O1_bpm	K_i^a [kN/mm]	116,4	109,3	92,4	85,3	224,4	412,8	523,4	46,0	67,8
	K_i^e [kN/mm]	67,8								
	Odstupanje	1,72	1,61	1,36	1,26	3,31	6,09	7,72	0,68	1,00
O1_bpm*	K_i^a [kN/mm]	116,4	109,3	92,4	85,3	224,4	412,8	523,4	46,0	67,8
	K_i^e [kN/mm]	66,5								
	Odstupanje	1,75	1,64	1,39	1,28	3,37	6,21	7,87	0,69	1,02
O1_cpm	K_i^a [kN/mm]	32,8	25,7	30,4	23,3	47,9	104,3	300,3	18,7	55,3
	K_i^e [kN/mm]	59,7								
	Odstupanje	0,55	0,43	0,51	0,39	0,80	1,75	5,03	0,31	0,93
O1_bvm	K_i^a [kN/mm]	31,5	24,2	29,9	22,6	45,3	98,8	303,9	18,4	59,6
	K_i^e [kN/mm]	71,8								
	Odstupanje	0,43	0,34	0,42	0,31	0,63	1,38	4,23	0,26	0,83
O1_cvm	K_i^a [kN/mm]	33,0	25,7	30,7	23,3	34,8	104,5	307,6	19,0	32,1
	K_i^e [kN/mm]	34,1								
	Odstupanje	0,97	0,75	0,90	0,68	1,02	3,06	9,02	0,56	0,94
O2_cpm	K_i^a [kN/mm]	32,8	25,7	30,4	23,3	47,6	104,3	300,3	18,7	54,4
	K_i^e [kN/mm]	58,5								
	Odstupanje	0,56	0,44	0,52	0,40	0,81	1,78	5,13	0,32	0,93
O3_bpm	K_i^a [kN/mm]	137,1	115,6	110,6	89,1	227,2	423,5	670,7	48,0	70,4
	K_i^e [kN/mm]	77,4								
	Odstupanje	1,77	1,49	1,43	1,15	2,94	5,47	8,67	0,62	0,91
O3_cpm	K_i^a [kN/mm]	47,4	26,0	54,0	32,6	53,0	101,9	455,0	22,2	64,4
	K_i^e [kN/mm]	80,7								
	Odstupanje	0,59	0,32	0,67	0,40	0,66	1,26	5,64	0,28	0,80
O4_bpm	K_i^a [kN/mm]	142,2	115,6	115,7	89,1	233,4	430,4	680,3	51,0	72,9
	K_i^e [kN/mm]	87,8								
	Odstupanje	1,62	1,32	1,32	1,01	2,66	4,90	7,75	0,58	0,83
O4_cpm	K_i^a [kN/mm]	52,5	26,0	59,1	32,6	59,2	103,8	462,0	23,4	77,2
	K_i^e [kN/mm]	67,3								
	Odstupanje	0,78	0,39	0,88	0,48	0,88	1,54	6,86	0,35	1,15

7.6.2. Usporedba procjene horizontalne nosivosti sustava uokvireno zide pri pojavi prve značajne pukotine u ispunu

Usporedba eksperimentalno određene vrijednosti horizontalne nosivosti ispitnih uzoraka pri pojavi prve značajne pukotine u ispunu (V_{cr}^e), s rezultatima predloženog i postojećih analitičkih modela procjene (V_{cr}^a), prikazana je u Tablicama 7.21 i 7.22 u ovisnosti o smjeru opterećenja te Tablicom 7.23 u odnosu na srednju eksperimentalnu vrijednost. Koeficijent odstupanja određen je kao količnik dijeljenja analitičkih i eksperimentalnih rezultata.

Iz prikazanih rezultata vidljivo je da predloženi model u pravilu precijenjuje promatranu veličinu neovisno o smjeru opterećenja i vrsti ispuna. Vrijednosti koeficijenta odstupanja pri pozitivnom smjeru opterećenja nalaze se u intervalu od 0,7 do 1,32, a pri negativnom u intervalu od 0,72 do 1,79. U odnosu na srednju eksperimentalnu vrijednost, koeficijent odstupanja u intervalu je od 0,71 do 1,45. Iako najveća vrijednost koeficijenta odstupanja koja je dobivena kod uzorka *O4_cpm* postavlja pitanje opravdanosti primjene predloženog modela, u odnosu na srednje eksperimentalne vrijednosti kod natpolovične većine uzoraka, dobivena su odstupanja manja od ± 30% (kod 8 od 10 uzoraka) čime se može opravdati primjena predloženog modela u praksi.

U odnosu na srednju eksperimentalnu vrijednost, vidljivo je da postojeći modeli kod polovine uzoraka procjenjuju promatranu veličinu s manjim odstupanjem. Žarnićev, Floresov i Stavridisov model daju točniju procjenu kod uzoraka *O1_bpm* i *O1_bpm* dok Fioratov model daje točniju procjenu kod uzoraka *O1_bvm*, *O4_bpm* i *O4_cpm*. Međutim, niti jedan postojeći model ne daje procjenu sa zadovoljavajućim vrijednostima koeficijenta odstupanja kod većine uzoraka kao predloženi model. Iako bi se primjena Fioratovog modela mogla opravdana s obzirom na vrijednosti koeficijenata odstupanja (osim kod uzoraka *O1_bpm* i *O1_bpm**), potrebno je naglasiti da se navedeni i predloženi modeli konceptualno znatno razlikuju. Fioratov model procjene ne razlikuje pojedine mehanizme sloma sustava u ovisnosti o mehanizmima sloma gdje je odprinos ispuna horizontalnoj nosivosti sustava jednak u svim karakterističnim točkama odgovora sustava i određen pod pretpostavkom jednakog mehanizma sloma. Fioratov model daje bilinearan odnos sile i pomaka gdje je osnovna razlika kod procjene vrijednosti horizontalne nosivosti pri pojavi značajne pukotine i maksimalne horizontalne nosivosti sustava u dodavanju doprinosa okvira. Navedene pretpostavke modela nisu u skladu s vlastitim rezultatima ispitivanja i predstavljaju grubu aproksimaciju odgovora.

Tablica 7.21 *Usporedba analitički i eksperimentalno određene vrijednosti horizontalne nosivosti sustava pri pojavi prve značajne pukotine u ispunu za pozitivan smjer opterećenja*

		Žarnić	*Flores*	*Stavridis*	*Fiorato*	*Predloženi model*
O1_bpm	V_{cr}^a *[kN]*	88,6	94,6	108,6	210,1	133,6
	V_{cr}^e *[kN]*	101,5				
	Odstupanje	0,87	0,93	1,07	2,07	1,32
*O1_bpm**	V_{cr}^a *[kN]*	88,6	94,6	108,6	210,1	133,6
	V_{cr}^e *[kN]*	101,6				
	Odstupanje	0,87	0,93	1,07	2,07	1,31
O1_cpm	V_{cr}^a *[kN]*	79,8	64,1	66,8	152,8	126,7
	V_{cr}^e *[kN]*	139,7				
	Odstupanje	0,57	0,46	0,48	1,09	0,91
O1_bvm	V_{cr}^a *[kN]*	30,2	35,3	30,3	53,4	52,3
	V_{cr}^e *[kN]*	72,0				

	Odstupanje	0,42	0,49	0,42	0,74	0,73
O1_cvm	V_{cr}^a *[kN]*	46,6	28,0	35,8	89,5	83,1
	V_{cr}^e *[kN]*	79,1				
	Odstupanje	0,59	0,36	0,45	1,14	1,05
O2_cpm	V_{cr}^a *[kN]*	78,9	62,9	60,2	149,0	124,5
	V_{cr}^e *[kN]*	118,6				
	Odstupanje	0,67	0,53	0,51	1,26	1,05
O3_bpm	V_{cr}^a *[kN]*	91,9	106,7	115,0	226,3	167,4
	V_{cr}^e *[kN]*	152,1				
	Odstupanje	0,60	0,70	0,76	1,49	1,10
O3_cpm	V_{cr}^a *[kN]*	77,5	62,1	60,2	154,7	153,7
	V_{cr}^e *[kN]*	189,0				
	Odstupanje	0,41	0,33	0,32	0,82	0,81
O4_bpm	V_{cr}^a *[kN]*	87,5	95,7	107,2	209,7	167,1
	V_{cr}^e *[kN]*	239,0				
	Odstupanje	0,37	0,40	0,45	0,88	0,70
O4_cpm	V_{cr}^a *[kN]*	75,3	59,2	56,7	143,6	182,0
	V_{cr}^e *[kN]*	149,9				
	Odstupanje	0,50	0,39	0,38	0,96	1,21

Tablica 7.22 *Usporedba analitički i eksperimentalno određene vrijednosti horizontalne nosivosti sustava pri pojavi prve značajne pukotine u ispunu za negativan smjer opterećenja*

		Žarnić	*Flores*	*Stavridis*	*Fiorato*	*Predloženi model*
O1_bpm	V_{cr}^a *[kN]*	88,6	94,6	108,6	210,1	133,6
	V_{cr}^e *[kN]*	109,6				
	Odstupanje	0,81	0,86	0,99	1,92	1,22
*O1_bpm**	V_{cr}^a *[kN]*	88,6	94,6	108,6	210,1	133,6
	V_{cr}^e *[kN]*	92,0				
	Odstupanje	0,96	1,03	1,18	2,28	1,45
O1_cpm	V_{cr}^a *[kN]*	79,8	64,1	66,8	152,8	126,7
	V_{cr}^e *[kN]*	136,2				
	Odstupanje	0,59	0,47	0,49	1,12	0,93
O1_bvm	V_{cr}^a *[kN]*	30,2	35,3	30,3	53,4	52,3
	V_{cr}^e *[kN]*	72,2				
	Odstupanje	0,42	0,49	0,42	0,74	0,72
O1_cvm	V_{cr}^a *[kN]*	46,6	28,0	35,8	89,5	83,1
	V_{cr}^e *[kN]*	76,6				
	Odstupanje	0,61	0,37	0,47	1,17	1,08
O2_cpm	V_{cr}^a *[kN]*	78,9	62,9	60,2	149,0	124,5
	V_{cr}^e *[kN]*	120,1				
	Odstupanje	0,66	0,52	0,50	1,24	1,04
O3_bpm	V_{cr}^a *[kN]*	91,9	106,7	115,0	226,3	167,4
	V_{cr}^e *[kN]*	171,4				
	Odstupanje	0,54	0,62	0,67	1,32	0,98
O3_cpm	V_{cr}^a *[kN]*	77,5	62,1	60,2	154,7	153,7
	V_{cr}^e *[kN]*	200,2				

	Odstupanje	0,39	0,31	0,30	0,70	0,77
O4_bpm	V_{cr}^a *[kN]*	87,5	95,7	107,2	209,7	167,1
	V_{cr}^e *[kN]*	229,6				
	Odstupanje	0,38	0,42	0,47	0,91	0,73
O4_cpm	V_{cr}^a *[kN]*	75,3	59,2	56,7	143,6	182,0
	V_{cr}^e *[kN]*	101,4				
	Odstupanje	0,74	0,58	0,56	1,42	1,79

Tablica 7.23 *Usporedba analitički i eksperimentalno određene vrijednosti horizontalne nosivosti sustava pri pojavi prve značajne pukotine u ispunu u odnosu na srednju eksperimentalnu vrijednost*

		Žarnić	*Flores*	*Stavridis*	*Fiorato*	*Predloženi model*
O1_bpm	V_{cr}^a *[kN]*	88,6	94,6	108,6	210,1	133,6
	V_{cr}^e *[kN]*	105,5				
	Odstupanje	0,84	0,90	1,03	1,99	1,27
*O1_bpm**	V_{cr}^a *[kN]*	88,6	94,6	108,6	210,1	133,6
	V_{cr}^e *[kN]*	96,8				
	Odstupanje	0,92	0,98	1,12	2,17	1,38
O1_cpm	V_{cr}^a *[kN]*	79,8	64,1	66,8	152,8	126,7
	V_{cr}^e *[kN]*	137,9				
	Odstupanje	0,58	0,46	0,48	1,11	0,92
O1_bvm	V_{cr}^a *[kN]*	30,2	35,3	30,3	53,4	52,3
	V_{cr}^e *[kN]*	72,1				
	Odstupanje	0,42	0,49	0,42	0,74	0,72
O1_cvm	V_{cr}^a *[kN]*	46,6	28,0	35,8	89,5	83,1
	V_{cr}^e *[kN]*	77,8				
	Odstupanje	0,60	0,36	0,46	1,15	1,07
O2_cpm	V_{cr}^a *[kN]*	78,9	62,9	60,2	149,0	124,5
	V_{cr}^e *[kN]*	119,3				
	Odstupanje	0,66	0,53	0,50	1,25	1,04
O3_bpm	V_{cr}^a *[kN]*	91,9	106,7	115,0	226,3	167,4
	V_{cr}^e *[kN]*	161,7				
	Odstupanje	0,57	0,66	0,71	1,40	1,03
O3_cpm	V_{cr}^a *[kN]*	77,5	62,1	60,2	154,7	153,7
	V_{cr}^e *[kN]*	194,6				
	Odstupanje	0,40	0,32	0,31	0,79	0,79
O4_bpm	V_{cr}^a *[kN]*	87,5	95,7	107,2	209,7	167,1
	V_{cr}^e *[kN]*	234,2				
	Odstupanje	0,37	0,41	0,46	0,90	0,71
O4_cpm	V_{cr}^a *[kN]*	75,3	59,2	56,7	143,6	182,0
	V_{cr}^e *[kN]*	125,6				
	Odstupanje	0,60	0,47	0,45	1,14	1,45

7.6.3. Usporedba procjene relativnog međukatnog pomaka sustava uokvireno zide pri pojavi prve značajne pukotine u ispunu

Usporedba eksperimentalno određene vrijednosti relativnog međukatnog pomaka ispitnih uzoraka pri pojavi prve značajne pukotine u ispunu (δ_{cr}^{e}), s rezultatima predloženog i postojećih analitičkih modela procjene (δ_{cr}^{a}), prikazana je u Tablicama 7.24 i 7.25 u ovisnosti o smjeru opterećenja te Tablicom 7.26 u odnosu na srednju eksperimentalnu vrijednost. Koeficijent odstupanja određen je kao količnik dijeljenja analitičkih i eksperimentalnih rezultata.

Iz prikazanih rezultata vidljivo je da predloženi model pri pozitivnom smjeru opterećenja kod većine uzoraka precijenjuje, a pri negativnom podcjenjuje promatranu veličinu. Vrijednosti koeficijenta odstupanja pri pozitivnom smjeru opterećenja u intervalu su od 0,71 do 1,56, a pri negativnom u intervalu od 0,76 do 2,12. Gornje granice vrijednosti koeficijenta upućuju na značajna odstupanja predloženog modela, međutim, prilikom usporedbe sa srednjim eksperimentalnim vrijednostima, dobivene su znatno manje vrijednosti koeficijenta odstupanja u intervalu od 0,84 do 1,27. Drugim riječima, predloženi model podcjenjuje promatranu veličinu s maksimalnim odstupanjem u iznosu od 16% i precijenjuje s maksimalnim odstupanjem u iznosu od 27%.

U odnosu na predloženi model i srednje eksperimentalne vrijednosti, vidljivo je da postojeći modeli kod svih ispitnih uzoraka daju procjenu promatrane veličine s većim vrijednostima koeficijenta odstupanja. S obzirom na navedeno, može se zaključiti da predloženi model sa zadovoljavajućom točnošću procijenjuje promatranu veličinu te da je kao takav primjenjiv u inženjerskoj praksi.

Tablica 7.24 *Usporedba analitički i eksperimentalno određene vrijednosti relativnog međukatnog pomaka okvira s ispunom pri pojavi prve značajne pukotine u ispunu za pozitivan smjer opterećenja*

		Žarnić	*Flores*	*Stavridis*	*Fiorato*	*Predloženi model*
O1_bpm	δ_{cr}^{a} *[kN]*	0,01	0,02	0,02	0,04	0,14
	δ_{cr}^{e} *[kN]*	0,09				
	Odstupanje	0,11	0,22	0,22	0,44	1,56
*O1_bpm**	δ_{cr}^{a} *[kN]*	0,01	0,02	0,02	0,04	0,14
	δ_{cr}^{e} *[kN]*	0,09				
	Odstupanje	0,11	0,22	0,22	0,44	1,56
O1_cpm	δ_{cr}^{a} *[kN]*	0,02	0,04	0,04	0,10	0,16
	δ_{cr}^{e} *[kN]*	0,16				
	Odstupanje	0,12	0,25	0,25	0,62	1,00
O1_bvm	δ_{cr}^{a} *[kN]*	0,007	0,02	0,02	0,04	0,06
	δ_{cr}^{e} *[kN]*	0,08				
	Odstupanje	0,09	0,25	0,25	0,5	0,75
O1_cvm	δ_{cr}^{a} *[kN]*	0,01	0,02	0,02	0,06	0,18
	δ_{cr}^{e} *[kN]*	0,16				
	Odstupanje	0,06	0,12	0,12	0,37	1,12

O2_cpm	δ_{cr}^{a} *[kN]*	0,02	0,04	0,04	0,10	0,16
	δ_{cr}^{e} *[kN]*	0,15				
	Odstupanje	0,13	0,27	0,27	0,67	1,07
O3_bpm	δ_{cr}^{a} *[kN]*	0,01	0,02	0,02	0,04	0,17
	δ_{cr}^{e} *[kN]*	0,12				
	Odstupanje	0,08	0,17	0,17	0,33	1,42
O3_cpm	δ_{cr}^{a} *[kN]*	0,01	0,04	0,04	0,11	0,17
	δ_{cr}^{e} *[kN]*	0,16				
	Odstupanje	0,06	0,25	0,25	0,69	1,06
O4_bpm	δ_{cr}^{a} *[kN]*	0,01	0,01	0,02	0,03	0,16
	δ_{cr}^{e} *[kN]*	0,18				
	Odstupanje	0,05	0,05	0,11	0,17	0,89
O4_cpm	δ_{cr}^{a} *[kN]*	0,01	0,04	0,04	0,10	0,17
	δ_{cr}^{e} *[kN]*	0,24				
	Odstupanje	0,04	0,17	0,17	0,42	0,71

Tablica 7.25 *Usporedba analitički i eksperimentalno određene vrijednosti relativnog međukatnog pomaka okvira s ispunom pri pojavi prve značajne pukotine u ispunu za negativan smjer opterećenja*

		Žarnić	*Flores*	*Stavridis*	*Fiorato*	*Predloženi model*
O1_bpm	δ_{cr}^{a} *[kN]*	0,01	0,02	0,02	0,04	0,14
	δ_{cr}^{e} *[kN]*	0,14				
	Odstupanje	0,07	0,14	0,14	0,29	1,00
*O1_bpm**	δ_{cr}^{a} *[kN]*	0,01	0,02	0,02	0,04	0,14
	δ_{cr}^{e} *[kN]*	0,13				
	Odstupanje	0,08	0,15	0,15	0,31	1,08
O1_cpm	δ_{cr}^{a} *[kN]*	0,02	0,04	0,04	0,10	0,16
	δ_{cr}^{e} *[kN]*	0,17				
	Odstupanje	0,12	0,23	0,23	0,59	0,94
O1_bvm	δ_{cr}^{a} *[kN]*	0,07	0,02	0,02	0,04	0,06
	δ_{cr}^{e} *[kN]*	0,07				
	Odstupanje	0,1	0,28	0,28	0,57	0,86
O1_cvm	δ_{cr}^{a} *[kN]*	0,01	0,02	0,02	0,06	0,18
	δ_{cr}^{e} *[kN]*	0,16				
	Odstupanje	0,06	0,12	0,12	0,37	1,12
O2_cpm	δ_{cr}^{a} *[kN]*	0,02	0,04	0,04	0,10	0,16
	δ_{cr}^{e} *[kN]*	0,15				
	Odstupanje	0,13	0,27	0,27	0,67	1,07
O3_bpm	δ_{cr}^{a} *[kN]*	0,01	0,02	0,02	0,04	0,17
	δ_{cr}^{e} *[kN]*	0,19				
	Odstupanje	0,05	0,10	0,10	0,21	0,89
O3_cpm	δ_{cr}^{a}	0,01	0,04	0,04	0,11	0,17
	δ_{cr}^{e}	0,18				
	Odstupanje	0,05	0,22	0,22	0,61	0,94
O4_bpm	δ_{cr}^{a} *[kN]*	0,01	0,01	0,02	0,03	0,16
	δ_{cr}^{e} *[kN]*	0,21				
	Odstupanje	0,05	0,05	0,09	0,14	0,76

O4_cpm	δ_{cr}^{a} *[kN]*	0,01	0,04	0,04	0,10	0,17
	δ_{cr}^{e} *[kN]*	0,08				
	Odstupanje	0,12	0,50	0,50	1,25	2,12

Tablica 7.26 *Usporedba analitički i eksperimentalno određene vrijednosti relativnog međukatnog pomaka okvira s ispunom pri pojavi prve značajne pukotine u ispunu u odnosu na srednju eksperimentalnu vrijednost*

		Žarnić	*Flores*	*Stavridis*	*Fiorato*	*Predloženi model*
O1_bpm	δ_{cr}^{a} *[kN]*	0,01	0,02	0,02	0,04	0,14
	δ_{cr}^{e} *[kN]*	0,11				
	Odstupanje	0,09	0,18	0,18	0,36	1,27
*O1_bpm**	δ_{cr}^{a} *[kN]*	0,01	0,02	0,02	0,04	0,14
	δ_{cr}^{e} *[kN]*	0,11				
	Odstupanje	0,09	0,18	0,18	0,36	1,27
O1_cpm	δ_{cr}^{a} *[kN]*	0,02	0,04	0,04	0,10	0,16
	δ_{cr}^{e} *[kN]*	0,17				
	Odstupanje	0,12	0,23	0,23	0,59	0,94
O1_bvm	δ_{cr}^{a} *[kN]*	0,007	0,02	0,02	0,04	0,06
	δ_{cr}^{e} *[kN]*	0,07				
	Odstupanje	0,1	0,28	0,28	0,57	0,86
O1_cvm	δ_{cr}^{a} *[kN]*	0,01	0,02	0,02	0,06	0,18
	δ_{cr}^{e} *[kN]*	0,16				
	Odstupanje	0,06	0,12	0,12	0,37	1,12
O2_cpm	δ_{cr}^{a} *[kN]*	0,02	0,04	0,04	0,10	0,16
	δ_{cr}^{e} *[kN]*	0,15				
	Odstupanje	0,13	0,27	0,27	0,67	1,07
O3_bpm	δ_{cr}^{a} *[kN]*	0,01	0,02	0,02	0,04	0,17
	δ_{cr}^{e} *[kN]*	0,15				
	Odstupanje	0,07	0,13	0,13	0,27	1,13
O3_cpm	δ_{cr}^{a} *[kN]*	0,01	0,04	0,04	0,11	0,17
	δ_{cr}^{e} *[kN]*	0,17				
	Odstupanje	0,06	0,23	0,23	0,65	1,00
O4_bpm	δ_{cr}^{a} *[kN]*	0,01	0,01	0,02	0,03	0,16
	δ_{cr}^{e} *[kN]*	0,19				
	Odstupanje	0,05	0,05	0,10	0,16	0,84
O4_cpm	δ_{cr}^{a} *[kN]*	0,01	0,04	0,04	0,10	0,17
	δ_{cr}^{e} *[kN]*	0,16				
	Odstupanje	0,06	0,25	0,25	0,62	1,06

7.6.4. Usporedba procjene horizontalne nosivosti sustava uokvireno zide pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna

Usporedba eksperimentalno određene vrijednosti horizontalne nosivosti ispitnih uzoraka pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna (V_{max}^{e}), s rezultatima predloženog i postojećih analitičkih modela procjene (V_{max}^{a}), prikazana je u Tablicama 7.27 i 7.28 u ovisnosti o smjeru opterećenja te Tablicom 7.29 u odnosu na srednju eksperimentalnu vrijednost. Koeficijent odstupanja određen je kao količnik dijeljenja analitičkih i eksperimentalnih rezultata.

Iz prikazane usporedbe rezultata vidljivo je da predloženi model u pravilu precijenjuje promatranu veličinu neovisno o smjeru opterećenja. Pri pozitivnom smjeru opterećenja vrijednosti koeficijenta odstupanja u intervalu su od 0,74 do 1,26, a pri negativnom u intervalu od 0,74 do 1,26. Iako su intervali vrijednosti koeficijenta odstupanja pri pozitivnom i negativnom smjeru opterećenja jednaki, kod negativnog smjera uočena su nešto veća odstupanja. U odnosu na srednju eksperimentalnu vrijednost, koeficijent odstupanja također je u intervalu od 0,74 do 1,26. Donja granica odstupanja dobivena je kod uzorka *O3_cpm*, a gornja kod uzorka *O3_bpm*. Kod svih ostalih uzoraka odstupanje procjene od eksperimentalnih rezultata manje je od ± 20%.

Osim procjene horizontalne nosivosti sustava, predloženim modelom moguće je odrediti i pri kojem graničnom stanju dolazi do pojave dominantnog mehanizma sloma ispuna. S obzirom da su predloženim modelom dani izrazi koji procijenjuju horizontalnu nosivost i pripadne pomake pri pojedinim graničnim stanjima, jednostavnom usporedbom krutosti sustava u pojedinim područjima odgovora omogućena je procjena pojave dominantnog mehanizma sloma ispuna. Navedena mogućnost predloženog modela vidljiva je kod uzorka *O1_bpm* gdje je uočena pojava graničnog stanja pojave prve značajne pukotine i dominantnog mehanizma sloma ispuna u istom trenutku. Naime, procijenjene vrijednosti horizontalne nosivosti i pripadnog pomaka upućuju na pojavu očvršćavanja nakon graničnog stanja pojave prve značajne pukotine što nije u skladu s vlastitim i u literaturi dostupnim rezultatima ispitivanja. Prikazane vrijednosti u zagradama predstavljaju procjenu horizontalne nosivosti i vrijednost koeficijenta odstupanja pri graničnom stanju pojave prve značajne pukotine u ispunu.

U odnosu na predloženi model i srednju eksperimentalnu vrijednost, postojeći modeli samo u slučaju jednog uzorka procijenjuju promatranu veličinu s manjim odstupanjem. Manje odstupanje odnosi se na Stavridisov model i ispitni uzorak *O1_bpm** i to samo za pozitivni smjer opterećenja. Iz navedenog vidljivo je da predloženi model bolje procijenjuje horizontalnu nosivost sustava pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna od postojećih te da je s obzirom na relativno male vrijednosti odstupanja primijenjiv u praksi.

Tablica 7.27 *Usporedba analitički i eksperimentalno određene vrijednosti horizontalne nosivosti okvira s ispunom pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna za pozitivan smjer opterećenja*

		Žarnić	Flores	Stavridis	Mehrabi	Predloženi model
O1_bpm	V_{max}^a [kN]	112,2	118,2	162,9	184,7	158,3
	V_{max}^e [kN]	160,0				
	Odstupanje	0,70	0,78	1,02	1,15	0,99
O1_bpm*	V_{max}^a [kN]	112,2	118,2	162,9	184,7	158,3
	V_{max}^e [kN]	170,6				
	Odstupanje	0,66	0,69	0,95	1,08	0,93
O1_cpm	V_{max}^a [kN]	94,8	80,2	92,7	33,2	157,6
	V_{max}^e [kN]	187,2				
	Odstupanje	0,51	0,43	0,50	0,18	0,84
O1_bvm	V_{max}^a [kN]	53,1	44,1	45,5	47,2	74,0
	V_{max}^e [kN]	78,7				
	Odstupanje	0,67	0,56	0,58	0,60	0,94
O1_cvm	V_{max}^a [kN]	66,1	35,0	53,7	48,4	104,2 (83,1)
	V_{max}^e [kN]	79,1				
	Odstupanje	0,83	0,44	0,68	0,61	1,32 (1,05)
O2_cpm	V_{max}^a [kN]	96,4	78,6	90,4	43,1	152,9
	V_{max}^e [kN]	149,6				
	Odstupanje	0,64	0,53	0,60	0,29	1,02
O3_bpm	V_{max}^a [kN]	133,1	133,4	172,5	77,0	276,1
	V_{max}^e [kN]	219,8				
	Odstupanje	0,61	0,61	0,79	0,35	1,26
O3_cpm	V_{max}^a [kN]	119,3	77,6	90,4	72,4	206,5
	V_{max}^e [kN]	280,2				
	Odstupanje	0,43	0,28	0,32	0,26	0,74
O4_bpm	V_{max}^a [kN]	137,2	119,6	160,8	97,9	264,2
	V_{max}^e [kN]	258,5				
	Odstupanje	0,53	0,46	0,62	0,38	1,02
O4_cpm	V_{max}^a [kN]	125,0	74,0	85,0	104,0	203,4
	V_{max}^e [kN]	179,9				
	Odstupanje	0,69	0,41	0,47	0,58	1,13

Tablica 7.28 *Usporedba analitički i eksperimentalno određene vrijednosti horizontalne nosivosti okvira s ispunom pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna za negativan smjer opterećenja*

		Žarnić	Flores	Stavridis	Mehrabi	Predloženi model
O1_bpm	V_{max}^a [kN]	112,2	118,2	162,9	184,7	158,3
	V_{max}^e [kN]	149,8				
	Odstupanje	0,75	0,79	1,09	1,23	1,06
O1_bpm*	V_{max}^a [kN]	112,2	118,2	162,9	184,7	158,3
	V_{max}^e [kN]	141,5				
	Odstupanje	0,79	0,84	1,15	1,31	1,12
O1_cpm	V_{max}^a [kN]	94,8	80,2	92,7	33,2	157,6
	V_{max}^e [kN]	155,5				

	Odstupanje	0,61	0,52	0,60	0,21	1,01
O1_bvm	V_{max}^{a} *[kN]*	53,1	44,1	45,5	47,2	74,0
	V_{max}^{e} *[kN]*	78,8				
	Odstupanje	0,67	0,56	0,58	0,60	0,94
O1_cvm	V_{max}^{a} *[kN]*	66,1	35,0	53,7	48,4	104,2 (83,1)
	V_{max}^{e} *[kN]*	76,6				
	Odstupanje	0,86	0,46	0,70	0,63	1,36 (1,08)
O2_cpm	V_{max}^{a} *[kN]*	96,4	78,6	90,4	43,1	152,9
	V_{max}^{e} *[kN]*	138,6				
	Odstupanje	0,70	0,57	0,65	0,31	1,10
O3_bpm	V_{max}^{a} *[kN]*	133,1	133,4	172,5	77,0	276,1
	V_{max}^{e} *[kN]*	219,8				
	Odstupanje	0,61	0,61	0,78	0,35	1,26
O3_cpm	V_{max}^{a} *[kN]*	119,3	77,6	90,4	72,4	206,5
	V_{max}^{e} *[kN]*	279,9				
	Odstupanje	0,43	0,28	0,32	0,26	0,74
O4_bpm	V_{max}^{a} *[kN]*	137,2	119,6	160,8	97,9	264,2
	V_{max}^{e} *[kN]*	259,6				
	Odstupanje	0,53	0,46	0,62	0,38	1,02
O4_cpm	V_{max}^{a} *[kN]*	125,0	74,0	85,0	104,0	203,4
	V_{max}^{e} *[kN]*	169,6				
	Odstupanje	0,74	0,44	0,50	0,61	1,20

Tablica 7.29 *Usporedba analitički i eksperimentalno određene vrijednosti horizontalne nosivosti okvira s ispunom pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna u odnosu na srednju eksperimentalnu vrijednost*

		Žarnić	*Flores*	*Stavridis*	*Mehrabi*	*Predloženi model*
O1_bpm	V_{max}^{a} *[kN]*	112,2	118,2	162,9	184,7	158,3
	V_{max}^{e} *[kN]*	154,9				
	Odstupanje	0,72	0,76	1,05	1,19	1,02
*O1_bpm**	V_{max}^{a} *[kN]*	112,2	118,2	162,9	184,7	158,3
	V_{max}^{e} *[kN]*	156,1				
	Odstupanje	0,72	0,76	1,04	1,18	1,01
O1_cpm	V_{max}^{a} *[kN]*	94,8	80,2	92,7	33,2	157,6
	V_{max}^{e} *[kN]*	171,3				
	Odstupanje	0,55	0,47	0,54	0,19	0,92
O1_bvm	V_{max}^{a} *[kN]*	53,1	44,1	45,5	47,2	74,0
	V_{max}^{e} *[kN]*	78,8				
	Odstupanje	0,67	0,56	0,58	0,60	0,94
O1_cvm	V_{max}^{a} *[kN]*	66,1	35,0	53,7	48,4	104,2 (83,1)
	V_{max}^{e} *[kN]*	77,8				
	Odstupanje	0,85	0,45	0,69	0,62	1,34 (1,07)
O2_cpm	V_{max}^{a} *[kN]*	96,4	78,6	90,4	43,1	152,9
	V_{max}^{e} *[kN]*	144,1				
	Odstupanje	0,67	0,55	0,63	0,30	1,06
O3_bpm	V_{max}^{a} *[kN]*	133,1	133,4	172,5	77,0	276,1
	V_{max}^{e} *[kN]*	219,5				

	Odstupanje	0,61	0,61	0,79	0,35	1,26
O3_cpm	V_{max}^{a} *[kN]*	111,6	77,6	90,4	72,4	206,5
	V_{max}^{e} *[kN]*	280,0				
	Odstupanje	0,43	0,28	0,32	0,26	0,74
O4_bpm	V_{max}^{a} *[kN]*	137,2	119,6	160,8	97,9	264,2
	V_{max}^{e} *[kN]*	259,0				
	Odstupanje	0,53	0,46	0,62	0,38	1,02
O4_cpm	V_{max}^{a} *[kN]*	125,0	74,0	85,0	104,0	203,4
	V_{max}^{e} *[kN]*	174,7				
	Odstupanje	0,72	0,42	0,49	0,60	1,16

7.6.5. Usporedba procjene relativnog međukatnog pomaka sustava uokvireno zide pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna

Usporedba eksperimentalno određene vrijednosti relativnog međukatnog pomaka ispitnih uzoraka pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna (δ_{max}^{e}), s rezultatima predloženog i postojećih analitičkih modela procjene (δ_{max}^{a}), prikazana je Tablicama 7.30 i 7.31 u ovisnosti o smjeru opterećenja te Tablicom 7.32 u odnosu na srednju eksperimentalnu vrijednost. Koeficijent odstupanja određen je kao količnik dijeljenja analitičkih i eksperimentalnih rezultata.

Iz prikazane usporedbe rezultata vidljivo je da predloženi model u pravilu podcjenjuje promatranu veličinu neovisno o smjeru opterećenja. Vrijednosti koeficijenata odstupanja prihvatljivih su iznosa kod svih uzoraka osim kod *O1_bvm* gdje je u odnosu na srednju eksperimentalnu vrijednost dobiveno udstupanje u iznosu od 67%. S obzirom na to da je u slučaju ispitnog uzorka *O1_cvm* istovremeno nastupila pojava graničnog stanja pojave prve značajne pukotine i pojave dominantnog mehanizma sloma ispuna, u danim je tablicama u zagradama naznačena vrijednost relativnog međukatnog pomaka i koeficijenta odstupanja pri graničnom stanju pojave prve značajne pukotine. Kod svih ostalih uzoraka vrijednost koeficijenta odstupanja u intervalu je od 0,83 do 1,31.

U odnosu na predloženi, postojeći modeli procijenjuju promatranu veličinu s većom točnošću samo kod triju ispitnih uzoraka, međutim s neznatno manjim odstupanjem. Floresov model relativno dobro predviđa promatranu veličinu kod uzoraka kod kojih je ispuna izvedena od šupljih, a Stavridisov kod uzoraka kod kojih je ispuna izvedena od punih glinenih zidnih elemenata. Sorićev model jedino u slučaju ispitnog uzorka *O1_bvm* daje zadovoljavajući rezultat i to samo pri pozitivnom smjeru opterećenja. S obzirom na dosljednost, a neovisno o tipu ispune, može se zaključiti da predloženi model točnije procijenjuje promatranu veličinu od postojećih.

Tablica 7.30 *Usporedba analitički i eksperimentalno određene vrijednosti relativnog međukatnog pomaka okvira s ispunom pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna za pozitivan smjer opterećenja*

		Sorić	Flores	Stavridis	Predloženi model
O1_bpm	δ_{Vmax}^{a} [%]	0,02	0,3	0,52	0,24
	δ_{Vmax}^{e} [%]	0,27			
	Odstupanje	0,07	1,11	1,93	0,89
O1_bpm*	δ_{Vmax}^{a} [%]	0,02	0,3	0,52	0,24
	δ_{Vmax}^{e} [%]	0,27			
	Odstupanje	0,07	1,11	1,93	0,89
O1_cpm	δ_{Vmax}^{a} [%]	0,09	0,3	0,52	0,39
	δ_{Vmax}^{e} [%]	0,39			
	Odstupanje	0,23	0,77	1,33	1,00
O1_bvm	δ_{Vmax}^{a} [%]	0,05	0,3	0,52	0,25
	δ_{Vmax}^{e} [%]	0,08			
	Odstupanje	0,63	3,75	6,50	3,12
O1_cvm	δ_{Vmax}^{a} [%]	0,06	0,3	0,52	0,21 (0,18)
	δ_{Vmax}^{e} [%]	0,16			
	Odstupanje	0,35	1,76	3,06	1,31 (1,12)
O2_cpm	δ_{Vmax}^{a} [%]	0,09	0,3	0,52	0,39
	δ_{Vmax}^{e} [%]	0,39			
	Odstupanje	0,23	0,77	1,33	1,00
O3_bpm	δ_{Vmax}^{a} [%]	0,03	0,3	0,52	0,29
	δ_{Vmax}^{e} [%]	0,27			
	Odstupanje	0,11	1,11	1,93	1,07
O3_cpm	δ_{Vmax}^{a} [%]	0,12	0,3	0,52	0,57
	δ_{Vmax}^{e} [%]	0,56			
	Odstupanje	0,21	0,54	0,93	1,02
O4_bpm	δ_{Vmax}^{a} [%]	0,03	0,3	0,52	0,28
	δ_{Vmax}^{e} [%]	0,28			
	Odstupanje	0,11	1,07	1,86	1,00
O4_cpm	δ_{Vmax}^{a} [%]	0,13	0,3	0,52	0,52
	δ_{Vmax}^{e} [%]	0,5			
	Odstupanje	0,26	0,60	1,04	1,04

Tablica 7.31 *Usporedba analitički i eksperimentalno određene vrijednosti relativnog međukatnog pomaka okvira s ispunom pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna za negativan smjer opterećenja*

		Sorić	Flores	Stavridis	Predloženi model
O1_bpm	δ_{Vmax}^{a} [%]	0,02	0,3	0,52	0,24
	δ_{Vmax}^{e} [%]	0,27			
	Odstupanje	0,07	1,11	1,93	0,89
O1_bpm*	δ_{Vmax}^{a} [%]	0,02	0,3	0,52	0,24
	δ_{Vmax}^{e} [%]	0,31			
	Odstupanje	0,06	0,97	1,68	0,77
O1_cpm	δ_{Vmax}^{a} [%]	0,09	0,3	0,52	0,39
	δ_{Vmax}^{e} [%]	0,41			
	Odstupanje	0,22	0,73	1,27	0,95
O1_bvm	δ_{Vmax}^{a} [%]	0,05	0,3	0,52	0,25

	δ_{Vmax}^{e} [%]	0,22			
	Odstupanje	0,23	1,36	2,36	1,14
O1_cvm	δ_{Vmax}^{a} [%]	0,06	0,3	0,52	0,21 (0,18)
	δ_{Vmax}^{e} [%]	0,16			
	Odstupanje	0,38	1,88	3,25	1,31 (1,12)
O2_cpm	δ_{Vmax}^{a} [%]	0,09	0,3	0,52	0,39
	δ_{Vmax}^{e} [%]	0,53			
	Odstupanje	0,17	0,57	0,98	0,73
O3_bpm	δ_{Vmax}^{a} [%]	0,03	0,3	0,52	0,29
	δ_{Vmax}^{e} [%]	0,36			
	Odstupanje	0,08	0,83	1,44	0,80
O3_cpm	δ_{Vmax}^{a} [%]	0,12	0,3	0,52	0,57
	δ_{Vmax}^{e} [%]	0,56			
	Odstupanje	0,21	0,54	0,93	1,02
O4_bpm	δ_{Vmax}^{a} [%]	0,03	0,3	0,52	0,28
	δ_{Vmax}^{e} [%]	0,29			
	Odstupanje	0,10	1,03	1,79	0,96
O4_cpm	δ_{Vmax}^{a} [%]	0,13	0,3	0,52	0,52
	δ_{Vmax}^{e} [%]	0,43			
	Odstupanje	0,30	0,70	1,21	1,21

Tablica 7.32 *Usporedba analitički i eksperimentalno određene vrijednosti relativnog međukatnog pomaka okvira s ispunom pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispune u odnosu na srednju eksperimentalnu vrijednost*

		Sorić	Flores	Stavridis	Predloženi model
O1_bpm	δ_{Vmax}^{a} [%]	0,02	0,3	0,52	0,24
	δ_{Vmax}^{e} [%]	0,27			
	Odstupanje	0,07	1,11	1,93	0,89
O1_bpm*	δ_{Vmax}^{a} [%]	0,02	0,3	0,52	0,24
	δ_{Vmax}^{e} [%]	0,29			
	Odstupanje	0,07	1,03	1,79	0,83
O1_cpm	δ_{Vmax}^{a} [%]	0,09	0,3	0,52	0,39
	δ_{Vmax}^{e} [%]	0,40			
	Odstupanje	0,23	0,75	1,30	0,97
O1_bvm	δ_{Vmax}^{a} [%]	0,05	0,3	0,52	0,25
	δ_{Vmax}^{e} [%]	0,15			
	Odstupanje	0,33	2,00	3,46	1,67
O1_cvm	δ_{Vmax}^{a} [%]	0,06	0,3	0,52	0,21 (0,18)
	δ_{Vmax}^{e} [%]	0,16			
	Odstupanje	0,38	1,88	3,25	1,31 (1,12)
O2_cpm	δ_{Vmax}^{a} [%]	0,09	0,3	0,52	0,39
	δ_{Vmax}^{e} [%]	0,46			
	Odstupanje	0,19	0,65	1,13	0,85
O3_bpm	δ_{Vmax}^{a} [%]	0,03	0,3	0,52	0,29
	δ_{Vmax}^{e} [%]	0,31			
	Odstupanje	0,10	0,97	1,68	0,93
O3_cpm	δ_{Vmax}^{a} [%]	0,12	0,3	0,52	0,57
	δ_{Vmax}^{e} [%]	0,56			

	Odstupanje	0,21	0,54	0,93	1,02
O4_bpm	$\delta_{Vmax}{}^{a}$ *[%]*	0,03	0,3	0,52	0,28
	$\delta_{Vmax}{}^{e}$ *[%]*	0,28			
	Odstupanje	0,11	1,07	1,86	1,00
O4_cpm	$\delta_{Vmax}{}^{a}$ *[%]*	0,13	0,3	0,52	0,52
	$\delta_{Vmax}{}^{e}$ *[%]*	0,46			
	Odstupanje	0,28	0,65	1,13	1,13

7.6.6. Usporedba procjene horizontalne nosivosti sustava uokvireno zide pri granicnom stanju pred rušenje

Usporedba eksperimentalno određene vrijednosti horizontalne nosivosti ispitnih uzoraka pri graničnom stanju pred rušenje ($V_{col}{}^{e}$), s rezultatima predloženog i postojećih analitičkih modela procjene ($V_{col}{}^{a}$), prikazana je u Tablicama 7.33 i 7.34 u ovisnosti o smjeru opterećenja te Tablicom 7.35 u odnosu na srednju eksperimentalnu vrijednost. Koeficijent odstupanja određen je kao količnik dijeljanja analitičkih i eksperimantalnih rezultata.

Iz prikazane usporedbe vidljivo je da postojeći modeli daju točniju procjenu promatrane veličine kod natpolovične većine uzoraka neovisno o smjeru opterećenja. Međutim, ne može se izdvojiti niti jedan model koji za većinu uzoraka daje vrijednosti koeficijenta odstupanja zadovoljavajućih iznosa. Osim toga, Flores definira promatranu veličinu u odnosu na horizontalnu nosivost sustava pri pojavi prve značajne pukotine u ispunu dok Stavridis pretpostavlja da sva vertikalna opterećenja preuzima ispun uslijed posmičnog sloma stupa okvira. Iz usporedbe prikazane u *Potpoglavlju 7.6.2.* vidljivo je da predloženi model točnije procijenjuje horizontalnu nosivost pri pojavi prve značajne pukotine u ispunu od Floresovog modela čime je upitna primjena potonjeg pri procjeni rezidualne nosivosti sustava. S druge strane, Stavridisova pretpostavka implicira da ispun pri rezidualnoj nosivosti sustava ima dostatnu kompaktnost, tj. oštećenje koje osigurava prijenos horizontalnih sila te da je jedini element sustava koji osigurava rezidualnu nosivost. Navedene pretpostavke Stavridisovog modela nisu u skladu s rezultatima vlastitih ispitivanja posebno kod uzoraka kod kojih je ispun izveden od šupljih zidnih elemenata. S obzirom da je jedino ispitivanje uzorka *O2_cpm* nastavljeno i nakon gubitka nosivosti jednog od stupova okvira, čime je omogućen realniji uvid u rezidualnu nosivost te u odnosu na odstupanje u iznosu od 27%, čini se prikladnim primijeniti predloženi model prilikom procjene promatrane veličine.

Tablica 7.33 *Usporedba analitički i eksperimentalno određene vrijednosti horizontalne nosivosti okvira s ispunom pri graničnom stanju pred rušenje za pozitivan smjer opterećenja*

		Zarnić	Flores	Stavridis	Predloženi model
O1_bpm	V_{col}^a [kN]	112,2	105,9	117,5	39,3
	V_{col}^e [kN]	116,2			
	Odstupanje	0,97	0,91	1,01	0,34
O1_bpm*	V_{col}^a [kN]	112,2	105,9	117,5	43,2
	V_{col}^e [kN]	94,2			
	Odstupanje	1,19	1,12	1,25	0,46
O1_cpm	V_{col}^a [kN]	94,8	71,8	199,1	141,5
	V_{col}^e [kN]	-			
	Odstupanje	-	-	-	-
O1_bvm	V_{col}^a [kN]	53,1	39,5	74,2	42,2
	V_{col}^e [kN]	39,7			
	Odstupanje	1,34	0,99	1,87	1,06
O1_cvm	V_{col}^a [kN]	69,5	31,4	202,7	124,0
	V_{col}^e [kN]	81,2			
	Odstupanje	0,85	0,39	2,50	1,53
O2_cpm	V_{col}^a [kN]	96,4	70,4	192,1	111,6
	V_{col}^e [kN]	-			
	Odstupanje	-	-	-	-
O3_bpm	V_{col}^a [kN]	133,1	119,5	183,2	92,1
	V_{col}^e [kN]	191,1			
	Odstupanje	0,70	0,62	0,96	0,48
O3_cpm	V_{col}^a [kN]	119,3	69,5	284,8	221,7
	V_{col}^e [kN]	-			
	Odstupanje	-	-	-	-
O4_bpm	V_{col}^a [kN]	137,2	107,2	159,1	105,2
	V_{col}^e [kN]	184,7			
	Odstupanje	0,74	0,58	0,86	0,57
O4_cpm	V_{col}^a [kN]	125,0	66,3	284,8	221,0
	V_{col}^e [kN]	210,1			
	Odstupanje	0,59	0,31	1,35	1,05

Tablica 7.34 *Usporedba analitički i eksperimentalno određene vrijednosti horizontalne nosivosti okvira s ispunom pri graničnom stanju pred rušenje za negativan smjer opterećenja*

		Zarnić	Flores	Stavridis	Predloženi model
O1_bpm	V_{col}^a [kN]	112,2	105,9	117,5	39,3
	V_{col}^e [kN]	86,8			
	Odstupanje	1,29	1,22	1,35	0,45
O1_bpm*	V_{col}^a [kN]	112,2	105,9	117,5	43,2
	V_{col}^e [kN]	76,1			
	Odstupanje	1,47	1,39	1,54	0,57
O1_cpm	V_{col}^a [kN]	94,8	71,8	199,1	141,5
	V_{col}^e [kN]	162,2			
	Odstupanje	0,58	0,44	1,23	0,87
O1_bvm	V_{col}^a [kN]	53,1	39,5	74,2	42,2

	V_{col}^e [kN]	48,5			
	Odstupanje	1,09	0,81	1,53	0,87
O1_cvm	V_{col}^a [kN]	69,5	31,4	202,7	124,0
	V_{col}^e [kN]	-			
	Odstupanje	-	-	-	-
O2_cpm	V_{col}^a [kN]	96,4	70,4	192,1	111,6
	V_{col}^e [kN]	152,7			
	Odstupanje	0,63	0,46	1,26	0,73
O3_bpm	V_{col}^a [kN]	133,1	119,5	183,2	92,1
	V_{col}^e [kN]	174,0			
	Odstupanje	0,76	0,68	1,05	0,53
O3_cpm	V_{col}^a [kN]	119,3	69,5	284,8	221,7
	V_{col}^e [kN]	296,1			
	Odstupanje	0,40	0,23	0,96	0,75
O4_bpm	V_{col}^a [kN]	137,2	107,2	159,1	105,2
	V_{col}^e [kN]	172,0			
	Odstupanje	0,80	0,62	0,93	0,61
O4_cpm	V_{col}^a [kN]	125,0	66,3	284,8	221,0
	V_{col}^e [kN]	206,4			
	Odstupanje	0,60	0,32	1,38	1,07

Tablica 7.35 *Usporedba analitički i eksperimentalno određene vrijednosti horizontalne nosivosti okvira s ispunom pri graničnom stanju pred rušenje u odnosu na srednju eksperimentalnu vrijednost*

		Zarnić	Flores	Stavridis	Predloženi model
O1_bpm	V_{col}^a [kN]	112,2	105,9	117,5	39,3
	V_{col}^e [kN]	101,5			
	Odstupanje	1,10	1,04	1,16	0,39
O1_bpm*	V_{col}^a [kN]	112,2	105,9	117,5	43,2
	V_{col}^e [kN]	85,1			
	Odstupanje	1,32	1,24	1,38	0,51
O1_cpm	V_{col}^a [kN]	94,8	71,8	199,1	141,5
	V_{col}^e [kN]	(162,2)			
	Odstupanje	0,58	0,44	1,23	0,87
O1_bvm	V_{col}^a [kN]	53,1	39,5	74,2	42,2
	V_{col}^e [kN]	44,1			
	Odstupanje	1,19	0,89	1,64	1,05
O1_cvm	V_{col}^a [kN]	69,5	31,4	202,7	124,0
	V_{col}^e [kN]	(81,2)			
	Odstupanje	0,85	0,39	2,50	1,53
O2_cpm	V_{col}^a [kN]	96,4	70,4	192,1	111,6
	V_{col}^e [kN]	(152,7)			
	Odstupanje	0,63	0,46	1,26	0,73
O3_bpm	V_{col}^a [kN]	133,1	119,5	183,2	92,1
	V_{col}^e [kN]	182,5			
	Odstupanje	0,73	0,65	1,00	0,50
O3_cpm	V_{col}^a [kN]	119,3	69,5	284,8	221,7
	V_{col}^e [kN]	(296,2)			

	Odstupanje	0,40	0,23	0,96	0,75
O4_bpm	V_{col}^a *[kN]*	137,2	107,2	159,1	105,2
	V_{col}^e *[kN]*	178,3			
	Odstupanje	0,77	0,60	0,89	0,59
O4_cpm	V_{col}^a *[kN]*	125,0	66,3	284,8	221,0
	V_{col}^e *[kN]*	208,2			
	Odstupanje	0,60	0,38	1,37	1,06

7.6.7. Usporedba procjene relativnog međukatnog pomaka sustava uokvireno ziđe pri graničnom stanju pred rušenje

Usporedba eksperimentalno određene vrijednosti relativnog međukatnog pomaka ispitnih uzoraka pri graničnom stanju pred rušenje (δ_{Vcol}^e), s rezultatima predloženog i postojećih analitičkih modela procjene (δ_{Vcol}^a), prikazana je Tablicom 7.36 u ovisnosti o smjeru opterećenja te Tablicom 7.37 u odnosu na srednju eksperimentalnu vrijednost. Koeficijent odstupanja određen je kao količnik dijeljenja analitičkih i eksperimentalnih rezultata.

Iz prikazane usporedbe vidljivo je da predloženi model sa zadovoljavajućom točnošću predviđa vrijednost promatrane veličine. U odnosu na srednju eksperimentalnu vrijednost, koeficijenti odstupanja u intervalu su od 0,72 do 1,44. Maksimalno odstupanje u navedenom iznosu od 44% dobiveno je kod uzorka *O2_cpm* koji se od svih ostalih uzoraka skupine *O1* razlikuje jedino u koeficijentu armiranja poprečnom armaturom. Za točniju procjenu, posebno analitičkim izrazom, potrebna su dodatna ispitivanja kako bi se dobio jasniji uvid utjecaja količine poprečne armature u stupovima okvira na ponašanje sustava posebice na promatranu veličinu.

Tablica 7.36 *Usporedba analitički i eksperimentalno određene vrijednosti relativnog međukatnog pomaka okvira s ispunom pri graničnom stanju pred rušenje u ovisnosti o smjeru opterećenja*

		Pozitivan smjer opterećenja			*Negativan smjer opterećenja*		
		Flores	*Stavridis*	*Predloženi model*	*Flores*	*Stavridis*	*Predloženi model*
O1_bpm	δ_{Vcol}^a *[%]*	0,5	0,62	1,0	-0,5	-0,62	-1,0
	δ_{Vcol}^e *[%]*	0,8			0,1		
	Odstupanje	0,63	0,78	1,25	0,5	0,62	1,00
*O1_bpm**	δ_{Vcol}^a *[%]*	0,5	0,62	1,0	-0,5	-0,62	-1,0
	δ_{Vcol}^e *[%]*	1			-1,1		
	Odstupanje	0,50	0,62	1,00	0,45	0,56	0,91
O1_cpm	δ_{Vcol}^a *[%]*	0,5	0,62	1,3	-0,5	-0,62	-1,3
	δ_{Vcol}^e *[%]*	-			-1,7		
	Odstupanje	-	-	-	0,29	0,36	0,76
O1_bvm	δ_{Vcol}^a *[%]*	0,5	0,62	1,0	-0,5	-0,62	-1,0
	δ_{Vcol}^e *[%]*	1,1			-1,1		
	Odstupanje	0,45	0,56	0,91	0,45	0,56	0,91

O1_cvm	δ_{Vcol}^{a} *[%]*	0,5	0,62	1,3	-0,5	-0,62	-1,3
	δ_{Vcol}^{e} *[%]*	1,8			-		
	Odstupanje	0,28	0,34	0,72	-	-	-
O2_cpm	δ_{Vcol}^{a} *[%]*	0,5	0,62	1,3	-0,5	-0,62	-1,3
	δ_{Vcol}^{e} *[%]*	-			-0,9		
	Odstupanje	-	-	-	0,56	0,69	1,44
O3_bpm	δ_{Vcol}^{a} *[%]*	0,5	0,62	1,0	-0,5	-0,62	-1,0
	δ_{Vcol}^{e} *[%]*	0,9			-1,0		
	Odstupanje	0,56	0,69	1,11	0,50	0,62	1,00
O3_cpm	δ_{Vcol}^{a} *[%]*	0,5	0,62	1,3	-0,5	-0,62	-1,3
	δ_{Vcol}^{e} *[%]*	-			-1,3		
	Odstupanje	-	-	-	0,38	0,48	1,00
O4_bpm	δ_{Vcol}^{a} *[%]*	0,5	0,62	1,0	-0,5	-0,62	-1,0
	δ_{Vcol}^{e} *[%]*	0,9			-0,9		
	Odstupanje	0,56	0,69	1,11	0,56	0,69	1,11
O4_cpm	δ_{Vcol}^{a} *[%]*	0,5	0,62	1,3	-0,5	-0,62	-1,3
	δ_{Vcol}^{e} *[%]*	1,3			-1,2		
	Odstupanje	0,38	0,48	1,00	0,42	0,52	1,08

Tablica 7.37 *Usporedba analitički i eksperimentalno određene vrijednosti relativnog međukatnog pomaka okvira s ispunom pri graničnom stanju pred rušenje u odnosu na srednju eksperimentalnu vrijednost*

		Flores	*Stavridis*	*Predloženi model*
O1_bpm	δ_{Vcol}^{a} *[%]*	0,5	0,62	1,0
	δ_{Vcol}^{e} *[%]*	0,9		
	Odstupanje	0,56	0,69	1,11
*O1_bpm**	δ_{Vcol}^{a} *[%]*	0,5	0,62	1,0
	δ_{Vcol}^{e} *[%]*	1,0		
	Odstupanje	0,50	0,62	1,00
O1_cpm	δ_{Vcol}^{a} *[%]*	0,5	0,62	1,3
	δ_{Vcol}^{e} *[%]*	(1,7)		
	Odstupanje	0,29	0,36	0,76
O1_bvm	δ_{Vcol}^{a} *[%]*	0,5	0,62	1,0
	δ_{Vcol}^{e} *[%]*	1,1		
	Odstupanje	0,45	0,56	0,91
O1_cvm	δ_{Vcol}^{a} *[%]*	0,5	0,62	1,3
	δ_{Vcol}^{e} *[%]*	(1,8)		
	Odstupanje	0,28	0,34	0,72
O2_cpm	δ_{Vcol}^{a} *[%]*	0,5	0,62	1,3
	δ_{Vcol}^{e} *[%]*	0,9		
	Odstupanje	0,56	0,69	1,44
O3_bpm	δ_{Vcol}^{a} *[%]*	0,5	0,62	1,0
	δ_{Vcol}^{e} *[%]*	0,9		
	Odstupanje	0,56	0,69	1,11
O3_cpm	δ_{Vcol}^{a} *[%]*	0,5	0,62	1,3
	δ_{Vcol}^{e} *[%]*	(1,3)		
	Odstupanje	0,38	0,48	1,00
O4_bpm	δ_{Vcol}^{a} *[%]*	0,5	0,62	1,0

	δ_{Vcol}^{e} [%]	0,9		
	Odstupanje	0,56	0,62	1,11
O4_cpm	δ_{Vcol}^{a} [%]	0,5	0,62	1,3
	δ_{Vcol}^{e} [%]	1,2		
	Odstupanje	0,42	0,52	1,08

7.7. Procjena ponašanja u slučaju višerasponskog višeetažnog sustava uokvireno ziđe

Višerasponski višeetažni nosivi sustavi uokvirenog ziđa, uobičajeni kod stvarnih konstrukcija, nameću potrebu definiranja modela procjene ponašanja. Predloženi model temeljen je na rezultatima ispitivanja jednorasponskih uzoraka i kao takav predstavlja ponašanje jedne nosive „jedinice" zamišljene prototipne konstrukcije. Međutim, ukoliko se uzme u obzir da ispitani uzorci predstavljaju najnižu etažu gdje je i uobičajena pojava maksimalnog horizontalnog opterećenja uzrokovanog djelovanjem potresa, a samim time i oštećenja (pojava meke etaže) uz određene prilagodbe i generalizacije, moguće je predloženi model prilagoditi višerasponskim konstrukcijama. Na taj se način konstrukcija promatra kroz tzv. *storey* model gdje je ukupna horizontalna nosivost konstrukcije istovjetna horizontalnoj nosivosti prve etaže. Navedena pretpostavaka u skladu je s rezultatima ispitivanja višeetažnih uzoraka opisanih u *Poglavlju 2*. U nedostatku vlastitih rezultata ispitivanja, utjecaj dodanih raspona sagledan je na osnovi rezultata dostupnih u literaturi gdje se ponašanje uobičajeno promatra pomoću numeričkih modela.

Eksperimentalna su ispitivanja višerasponskih uzoraka rijetka, posebice uokvirenog ziđa, a rezultati su oprečni. Al-Chaarova [14] istraživanja provedena na dvorasponskim i trorasponskim uzorcima ukazuju na znatno povećanje maksimalne horizontalne nosivosti u odnosu na jednorasponske uzorke. Tako je, kod dvorasponskog okvira, uočena 3,8 puta veća horizontalna nosivost i 1,5 puta veća početna krutost, a kod trorasponskog okvira 4,1 puta veća horizontalna nosivost i 2,2 puta veća početna krutost. Iako Al-Chaar ne promatra ponašanje uzoraka u skladu s podjelom prema graničnim stanjima, gdje početnu krutost uzoraka određuje pri razini horizontalnog opterećenja u iznosu od 50% maksimalno zabilježene vrijednosti, rezultati ispitivanja upućuju i na povećanje vrijednosti relativnog međukatnog pomaka pri navedenoj razini horizontalnog opterećenja. Povećanje je pomaka 1,6 puta u odnosu na jednorasponski sustav neovisno o broju raspona. Međutim, ukoliko se postave odnosi povećanja početne krutosti i horizontalne nosivosti te se dovedu u korelaciju s odnosom pomaka jednorasponskog i višerasponskih uzoraka, navedeno povećanje pomaka nije u skladu s dobivenim rezultatom. Tako se za dvorasponski uzorak dobije veća vrijednost pomaka u iznosu od 2,5 puta, a za trorasponski 1,9 puta u odnosu na jednorasponski uzorak. Na navedena odstupanja mjerenih i računskih vrijednosti nije dan osvrt niti pojašnjenje.

S druge strane, Mehrabijeva ispitivanja [12] gdje su promatrani dvorasponski uzorci s dvije vrste ispuna, upućuju na povećanje horizontalne nosivosti u iznosu od 85% i 68% u odnosu na jednorasponske uzroke gdje se prva vrijednost odnosi na slabi ispun. Prema autoru, rezultate dobivene ispitivanjem uzorka s jakim ispunom treba uzeti s rezervom s obzirom da ispun u pojedinim rasponima nije u istom trenutku dosegao maksimalnu nosivost. Za razliku od Al-Chaara, Mehrabi daje vrijednosti horizontalnog pomaka pri pojavi prve značajne pukotine u ispunu i pri maksimalnoj horizontalnoj nosivosti. Vrijednosti horizontalnog pomaka jednorasponskog i dvorasponskog uzorka sa slabim ispunom jednake su dok je kod jakog ispuna uočeno neznatno smanjenje pomaka kod dvorasponskog uzorka (6%). Pri maksimalnoj nosivosti uočeno je smanjenje pomaka neovisno o vrsti ispuna gdje kod slabog smanjenje iznosi 14%, a kod jakog 80%. Navedena smanjenja određena su u odnosu na rezultate dobivene ispitivanjem jednorasponskog uzorka. Međutim, smanjenje pomaka pri maksimalnoj nosivosti dvorasponskog uzorka s jakim ispunom također treba uzeti s rezervom iz prethodno navedenog razloga. Povećanje početne krutosti dvorasponskih uzoraka približno je jednako i u slučaju slabog ispuna iznosi 2,3 puta, a u slučaju jakog 2 puta.

Fioratovo istraživanje [7] na trorasponskim dvoetažnim uzoracima upućuje da je povećanje horizontalne nosivosti proporcionalnu broju dodanih raspona, drugim riječima, povećanje horizontalne nosivosti iznosi 3 puta u odnosu na jednorsponske uzorke. Iako autor decidirano ne uspoređuje pomake uzoraka, iz priloženih rezultata da se zaključiti da su pomaci pri maksimalnoj nosivosti približno jednaki. Iako autor promatra pojavu prvih značajnih pukotina u ispinu, izostaje njihova međusobna usporedba. Na osnovi povećanja nosivosti i približno jednakih pomaka pri maksimalnoj horizontalnoj nosivosti, može se zaključiti da je povećanje početne krutosti proporcionalno povećanju nosivosti.

Mehanizam sloma ispuna i okvira jednorasponskih i višerasponskih uzoraka kod svih je promatranih istraživanja približno jednak, pri čemu se može zaključiti da se dodavanjem raspona ne utječe na promjenu mehanizam sloma elemenata i sustava kao cijeline.

Numerička istraživanja višerasponskih nosivih sustava uokvirenog zida uobičajeno se provode pomoću makro i mikro modela ili pomoću neuralnih mreža. Tu su, u ovisnosti o matematičkom pristupu, također dobiveni oprečni rezultati.

Makro modeli temeljeni su na konceptu zamjenske tlačne dijagonale gdje se prilikom promatranja ponašanja višerasponskih sustava ispunu svakog raspona pridružuju jednake karakteristike. Mikro modeliranje temelji se na metodi konačnih elemenata gdje je ponašanje pojedinih materijala sustav opisan matematičkim odnosom naprezanja i deformacije. Neovisno o razini razvijenosti modela, dostupna istraživanja upućuju da je doprinos dodanih raspona proporcionalan

njihovom broju. Iako, u odnosu na jednorasponski sustav, višerasponski sustavi sadržavaju manji broj stupova okvira, uočeno je da navedeno nema znatnijeg utjecaja na horizontalnu nosivost. Pomaci višerasponskih sustava uobičajeno se promatraju u odnosu na maksimalnu horizontalnu nosivost gdje su vrijednosti približno jednake za jednorasponske i višerasponske sustave. Osvrt na vrijednosti pomaka pri pojavi prve značajne pukotine u ispunu i utjecaj dodavanja raspona izostaje [19], [13], [58], [61].

S druge strane, istraživanja provedena pomoću neuralnih mreža [39] ukazuju da doprinos dodanih raspona nije proporcionalan njihovom broju, a sama vrijednost doprinosa ovisna je o promatranoj veličini. Tako je doprinos dodanih raspona horizontalnoj nosivosti pri pojavi prve značajne pukotine u ispunu u iznosu od 0,9, a maksimalnoj nosivosti u iznosu od 0,7. Vrijednost pomaka pri pojavi prve značajne pukotine u ispunu povećava se s koeficijentom 0,3 sa svakim dodanim rasponom dok vrijednost pomaka pri maksimalnoj sili nije ovisna o rasponu, tj. jednaka je za jednorasponske i višerasponske sustave.

Neovisno o matematičkom pristupu, mehanizam sloma ispuna i elemenata okvira nije ovisan o broju raspona. Na osnovi navedenih istraživa predlaže se sljedeće:

- vrijednosti pomaka, tj. relativnih međukatnih pomaka pri pojedinim graničnim stanjima sustava uokvireno ziđe ne ovise o broju raspona,
- vrijednost horizontalne nosivosti sustava uokvireno ziđe pri pojedinim graničnim stanjima određuje se kao zbroj doprinosa svih elemenata u nizu.

Prva pretpostavka jednakosti pomaka jednorasponskih i višerasponskih sustava uokvirenog ziđa može se opravdati činjenicom da je pojava pukotina u pojedinim elementima sustava, a samim time i pri pojedinim graničnim stanjima, određena pripadnim deformacijama što je materijalna karakteristika koja ne ovisi o konfiguraciji nosivog sustava. Druga pretpostavka proizlazi iz navedenih postojećih istraživanja s tim da tu doprinos dodanih raspona nije proporcionalan njihovom broju. Naime, s obzirom da susjedni rasponi dijele jedan stup, doprinos svakog dodanog raspona nešto je manji od 1.

Procjena relativnih međukatnih pomaka višerasponskih sustava pri pojavi prve značajne pukotine u ispunu i pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna omogućena je pomoću izraza (7.75) i (7.81). Alternativno, mogu se primijeniti i izrazi definirani na geometrijskim karakteristikama sustava. Vrijednosti koeficijenata α i β određuju se na osnovi jednog raspona. U slučaju višerasponskog sustava s različitim vrijednostima koeficijenta α predlaže se procjena relativnog međukatnog pomaka na osnovi geometrijskih karakteristika svakog raspona, pri čemu se usvaja najmanja vrijednost. Za granično

stanje pred rušenje predlaže se primjena vrijednosti relativnih međukatnih pomaka definiranih u *Potpoglavlju 7.5.7.* (1% za višerasponske sustave kod kojih je ispun izveden od šupljih zidnih elemenata i 1,3% za višerasponske sustave kod kojih je ispun izveden od punih zidnih elemenata).

Zbrajanjem doprinosa svih elemenata u nizu omogućena je procjena horizontalne nosivosti sustava različitih konfiguracija kao na Slici 7.27. Tako u slučaju sustava prikazanog Slikom 7.27 a) horizontalnu nosivost definiraju tri stupa i jedna ispun, a u slučaju sustava prikazanog Slikom 7.27 b) tri stupa i dva ispuna. Tu je, primjera radi, promatran dvorasponski sustav, a predložena metodologija procjene horizontalne nosivosti ne ovisi o broju raspona. Procjena horizontalne nosivosti višeraponskih sustava, u ovisnosti o graničnim stanjima, omogućena je pomoću izrazâ (7.62), (7.77), (7.83), (7.84) i (7.86). Međutim, potrebno je obratiti pozornost na izraze pomoću kojih se određuje horizontalna nosivost okvira. Tako izraz (7.66) prelazi u oblik (7.87), a izraz (7.67) u oblik (7.88). Navedene prilagodbe potrebno je primijeniti i kod procjene horizontalne nosivosti pri graničnom stanju pred rušenje, tj. kod izraza (7.83), (7.84) i (7.85):

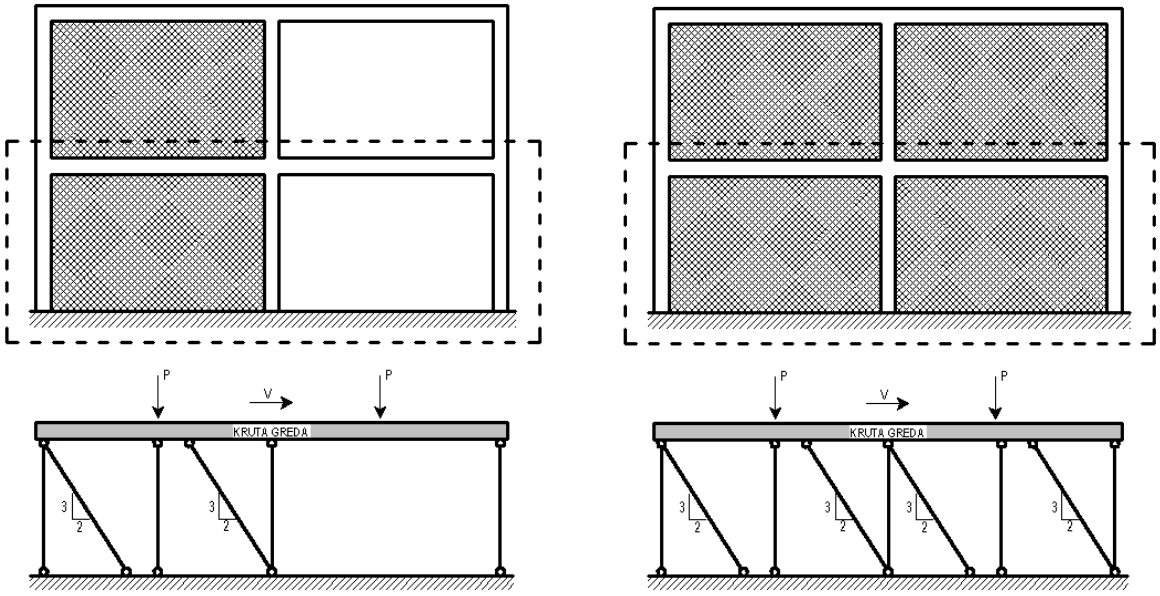
$$V_f = n_c \cdot V_c = n_c \cdot k \cdot \left[\left(\frac{0{,}5 \cdot \sqrt{f_c}}{\frac{L_v}{d}} \cdot \sqrt{1 + \frac{P}{0{,}5 \cdot \sqrt{f_c} \cdot A_c}} \right) \cdot 0{,}8 \cdot A_c + \frac{A_{sh} \cdot f_{yh} \cdot d}{s} \right] \tag{7.87}$$

$$V_f = \frac{2 \cdot n_c \cdot M_u}{H} \tag{7.88}$$

gdje je n_c broj stupova kod višerasponskog sustava uokvireno zide. Vrijednost koeficijenta redukcije horizontalne nosivosti stupa k ovisna je o graničnom stanju gdje je za granično stanje pojave prve značajne pukotine u ispunu $k = 1$, a za granično stanje pojave dominantnog mehanizma sloma ispuna i granično stanje pred rušenje $k = 0{,}7$. Za mjerodavnu vrijednost horizontalne nosivosti okvira višerasponskih sustava predlaže se usvajanje manje vrijednosti dobivene izrazima (7.87) i (7.88).

Izrazi kojima je definiran doprinos ispuna ne zahtijevaju promjene s obzirom da je broj ispuna jednak broju raspona. Vrijednosti unutarnjih sila u ispunu određuju se u ovisnosti o graničnim stanjima na temelju predložene geometrijske idealizacije sustava. Pri graničnom stanju pojave prve značajne pukotine oba kosa štapa ispuna prenose tlačne sile uzrokovane interakcijom dok pri graničnom stanju pojave dominantnog mehanizma sloma ispuna i graničnom stanju pred rušenje samo jedan kosi štap

ispuna prenosi tlačne sile. Navedeno podrazumijeva da svakom rasponu pripada gravitacijsko opterećenje određeno na temelju pripadnih površina.



Slika 7.27 *Prikaz geometrijske idealizacije višerasponskih sustava uokvireno zide*

Primjera radi, u nastavku teksta prikazani su izrazi kojima je određena horizontalna nosivost višerasponskih konfiguracija prikazanih Slikom 7.27.

Za kofiguraciju prikazu Slikom 7.27 a) horizontalna nosivost pri graničnom stanju pojave prve značajne pukotine u ispunu definirana je izrazom (7.89). Tu će se pretpostaviti da stupovima otkazuje nosivost uslijed savojnog sloma.

$$V_{cr} = \psi_{cr} \cdot V_f + n_i \cdot V_{i,cr} = \psi_{cr} \cdot \frac{6 \cdot M_u}{H} + \frac{f_t \cdot A_i}{4} \cdot \left[3 \cdot \alpha + \sqrt{9 \cdot \alpha^2 + 16 \cdot \left(1 + \frac{P}{A_e \cdot f_t} \right)} \right] \tag{7.89}$$

gdje n_i predstavlja broj ispuna, a H visinu etaže.

Horizontalna nosivost pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna definirana je izrazom (7.90):

$$V_{\max} = \psi_{\max} \cdot V_f + n_i \cdot V_{i,\max} = \psi_{\max} \cdot \frac{6 \cdot M_u}{H} + A_i \cdot \frac{c_0 + \mu \cdot \dfrac{P}{A_e}}{1 - \mu \cdot \dfrac{3}{4} \cdot \alpha} \tag{7.90}$$

Horizontalna nosivost pri graničnom stanju pred rušenje ovisi o vrsti ispuna te odnosa posmične čvrstoće stupova i grede u jednom rasponu sustava. Tu je pretpostavljeno da su svi stupovi i grede jednakih geometrijskih karakteristika te da su armirani sa jednakom količinom uzdužne i poprečne armature. Izrazom 7.91 definirana je rezidualna horizontalna nosivost u slučaju kada je ispun izveden od šupljih zidnih elemenata ($V_{res,1}$), a izrazom 7.92 slučaj kada je ispun izveden od punih zidnih elemenata uz pretpostavku sloma stupa okvira ($V_{res,2}$). Izrazom (7.93) definirana je rezidualna nosivost u slučaju kada je ispun izveden od punih zidnih elemenata uz pretpostavku sloma grede okvira ($V_{res,3}$):

$$V_{res,1} = \frac{6 \cdot M_u}{H} \tag{7.91}$$

$$V_{res,2} = n_i \cdot V_{i,res} = A_i \cdot \frac{\frac{\mu \cdot P}{A_e}}{1 - \mu \cdot \frac{3}{4} \cdot \alpha} \tag{7.93}$$

$$V_{res,3} = V_f + n_i \cdot V_{i,res} = \frac{6 \cdot M_u}{H} + A_i \cdot \frac{\frac{\mu \cdot P}{A_e}}{1 - \mu \cdot \frac{3}{4} \cdot \alpha} \tag{7.94}$$

Za kofiguraciju prikazu Slikom 7.27 b) horizontalna nosivost pri graničnom stanju uporabljivosti definirana je izrazom (7.95). Tu je također pretpostavljeno da stupovima otkazuje nosivost uslijed savojnog sloma:

$$V_{cr} = \psi_{cr} \cdot V_f + n_i \cdot V_{i,cr} = \psi_{cr} \cdot \frac{6 \cdot M_u}{H} + 2 \cdot \frac{f_t \cdot A_i}{4} \cdot \left[3 \cdot \alpha + \sqrt{9 \cdot \alpha^2 + 16 \cdot \left(1 + \frac{P}{A_e \cdot f_t} \right)} \right] \tag{7.95}$$

Horizontalna nosivost pri pojavi dominantnog mehanizma sloma definirana je izrazom (7.96):

$$V_{\max} = \psi_{\max} \cdot V_f + n_i \cdot V_{i,\max} = \psi_{\max} \cdot \frac{6 \cdot M_u}{H} + 2 \cdot A_i \cdot \frac{c_0 + \mu \cdot \frac{P}{A_e}}{1 - \mu \cdot \frac{3}{4} \cdot \alpha} \tag{7.96}$$

Pri graničnom stanju pred rušenje vrijede sve pretpostavke kao i za kofiguraciju prikazanu Slikom 7.26 a). Izrazom 7.97 definirana je rezidualna horizontalna nosivost u slučaju kada je ispun izveden od šupljih zidnih elemenata ($V_{res,1}$), a izrazom 7.98 slučajj kada je ispun izveden od punih zidnih elemenata uz pretpostavku sloma stupa okvira ($V_{res,2}$). Izrazom (7.99) definirana je rezidualna

nosivost u slučaju kada je ispun izveden od punih zidnih elemenata uz pretpostavku sloma grede okvira ($V_{res,3}$):

$$V_{res,1} = \frac{6 \cdot M_u}{H} \tag{7.97}$$

$$V_{res,2} = n_i \cdot V_{i,res} = 2 \cdot A_i \cdot \frac{\frac{\mu \cdot P}{A_e}}{1 - \mu \cdot \frac{3}{4} \cdot \alpha} \tag{7.98}$$

$$V_{res,3} = V_f + n_i \cdot V_{i,res} = \frac{6 \cdot M_u}{H} + 2 \cdot A_i \cdot \frac{\frac{\mu \cdot P}{A_e}}{1 - \mu \cdot \frac{3}{4} \cdot \alpha} \tag{7.99}$$

8. PROCJENA OČEKIVANIH NELINEARNIH POMAKA SUSTAVA UOKVIRENO ZIĐE PRI DJELOVANJU POTRESA

Aproksimacija nelinearnog odgovora pomoću linearnog uvijek je bila od interesa za inženjersku praksu. Većina tih aproksimacija temelji se na opažanjima da za svaki potres postoje različiti intervali vrijednosti perioda u spektru linearnog odgovora jednostupnjevnog modela u kojemu je odgovor gotovo konstantan. U područjima približno konstantnih pomaka i brzina, maksimalni nelinearni pomaci približno su jednaki onima dobivenim pomoću zaglađenog linearnog spektra pomaka. U području niskih perioda, gdje je maksimalno ubrzanje neosjetljivo na promjenu krutosti sustava, maksimalni nelinearni pomaci premašuju linearne vrijednosti.

Odabrana metoda procjene nelinearnih pomaka temelji se na idealiziranom linearnom spektru odgovora modificiranim faktorom kojim se uzimaju u obzir nelinearni efekti. Osnovne varijable modela odnose se na efektivnu krutost i nosivost na granici tečenja sustava te frekventni sadržaj i intenzitet potresa. Metoda je razvijena i verificirana na brojnim eksperimentalnim ispitivanjima različitih konstruktivnih sustava na Sveučilištu u Illinoisu u Urbana – Champaignu, SAD. Metoda se bazira na proračunu očekivanih nelinearnih pomaka pomoću linearne spektralne analize te omogućava pojedina poopćenja koja bi inače bila problematična. Metodu je razvio Shimazaki 1985. [73] na osnovi parametarske analize odgovora jednostupnjevnim sustavom gdje je ustvrdio da elastični odgovor s 2% kritičnog prigušenja omeđuje neelastične deformacije uz određenu kombinaciju nosivosti, frekventnog sadržaja potresa i osnovnog perioda osciliranja sustava. Razvijena metoda primjenjiva je na interval perioda koji odgovara području odgovora s približnom konstantnom brzinom. Kasnije, 1997. LePage [74] proširuje Shimazakijevu metodu i na područje odgovora sustava s približno jednakom akceleracijom, tj. na područje niskih perioda. U nastavku teksta dan je detaljan opis LePageova modela na temelju kojeg je dana procjena nelinearnih pomaka ispitnih uzoraka te osvrt na očekivano oštećenje uzoraka u ovisnosti o vršnog vrijednosti ubrzanja odabranih potresa i područja ponašanja uzoraka definiranih u *Poglavlju 6*.

8.1. Prikaz metode procjene nelinearnih pomaka pri djelovanju potresa

Odabrana metoda procjene pomaka povezuje karakteristike potresa s krutošću i nosivošću konstrukcije u cilju prognoziranja očekivanih nelinearnih pomaka pri djelovanju potresa.

8.1.1. Generalizirani spektar pomaka

Brojna istraživanja pokazala su da se nelinearni spektar pomaka može aproksimirati pomoću linearne procjene [73], [75], [76], [77]. Generalizirani spektar pomaka namijenjen je procjeni pomaka konstrukcija čiji se odgovor nalazi u nelinearnom području. Linearni spektar pomaka može se definirati na osnovi uobičajenog zaglađenog linearnog spektra akceleracije s obzirom da su vrijednosti spektralnih pomaka, brzina i ubrzanja povezane pomoću sljedećih odnosa:

$$S_a \approx \omega^2 \cdot S_d = \left(\frac{2 \cdot \pi}{T} \right)^2 \cdot S_d \tag{8.1}$$

$$S_v \approx \omega \cdot S_d = \left(\frac{2 \cdot \pi}{T} \right) \cdot S_d \tag{8.2}$$

gdje su S_a, S_v i S_d spektralna akceleracija, brzina i pomaka linearnog sustava, ω kružna frekvencija i T osnovni period osciliranja jednostupnjevnog sustava.

Navedene aproksimacije primjenjive su za jednostupnjevne sustave s prigušenjem manjim od 20% kritičnog.

Linearni spektar ubrzanja može se odrediti na temelju procijenjene vršne vrijednosti ubrzanja potresa primjenom prikladnog faktora amplifikacije ubrzanja. Za sustave s 2% prigušenjem preporučena vrijednost faktora amplifikacije ubrzanja nalazi se u intervalu od 3,1 do 4,3 i ovisna je o lokalnim karakteristikama tla, udaljenošću promatrane lokacije od rasjeda te o frekventnom sastavu potresa. Istraživanja Shimbatae [76] upućuju da je vrijednost faktora amplifikacije ubrzanja u iznosu od 3,75 reprezentativna za širok spektar potresa.

Idealizirani spektar ubrzanja može se definirati pomoću sljedećih izraza:

$$S_a = \begin{cases} F_a \cdot a_{\max} \cdot g \rightarrow T \langle T_g \\ F_a \cdot a_{\max} \cdot g \cdot \dfrac{T_g}{T} \rightarrow T \geq T_g \end{cases} \tag{8.3}$$

gdje je F_a faktor amplifikacije ubrzanja, g gravitacijsko ubrzanje, a_{max} vršna vrijednost akceleracije izražena u odnosu na gravitacijsko ubrzanje i T_g karakteristični period potresa. Karakteristični period potresa može se definirati kao period pri kojem završava područje konstantne akceleracije. Izrazi (8.3) definirani su na temelju pretpostavke da za periode manje od T_g spektralna akceleracija ima približno jednake vrijednosti te da je za periode veće od T_g spektar brzine približno konstantan. Navedena poopćenja proizlaze iz Newmarkovih tripartalnih logaritamski spektara [78].

Uvrštavanjem odnosa definiranih izrazima (8.1) i (8.2) u izraz (8.3) dolazi se do izraza za idealizirani linearni spektar pomaka:

$$S_d = \begin{cases} \dfrac{F_a \cdot a_{\max} \cdot g}{(2 \cdot \pi)^2} \cdot T^2 \rightarrow T \langle T_g \\ \dfrac{F_a \cdot a_{\max} \cdot g \cdot T_g}{(2 \cdot \pi)^2} \cdot T \rightarrow T \geq T_g \end{cases} \tag{8.4}$$

Navedeni izraz može se preoblikovati na sljedeći način:

$$S_d = \begin{cases} D_g \cdot \left(\dfrac{T_{eff}}{T_g} \right)^2 \rightarrow T_{eff} \langle T_g \\ D_g \cdot \dfrac{T_{eff}}{T_g} \rightarrow T_{eff} \geq T_g \end{cases} \tag{8.5}$$

pri čemu je D_g karakteristični pomak potresa, a T_{eff} efektivni period jednostupnjevnog sustava. Karakteristični pomak potresa predstavlja maksimalni linearni pomak jednostupnjevnog sustava perioda T_g s koeficijentom prigušenja u iznosu od 2% kritičnog, a može se definirati pomoću vršne vrijednosti ubrzanja izrazom (8.6):

$$D_g = F_a \cdot a_{\max} \cdot g \cdot \left(\frac{T_g}{2 \cdot \pi} \right)^2 \tag{8.6}$$

Efektivni početni period T_{eff} može se pretpostaviti u iznosu od $\sqrt{2}$ puta period koji odgovara neraspucanom stanju konstrukcije, a predstavlja srednju vrijednost perioda neraspucane i potpuno raspucane konstrukcije (na razini poprečnog presjeka).

Kako bi se uzeo u obzir nelinearni odgovor, izraz (8.5) preoblikovan je i zapisan u bezdimenzionalnom obliku :

$$\Delta_s = \frac{S_d \cdot DR}{D_g} = \begin{cases} TR^2 \cdot DR \rightarrow TR \langle 1 \\ TR \rightarrow TR \geq 1 \end{cases} \tag{8.7}$$

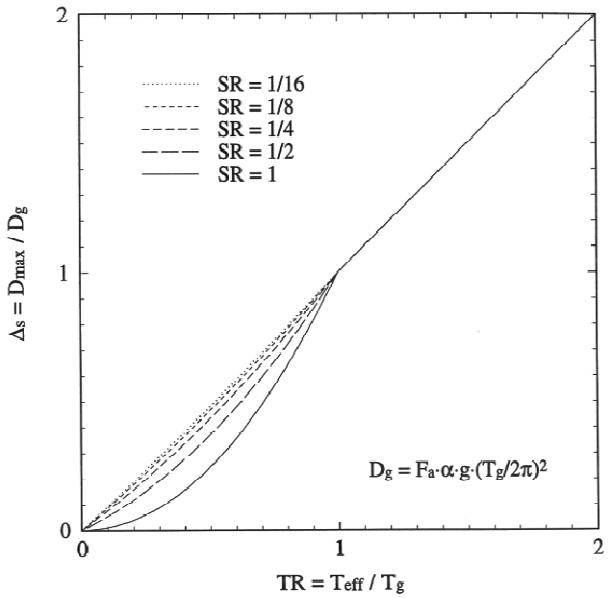
gdje je Δ_s nelinearni spektar pomaka normaliziran pomoću karakterističnog pomaka potresa D_g, DR omjer pomaka kojim se normalizira maksimalni nelinearni pomak pomoću zaglađenog spektra pomaka S_d linearnog sustava s 2% prigušenjem, TR omjer perioda kojim se normalizira efektivni period T_{eff} pomoću karakterističnog perioda potresa T_g.

Izraz (8.7) upućuje da su za sustave kod kojih je omjer perioda veći od jedan linearni i nelinearni pomaci približno jednaki, stoga je omjer pomaka DR jednak jedan. Za sustave u području niskih perioda (TR < 1), vrijednost omjera DR je veća od jedan. Navedeni izraz nije namjenjen

proračunu maksimalnog pomaka te predstavlja graničnu vrijednost. Omjer pomaka *DR* definiran je pomoću sljedećeg izraza:

$$DR = \begin{cases} \dfrac{1-SR}{TR} + SR \rightarrow TR\langle 1 \\ 1 \rightarrow TR \geq 1 \end{cases} \tag{8.8}$$

gdje je *SR* omjer čvrstoće kojim se normalizira čvrstoća sustava u odnosu na maksimalnu silu koja bi se razvila u sustava kada bi on ostao u linearnom području odgovora tijekom djelovanja potresa. Vrijednost omjera $SR \geq 1$ odnosi se na sustav čiji je odgovor u nelinearnom području. U izrazu (8.7) omjer pomaka *DR* predstavlja faktor modifikacije linearnih pomaka kako bi se u obzir uzeo nelinearni odgovor sustava. Slikom 8.1 dan je prikaz odnosa definiranih izrazom (8.7) gdje je *DR* određen pomoću izraza (8.8). Za niske vrijednosti omjera *SR*, omjer *DR* približava se vrijednosti $1/TR$, a $\Delta_s = TR$.



Slika 8.1 *Generalizirani spektar nelinearnih pomaka definiran izrazima (8.7) i (8.8)* [74]

Izraz (8.8), kojim se definira vrijednost omjera *DR*, može se pojasniti pomoću sljedećih poopćenja. Omjer pomaka *DR* definiran je kao:

$$DR = \frac{D_{max}}{D_l} \tag{8.9}$$

dok je omjer čvrstoća definiran kao:

$$SR = \frac{V_y}{V_l} = \frac{1}{R} \tag{8.10}$$

gdje je D_{max} maksimalni pomak nelinearnog jednostupnjevnog sustava, D_l pomak koji bi ostvario linearni sustav, V_y sila pri pojavi tečenja, V_l sila koju bi ostvario linearni sustav i R faktor redukcije sile. Uzimajući u obzir linearni odnos sile i pomaka, omjer čvrstoća može se izraziti i pomoću pomaka:

$$SR = \frac{D_y}{D_l} \tag{8.11}$$

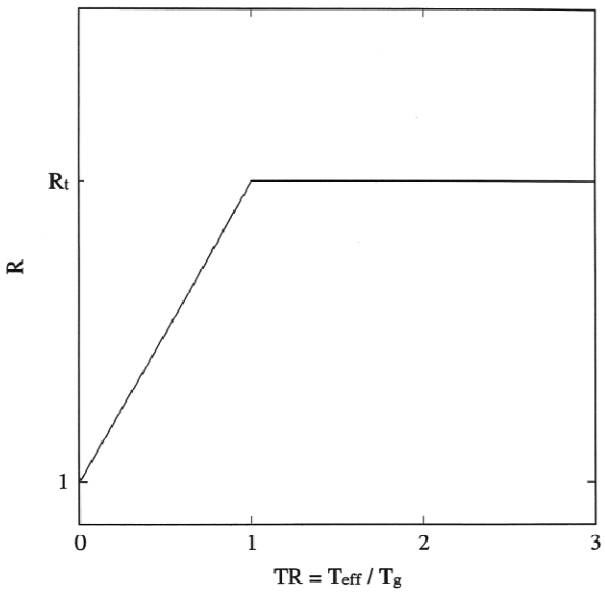
gdje je D_y pomak pri pojavi tečenja jednostupnjevnog sustava.

Iz izraza (8.9), (8.10) i (8.11) slijedi:

$$DR = SR \cdot \frac{D_{\max}}{D_y} = \frac{\mu^*}{R} \tag{8.12}$$

gdje je μ^* faktor duktilnosti kojim je definiran omjer maksimalnog nelinearnog pomaka i pomaka pri pojavi tečenja. Iz izraza (8.12) slijedi da je DR jednak jedan ili približno jedan kada je faktor redukcije sile R jednak ili približno jednak faktoru duktilnosti μ^*.

Čini se prikladnim usvojiti određenu razinu vrijednosti R omjera maksimalne sile koju bi ostvario linearni sustav u odnosu na raspoloživu čvrstoću. Poznato je da je za konstrukcije, čiji je efektivni početni period veći od karakterističnog perioda gibanja tla ($TR > 1$), DR neosjetljiv na čvrstoću. Idealno, za $TR > 1$, vrijednost R može biti velika po želji. Ako se vrijednost TR približava nuli, vrijednost R se približava jedinici. Za krute konstrukcije, kod kojih ne dolazi do amplifikacije ili deamplifikacije ubrzanja tla, prikladno je usvojiti vrijednost R u iznosu od jedan za $TR = 0$ (hipotetska vrijednost). Istraživanja su pokazala da se vrijednost R povećava kada je $0 < TR \leq 1$. Uzimajući u obzir varijaciju vrijednosti R u navedenom području vrijednosti TR, čini se prikladnim definirati linearnu varijaciju vrijednosti R kao što je prikazano Slikom 8.2. Uvrštavajući $\mu^* = R_t$ u izraz (8.12) i izražavajući R kao linearnu varijaciju od R_t u području $0 < TR \leq 1$ i $R = R_t$ kada je $TR > 1$, dolazi se do izraza (8.8) za DR prikazanog u funkciji bezdimenzionalnih parametara SR i TR.



Slika 8.2 *Odnos faktora redukcije čvrstoće i omjera perioda* [74]

Vrijednost R kada je $TR \geq 1$ mora se definirati u iznosu koji daje prihvatljive vrijednosti kada je $TR = 1$. Istraživanja su pokazale da koeficijenta R_t ne smije imati vrijednost veću od 16 kako bi izraz (8.8) dao zadovoljavajuće rezultate. Omjer čvrstoća SR, definiran u funkciji prihvatljivog faktora redukcije sile R_t, dan je pomoću izraza (8.13):

$$SR = \begin{cases} \dfrac{1}{(R_t - 1)\cdot TR + 1} \rightarrow TR \langle 1 \\ \dfrac{1}{R_t} \rightarrow TR \geq 1 \end{cases} \tag{8.13}$$

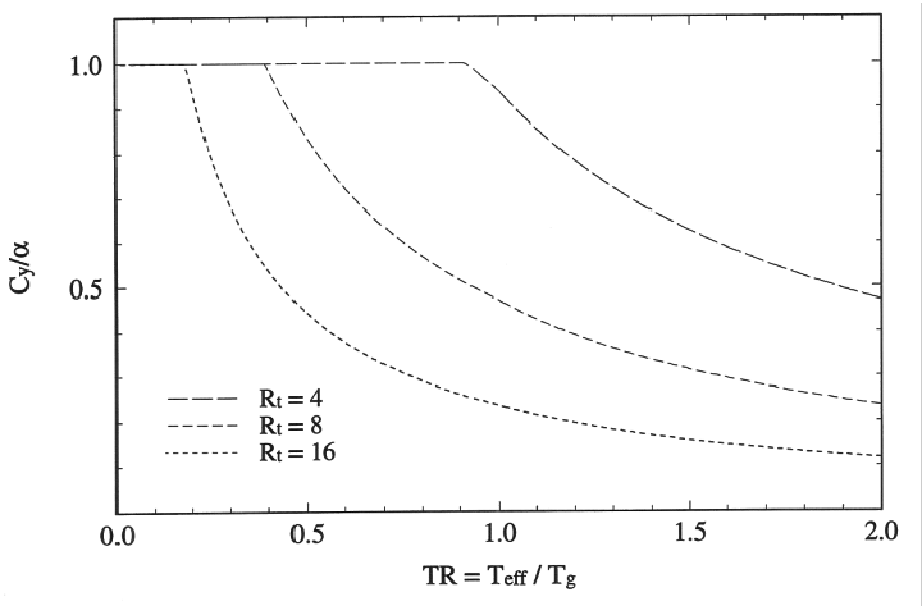
Omjer čvrstoće SR povezan je s koeficijentom posmika pri pojavi popuštanja (en. *base shear strength coefficient*) C_y, pomoću sljedećeg izraza:

$$C_y = \frac{V_y}{W} = \frac{S_a \cdot SR}{g} \tag{8.14}$$

Minimalna čvrstoća definirana izrazom (8.13) može se prikazati pomoću koeficijenata posmika C_y na sljedeći način:

$$C_y = \begin{cases} \dfrac{F_a \cdot a_{\max}}{(R_t - 1)\cdot TR + 1} \leq a_g \rightarrow TR \langle 1 \\ \dfrac{F_a \cdot a_{\max}}{R_t \cdot TR} \rightarrow TR \geq 1 \end{cases} \tag{8.15}$$

Izrazom (8.15) maksimalna vrijednost koeficijenta posmika C_y ograničena je na a_{max}, što je u skladu s činjenicom da je ubrzanje sustava s niskim periodima približno jednako ubrzanju tla. Na Slici 8.3 prikazan je izraz (8.15) normaliziran u odnosu na vrijednost a_{max}. Prikazani dijagrami dobiveni su na temelju vrijednosti F_a u iznosu od 3,75 i R_t u iznosu od 4, 8 i 16.



Slika 8.3 *Normalizacija koeficijenta posmika na temelju izraza (8.15)* [74]

Nelinearni pomak, D_{max}, može se odrediti na temelju procjene linearnog pomaka pomoću izraza (8.16):

$$D_{\max} = S_d \cdot DR \tag{8.16}$$

Za niske vrijednosti omjera *SR*, izraz (8.8) ima gornju granicu definiranu kao:

$$DR = \begin{cases} \dfrac{1}{TR} \rightarrow TR\langle 1 \\ 1 \rightarrow TR \geq 1 \end{cases} \tag{8.17}$$

iz čega slijedi izraz za procjenu nelinearnog pomaka D_{max}:

$$D_{\max} = \frac{F_a \cdot a_{\max} \cdot g \cdot T_g}{\left(2 \cdot \pi\right)^2} \cdot T \tag{8.18}$$

Izraz (8.18) daje prihvatljivu gornju granicu procjene nelinearnog pomaka ukoliko koeficijent posmika C_y zadovoljava sljedeću relaciju:

$$C_y = a_{\max} \cdot \left(1 - TR\right) \geq \frac{a_{\max}}{6} \tag{8.19}$$

8.2. Odabir mjerodavnih zapisa potresa

Odabir mjerodavnih zapisa potresa izvršen je sukladno podjeli Republike Hrvatske na seizmičke zone. U okviru svake seizmičke zone utvrđuje se Državnim dokumentom za primjenu Eurokoda 8 konstantna vrijednost maksimalnog ubrzanja a_g u stjenovitom ili dobro zbijenom tlu. U Eurokodu je za ubrzanje uvedena oznaka a_g koja definira projektno ubrzanje tla i predstavlja dovoljan parametar opisa

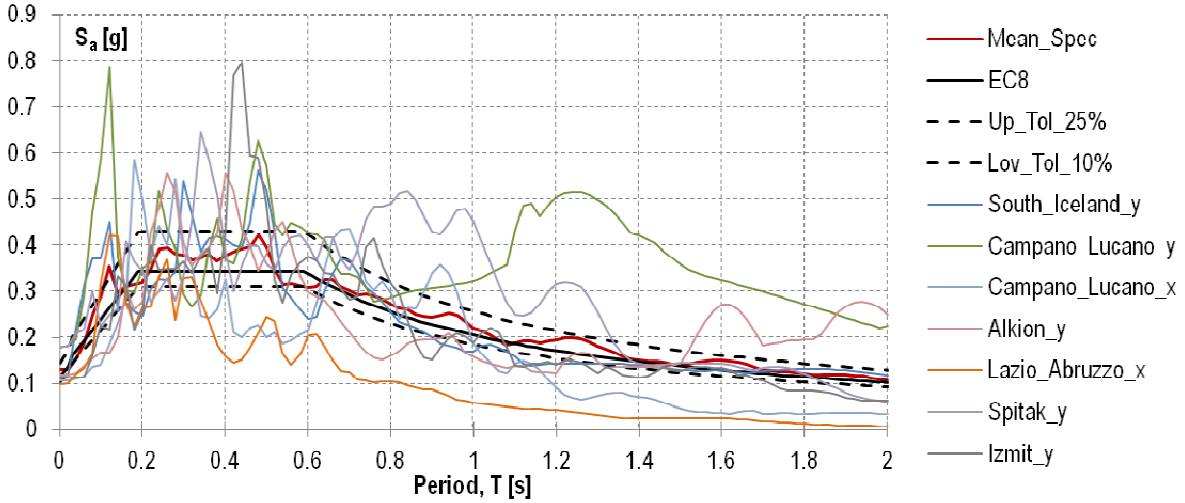
jakosti seizmičkog događaja. Vrijednosti projektnog ubrzanja tla definiraju se za povratno razdoblje potresa u iznosu od 475 godina u ovisnosti o stupnju seizmičkog intenziteta. Hrvatska je, prema važećem *Pravilniku* [79], podijeljena na tri područja seizmičkog intenziteta: VII, VIII i IX kojima odgovaraju vrijednosti projektnog ubrzanja tla u iznosu 0,1*g*, 0,2*g* i 0,3*g*.

Sukladno seizmičkim zonama, tj. projektnim ubrzanjima tla, odabrana su tri seta od sedam zapisa potresa čiji srednji elastični spektar ubrzanja približno odgovara elastičnom spektru ubrzanja definiranom Eurokodom 8, tip 1, s prigušenjem u iznosu od 2% kritičnog za tip tla C i navedena projektna ubrzanja tla. Za odabir kompatibilnih setova potresa korišten je programski paket *REXEL v3.5* [80]. Eurokod 8 dopušta primjenu stvarnih zapisa potresa uz uvjet da prosječni elastični spektar seta potresa ne podcjenjuje spektar norme za više od 10% u rasponu perioda unutar kojih je period konstrukcije koja se analizira. Prilikom odabira kompatibilnih setova potresa postavljena je donja granica odstupanja u normom propisanom iznosu dok je gornja granica odstupanja određena iterativno (vrijednost odstupanja povećavana je sve do one vrijednosti pri kojoj je bilo moguće dobiti kompatibilni zapis potresa). S obzirom da se Eurokodom 8 propisuje neki zamišljeni spektar koji ne odgovara stvarnom djelovanju nekog potresa, već približno simulira to djelovanje, bilo je potrebno odrediti raspone vršnih vrijednosti ubrzanja potresa kako bi se dobili kompatibilni elastični spektri sukladno odabranim projektnim ubrzanjima tla. Tako je, za projektno ubrzanje tla u iznosu od 0,1*g,* definiran raspon vršne vrijednosti ubrzanja potresa u intervalu od 0,1 do 0,2 *g,* zatim za projektno ubrzanje tla u iznosu 0,2 g definiran je raspon vršne vrijednosti ubrzanja potresa u intervalu od 0,2 do 0,3 *g*, a za projektno ubrzanje tla u iznosu 0,3 *g* definiran je raspon vršne vrijednosti ubrzanja potresa u intervalu od 0,3 do 0,5 *g*. Navedeni intervali vršnih ubrzanja potresa odabrani su isključivo iz uvjeta da se zadovolji kompatibilnost elastičnih spektara dok u suprotnom nije bilo moguće dobiti kompatibilne setove zapisa potresa. Osim definiranja intervala vršnih ubrzanja potresa, bilo je potrebno definirati tip tla na kojemu je zabilježen potres. Iako je mjerodavni elastični spektar ubrzanja definiran za tlo tipa C, prilikom izbora kompatibilnih zapisa potresa nije bilo moguće zadovoljiti i uvjet kompatibilnost tla iako su zapisi potresa preuzeti iz relativno velikih baza zapisa (*European Strong-Motion Database* i *SIMBAD* [81]).

Prikaz osnovnih karakteristika kompatibilnih zapisa potresa dan je Tablicama 8.1-8.3 dok je usporedba srednjeg i normom propisanog elastičnog spektra dana Slikama od 8.5 do 8.7 uz prikaz donje i gornje granice odstupanja u ovisnosti o vrijednosti projektnog ubrzanja tla a_g.

Tablica 8.1 *Prikaz osnovni karakteristika seta zapisa potresa kompatibilnih sa spektrom EC8, tip 1, 2% prigušenja, a_g = 0,1 g*

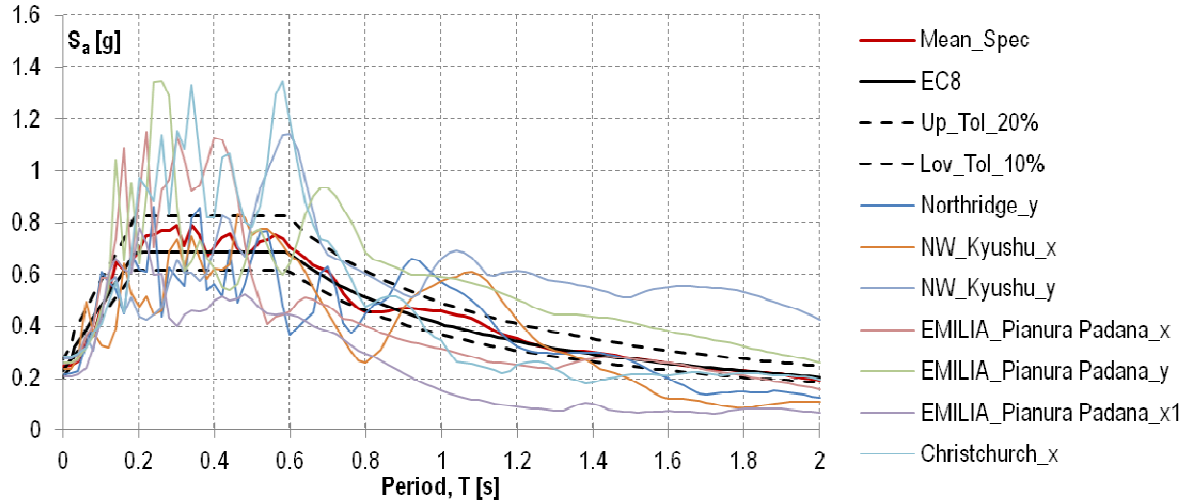
Naziv potresa	Datum	Magnituda, (M_w)	Udaljenost od epicentra, [*km*]	Vršno ubrzanje, [m/s^2]	Tip tla
South Iceland_y	21.6.2000	6,4	14	1,1423	A
Izmit_y	17.8.1999	7,6	96	1,1197	C
Alkion_y	25.2.1981	6,3	25	1,176	C
Campano Lucano_x	23.11.1980	6,9	48	1,0578	B
Spitak_y	7.12.1988	6,7	36	1,7958	C
Lazio Abruzzo_x	7.5.1984	5,9	5	0,985	A
Campano Lucano_y	23.11.1980	6,9	23	1,7756	A



Slika 8.5 *Usporedba srednjeg elastičnog spektra ubrzanja odabranog seta zapisa potresa s elastičnim spektrom EC8 za a_g = 0,1 g*

Tablica 8.2 *Prikaz osnovni karakteristika seta zapisa potresa kompatibilnih sa spektrom EC8, tip 1, tlo C, 2% prigušenja, a_g = 0,2 g*

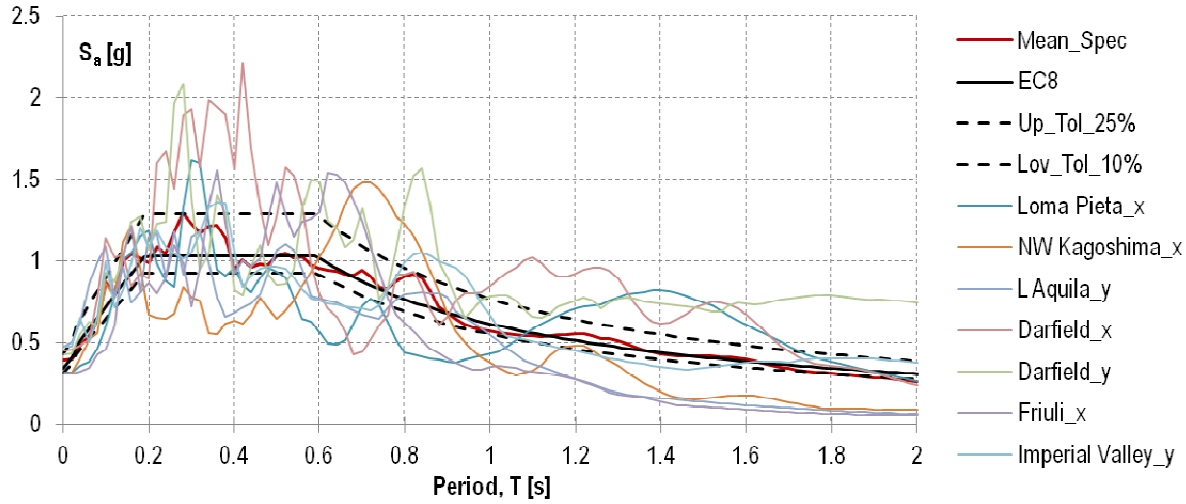
Naziv potresa	Datum	Magnituda, (M_w)	Udaljenost od epicentra, [*km*]	Vršno ubrzanje, [m/s^2]	Tip tla
Northridge_y	17.1.1994	6,7	20,2	2,1739	C
NW_Kyushu_x	20.3.2005	6,6	26	2,3529	C
EMILIA_Pianura Padana_x	20.5.2012	6,1	13,4	2,5745	C
Christchurch_x	21.2.2011	6,2	13,7	2,8548	C
EMILIA_Pianura Padana_x1	29.5.2012	6,0	16,0	2,0816	C
EMILIA_Pianura Padana_y	20.5.2012	6,1	13,4	2,5912	C
NW_Kyushu_y	20.3.2005	6,6	26,0	2,7531	C



Slika 8.6 *Usporedba srednjeg elastičnog spektra ubrzanja odabranog seta zapisa potresa s elastičnim spektrom EC8 za a_g = 0,2 g*

Tablica 8.3 *Prikaz osnovni karakteristika seta zapisa potresa kompatibilnih sa spektrom EC8, tip 1, 2% prigušenja, a_g = 0,3 g*

Naziv potresa	Datum	Magnituda, (M_w)	Udaljenost od epicentra, [*km*]	Vršno ubrzanje, [m/s^2]	Tip tla
Imperial Valley_y	15.10.1979	6,5	27,0	4,7587	C
L'Aquila_y	6.4.2009	6,3	4,4	4,7927	B
Loma Pieta_x	18.10.1989	6,9	29,7	3,1609	C
Friuli_x	6.5.1976	6,4	21,7	3,0901	B
NW Kagoshima_x	16.5.1997	6,0	15,4	3,1479	C
Darfield_x	3.9.2010	7,1	17,8	4,5382	C
Darfield_y	3.9.2010	7,1	17,8	4,2953	C



Slika 8.7 *Usporedba srednjeg elastičnog spektra ubrzanja obaranog seta zapisa potresa s elastičnim spektrom EC8 za a_g = 0,3 g*

8.3. Idealizirani spektri pomaka za odabrane zapise potresa

Karakteristični period potresa T_g i spektar pomaka sustava s 10% prigušenjem koristi se za idealizaciju spektra pomaka sustava s 2% prigušenjem. Poznavanjem vrijednosti karakterističnog perioda potresa T_g te uvrštavanjem u izraze (8.1) i (8.2) određuju se idealizirani spektri ubrzanja i pomaka odabranih potresa. Vrijednost T_g određuje se pomoću energetskog spektra potresa s 10% prigušenjem i označava period pri kojem je ostvarena vršna vrijednost energije. Period T_g predstavlja period sjecišta spektra ubrzanja i brzine s konstantnom ubrzanjem i konstantnom brzinom. Prilikom određivanja energetskog spektra potresa korišten je računalni algoritam napisan u programskom paketu Fortran [82]. Prikaz algoritma dan je u dodatku B.

Idealizirani spektri ubrzanja, pomaka i energije određeni su u području perioda od 0 do 2 sekunde za prigušenja u iznosu od 2% i 10% kritičnog. Odabrano područje perioda odgovara području perioda spektara s konstantnim ubrzanjem i konstantnom brzinom. Područje vrlo niskih perioda ($T \leq T_g$ /3) nije promatrano u provedenoj analizi, a spektar je ubrzanja u navedenom području, radi jednostavnosti, aproksimiran s jednakom vrijednošću kao i u intervalu T_g /3 ≤ $T \leq T_g$ (područje jednakog ubrzanja). Prikaz idealiziranih spektara ubrzanja, pomaka i energije za odabrane zapise potresa kompatibilne s *EC8* spektrom prikazane su u dodatku B. Prikaz akcelerograma odabranih zapisa potresa također je dan u dodatku B.

S prikazanih slika vidljivo je da idealizirani spektri pomaka u većini slučajeva dobro aproksimiraju spektre pomaka potresa s 2% prigušenjem. Iako u nekim slučajevima idealizirani spektri pomaka značajno podcjenjuju spektre pomaka potresa, u području opsega perioda od interesa aproksimacije pomaka zadovoljavajuće su i na strani sigurnosti. Navedena odstupanja uočena su većinom u području perioda $T > 0{,}6$ *s*. S obzirom da je opseg perioda od interesa u intervalu od 0,2 do 0,6 *s*, može se zaključiti da idealizirani spektar pomaka daje zadovoljavajuće aproksimacije pomaka za sve odabrane potrese.

8.4. Procjena nelinearnih pomaka ispitnih uzoraka

Nelinearni pomaci ispitnih uzoraka procijenjeni su pomoću izraza (8.18). Navedenim izrazom definira se gornja granica procijenjenih vrijednosti što se može smatrati kao procjena na strani sigurnosti. U Tablicama 8.4 do 8.24 dan je prikaz procijenjenih vrijednosti maksimalnih pomaka, tj. relativnih međukatnih pomaka za sve ispitne uzorke u ovisnosti o promatranom potresu. U tablicama su izostavljene procjene pomaka ispitnog uzorka *O1_b* iz razloga što za navedeni uzorak nije bilo moguće

odrediti granična stanja. Uz prikaz procijenjenih vrijednosti nelinearnih pomaka uzoraka, u tablicama su dane i osnovne karakteristike potresa kao što je projektno vršno ubrzanje a_g te karakteristični period T_g.

Tablica 8.4 *Procijenjene vrijednosti nelinearnih pomaka ispitnih uzoraka za potres South Iceland_y*

Potres	a_g [g]	T_g [s]	Ispitni uzorak	T [s]	D_{max} [mm]	δ_{max} [%]
South Iceland_y	0,114	0,49	*O1*	0,56	29,8	1,1
			O1_bpm	0,21	11,2	0,4
			*O1_bpm**	0,20	10,6	0,4
			O1_cpm	0,22	11,7	0,4
			O1_bvm	0,20	10,6	0,4
			O1_cvm	0,27	14,4	0,5
			O2_cpm	0,22	11,7	0,4
			O3	0,47	25,0	0,9
			O3_bpm	0,24	12,8	0,5
			O3_cpm	0,23	12,2	0,4
			O4	0,52	27,7	1,1
			O4_bpm	0,22	11,7	0,4
			O4_cpm	0,26	13,8	0,5

Tablica 8.5 *Procijenjene vrijednosti nelinearnih pomaka ispitnih uzoraka za potres Izmit_y*

Potres	a_g [g]	T_g [s]	Ispitni uzorak	T [s]	D_{max} [mm]	δ_{max} [%]
Izmit_y	0,112	0,43	*O1*	0,56	25,6	0,9
			O1_bpm	0,21	9,6	0,3
			*O1_bpm**	0,20	9,2	0,3
			O1_cpm	0,22	10,1	0,4
			O1_bvm	0,20	9,2	0,3
			O1_cvm	0,27	12,4	0,4
			O2_cpm	0,22	10,1	0,4
			O3	0,47	21,5	0,8
			O3_bpm	0,24	11,0	0,4
			O3_cpm	0,23	10,5	0,4
			O4	0,52	23,8	0,8
			O4_bpm	0,22	10,1	0,4
			O4_cpm	0,26	11,9	0,4

Tablica 8.6 *Procijenjene vrijednosti nelinearnih pomaka ispitnih uzoraka za potres Alkion_y*

Potres	a_g [g]	T_g [s]	Ispitni uzorak	T [s]	D_{max} [mm]	δ_{max} [%]
Alkion_y	0,118	0,40	*O1*	0,56	25,0	0,9
			O1_bpm	0,21	9,4	0,3
			*O1_bpm**	0,20	8,9	0,3
			O1_cpm	0,22	9,8	0,3
			O1_bvm	0,20	8,9	0,3
			O1_cvm	0,27	12,1	0,4
			O2_cpm	0,22	9,8	0,3
			O3	0,47	21,0	0,7
			O3_bpm	0,24	10,7	0,4
			O3_cpm	0,23	10,3	0,4
			O4	0,52	23,3	0,8
			O4_bpm	0,22	9,8	0,3
			O4_cpm	0,26	11,6	0,4

Tablica 8.7 *Procijenjene vrijednosti nelinearnih pomaka ispitnih uzoraka za potres Campano Lucano_x*

Potres	a_g [g]	T_g [s]	Ispitni uzorak	T [s]	D_{max} [mm]	δ_{max} [%]
Campano Lucano_x	0,106	0,18	*O1*	0,56	10,1	0,4
			O1_bpm	0,21	3,8	0,1
			*O1_bpm**	0,20	3,6	0,1
			O1_cpm	0,22	4,0	0,1
			O1_bvm	0,20	3,6	0,1
			O1_cvm	0,27	4,9	0,2
			O2_cpm	0,22	4,0	0,1
			O3	0,47	8,5	0,3
			O3_bpm	0,24	4,3	0,2
			O3_cpm	0,23	4,2	0,1
			O4	0,52	9,4	0,3
			O4_bpm	0,22	4,0	0,1
			O4_cpm	0,26	4,7	0,2

Tablica 8.8 *Procijenjene vrijednosti nelinearnih pomaka ispitnih uzoraka za potres Spitak_x*

Potres	a_g [g]	T_g [s]	Ispitni uzorak	T [s]	D_{max} [mm]	δ_{max} [%]
Spitak_y	0,180	0,35	*O1*	0,56	33,5	1,2
			O1_bpm	0,21	12,5	0,4
			*O1_bpm**	0,20	11,9	0,4
			O1_cpm	0,22	13,1	0,5
			O1_bvm	0,20	11,9	0,4
			O1_cvm	0,27	16,1	0,6
			O2_cpm	0,22	13,1	0,5
			O3	0,47	28,1	1,0
			O3_bpm	0,24	14,3	0,5

			O3_cpm	0,23	13,7	0,5
			O4	0,52	31,1	1,1
			O4_bpm	0,22	13,1	0,5
			O4_cpm	0,26	15,5	0,5

Tablica 8.9 *Procijenjene vrijednosti nelinearnih pomaka ispitnih uzoraka za potres Lazio Abruzo_x*

Potres	a_g [*g*]	T_g [*s*]	Ispitni uzorak	T [*s*]	D_{max} [*mm*]	δ_{max} [%]
Lazio Abruzo_x	0,100	0,25	*O1*	0,56	13,1	0,5
			O1_bpm	0,21	4,9	0,2
			*O1_bpm**	0,20	4,7	0,2
			O1_cpm	0,22	5,1	0,2
			O1_bvm	0,20	4,7	0,2
			O1_cvm	0,27	6,3	0,2
			O2_cpm	0,22	5,1	0,2
			O3	0,47	11,0	0,4
			O3_bpm	0,24	5,6	0,2
			O3_cpm	0,23	5,4	0,2
			O4	0,52	12,2	0,4
			O4_bpm	0,22	5,1	0,2
			O4_cpm	0,26	6,1	0,2

Tablica 8.10 *Procijenjene vrijednosti nelinearnih pomaka ispitnih uzoraka za potres Campano Lucano_y*

Potres	a_g [*g*]	T_g [*s*]	Ispitni uzorak	T [*s*]	D_{max} [*mm*]	δ_{max} [%]
Campano Lucano_y	0,177	0,49	*O1*	0,56	46,3	1,6
			O1_bpm	0,21	17,4	0,6
			*O1_bpm**	0,20	16,5	0,6
			O1_cpm	0,22	18,2	0,6
			O1_bvm	0,20	16,5	0,6
			O1_cvm	0,27	22,3	0,8
			O2_cpm	0,22	18,2	0,6
			O3	0,47	38,9	1,4
			O3_bpm	0,24	19,8	0,7
			O3_cpm	0,23	19,0	0,7
			O4	0,52	43,0	1,5
			O4_bpm	0,22	18,2	0,6
			O4_cpm	0,26	21,5	0,8

Tablica 8.11 *Procijenjene vrijednosti nelinearnih pomaka ispitnih uzoraka za potres Northridge_y*

Potres	a_g [g]	T_g [s]	Ispitni uzorak	T [s]	D_{max} [mm]	δ_{max} [%]
Northridge_y	0,217	0,35	*O1*	0,56	40,5	1,4
			O1_bpm	0,21	15,2	0,5
			*O1_bpm**	0,20	14,5	0,5
			O1_cpm	0,22	15,9	0,6
			O1_bvm	0,20	14,5	0,5
			O1_cvm	0,27	19,5	0,7
			O2_cpm	0,22	15,9	0,6
			O3	0,47	34,0	1,2
			O3_bpm	0,24	17,4	0,6
			O3_cpm	0,23	16,6	0,6
			O4	0,52	37,6	1,3
			O4_bpm	0,22	15,9	0,6
			O4_cpm	0,26	18,8	0,7

Tablica 8.12 *Procijenjene vrijednosti nelinearnih pomaka ispitnih uzoraka za potres NW Kyushu_x*

Potres	a_g [g]	T_g [s]	Ispitni uzorak	T [s]	D_{max} [mm]	δ_{max} [%]
NW Kyushu_x	0,235	0,54	*O1*	0,56	67,7	2,4
			O1_bpm	0,21	25,4	0,9
			*O1_bpm**	0,20	24,2	0,9
			O1_cpm	0,22	26,6	0,9
			O1_bvm	0,20	24,2	0,9
			O1_cvm	0,27	32,6	1,2
			O2_cpm	0,22	26,6	0,9
			O3	0,47	56,8	2,0
			O3_bpm	0,24	29,0	1,0
			O3_cpm	0,23	27,8	1,0
			O4	0,52	62,8	2,2
			O4_bpm	0,22	26,6	0,9
			O4_cpm	0,26	31,4	1,1

Tablica 8.13 *Procijenjene vrijednosti nelinearnih pomaka ispitnih uzoraka za potres EMILIA Pianura Padana_x*

Potres	a_g [g]	T_g [s]	Ispitni uzorak	T [s]	D_{max} [mm]	δ_{max} [%]
EMILIA Pianura Padana_x	0,257	0,43	*O1*	0,56	59,0	2,1
			O1_bpm	0,21	22,1	0,8
			*O1_bpm**	0,20	21,1	0,7
			O1_cpm	0,22	23,2	0,8
			O1_bvm	0,20	21,1	0,7
			O1_cvm	0,27	28,4	1,0
			O2_cpm	0,22	23,2	0,8
			O3	0,47	49,5	1,8
			O3_bpm	0,24	25,3	0,9

			O3_cpm	0,23	24,2	0,9
			O4	0,52	54,7	2,0
			O4_bpm	0,22	23,2	0,8
			O4_cpm	0,26	27,4	1,0

Tablica 8.14 *Procijenjene vrijednosti nelinearnih pomaka ispitnih uzoraka za potres Christchurch_x*

Potres	a_g [*g*]	T_g [*s*]	Ispitni uzorak	T [*s*]	D_{max} [*mm*]	δ_{max} [*%*]
Christchurch_x	0,286	0,58	*O1*	0,56	88,2	3,1
			O1_bpm	0,21	33,1	1,2
			*O1_bpm**	0,20	31,5	1,1
			O1_cpm	0,22	34,7	1,2
			O1_bvm	0,20	31,5	1,1
			O1_cvm	0,27	42,5	1,5
			O2_cpm	0,22	34,7	1,2
			O3	0,47	74,0	2,6
			O3_bpm	0,24	37,8	1,3
			O3_cpm	0,23	36,2	1,3
			O4	0,52	81,9	2,9
			O4_bpm	0,22	34,7	1,2
			O4_cpm	0,26	41,0	1,5

Tablica 8.15 *Procijenjene vrijednosti nelinearnih pomaka ispitnih uzoraka za potres EMILIA Pianura Padana_x1*

Potres	a_g [*g*]	T_g [*s*]	Ispitni uzorak	T [*s*]	D_{max} [*mm*]	δ_{max} [*%*]
EMILIA Pianura Padana_x1	0,209	0,20	*O1*	0,56	22,2	0,8
			O1_bpm	0,21	8,3	0,3
			*O1_bpm**	0,20	7,9	0,3
			O1_cpm	0,22	8,7	0,3
			O1_bvm	0,20	7,9	0,3
			O1_cvm	0,27	10,7	0,4
			O2_cpm	0,22	8,7	0,3
			O3	0,47	18,7	0,7
			O3_bpm	0,24	9,5	0,3
			O3_cpm	0,23	9,1	0,3
			O4	0,52	20,6	0,7
			O4_bpm	0,22	8,7	0,3
			O4_cpm	0,26	10,3	0,4

Tablica 8.16 *Procijenjene vrijednosti nelinearnih pomaka ispitnih uzoraka za potres EMILIA Pianura Padana_y*

Potres	a_g [g]	T_g [s]	Ispitni uzorak	T [s]	D_{max} [mm]	δ_{max} [%]
EMILIA Pianura Padana_y	0,259	0,27	*O1*	0,56	37,2	1,3
			O1_bpm	0,21	14,0	0,5
			*O1_bpm**	0,20	13,3	0,5
			O1_cpm	0,22	14,6	0,5
			O1_bvm	0,20	13,3	0,5
			O1_cvm	0,27	18,0	0,6
			O2_cpm	0,22	14,6	0,5
			O3	0,47	31,3	1,1
			O3_bpm	0,24	16,0	0,6
			O3_cpm	0,23	15,3	0,5
			O4	0,52	34,6	1,2
			O4_bpm	0,22	14,6	0,5
			O4_cpm	0,26	17,3	0,6

Tablica 8.17 *Procijenjene vrijednosti nelinearnih pomaka ispitnih uzoraka za potres NW Kyushu_y*

Potres	a_g [g]	T_g [s]	Ispitni uzorak	T [s]	D_{max} [mm]	δ_{max} [%]
NW Kyushu_y	0,275	0,58	*O1*	0,56	85,0	3,0
			O1_bpm	0,21	31,9	1,1
			*O1_bpm**	0,20	30,4	1,1
			O1_cpm	0,22	33,4	1,2
			O1_bvm	0,20	30,4	1,1
			O1_cvm	0,27	41,0	1,5
			O2_cpm	0,22	33,4	1,2
			O3	0,47	71,4	2,5
			O3_bpm	0,24	36,4	1,3
			O3_cpm	0,23	34,9	1,2
			O4	0,52	79,0	2,8
			O4_bpm	0,22	33,4	1,2
			O4_cpm	0,26	39,5	1,4

Tablica 8.18 *Procijenjene vrijednosti nelinearnih pomaka ispitnih uzoraka za potres Imperial Valley_y*

Potres	a_g [g]	T_g [s]	Ispitni uzorak	T [s]	D_{max} [mm]	δ_{max} [%]
Imperial Valley_y	0,476	0,36	*O1*	0,56	91,2	3,3
			O1_bpm	0,21	34,2	1,2
			*O1_bpm**	0,20	32,6	1,2
			O1_cpm	0,22	35,8	1,3
			O1_bvm	0,20	32,6	1,2
			O1_cvm	0,27	44,0	1,6
			O2_cpm	0,22	35,8	1,3
			O3	0,47	76,6	2,7
			O3_bpm	0,24	39,1	1,4

			O3_cpm	0,23	37,5	1,3
			O4	0,52	84,7	3,0
			O4_bpm	0,22	35,8	1,3
			O4_cpm	0,26	42,4	1,5

Tablica 8.19 *Procijenjene vrijednosti nelinearnih pomaka ispitnih uzoraka za potres L'Aquila_y*

Potres	a_g [*g*]	T_g [*s*]	Ispitni uzorak	T [*s*]	D_{max} [*mm*]	δ_{max} [*%*]
L'Aquila_y	0,479	0,20	*O1*	0,56	51,0	1,8
			O1_bpm	0,21	19,1	0,7
			*O1_bpm**	0,20	18,2	0,6
			O1_cpm	0,22	20,0	0,7
			O1_bvm	0,20	18,2	0,6
			O1_cvm	0,27	24,6	0,9
			O2_cpm	0,22	20,0	0,7
			O3	0,47	42,8	1,5
			O3_bpm	0,24	21,9	0,8
			O3_cpm	0,23	21,0	0,7
			O4	0,52	47,4	1,7
			O4_bpm	0,22	20,0	0,7
			O4_cpm	0,26	23,7	0,8

Tablica 8.20 *Procijenjene vrijednosti nelinearnih pomaka ispitnih uzoraka za potres Loma Pieta_x*

Potres	a_g [*g*]	T_g [*s*]	Ispitni uzorak	T [*s*]	D_{max} [*mm*]	δ_{max} [*%*]
Loma Pieta_x	0,316	0,30	*O1*	0,56	50,5	1,8
			O1_bpm	0,21	18,9	0,7
			*O1_bpm**	0,20	18,0	0,6
			O1_cpm	0,22	19,8	0,7
			O1_bvm	0,20	18,0	0,6
			O1_cvm	0,27	24,3	0,9
			O2_cpm	0,22	19,8	0,7
			O3	0,47	42,4	1,5
			O3_bpm	0,24	21,6	0,8
			O3_cpm	0,23	20,7	0,7
			O4	0,52	46,9	1,7
			O4_bpm	0,22	19,8	0,7
			O4_cpm	0,26	23,4	0,8

Tablica 8.21 *Procijenjene vrijednosti nelinearnih pomaka ispitnih uzoraka za potres Friuli_x*

Potres	a_g [g]	T_g [s]	Ispitni uzorak	T [s]	D_{max} [mm]	δ_{max} [%]
Friuli_x	0,309	0,64	*O1*	0,56	105,3	3,8
			O1_bpm	0,21	39,5	1,4
			*O1_bpm**	0,20	37,6	1,3
			O1_cpm	0,22	41,4	1,5
			O1_bvm	0,20	37,6	1,3
			O1_cvm	0,27	50,8	1,8
			O2_cpm	0,22	41,4	1,5
			O3	0,47	88,4	3,2
			O3_bpm	0,24	45,1	1,6
			O3_cpm	0,23	43,3	1,5
			O4	0,52	97,8	3,5
			O4_bpm	0,22	41,4	1,5
			O4_cpm	0,26	48,9	1,7

Tablica 8.22 *Procijenjene vrijednosti nelinearnih pomaka ispitnih uzoraka za potres NW Kagoshima_x*

Potres	a_g [g]	T_g [s]	Ispitni uzorak	T [s]	D_{max} [mm]	δ_{max} [%]
NW Kagoshima_x	0,315	0,71	*O1*	0,56	119,0	4,2
			O1_bpm	0,21	44,6	1,6
			*O1_bpm**	0,20	42,5	1,5
			O1_cpm	0,22	46,7	1,7
			O1_bvm	0,20	42,5	1,5
			O1_cvm	0,27	57,4	2,0
			O2_cpm	0,22	46,7	1,7
			O3	0,47	99,9	3,6
			O3_bpm	0,24	51,0	1,8
			O3_cpm	0,23	48,9	1,7
			O4	0,52	110,5	3,9
			O4_bpm	0,22	46,7	1,7
			O4_cpm	0,26	55,2	2,0

Tablica 8.23 *Procijenjene vrijednosti nelinearnih pomaka ispitnih uzoraka za potres Darfield_x*

Potres	a_g [g]	T_g [s]	Ispitni uzorak	T [s]	D_{max} [mm]	δ_{max} [%]
Darfield_x	0,315	0,42	*O1*	0,56	101,4	3,6
			O1_bpm	0,21	38,0	1,4
			*O1_bpm**	0,20	36,2	1,3
			O1_cpm	0,22	39,8	1,4
			O1_bvm	0,20	36,2	1,3
			O1_cvm	0,27	48,9	1,7
			O2_cpm	0,22	39,8	1,4
			O3	0,47	85,1	3,0
			O3_bpm	0,24	43,5	1,5

			O3_cpm	0,23	41,7	1,5
			O4	0,52	94,2	3,4
			O4_bpm	0,22	39,8	1,4
			O4_cpm	0,26	47,1	1,7

Tablica 8.24 *Procijenjene vrijednosti nelinearnih pomaka ispitnih uzoraka za potres Darfield_x*

Potres	a_g [*g*]	T_g [*s*]	Ispitni uzorak	T [*s*]	D_{max} [*mm*]	δ_{max} [*%*]
Darfield_y	0,430	0,27	*O1*	0,56	61,8	2,2
			O1_bpm	0,21	23,2	0,8
			*O1_bpm**	0,20	22,1	0,8
			O1_cpm	0,22	24,3	0,9
			O1_bvm	0,20	22,1	0,8
			O1_cvm	0,27	29,8	1,1
			O2_cpm	0,22	24,3	0,9
			O3	0,47	51,9	1,8
			O3_bpm	0,24	26,5	0,9
			O3_cpm	0,23	25,4	0,9
			O4	0,52	57,4	2,0
			O4_bpm	0,22	24,3	0,9
			O4_cpm	0,26	28,7	1,0

8.5. Klasifikacija oštetljivosti i oštećenja prema *EMS-98* skali

Prilikom klasifikacije oštećenja ispitnih uzoraka, a sukladno promatranim graničnim stanjima, primijenjena je *European Macroseismic Scale 1998* (*EMS-98*) [83]. Navedenom skalom dana je opisna klasifikacija razreda oštetljivosti (eng. *vulnerability class*) i razine oštećenja (eng. *damage grade*) različitih tipova konstrukcijskih sustava. Razredi oštetljivosti konstrukcijskih sustava definirani su u odnosu na vrstu konstrukcije i primijenjeni materijal. Razlikuje se šest razreda oštetljivost definiranih slovima od A do F sukladno očekivanom ponašanju prilikom djelovanja potresa. Npr., razred oštetljivosti A definira visoku razinu oštetljivosti i vrlo loše ponašanje konstrukcije prilikom djelovanja potresa (Tablica 8.25). Razine oštetljivosti definirane su u odnosu na opažena ponašanja konstrukcija prilikom potresa dok sama klasifikacija konstrukcijskih sustava u određeni razred oštetljivosti predstavlja najvjerojatniji scenarij ponašanja konstrukcije prilikom potresa. S obzirom na to da je ponašanje konstrukcijskih sustava prilikom djelovanja potresa, uz sami intenzitet potresa, pod dominantnim utjecajem mehaničkih čvrstoća primijenjenih materijala, kvaliteti i načina izvedbe te razine projektirane seizmičke otpornosti, a sama klasifikacija temeljena na postojećim saznanjima, svakom je razredu oštetljivosti pridruženo područje vjerojatnog i manje vjerojatnog odstupanja.

Tablica 8.25 *Veza između razreda oštetljivosti i ponašanja konstrukcija pri djelovanju potresa prema EMS-98* [83]

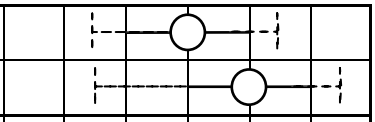
Razred oštetljivosti	*A*	*B*	*C*	*D*	*E*	*F*
Oštetljivost	Visoka	Srednje visoka	Srednja	Srednje niska	Niska	Vrlo niska
Ponašanje	Vrlo loše	Loše	Umjereno	Dobro	Vrlo dobro	Izvrsno

Iako izvorni dokument ne sadrži klasifikaciju razreda oštetljivosti armirano-betonskih okvira sa zidanim ispunom, ne ovisno o razini projektirane seizmičke otpornosti, u literaturi se mogu pronaći proširenja i prilagodbe tzv. *tablice oštetljivosti*. Tako npr., Schwarz i dr [84] sukladno kriterijima klasifikacije prema *EMS-98*, uz primjenu baze podataka *World Housing Encyclopedia,* daju, a u ovisnosti o razini projektirane seizmičke otpornosti, klasifikaciju armirano-betonskih okvira sa zidanim ispunom prema Tablici 8.26 uz naznačena područje vjerojatnih i manje vjerojatnih odstupanja.

Kao što je vidljivo iz Tablice 8.26, pridruženi razredi oštetljivosti pokrivaju relativno veliko područje. Razlog tomu može se povezati s različitim brojem etaža dokumentiranih konstrukcija kao i razlikama u konstrukcijskom oblikovanju i mehaničkim karakteristikama primijenjenih materijala. Povrh toga, navedeno upućuje na složenost postupka klasifikacije razreda oštetljivosti konstrukcija kao i generiranje rafinirane sheme klasifikacije. Potrebno je napomenuti da je u prikazanoj tablici za pojedine konstrukcijske sustave klasifikacija razreda oštetljivosti izvršena isključivo na osnovi jednog izvješća.

Tablica 8.26 *Razredi oštetljivosti konstrukcijskih sustava prema Schwarzu i dr.* [84]

Tip nosivog sustava		Broj konstr.	Broj etaža	Razred oštetljivosti					
				A	B	C	D	E	F
Klasifikacija prema *EMS-98*	Okviri bez seizmičke otpornosti	-	-						
	Okviri s umjerenom seizmičkom otpornosti								
	Okviri s visokom seizmičkom otpornosti								
	Ziđe bez seizmičke otpornosti								
	Ziđe s umjerenom seizmičkom otpornosti								
	Ziđe s visokom seizmičkom otpornosti								
Okviri	Neduktilni s nearmiranim ispunom	15	2 - 18						
			1 - 3						
			4 - 6						
			> 6						
	Duktilni s nearmiranim ispunom	6	3 - 20						
		1	1 - 3						
		3	4 - 6						

	Dvojni sustavi – okviri s posmičnim zidovima	2	> 6	
		4	4 - 30	
Zidovi	Okviri s *in – situ* izvedenim posmičnim zidovima	5	4 - 35	
	Okviri s predgotovljenim posmičnim zidovima	1	5 - 9	
Predgotovljeni beton	Predgotovljeni zidni paneli	3	4 - 11	
	Prednapeti okviri s posmičnim zidovima	1	5 - 10	
	Okviri	3	5 - 12	
	Posmični zidovi izvedeni *in – situ*	1	4 - 18	

◯ - najvjerojatniji razred oštetljivosti —— - područje vjerojatnosti - - - - - iznimni slučajevi

Prilikom definiranja oštećenja *EMS-98,* razlikuje se pet opisno definiranih razina (eng. *damage grade*) temeljenih na gruboj podjeli konstrukcija na zidane i armirano-betonske, a u odnosu na konstruktivne i nekonstruktivne elemente. Kao i u slučaju klasifikacije razreda oštetljivosti, također nedostaje opis oštećenja armirano-betonskih okvira sa zidanim ispunom sukladno definiranim razinama.

Međutim, Schwarz i dr. [84], uz prijedlog pridruživanja razreda oštetljivosti armirano-betonskim okvirima sa zidanim ispunom, predlažu opisno i klasifikaciju oštećenja navedenog sustava u odnosu na *EMS-98* definirane razine. Kao i kod *EMS-98,* autori razlikuju oštećenje konstruktivnih i nekonstruktivnih elemenata gdje je ispun tretiran kao nekonstruktivni element. Povrh kvantitativnog opisa oštećenja sukladno *EMS-98*, autori daju i kvalitativan opis oštećenja ispuna na temelju analitičkih modela procjene nosivosti istog. Analitički modeli procjene nosivosti ispuna temeljeni su na mehanizmima sloma istog (*Poglavlje 2*). Potrebno je naglasiti da autori ne promatraju utjecaj vanravninske stabilnosti ispuna prilikom predložene klasifikacije razina oštećenja (RO). Detaljan prikaz kvantitativnog i kvalitativnog opisa razina oštećenja armirano-betonskih okvira sa zidanim ispunom dan je Tablicom 8.27.

Tablica 8.27 *Kvantitativan i kvalitativan opis razina oštećenja armiranobetonskih okvira sa zidanim ispunom prema Schwarzu i dr. [84]*

RO	Element	Opis oštećenja	Položaj	Oštećenje
1	Okvir	Pojava pukotina na površinskoj obradi elemenata	Nije definiran	Ne
	A-b zid	Neznačajne pukotine	U podnožju	
	Analitički opis	*Dosezanje vlačne čvrstoće betona*		
	Ispun	Neznačajne pukotine	Nije definirano	Neznatno
	Analitički opis	*Odvajanje ispuna od stupova okvira*		
2	Okvir	Pukotine na stupovima i gredama	Nije definirano	Neznatno
	A-b zid	Pukotine	(U podnožju)	
	Analitički opis	*Tečenje armaturnog čelika*		
	Ispun	Pukotine: otpadanje površinske	U uglovima	Umjereno

		obrade, pojava drobljenja, ispadanje morta		
	Analitički opis	*Dijagonalni posmični slom, horizontalno klizanje, drobljenje uglova*		Umjereno do značajno
3	Okvir	Pukotine u čvorovima okvira, drobljenje zaštitnog sloja betona, izvijanje armature	U podnožju	Umjereno
	A-b zid	Pukotine na spojevima zidova, drobljenje zaštitnog sloja betona, izvijanje armature	U čvorovima	
	Analitički opis	*Maksimalna deformacija ε_{cu} pri naprezanju $f_c = 0$*		
	Ispun	Značajne pukotine, slom ispune	(U pojedinim rasponima)	Značajno
	Analitički opis	*Drobljenje uglova, slom*		Značajno do vrlo značajno
4	Okvir	Značajne pukotine popraćene drobljenjem betona i slomom armature; naginjanje stupova	(U podnožju), slom nekolicine stupova ili jedne od gornjih etaža	Značajno
	A-b zid	Značajne pukotine popraćene drobljenjem betona i slomom armature		
	Analitički opis	*Degradacija jezgre poprečnog presjeka*		
	Ispun	-		Vrlo značajno
	Analitički opis	-		Slom
5	Okvir	Slom	pojava meke etaže ili rušenje dijelova konstrukcije	Vrlo značajno
	A-b zid	Slom		
	Analitički opis	*Otkazivanje nosivosti armature ili betona*		

8.5.1. Klasifikacija razreda oštetljivosti uzoraka

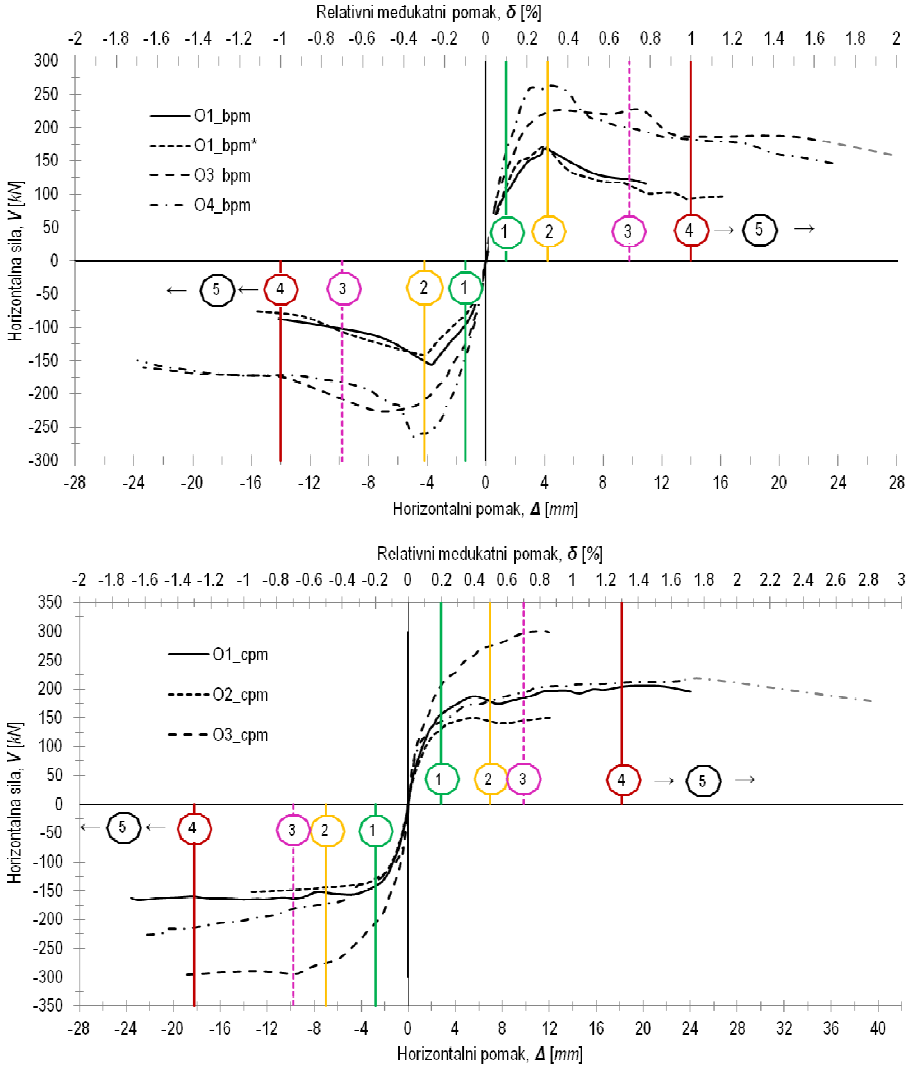
Sukladno geometrijskim karakteristikama ispitnih uzoraka (jedna etaža) i predloženim pridruženim razredima oštetljivosti prema Tablici 8.25, za sve je ispitne uzorke usvojen razred oštetljivosti B. Iako prema Tablici 8.26, a sukladno geometrijskim karakteristikama, razred oštetljivosti ispitnih uzoraka djelomično prelazi i u C razred uslijed relativno velikog raspona vjerojatnosti ošetljivosti i jednostavnosti razlučivanja usvojena je kao najvjerojatnija razina oštetljivosti razred B. Bez obzira na usvojeni razred oštetljivosti, relativno velik raspon vjerojatnosti oštetljivosti promatranog sustava prema Tablici 8.26 upućuje da ponašanje promatranog sustava pri djelovanju potresa varira od vrlo lošeg pa do vrlo dobrog. Široko područje ponašanja ne čudi s obzirom na brojne konstrukcijske nedostatke neduktilnih armirano-betonskih okvira i nelinearnu krtu prirodu ispuna.

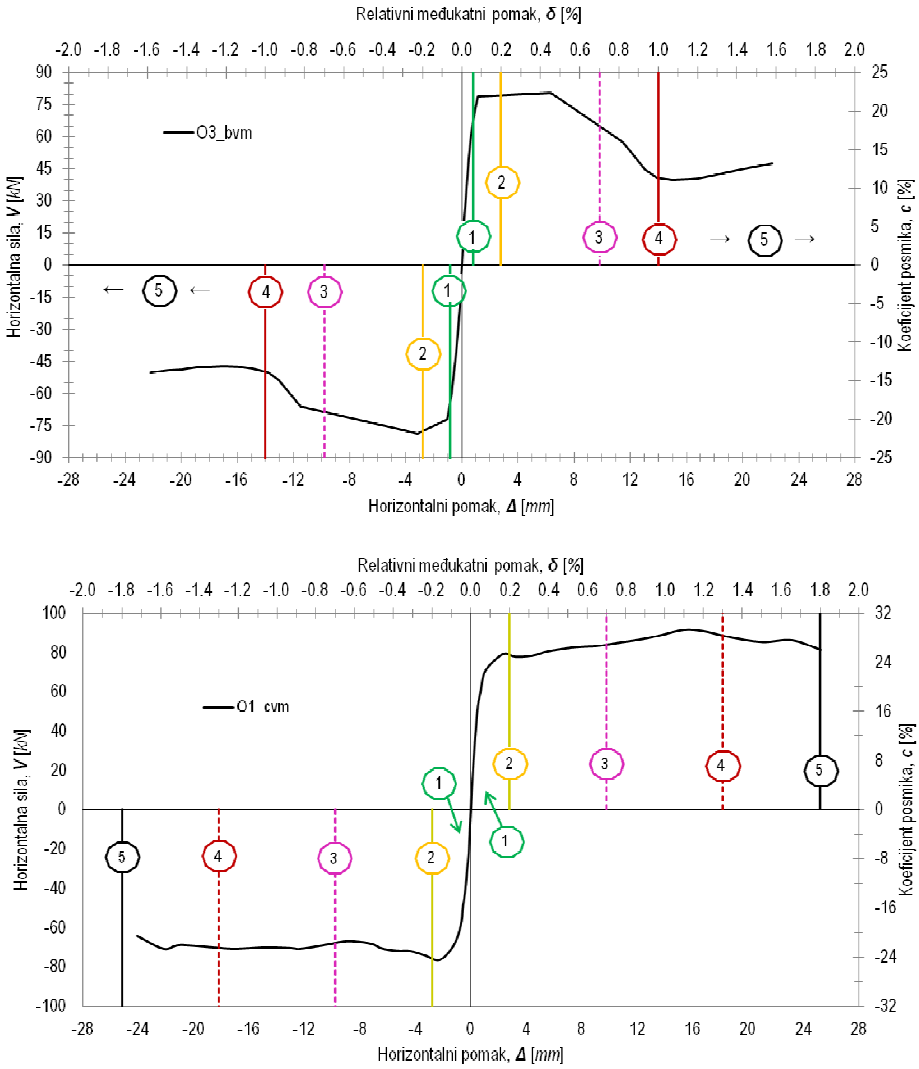
8.5.2. Klasifikacija razina oštećenja sustava uokvireno ziđe

Klasifikacija razina oštećenja uzoraka izvršena je u skladu s graničnim stanjima i prema Tablici 8.27. Shematski prikaz razina oštećenja dan je Slikom 8.8. S obzirom na brojčanu razliku između promatranih graničnih stanja i razina oštećenja, potrebno je definirati dodatne dvije vrijednosti relativnog međukatnog pomaka uzoraka. Prema opisu razina oštećenja danih u Tablici 8.27, graničnom stanju pojave prve značajne pukotine u ispunu pridružena je razina oštećenja 1, graničnom stanju pojave dominantnog mehanizma sloma ispuna razina oštećenja 2, a graničnom stanju pred rušenje razina oštećenja 4. Pridružene razine oštećenja definirane su na temelju vizualnih opažanja i analitičkih modela koji proizlaze iz njih (*Poglavlje 7*). Dva dodatna područja ponašanja, u pogledu razina oštećenja 3 i 5, također su određena na osnovi vizualnih opažanja. Tako je, za razinu oštećenja 3 usvojena vrijednost relativnog međukatnog pomaka u iznosu od 0,7%. Navedena vrijednost usvojena je za sve uzorke, odnosno za sve tlačne čvrstoće ispuna, a definirana je prvenstveno u odnosu na opažena oštećenja okvira uzoraka. Odabir okvira, kao mjerodavnog elementa sustava prilikom definiranja navedene razine oštećenja, proizlazi iz ovisnosti razine oštećenja ispuna o zidnom elementu. Pri usvojenoj su vrijednosti relativnog međukatnog pomaka u ispunu prisutne brojne znatne pukotine neovisno o vrsti zidnog elementa. Međutim, same se razine oštećenja ispuna razlikuju. Tako se npr., kod ispuna izvedenih od šupljih zidnih elemenata, mogu uočiti područja zahvaćena drobljenjem dok kod ispuna izvedenih od punih zidnih elemenata takva područja izostaju. Razinu oštećenja 5 nije moguće definirati brojčanom vrijednošću relativnog međukatnog pomaka, a definirana je s područjem ponašanja nakon pojave graničnog stanja pred rušenje. Iako je u Tablici 8.27 izostavljen opis oštećenja ispuna pri razini 5, tj. smatra se da je ispun toliko oštećen da se njegovo postojanje može zanemariti, kod uzoraka s ispunom izvedenim od punih zidnih elemenata uočeno je da prvo okviru otkazuje nosivost, a ispun još uvijek posjeduje određenu razinu horizontalne nosivosti i zadržava relativno dobru kompaktnost. Potrebno je napomenuti da su granična stanja, a samim time i razine oštećenja, kod uzoraka kod kojih je ispun izvedena vapnenim mortom, temeljena na osnovi ponašanja jednog uzorka. Tako je za ispitni uzorak kod kojeg je ispun izveden od glinene opeke povezane vapnenim mortom moguće definirati razinu oštećenja 5 brojčanom vrijednošću relativnog međukatnog pomaka. Međutim, dobivena se vrijednost treba uzeti s rezervom iz prethodno navedenog razloga. Osim toga, za razliku od svih ostalih uzoraka tu je razina oštećenja 5 definirana graničnim stanjem pred rušenje. Radi jednostavnosti razlučivanja razina oštećenja za razinu 4, usvojena je vrijednost relativnog međukatnog pomaka određena na osnovi uzoraka kod kojih je ispun izveden od glinene opeke povezane mortom opće namjene. Navedena pretpostavka u skladu je s opaženim oštećenjem uzorka i opisom danim u Tablici 8.27. S obzirom na to da je kod promatranog uzorka granično stanje pojave prve značanje pukotine u

ispunu istovjetno graničnom stanju dominantnog mehanizma sloma ispuna, za razinu oštećenja 1, odabrana je vrijednost relativnom međukatnog pomaka manja od 0,2%.

Vrijednosti relativnih međukatnih pomaka pri određenim razinama oštećenja izravno su ovisna o tlačnoj čvrstoći ispuna kao i kod graničnih stanja. Prikaz razina oštećenja, uz pripadne vrijednosti relativnih međukatnih pomaka, dan je Tablicom 8.28.





Slika 8.8 *Shematski prikaz razina oštećenja uzoraka uokvirenog zida*

Tablica 8.28 *Prikaz razina oštećenja i pripadnih vrijednosti relativnog međukatnog pomaka ispitnih uzoraka, u ovisnosti o tlačnoj čvrstoći ispuna*

Tlačna čvrstoća ispuna (*cpm*)	f_i = 5,2 N/mm²				
Razina oštećenja	1	2	3	4	5
Relativni međukatni pomak, [%]	0,2	0,5	0,7	1,3	> 1,3
Tlačna čvrstoća ispuna (*bpm*)	f_i = 4,6 N/mm²				
Razina oštećenja	1	2	3	4	5
Relativni međukatni pomak, [%]	0,1	0,3	0,7	1,0	> 1,0
Tlačna čvrstoća ispuna (*cvm*)	f_i = 3,5 N/mm²				
Razina oštećenja	1	2	3	4	5
Relativni međukatni pomak, [%]	0,2 <	0,2	0,7	1,3	1,8
Tlačna čvrstoća ispuna (*bvm*)	f_i = 0,8 N/mm²				
Razina oštećenja	1	2	3	4	5
Relativni međukatni pomak, [%]	0,06	0,2	0,7	1,0	> 1,0

S obzirom na jednoznačno definiranje razina oštećenja, pomoću relativnih međukatnih pomaka, čini se prikladnim svakoj razini pripisati i određeno područje. S obzirom da je procjena razine oštećenja prema *EMS-98* većim dijelom temeljena na subjektivnoj procjeni, gdje je oštećenje svake razine nezamjetno opisano, svakoj je razini pridruženo pripadno područje koje je određeno u iznosu od jedne polovine intervala vrijednosti relativnog međukatnog pomaka susjednih razina. Usvojena pridružena područja oštećenja pojedinih razina proizlaze iz eksperimentalnih opažanja. Prikaz područja određenih razina oštećenja dan je Tablicom 8.29 također u ovisnosti o tlačnoj čvrstoći ispuna.

Tablica 8.29 *Prikaz područja oštećenja ispitnih uzoraka, s pripadnim vrijednostima relativnih međukatnih pomaka, u ovisnosti o tlačnoj čvrstoći ispuna*

Tlačna čvrstoća ispuna (*cpm*)	f_i = 5,2 *N/mm²*				
Područje oštećenja	1	2	3	4	5
Relativni međukatni pomak, [%]	0,1 < δ ≤ 0,35	0,35 < δ ≤ 0,6	0,6 < δ ≤ 1,0	1,0 < δ ≤ 1,3	δ > 1,3
Tlačna čvrstoća ispuna (*bpm*)	f_i = 4,6 *N/mm²*				
Područje oštećenja	1	2	3	4	5
Relativni međukatni pomak, [%]	0,05 < δ ≤ 0,2	0,2 < δ ≤ 0,5	0,5 < δ ≤ 0,85	0,85 < δ ≤ 1,0	δ > 1,0
Tlačna čvrstoća ispuna (*cvm*)	f_i = 3,5 *N/mm²*				
Područje oštećenja	1	2	3	4	5
Relativni međukatni pomak, [%]	0,2 ≤ δ	0,2 < δ ≤ 0,45	0,45 < δ ≤ 1	1,0 < δ ≤ 1,55	δ > 1,55
Tlačna čvrstoća ispuna (*bvm*)	f_i = 0,8 *N/mm²*				
Područje oštećenja	1	2	3	4	5
Relativni međukatni pomak, [%]	0,03 < δ ≤ 0,1	0,1 < δ ≤ 0,45	0,45 < δ ≤ 0,85	0,85 < δ ≤ 1,0	δ > 1,0

S ciljem usporedbe razine oštećenja sustava uokvireno ziđe i čistog okvirnog sustava, potrebno je definirati i razine oštećenja uzoraka praznih okvira. Same razine oštećenja definirane su na osnovi vizualnih opažanja i Tablice 8.27. Jednako kao i kod uokvirenog ziđa, razine oštećenja praznih okvira također se mogu definirati u odnosu na granična stanja. Osnovna razlika u razina oštećenja promatranih sustava očituje se pri razini 1 i 5. Razina 1 kod praznih okvira definirana je pojavom oštećenja površinske obrade (žbuke), a ne samih nosivih elemenata. S obzirom da ispitni uzorci nisu bili površinski obrađeni, onemogućena je točna ocjena vrijednosti relativnog međukatnog pomaka, stoga je za sve tipove okvira usvojena vrijednost u iznosu od 0,1%. Za razinu oštećenja 2 usvojeno je granično stanje pojave prvih značajnih pukotina, a za razinu 3 granično stanje pojave dominantnog mehnizma sloma. Vrijednost relativnog međukatnog pomaka, pri razini oštećenja 4, određena je na temelju vizualnih opažanja. Osnovni uvjet definiranja oštećenja razinom 4 pojava je drobljenja betona. Razina 5 određena je pojavom sloma stupa okvira. Pripadna područja razina oštećenja definirana su kao i kod

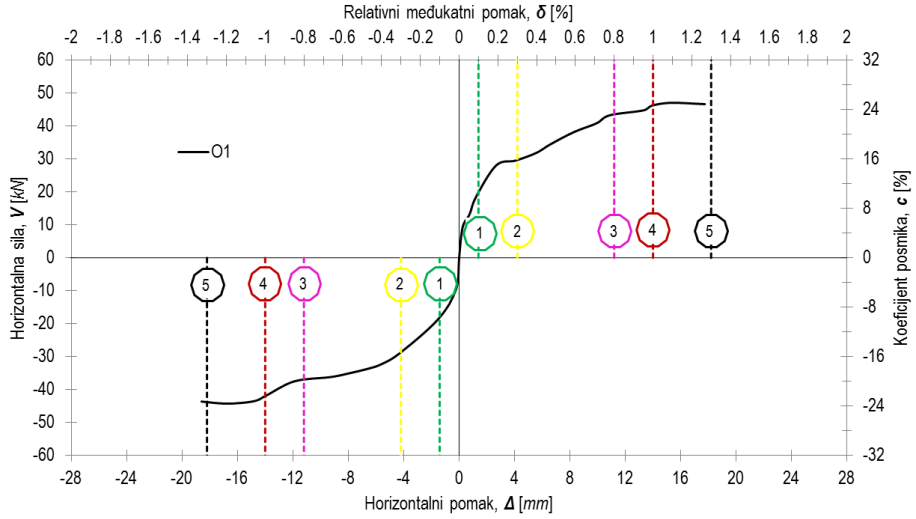
uokvirenog ziđa, svakoj razini pridruženo je područje u iznosu od jedne polovine intervala vrijednosti relativnog međukatnog pomaka susjednih razina. Razine oštećenja i pripadne vrijednosti relativnih međukatnih pomaka prikazane su u Tablici 8.30, a pripadna područja Tablicom 8.31. Shematski prikaz razina oštećenje uzoraka praznih okvira dan je Slikom 8.9.

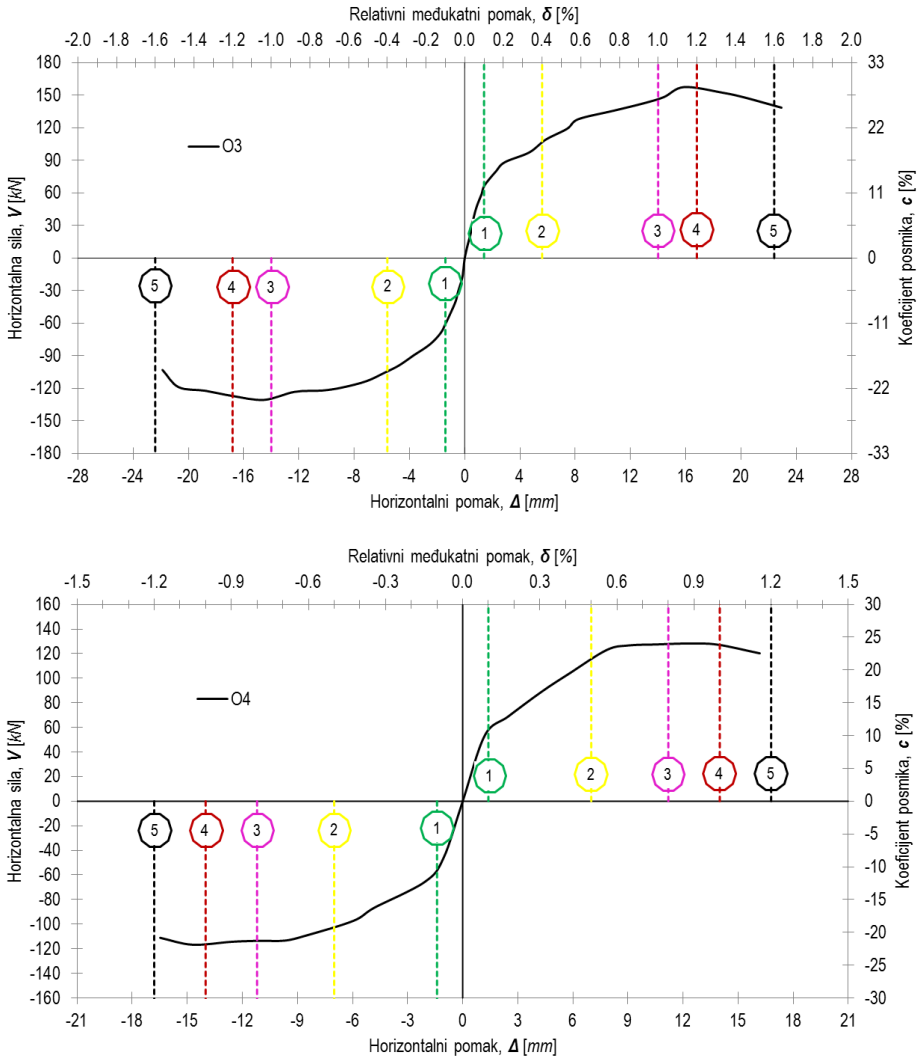
Tablica 8.30 *Prikaz razina oštećenja i pripadnih vrijednosti relativnog međukatnog pomaka uzoraka praznih okvira*

Tip okvira	*O1*				
Razina oštećenja	1	2	3	4	5
Relativni međukatni pomak, [%]	0,1	0,3	0,8	1,0	1,3
Tip okvira	*O3*				
Razina oštećenja	1	2	3	4	5
Relativni međukatni pomak, [%]	0,1	0,4	1,0	1,2	1,6
Tip okvira	*O4*				
Razina oštećenja	1	2	3	4	5
Relativni međukatni pomak, [%]	0,1	0,5	0,8	1,0	1,2

Tablica 8.31 *Prikaz razina oštećenja i pripadnih vrijednosti relativnog međukatnog pomaka uzoraka praznih okvira*

Tip okvira	*O1*				
Područje oštećenja	1	2	3	4	5
Relativni međukatni pomak, [%]	$0,05 < \delta \leq 0,2$	$0,2 < \delta \leq 0,55$	$0,55 < \delta \leq 0,9$	$0,9 < \delta \leq 1,15$	$\delta > 1,15$
Tip okvira	*O3*				
Područje oštećenja	1	2	3	4	5
Relativni međukatni pomak, [%]	$0,05 < \delta \leq 0,25$	$0,25 < \delta \leq 0,7$	$0,7 < \delta \leq 1,1$	$1,1 < \delta \leq 1,4$	$\delta > 1,4$
Tip okvira	*O4*				
Područje oštećenja	1	2	3	4	5
Relativni međukatni pomak, [%]	$0,05 < \delta \leq 0,3$	$0,3 < \delta \leq 0,65$	$0,65 < \delta \leq 0,9$	$0,9 < \delta \leq 1,1$	$\delta > 1,1$





Slika 8.9 *Shematski prikaz razina oštećenja uzoraka praznih okvira*

8.6. Ocjena oštećenja uzoraka u odnosu na odabrane zapise potresa

Ocjena oštećenja ispitnih uzoraka u odnosu na odabrane zapise potresa prikazana je Tablicama od 8.32 do 8.34 u ovisnost o proračunskom ubrzanju tla. Na temelju prikazanih rezultata može se zaključiti da se dodavanjem ispuna u neduktilne armirano-betonske okvire smanjuje razina oštećenja konstrukcije. Navedeno je posebno naglašeno u slučaju potresa kod kojih je razina oštećenja praznog okvira pri projektnim ubrzanjima tla od 0,1 do 0,2 *g* definirana razinom 5. Iako kod potresa s projektnim ubrzanjem od 0,3 *g* utjecaj ispuna na smanjenje oštećenja nije posebno naglašen, treba imati na umu da su procijenjeni nelinearni pomaci praznih okvira znatno veći od graničnih pomaka pri slomu (u nekim slučajevima i nekoliko puta) dok su procijenjeni nelinearni pomaci uzoraka s ispunom u većini slučajeva u području ponašanja koje odgovara rezidualnoj nosivosti. Iako u navedenom području dolazi do sloma jednog od elemenata sustava, čime je izgubljena cjelovitost i kompaktnost konstrukcije, preostali je element i dalje sposoban preuzimati horizontalno opterećenje što upućuje da ispun znatno

doprinosi osiguranju globalne stabilnosti konstrukcije prilikom djelovanja snažnih potresa. Osim doprinosa ispuna globalnoj stabilnosti, smanjenje pomaka konstrukcije osigurava i smanjenje oštećenja nematerijalnih dobara.

Prema dobivenim rezultatima vidljiv je i naglašen utjecaj karakterističnog perioda osciliranja tla na razine oštećenja gdje su u pravilu pri većim vrijednostima dobivene i veće razine oštećenja. S druge strane, čini se da projektno ubrzanje tla nije prikladna mjera ocjene oštećenja. Navedeno se posebno očituje u slučaju potresa Campano Lucano_y i L'Aquila_y. Iako je projektno ubrzanje potresa L'Aquila_y približno 2,7 puta veće, procijenjeni nelinearni pomaci daju jednake razine oštećenja uzoraka.

Uočena smanjenja oštećenja upućuju na mogućnost primjene zidanog ispuna kao sredstva ojačanja neduktilnih armirano-betonskih okvira. Iako rezultati prikazani tablicama ne daju prednost pojedinom tipu ispuna, treba uzeti u obzir utjecaj tipa zidnog elementa na ponašanje sustava nakon pojave dominantnog mehanizma sloma ispuna (nivo oštećenja 2). Naime, progresivni porast oštećenja ispuna izvedenog od šupljih zidnih elemenata daje prednost primjeni punih zidnih elemenata neovisno o vrsti morta. Navedeno se može opravdati i činjenicom da oštećenje ispuna izvedenog od šupljih zidnih elemenata koje je dobrim dijelom lokalizirano uz okvire značajno doprinosi gubitku vanravninske stabilnosti istog. S druge strane, neovisno o razini oštećenja, ispun izveden od punih zidnih elemenata zadržava relativno dobru kompaktnost čime se smanjuje vjerojatnost gubitka vanravninske stabilnosti.

Tablica 8.32 *Ocjena nivoa oštećenja uzoraka za zapise potresa kompatibilne s EC8 spektrom za a_g=0,1*

Ispitni uzorak	South Icelana_y	Izmit_y	Alkion_y	Campano Lucano_x	Spitak_y	Lazio Abruzo_x	Campano Lucano_y
O1	4	4	3	2	5	2	5
O1_bpm	2	2	2	1	2	1	3
*O1_bpm**	2	2	2	1	2	1	3
O1_cpm	2	2	1	1	2	1	3
O1_bvm	2	2	2	2	2	2	3
O1_cvm	3	2	2	1	3	2	3
O2_cpm	2	2	1	1	2	1	3
O3	3	3	3	2	3	2	4
O3_bpm	2	2	2	1	3	1	3
O3_cpm	2	2	2	1	2	1	3
O4	4	3	3	1	4	2	5
O4_bpm	2	2	2	1	2	1	3
O4_cpm	2	2	2	1	2	1	3

Tablica 8.33 *Ocjena nivoa oštećenja ispitnih uzoraka za zapise potresa kompatibilne s EC8 spektrom za a_g=0,2*

Ispitni uzorak	Northrid_y	Kyushu_x	EMILIA_x	Christch_x	EMILIA_x1	EMILIA_y	Kyushu_y
O1	5	5	5	5	3	5	5
O1_bpm	3	4	3	5	2	2	5
*O1_bpm**	3	4	3	5	2	2	5
O1_cpm	2	3	3	4	1	2	4
O1_bvm	3	4	3	5	2	3	5
O1_cvm	3	4	4	4	2	3	4
O2_cpm	2	3	3	4	1	2	4
O3	4	5	5	5	2	5	5
O3_bpm	3	4	4	5	2	3	5
O3_cpm	2	3	3	4	1	2	4
O4	5	5	5	5	3	5	5
O4_bpm	3	4	3	5	2	3	5
O4_cpm	3	4	3	5	2	3	5

Tablica 8.34 *Ocjena nivoa oštećenja ispitnih uzoraka za zapise potresa kompatibilne s EC8 spektrom za a_g=0,3*

Ispitni uzorak	Imperial Valley_y	L'Aquila_y	Loma Pieta_x	Friuli_x	Kagoshima_x	Darfield_x	Darfield_y
O1	5	5	5	5	5	5	5
O1_bpm	5	3	3	5	5	5	3
*O1_bpm**	5	3	3	5	5	5	3
O1_cpm	4	3	3	5	5	5	3
O1_bvm	5	3	3	5	5	5	3
O1_cvm	5	4	3	5	5	5	4
O2_cpm	4	3	3	5	5	5	3
O3	5	5	5	5	5	5	5
O3_bpm	5	3	3	5	5	5	4
O3_cpm	5	3	3	5	5	5	3
O4	5	5	5	5	5	5	5
O4_bpm	5	4	3	5	5	5	4
O4_cpm	5	4	3	5	5	5	4

9. ZAKLJUČAK I PRIJEDLOZI ZA DALJNJA ISTRAŽIVANJA

9.1. Osvrt

Okviri sa zidanim ispunom najzastupljeniji su oblik nosivog sustava pri oblikovanju građevina. Međutim, njihovo ponašanje prilikom djelovanja horizontalnog opterećenja najmanje je istraživano i shvaćeno u odnosu na druge nosive sustave. Dugo su vremena te konstrukcije izvođene i projektirane bez prikladnog znanja o njihovom ponašanju što je prilikom djelovanja snažnih potresa za posljedicu imalo katastrofalne socijalne i ekonomske gubitke. Unatoč relativno velikom broju istraživanja još uvijek nije postignut dogovor o tome je li utjecaj ispuna na ponašanje sustava okvir s ispunom pri djelovanju potresa pozitivan ili negativan. Dodatne nesigurnosti, kao što su izostanak pouzdanog modela proračuna nosivosti i krutosti sustava te velik broj utjecajnih čimbenika, dovele su do zanemarivanja utjecaja ispuna na globalno ponašanje kako u praksi tako i u seizmičkim propisima. Iako je u modernim seizmičkim propisima prepoznat utjecaj ispuna, ona se i dalje u većini slučajeva tretira kao nekonstruktivni element, a interakcija okvira i ispuna se ili u potpunosti zanemaruje ili ostvaruje primjenom modela tlačne dijagonale. Većinom su dane smjernice za sprječavanje nepoželjnih utjecaja ispuna u obliku oblikovanja armature elemenata okvira.

Poseban slučaj predstavljaju armirano-betonski okviri projektirani prvenstveno za prijenos gravitacijskog opterećenja. Takva se vrsta okvira u literaturi naziva neduktilnim ili neseizmički projektiranim okvirima, a svojstveno im je oblikovanje armature kojim nije osigurano duktilno ponašanje konstrukcije. Navedeni sustav tvori većinu graditeljskog fonda u područjima srednje i visoke seizmičnosti diljem svijeta te kao takav zahtijeva posebnu pozornost. Potpuni izostanak seizmičkih propisa i smjernica te mogućnost pojave različitih mehanizama sloma ispuna čine iznimno složenim zadatkom procjenu ponašanja. Karakteristike odgovora sustava ovise o obliku sloma ispuna posebno u području nakon dosezanja maksimalne nosivosti. Općenito, mogu se razlikovati četiri područja ponašanja sustava okvir s ispunom. U prvom području konstrukcija se ponaša monolitno i gotovo linearno sve do pojave prvih značajnih pukotina u ispunu nakon čega dolazi do smanjenja krutosti. Nakon pojave prvih značajnih pukotina, a prije maksimalne nosivosti sustava, definirano je drugo područje ponašanja. U navedenom je području ponašanje okarakterizirano interakcijom između okvira i ispuna iako su elementi većinom neoštećeni. Treće je područje definirano maksimalnom i rezidualnom nosivošću sustava, a svojstvena mu je pojava znatnog oštećenja ispuna. Četvrto područje ponašanja definirano je pojavom sloma jednog od elemenata sustava. Potrebno je naglasiti da slom jednog od elemenata sustava ne označava i globalni slom. Nosivost okvira s ispunom pri navedenim graničnim stanjima uobičajeno se definira u odnosu na mehanizam sloma ispuna. Pojava određenog mehanizma

sloma ispuna u izravnoj je vezi s mehaničkim karakteristikama i naponskim stanjem u istom. Utjecaj pojedinih čimbenika na pojavu određen mehanizma sloma ispuna opisan je u *Poglavlju 2*.

Iako je navedena podjela područja ponašanja okvira s ispunom uobičajena u literaturi, primjećuje se kako nedostaje općeniti dogovor o metodologiji definiranja graničnih stanja sustava koja omeđuju područja ponašanja. Osim nedostatka navedenog konsenzusa, uočen je i nedostatak prikladnih analitičkih modela procjene horizontalne nosivosti pri pojedinim graničnim stanjima. Navedeno je osnovna motivacija provedbe istraživanja.

S ciljem jasnijeg razlučivanja utjecaja pojedinih parametara sustava okvir s ispunom na njegovo ponašanje prilikom djelovanja potresa te njihove kvantifikacije, provedena je eksperimentalna i analitička analiza.

Eksperimentalno istraživanje podijeljeno je u dvije faze. U prvoj je fazi provedeno ispitivanje osnovnih mehaničkih karakteristika materijala primijenjenih tijekom izvedbe uzoraka dok je u drugoj fazi provedeno modelsko ispitivanje jednorasponskih, jednoetažnih uzoraka neduktilnih armirano-betonskih okvira sa zidanim ispunom. Karakteristike armirano-betonskih okvira i zidanog ispuna odabrane su u skladu s inženjerskom praksom vremena prije donošenja modernih seizmičkih propisa. S obzirom na veliku varijaciju mehaničkih i geometrijskih karakteristika promatranog sustav, odabrani su parametri podijeljeni u ovisnosti o elementu sustava. Tako je promatrana skupina parametara koja se odnosi na ispun i skupina koja se odnosi na armiranobetonske okvire. Parametri ispuna definirani su mehaničkim karakteristikama dok je varijacija ostvarena primjenom dviju vrsta zidnih elemenata i mortova. Ukupno su ispitane četiri vrste ispuna. Parametri okvira definirani su različitim geometrijskim karakteristikama elemenata i različitim koeficijentima armiranja uzdužnom i poprečnom armaturom. Opis karakteristika ispitnih uzoraka opisan je u *Poglavlju 3* dok je prikaz mehaničkih karakteristika primijenjenih materijala opisan u *Poglavlju 4*.

Modelska ispitivanja provedena su na ukupno 14 jednorasponskih, jednoetažnih uzoraka. Mjerilo modela i geometrijske karakteristike odabrane su na temelju geometrijskog kapaciteta reaktivnog čeličnog okvira. Za prototip modela odabran je srednji raspon prve etaže zamišljene višeetažne zgrade gdje se javljaju maksimalna vertikalna (gravitacijska) i horizontalna opterećenja uslijed djelovanja potresa. Prototip je raspona 4 *m* i visine od 3 *m*, a modeli su skalirani u mjerilu 1:2. Prilikom izvedbe modela poštivani su uvjeti zakona sličnosti gdje se podudarnost dvaju tijela različitih dimenzija ostvaruje ispunjavanjem uvjeta geometrijske i materijalne sličnosti. Izvedba modela opisana je u *Poglavlju 3*. Podjela modela u skupine izvršena je u odnosu na tip okvira. Ispitivanje modela izvršeno je pod konstantnim vertikalnim i promjenjivim horizontalnim cikličkim opterećenjem. Kontrola unosa horizontalnog opterećenja izvršena je na dva načina. U području malih deformacija kontrolirana je sila, a

nakon toga pomak. Svaki korak opterećenja nanošen je u dvama ciklusima kako bi se obuhvatio utjecaj degradacije na odgovor uzoraka. Većina uzoraka ispitana je do sloma kako bi se pokrila rubna područja ponašanja. Tijekom ispitivanju mjereni su horizontalni pomaci uzoraka u polovini visine grede te horizontalno i vertikalno opterećenje. Svi su uzorci opremljeni istom opremom uz jednak raspored mjernih instrumenata. Podatci s mjernih uređaja prikupljani su kontinuirano u vremenu pomoću sustava *DEWE-BOOK* uz *DEWESoft* softversku podršku. Pojava i širenje pukotina praćena je vizualno uz kontrolu prostornim optičkim mjernim sustavom *ARAMIS*. Opis opreme ispitnih uzoraka opisan je u *Poglavlju 6*.

Prilikom analize rezultata provedenih istraživanja, promatran je utjecaj odabranih parametara na konstrukcijske i dinamičke karakteristike te oblik sloma ispitnih uzoraka. Konstrukcijske karakteristike su definirane nosivošću i krutošću ispitnih uzoraka dok su dinamičke karakteristike promatrane kroz disipaciju energije, prigušenje i osnovni period osciliranja. Za svaki su uzorak, grafički ili tablično, posebno prikazane vrijednosti promatranih karakteristika. Ocjena doprinosa promatranih parametara izvršena je u odnosu na referentne vrijednosti dobivene ispitivanjem praznih okvira u ovisnosti o skupini uzoraka te u odnosu na mehaničke karakteristike ispuna (tlačnu čvrstoću). Doprinosi parametara određeni su kvantitativno. Opis i usporedba rezultata ispitivanja objašnjena je u *Poglavlju 6*.

Analitička analiza eksperimentalnih rezultata također je podijeljena u dvije faze. U prvoj fazi je provedena usporedba postojećih analitičkih modela procjene ponašanja sustava i vlastitih rezultata ispitivanja te je predložena metoda koja se konceptualno oslanja na postojeće. Postojeći modeli procjene ponašanja većim se dijelom oslanjaju isključivo na proračun horizontalne nosivosti dok rijetki daju i model procjene pripadnih relativnih međukatnih pomaka. Uslijed relativno malog broja analitičkih modela, kojim je omogućena procjena cjelovitog odgovora sustava u ovisnosti o graničnim stanjima, broj ocjenjenih modela ovisio je o dostupnosti u literaturi. Predloženi model analitičke procjene ponašanja temelji se na proračunu horizontalne nosivosti i pripadnih relativnih međukatnih pomaka za sva tri promatrana granična stanja, a definiran je idealiziranim četverolinearnim odnosom sile i pomaka. Horizontalna nosivost sustava definirana je, u poopćenom smislu, kao zbroj doprinosa okvira i ispuna. Doprinos okvira definiran je koeficijentom Ψ čija je vrijednost ovisna o promatranom graničnom stanju i određena na temelju vlastitih rezultata ispitivanja. Doprinos ispuna pri promatranim graničnim stanjima definiran je u ovisnosti o mehanizmima sloma. Iako je tijekom provedenih ispitivanja pri promatranim graničnim stanjima uočena pojava raznovrsnih mehanizama sloma ispuna, zbog dosljednosti proračuna pretpostavljena je pojava mehanizama sloma u ovisnosti o hijerarhiji čvrstoća. S obzirom da je predloženi analitički model temeljen na vlastitim ispitivanjima, potrebno je naglasiti da postoje određena ograničenja primjene. Ograničenja se odnose na geometrijske i mehaničke karakteristike sustava.

Unatoč ograničenjima, predloženi model pogodan je za nelinearnu statičku i dinamičku analizu te kao takav primjenjiv je u inženjerskoj praksi. Opis i usporedba postojećih i predložene metode procjene ponašanja detaljno je opisana u *Poglavlju 7*.

U drugoj fazi provedena je procjena nelinearnih pomaka ispitnih uzoraka. Odabrana metoda procjene nelinearnih pomaka temelji se na idealiziranom linearnom spektru odgovora modificiranim faktorom kojim se uzimaju u obzir nelinearni efekti. Osnovne varijable modela odnose se na efektivnu krutost i nosivost na granici tečenja sustava te frekventni sadržaj i intenzitet potresa. Metoda je razvijena i verificirana na brojnim eksperimentalnim ispitivanjima različitih konstruktivnih sustava na Sveučilištu u Illinoisu u Urbana-Champaignu, SAD. Metoda se bazira na proračunu očekivanih nelinearnih pomaka pomoću linearne spektralne analize te omogućava pojedina poopćenja koja bi inače bila problematična. Procjena nelinearnih pomaka ispitnih uzoraka izvršena je u odnosu na odabrane zapise potresa. Odabir mjerodavnih zapisa potresa izvršen je sukladno podjeli Republike Hrvatske na seizmičke zone. Hrvatska je, prema važećem *Pravilniku*, podijeljena na tri područja seizmičkog intenziteta kojima odgovaraju vrijednosti projektnog ubrzanja tla u iznosu od 0,1, 0,2 i 0,3 g. Sukladno seizmičkim zonama, tj. projektnim ubrzanjima tla, odabrana su tri seta po sedam zapisa potresa čiji srednji elastični spektri ubrzanja približno odgovaraju elastičnim spektrima definiranim Eurokodom 8, tip 1, s prigušenjem u iznosu od 2% kritičnog za tip tla C. Na temelju procijenjenih nelinearnih pomaka, dana je i procjena oštećenja ispitnih uzoraka. Razine oštećenja definirane su na osnovi preporuka danih u *European Makroseismic Scale* (*EMS-98*) i dostupnoj literaturi. Procjena nelinearnih pomaka i razina oštećenja ispitnih uzoraka opisana je u *Poglavlju 8*.

9.2. Zaključak

Provedena istraživanja upućuju da se dodavanjem ispuna u neduktilno armiranobetonske okvire doprinosi boljem ponašanju promatranog sustava prilikom djelovanja potresnog opterećenja. Ispun doprinosi poboljšanju konstrukcijskih karakteristika u vidu povećanja nosivosti i krutosti sustava, neovisno o mehaničkim karakteristikama istog, osobito pri malim relativnim međukatnim pomacima.

Znatan doprinos ispuna horizontalnoj nosivosti uočen je u području ponašanja uzoraka do vrijednosti relativnog međukatnog pomaka u iznosu od 0,5%. U području ponašanja nakon navedene vrijednosti relativnog međukatnog pomaka, doprinos ispuna je i dalje značajan, ali ne i toliko naglašen. Iako se mehaničke karakteristike promatranih ispuna razlikuju, uočeno je da povećanje horizontalne nosivosti sustava ovisi o vrsti primijenjenog morta. Tako je kod uzoraka, kod kojih je ispun izvedena mortom opće namjene, doprinos veći nego u slučaju vapnenog morta neovisno o tipu zidnih elemenata.

Međutim, uočeno je kako tip zidnog elementa značajno utječe na opadanje horizontalne nosivosti nakon pojave dominantnog mehanizma sloma ispuna. Naime, kod uzoraka kod kojih je ispun izveden od šupljih zidnih elemenata, a neovisno o vrsti morta, oštećenje istog u području odgovora nakon pojave dominantnog mehanizma sloma progresivno se povećava. U konačnici doprinos iščezava, a odgovor sustava istovjetan je odgovoru praznog okvira. Suprotno, kod uzoraka kod kojih je ispun izveden od punih zidnih elemenata, a također neovisno o vrsti morta, nakon pojave dominantnog sloma ispuna sustav zadržava približno jednaku horizontalnu nosivost sve do sloma jednog od elemenata okvira. Navedena pojava neovisna je o karakteristikama armirano-betonskih okvira. Sukladno povećanju oštećenja, degradacija sekantne krutosti izraženija je kod uzoraka kod kojih je ispun izveden od šupljih zidnih elemenata. Međutim, može se primijetiti da degradacija sekantne krutosti uzoraka, kod kojih je ispun izveden vapnenim mortom, započinje znatno ranije nego kod uzoraka kod kojih je ispun izveden mortom opće namjena. Navedena pojava neovisna je o tipu zidnog elementa. U usporedbi s praznim okvirima, opadanje sekantne krutosti uzoraka s ispunom izvedenim mortom opće namjena izraženije je u području odgovora uzoraka s vrijednostima relativnog međukatnog pomaka većim od 0,4%. Kod uzoraka kod kojih je ispun izveden vapnenim mortom, opadanje sekantne krutosti izraženije je u području cijelog odgovora.

Povećanje je početne krutosti ispitnih uzoraka sa zidanim ispunom značajno, međutim, tu se nije pronašla poveznica koja upućuje na određenu karakteristiku ispuna. Naime, početna krutost svih uzoraka s ispunom približno je jednaka neovisno o mehaničkim karakteristikama ispuna i tipu okvira.

Područja ponašanja ispitnih uzoraka određena su u skladu s promatranim graničnim stanjima, u odnosu na tlačnu čvrstoću ispuna. Uočeno je da su vrijednosti relativnih međukatnih pomaka pri graničnom stanju pojave prve značajne pukotine u ispunu i pojave dominantnog mehanizma sloma ispuna, neovisno o vrsti morta, manja kod uzoraka kod kojih je ispun izveden pomoću šupljih zidnih elemenata. Vrijednost relativnog međukatnog pomaka pri graničnom stanju pred rušenje također je ovisna o vrsti zidnih elemenata ispuna. Tako je vrijednost relativnog međukatnog pomaka pri graničnom stanju pred rušenje kod ispitnih uzoraka, kod kojih je ispun izveden od šupljih zidnih elemenata, određena trenutkom u kojem doprinos ispuna horizontalnoj nosivosti sustava iščezava. Utvrđeno je da vrijednost navedenog relativnog pomaka iznosi 1%. S druge pak strane, kod uzoraka kod kojih je ispun izvedena od punih zidnih elemenata vrijednost relativnog međukatnog pomaka, pri promatranom graničnom stanju, određena je trenutkom pojave sloma jednog od elemenata okvira. Naime, navedeni ispun zadržava relativno dobru kompaktnost u području cijelog odgovora ispitnih uzoraka. Usvojeno je da vrijednost promatranog relativnog međukatnog pomaka iznosi 1,3%.

Dinamičke karakteristike uzoraka također su pod dominantnim utjecajem ispuna prvenstveno u pogledu disipacije energije. Promatrana je disipacija energije po jedinici pomaka ispitnih uzoraka za oba ciklusa pri svakom koraku opterećenja. Uočeno je kako vrijednosti navedene dinamičke karakteristike ovise o vrsti ispuna, vrijednosti pomaka i ciklusu opterećenja ispitnih uzoraka gdje su dobivene manje vrijednosti pri ponovljenim ciklusima. Rezultati upućuju kako vrijednost povećanja disipacije energije ovisi o vrsti primijenjenog morta i tako su, kod ispitnih uzoraka kod kojih je ispun izveden vapnenim mortom, uočene manje vrijednosti. Iako je u početnim fazama opterećenja disipacija energije neovisna o tipu zidnog elementa, navedeno dolazi do izražaja u području odgovora ispitnih uzoraka nakon pojave dominantnog mehanizma sloma ispuna. Uočeno je da kod uzoraka, kod kojih je ispun izveden od šupljih zidnih elemenata, dolazi do smanjenja vrijednosti disipacije energije sukladno povećanju horizontalnog pomaka dok je kod uzoraka kod kojih je ispun izveden od punih zidnih elemenata, vrijednost disipacije energije približno jednaka. Navedeno je u skladu s doprinosima ispuna horizontalnoj nosivosti u navedenom području ponašanja ispitnih uzoraka.

Sukladno povećanju početne krutosti ispitnih uzoraka uočeno je smanjenje vrijednosti osnovnog perioda osciliranja. Navedeno smanjenje vrijednosti osnovnog perioda osciliranja upućuje na povećanje potresnog opterećenja.

Prigušenje ispitnih uzoraka također je određeno za oba ciklusa u svakom koraku opterećenja gdje su dobivene manje vrijednosti pri ponovljenim ciklusima. Apsorbirana energija prilikom izračuna vrijednosti prigušenja određena je dvama načinima kao potencijalna deformacijska energija i uloženi rad prilikom deformiranja uzoraka. Rezultati upućuju da je prikladnije apsorbiranu energiju odrediti kao uloženi rad, s obzirom da su prilikom definiranja apsorbirane energije, kao potencijalne deformacijske energije, dobivene vrijednosti disipirane i apsorbirane energije veće od 1. Navedena vrijednost je nerealna i upućuje da sustav disipira više energije nego što je prvobitno uneseno. Kod skupine uzoraka *O1* uočeno je povećanje prigušenja uzoraka s ispunom. Navedeno povećanje iznosi približno 20% u odnosu na prazan okvir. Suprotno, kod uzoraka skupine O2 i O3, uočeno je smanjenje prigušenja. Navedena pojava neočekivana je i nije pronađen uzrok tomu.

Mehanizmi sloma sustava pod dominantnim su utjecajem karakteristika ispuna. Kod graničnog stanja pojave prve značajne pukotine u ispunu, uočeni su raznovrsni mehanizmi sloma dok je pri graničnom stanju pojave dominantnog mehanizma sloma u većini slučajeva, isti uzrokovan dijagonalnim posmičnim slomom ispuna. Kod ispitnih uzoraka *O1_bpm* i *O1_bpm** dominantni mehanizam sloma ispuna, uzrokovan je drobljenjem istog u uglovima okvira. Slom praznih okvira uzrokovan je posmičnim slomom jednog od stupova okvira, neovisno o karakteristikama istih. Primijećeno je kako, kod uzoraka s ispunom skupina *O2* i *O3,* dolazi do promjene mehanizma sloma okvira uzoraka. Naime, kod svih

uzoraka s ispunom uočen je posmični slom grede okvira. Navedena promjena mehanizma sloma okvira predstavlja značajan doprinos ispuna globalnoj stabilnosti, uslijed čega je smanjena vjerojatnost pojave meke etaže. Uzorak *O2_cpm* upućuje i na znatan utjecaj količine poprečne armature u stupovima na vrijednost relativnog međukatnog pomaka pri posmičnom slomu okvira iako dostupna literatura upućuje na drugačije. U odnosu na uzorak *O1_cpm* koji je po svim karakteristikama, osim količine poprečne armature u stupovima okvira, identičan uzorku *O2_cpm*, uočeno je da je slom stupa uzorka *O2_cpm* nastupio pri znatno manjoj vrijednosti relativnog međukatnog pomaka. Navedeno je smanjenje vrijednosti reda veličine od približno 2 puta.

Analitička procjena horizontalne nosivosti ispitnih uzoraka pri pojedinim graničnim stanjima izvršena je pomoću postojećih i predloženog modela procjene. Postojećim modelima procjene, neovisno je li promatrana nosivost ili relativni međukatni pomak, nije bilo moguće opisati odgovor ispitnih uzoraka sa zadovoljavajućom točnošću. Stoga, predložen je vlastiti model procjene temeljen na rezultatima ispitivanja. Predloženi model definiran je geometrijskom idealizacijom sustava okvir s ispunom i analitičkim izrazima za sva tri granična stanja.

Geometrijskom idealizacijom sustava definiran je rešetkasti sustav kod kojeg je ispun prikazana pomoću triju štapa. Jedan štap (vertikalni) preuzima gravitacijska opterećenja gdje je vrijednost sile određena na temelju aksijalnih krutosti stupova okvira i ispuna. Druga dva štapa (kosi štapovi) preuzimaju isključivo tlačne sile uzrokovane interakcijom okvir – ispun. Vrijednosti sila u štapovima određene su na temelju uvjeta ravnoteže geometrijski idealiziranog sustava.

Predloženim modelom, horizontalna nosivosti je definirana kao zbroj doprinosa okvira i ispuna. Iako literatura upućuje da se superpozicijom doprinosa ne može točno odrediti horizontalna nosivost sustava okvir s ispunom, navedena je generalizacija uobičajena. Doprinos okvira određen je koeficijentom Ψ koji predstavlja odnos horizontalne nosivosti okvira pri pojedinim graničnim stanjima i maksimalne nosivosti. Vrijednosti je navedenog koeficijenta određen na temelju rezultata ispitivanja regresijskom analizom istih primjenom eksponencijalne funkcije. Za svako granično stanje predložena su po dva izraza od kojih je u jednom procjena vrijednosti koeficijenta Ψ dana na osnovi mehaničkih i geometrijskih karakteristika, a u drugom samo na osnovi geometrijskih karakteristika ispuna i okvira. Geometrijske karakteristike okvira definirane su koeficijentima α i β te njihovim međusobnim odnosom. Koeficijent α predstavlja odnos visine i raspona okvira, a koeficijent β odnos momenata tromosti stupa i grede okvira. Geometrijska karakteristika ispuna definirana je koeficijentom γ kojim je određen odnos neto i bruto površine poprečnog presjeka zidnog elementa, a može se definirati kao robusnost elementa. Sadržane mehaničke karakteristike definirane su tlačnom i posmičnom čvrstoćom ispuna.

Horizontalna nosivost ispuna određena je na temelju pretpostavljenih mehanizama sloma pri određenim graničnim stanjima. Pretpostavljeno je da je granično stanje pojave prve značajne pukotine u ispunu određeno pojavom pukotine uslijed prekoračenja vlačne čvrstoće ispuna. Predloženi izraz izveden je na temelju pretpostavki teorije elastičnosti, a temeljen je na mehaničkim i geometrijskim karakteristikama sustava. Predložena su dva izraza, od kojih jedan uzima u obzir utjecaj gravitacijskog opterećenja, a drugi ne. Potrebno je naglasiti da predloženi izraz vrijedi isključivo za pretpostavljenu geometrijsku idealizaciju sustav. Granično stanje pojave dominantnog mehanizma sloma ispuna definirano je u ovisnosti o vrsti sloma gdje se razlikuje dijagonalni posmični slom i drobljenje uglova. Sukladno navedenim mehanizmima predložen su i izraz koji predstavljaju prilagodbu postojećih. Pregledom literature nije pronađen analitički model kojim je definirana pojava određenog mehanizma sloma ispuna. Stoga je, isključivo na temelju vlastitih rezultata ispitivanja i kao gruba procjena, predloženo da se promjena mehanizma sloma ispuna definira pomoću vrijednosti odnosa momenata tromosti stupa i okvira β. Usvojeno je da drobljenje uglova nastaje pri odnosu $\beta \leq 0{,}5$. Horizontalna nosivosti pri graničnom stanju pred rušenje definirana je u ovisnosti o mehanizmima sloma elemenata sustav i predstavlja rezidualnu nosivost. Tako je kod uzoraka kod kojih je ispun izvedena od šupljih zidnih elemenata pretpostavljeno da rezidualnu nosivost osigurava okvir. Prilikom procjene horizontalne nosivost okvira promatrana su dvije postojeće metode koje se razlikuju u pretpostavci mehanizma sloma stupova (savojni ili posmični slom), a usvaja se manja vrijednost. Kod ispitnih uzoraka, kod kojih je ispun izveden od punih zidnih elemenata, pretpostavljeno je da rezidualnu nosivost osigurava ili samo ispun ili ispun i okvir, ovisno o mehanizmu sloma okvira. Tako je pretpostavljeno da kod skupine uzoraka *O1* i *O2* rezidualnu nosivost osigurava samo ispun, a kod skupine uzoraka *O3* i *O4* ispun i okvir. Navedene pretpostavke su u skladu s uočenom promjenom mehanizma sloma okvira. Rezultati upućuju da je promjenu mehanizma sloma okvira kod uzoraka s ispunom također moguće definirati odnosom momenata tromosti stupa i grede okvira β. Tako je pretpostavljeno da u slučaju kada je $\beta \geq 1$ dolazi do sloma grede dok u suprotnom dolazi do sloma stupa. Pretpostavka je temeljena isključivo na vlastitim rezultatima ispitivanja. Rezidualna nosivost ispun također je definirana na modelu dijagonalnog posmičnog sloma.

Za procjenu relativnih međukatnih pomak također su predloženi analitički izrazi u ovisnosti o promatranom graničnom stanju. Predloženi izrazi temeljeni su na vlastitim rezultatima ispitivanja i određeni regresijskom analizom uz primjenu eksponencijalnih ili linearnih funkcija. Za granična stanja pojave prve značajne pukotine i pojave dominantnog mehanizma sloma ispuna predložena su po dva izraza, od kojih je jedan temeljen na geometrijskim i mehaničkim karakteristikama konstituenata sustava (α, β, γ, f_i i f_v), a drugi samo na geometrijskim karakteristikama. Vrijednosti relativnih međukatnih

pomaka pri graničnom stanju pred rušenje definirani su brojčano, ovisno o vrsti ispuna. Tako je za uzorke kod kojih je ispun izveden od šupljih zidnih elemenata usvojena vrijednost u iznosu od 1%, a za uzorke kod kojih je ispun izveden od punih zidnih elemenata 1,3%. Navedene vrijednosti predstavljaju srednju vrijednost relativnog međukatnog pomaka pri promatranom graničnom stanju određene u ovisnosti o tlačnoj čvrstoći ispuna.

Predloženi model procjene ponaša zadovoljavajuće opisuje eksperimentalne rezultate i primjenjiv je u inženjerskoj praksi unatoč svojoj relativno velikoj robusnosti. Model je pogodan za nelinearnu statičku i dinamičku analizu postojećih okvirnih konstrukcija sa zidanim ispunom. Međutim, treba obratiti pozornost na ograničenja primjene.

Procjena nelinearnih pomak ispitnih uzoraka izvršena je pomoću postojeće metode za tri seta zapisa potresa kompatibilnih s *EC8* elastičnim spektrom za tri razine projektnog ubrzanja tla, 0,1, 0,2 i 0,3 *g*. Odabrana metoda procjene pomaka povezuje karakteristike potresa s krutošću i nosivošću konstrukcije u cilju prognoziranja očekivanih nelinearnih pomaka pri djelovanju potresa. Prethodno su definirane razine oštećenja u skladu s graničnim stanjima i preporukama danim u *EMS-98*. Analiza rezultata upućuje da ispun doprinosi smanjenju relativnih međukatnih pomaka, a samim time i smanjenju oštećenja. Navedeno je posebno izraženo u slučaju potresa kompatibilnih s *EC8* elastičnim spektrom za projektno ubrzanje tla u iznosu od 0,2 *g* gdje je kod većine potresa oštećenje praznih okvira okarakterizirano razinom 5. Razina oštećenja 5 predstavlja rušenje. S druge strane odgovor uzoraka s ispunom većim je dijelom u području ponašanja graničnog stanja pojave dominantnog mehanizma sloma ispuna i manjim dijelom u području graničnog stanja pred rušenje. Treba napomenuti da procijenjeni pomak praznih okvira značajno premašuje vrijednosti pri slomu, u nekim slučajevima i nekoliko puta. Osim toga, granično stanje pred rušenje ispitnih uzoraka s ispunom definirano je rezidualnom nosivošću čime je osigurana stabilnosti.

Rezultati upućuju na mogućnost primjene zidanog ispuna kao sredstva ojačanja neduktilnih armirano-betonskih okvira. Osim doprinosa globalnoj stabilnosti, smanjenje pomaka konstrukcije osigurava i smanjenje oštećenja nematerijalnih dobara.

9.3. Prijedlozi za daljnja istraživanja

Provedenim analizama uočena su područja koja zahtijevaju dodatna istraživanja. Preporuke za daljnja istraživanja prvenstveno se odnose na dodatna ispitivanja ponašanja neduktilnih armirano-betonskih okvira sa zidanim ispunom, a one su sljedeće:

- Analiza utjecaja različitih geometrijskih karakteristika okvira – gdje se prvenstveno misli na odnos visine i raspona,
- Analiza utjecaja različitih postotaka armiranja stupova poprečnom armaturom,
- Dodatna analiza utjecaja vrste zidnih elemenata – tu se misli na veličinu, vrstu materijala i robusnost,
- Provjera/dopuna predložene metode procjene ponašanja na temelju prethodno navedenih prijedloga,
- Izrada prikladnog nelinearnog histereznog modela ponašanja i
- Provjera/dopuna primijenjene metode procjene očekivanih nelinearnih pomaka.

POPIS LITERATURE:

[1] Vintzileou, E.; Zeris, C.; Repapis, C.: *"Seismic Behaviour of Existing RC Buildings"*, 13th World Conference on Earthquake Engineering (13WCEE), Paper No. 2453.,Vancouver, Canada, 2004.

[2] Anagnos, T.; Comerio, M. C.; Goulet, C.; Steele, J.; Stewart, J. P.: *"Development of a Concrete Buildind Inventory: Los Angeles Case Study for the Analysis of Collapse Risk"*, Proc. 9th National & 10th Canadian Coference on Earthquake Engineering, Toronto, Canada, 2010.

[3] Buonopane, S. G.; White, R. N.*: "Seismic Evaluation of a Masonry Infilled Reinforced Concrete Frame by Pseudodynamic Testing"*, Techical Report MCEER-99-0001, 1999.

[4] *EN 1998-3:2005*: *"Assesment and retrofitting of buildings"*, European Committee for Standardization, CEN, Brussels, 2005.

[5] *FEMA 273*: *"NEHRP Guidelines for the seismic rehabilitation of buildings"*, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., 1997.

[6] *NZNSEE ERB*: *"The assessment and improvement of the structural performance of earthquake risk buildings"*, ERB Document, New Zealand National Society for Earthquake Engineering", 1996.

[7] Fiorato, A. E.; Sozen, M. A.;Gamble, W. L.: *"An Investigation of the Interaction of Reinforced Concrete Frames with Masonry Filler Walls"*, Civil Engineering Studies, Structural Research Series NO. 370, University of Illinois, Urbana, Illinois, November 1970.

[10] Kermani, A. M.; Goldsworthy, H. M.; Gad, E. F.: *"The Behaviour of RC Frames with Masonry Infill in Wenchuan Earthquke"*

[11] Gunay, M. S.; Mosalam, K. M.: *"Structural Engineering Reconnaissance of the April 6, 2009, Abruzzo, Italy, Earthquake, and Lessons Learned"*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER 2010/105, April 2010.

[12] Mehrabi, A., B.; Shing, P., B.; Schuller, M., P.; Noland, J., L.: *"Performance of Masonry-Infilled R/C Frames Under In-Plane Lateral Loads"*, Report CD/SR-94/6, Department of Civil, Environmental & Arhitectural Engineering, University of Colorado at Boulder, October 1994.

[13] Crisafulli, F. J.: *"Seismic Behaviour of Reinforced Concrete Structures with Masonry Infills"*, PhD Thesis, Depamtment of Civil Engineering , University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, July 1997.

[14] Al-Chaar, G.: *"Non-Ductile Behavior of Reinforced Concrete Frames with Masonry Infill Panels Subjected to In-Plane Loading"*, USACERL Techical Manuscript 99/18, US Army Corps of Engineers, Champaign, Illinois, December 1998.

[15] Colangelo, F.: *"Experimental evaluation of Member-by-Member Models and Damage Indices for Infilled Frames"*, Journal of Earthquake Engineering, Vol. 7, No. 1, pp. 25-50, 2003.

[16] Colangelo, F.: *"Pseudo-dynamic seismic response of reinforced concrete frames infilled with non-structural brick masonry"*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 34, pp 1219-1241, 2005.

[17] Hashemi, A.; Mosalam, K. M.: *"Shake-table experiment on reinforced cocrete structure containig masonry infill wall"*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 35, pp 1219-1241, 2006.

[18] Centeno, J.: *"In-plane shake table testing of gravity load designed reinforced cocrete frames with unreinforced masonry infill walls"*, A thesis submitted in partial fulfilment of the requirements for the degree of Master of applied science, The Faculty of Graduate Studies, The University of British Columbia, 2009.

[19] Stavridis, A.: *"Analytical and experimental Study of Seismic Performance of Reinforced Concrete Frames with Masonry Walls"*, PhD dissertation, University of California, Department of Structural Engineering, San Diego, California, 2009.

[20] Sharma, A.; Reddy, G. R.; Vaze, K. K.: *"Shake table tests on a non-seismically detailed RC frame structure"*, Structural Engineering and Mechanics, Vol. 41, No. 1, pp. 1-24, 2012.

[21] Vintzileou, E.; Zeris, S.; Repapis, C.: *"Seismic behaviour of existing RC buildings"*, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Paper No. 2453, 2004.

[22] *"Behaviour and Analysis of Reinforced Concrete Structures under Alternate Actions Inducing Inelastic Response"*, Comite Euro-International du Beton, Task Group III/6, Bulletin dinformanion No. 220, Vol. 2, Chapter 5, pp. 310-380, May, 1994.

[23] Sculler, M.; Mehrabi, A. B.; Noland, J. L.; Shing, P. B.: *"Performance of Masonry-Infilled R/C Frames under In-Plane Lateral Loads: Experiments"*, Proceedings from NCEER Workshop on Seismic Response of Masonry, San Francisco, California, pp 1/27-32, February 1994.

[24] Paulay, T.; Priestley, M. N. J.: *"Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings"*, John Wiley & Sons Inc., 1992.

[25] Brokken, S. T.; Bertero, V. V.: *"Studies on Effects of Infills in Seismic Resistant R/C Construction"*, University of California, Berkley, Report No. UCB/EERC-81/12, October 198.

[26] Mainstone, R. J.: *"On the Stiffnesses and Strengths of Infilled Frames"*, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, pp. 57-90, 1971.

[27] Smith, B. S.: *"Behaviour of Square Infilled Frames"*, Proceedings of the American Society of Civil Engineering, Journal of Structural Division, Vol. 92, No. ST1, pp. 381-403, 1966.

[28] Tomaževič, M.: *"Earthquake-Resistant Design of Masonry Buildings"*, Series on Innovation in Structures and Construction-Vol.1, Imperial College Press, 2000.

[29] Elwood, K. J., Moehle, J. P.: *"Shake Table Tests and Analytical Studies on the Gravity Load Collapse of Reinforced Conrete Frames"*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER 2003/01, November 2003.

[30] Calvi, G. M.; Magenes, G.; Pampanin, S.: *"Experimental Test on a Three Storey R.C. Frame Designed for Gravity Only"*, 12th European Conference on Earthquake Engineering, London, Paper No. 727, 2002.

[31] Haldar, P.; Singh, Y.; Paul, D. K.: *"Indentification of seismic failure modes of URM infilled RC frame buildings"*, Engineering Failure Analysis, Vol. 33, pp. 97-118, 2013.

[32] Leuchars, J. M.: *"Masonry infill panels"*, M. E. Report, University of Canterbury, February 1973.

[33] Polyakov, S. V.: *"Some Investigations of the Problem of the Strength of Elements of Buildings Subjected to Horizontal Loads"*, *Symposium* on Tall Buildings, University of Southampton, pp. 465-486, April 1966.

[34] Holmes, M.: *"Steel Frames with Brickwork and Concrete Infilling"*, Proceedings of Institution of Civil Engineers, London, Vol. 19, pp. 473-478, 1961.

[35] Smith, B. S.: *"Lateral Stiffness of Infilled Frames"*, Proceeding of the American Society of Civil Engineering, Journal of Structural Engineering, Vol. 88, No. ST6, pp. 183-199, 1962.

[36] Smith, B. S.: *"Method for Predicting the Lateral Stiffness and Strength of Multi-Storey Infilled Frames"*, Building Science, Vol. 2, pp. 247-257, 1967.

[37] Stafford, B. S.; Carter, C.: *"A method for the analysis of infilled frames"*, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Vol. 44, pp. 31–48, 1969.

[38] Binay, C. S.: *"Effect of Unreinforced Full and Partial Infilled Brick Masonry Wall in RC Frame Under Seismic Loading"*, A Thesis Submitted in Partial Fulfilment of the Requirements for the Degree of Master of Engineering, Graduate School, Kasetsart University, 2008.

[39] Kalman Šipoš, T: *"Proračun zgrada od armiranobetonskih okvira sa zidanom ispunom sukladno očekivanom potresnom odzivu"*, Doktorska disertacija, Građevinski Fakultet Sveučilišta J. J. Strossmayera u Osijeku, 2013.

[40] Aničić, D.: *"Ispitivanje konstrukcija"*, Udžbenik Građevinskog fakulteta Sveučilišta J. J. Strossmayera u Osijeku, Osijek, 2002.

[41] Dakuze, A.: *"Behaviour of Reinforced Concrete Frames Infilled with Brick Masonry Panels"*, PhD Thesis, The University of New Brunswick, Canada, 2000.

[42] *HRN ENV 1996-1-1:2007*: Projektiranje zidanih konstrukcija (*ENV 1996-1-1:1995)* Eurocode 6 – Design of masonry structures – Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures, European Committee for Standardization, Brusels, 1995.

[43] Schneider, K. J.: *"Bautabellen fur Ingenieure"*, 21 izdanje, 2014.

[44] Aničić, D.; Sorić, Z; Morić, D; Macan M: *"Ispitivanje nosivosti kamenih zidova"*, Građevinski institut OOUR, Fakultet građevinskih znanosti Zagreb, Zagreb, 1988.

[45] *EN 12504-1:2000*: Testing concrete in structures - Part 1: Cored specimens- Taking, examining and testing in compression, European Committee for Standardization, Brussels, 2005.

[46] *ISO 6892-1*: Metallic Materials – Tensile Testing. Part 1: Method of Test at Room Temperature, Geneva, 2009.

[47] *HRN EN 1015:2000*: Metode ispitivanja mortova za ziđe, (EN 1015:1999), Eiropean Committee for Standardization. Brussels, 2004.

[48] *HRN EN 1015-11*: Metode ispitivanja mortova za ziđe – 11. dio: Određivanje čvrstoće pri savijanju i tlačne čvrstoće očvrsnulog morta (*EN 1015-11:1999*), Eiropean Committee for Standardization. Brussels, 2004.

[49] *HRN EN 1015-11*: Metode ispitivanja mortova za ziđe – 11. dio: Određivanje čvrstoće pri savijanju i tlačne čvrstoće očvrsnulog morta (*EN 1015-11:1999*), Eiropean Committee for Standardization. Brussels, 2004.

[50] Sorić, Z.: *Zidane konstrukcije I*, drugo, prošireno izdanje. Udžbenici Sveučilišta u Zagrebu, Manualia Universitatis Studiorum Zagrabiensis, Tisak tmg-topgraf, Zagreb, 2004.

[51] *HRN EN 772:2004*: Metode ispitivanja zidnih elemenata (*EN 772:2004)*, European Committee for Standardization, Brussels, 2000.

[52] *HRN EN 772-16:2004*: Određivanje izmjera (*DIN EN 772-16:2000)*, European Committee for Standardization, Brussels, 2000.

[53] *HRN EN 772-1*:2000: Određivanje tlačne čvrstoće (*DIN EN 772-1:2000*), European Committee for Standardization, Brussels, 2000.

[54] Bosiljkov, V; Totev, Y. Z.; Nichols, J. M.: *"Shear modulus and stiffness of brickwork masonry: An experimental perspective"*, Structural Engineering and Mechanics, 20,1., 2005.

[55] *HRN EN 1052:2004*: Metode ispitivanja ziđa (*EN 1052:1998)*, European Committee for Standardization, Brussels, 1998.

[56] *ASTM E519-E519M-10:* Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages, American Standards for Testing of Materials, 100 Barr Harbour Drive, West Conshohocken, PA 19428-2959, USA, 2010.

[57] *HRN EN 1052-1:2004*: Određivanje tlačne čvrstoće (*EN 1052-1:1998*), European Committee for Standardization, Brussels, 1998.

[58] Radić, I: *"Ponašanje čelićnih okvirnih konstrukcija sa zidanim ispunom pri djelovanju potresa"*, Doktorska disertacija, Građevinski fakultet Sveučilišta J. J. Strossmayera u Osijeku, Osijek, 2012.

[59] *HRN EN 1052-3:2004:* Metode ispitivanja ziđa – 3. dio: Određivanje početne posmične čvrstoće (*prEN 1052-3:2001*), European Committee for Standardization, Brussels, 2001.

[60] Binda, L;Fontana, A.; Frigerio, G.: *"Mechanical Behaviour of Brick Masonries Derived from Unit and Mortar Characteristics"*, Poceedings of the 8th International Brick and Block Masonry Conference, Vol. 1, pp. 205-216, Dublin, Republic of Ireland, 1988.

[61] Zovkić, J.: *"Ponašanje armirano-betonskih okvira s ispunom pri djelovanju potresa"*, Doktorska disertacija, Građevinski fakultet Sveučilišta J. J. Strossmayera u Osijeku, Osijek, 2013.

[62] Lourenco, P. B.; Rots, J. G.; Blaauwendraad, J.: *"Continuum model for masonry: Parameter estimation and Validation"*, Journal of Structural Engineering, 124, pp. 642-652, 1998.

[63] Koutromanos, I.: *"Numerical Analysis of Masonry-Infilled Reinforced Concrete Frames Subjected to Seismic Loads and Experimental Evaluation of Retrofit Techniques"*, PhD Tesis, University of California, San Diego, USA, 2011.

[64] Polyakov, S.V.: *"On the Interactions Between Masonry Filler Walls and Enclosing Frame When Loaded in the Plane of the Wall"*, (English translation by G.L. Cairns, 1963) Translations in Earthquake Engineering Research Institute, Moscow, Russia, 1956.

[65] Žarnić, R.: *"Neelastični odziv armiranobetonskih okvirov z zidanim polnili na potresno obtežbo"*, Doktorska disertacija, Građevinski fakultet Sveučilišta u Ljubljani, Ljubljana, Slovenia, 1992.

[66] Wei, L.; Qiyun, W.; Jiahua, T.; Guoying, D.: *"Inelastic Earthquake Response Analysis of Brick Infilled Frames"*, Proccedings of 7th World Conference on Earthquake Engineering, Istanbul, Turkey, 1980.

[67] Flores, L. E.; Alcocer, S.M.: *"Calculated Response of Confined Masonry Structures"*, Proccedings of 11th World Conference on Earthquake Engineering", Mexico, 1996.

[68] *ASCE 41-06*: *"Seismic Rehabilitation of Existing Buildings"*, American Society of Civil Engineers, New York, USA, 2006.

[69] *FEMA 306*: *"Evaluation of Earthquake Damaged Concrete and Masonry Wall Buildings: Basic Procedures Manual"*, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., USA, 1998.

[70] Liauw, T. C.; Kwan, K. H.: *"Plastic theory of non-integral infilled frames"*, Proccedings of National Institution of Civil Engineers, Part 2, pp. 297-286, 1984.

[71] Sezen, H.: *"Seismic Behavior and Modeling of Reinforced Concrete Buildings Columns"*, PhD Tesis, University of California, Berkeley, 2002.

[72] Sigmund, V.: *"Ostvarenje koncepta okvira sa "slabim" gredama"*, Doktorska disertacija, Građevinski fakultet Sveučilišta u Sarajevu, Sarajevo, Bosna i Hercegovina, 1989.

[73] Shimazaki, K.; Sozen, M. A.: *"Seismic Drift of Reinforced Concrete Structures"*, Techical Research Report of Hazama-Gumi, Ltd, Tokyo, Japan, 1984.

[74] Lepage, A.: *"A Method for Drift-Control in Earthquake-Resistant Design of RC Building Structures"*, PhD Tesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois, USA, 1997.

[75] Veletsos, A. S.; Newmark, N. M.: *"Effect of Inelastic Behavior on the Response of Simple Systems to Earthquake Motions"*, Proccedings of 2nd World Conference on Earthquake Engineering, pp. 895-912, Tokyo & Kyoto, Japan, 1960.

[76] Shibata, A.; Sozen, M. A.: *"Substitute-Structur Method for Seismic Design in R/C"*, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 102, no. ST1, pp. 1-18, 1976.

[77] Riddell, R; Newmark, N. M.: *"Statistical Analysis of the Resonse of Nonlinear Systems Subjected to Earthquake*", Structural Research Series No. 468, Civil Engineering Studies, University of Illinois, Urbana, Illinois, USA, 1979.

[78] Newmark, N. M.: *"Current Trends in the Seismic Analysis and Design of High Rise Structures"*, Chapter 16 in Earthquake Engineering, ed. R. L. Weigel, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N. J., pp. 403-424, 1970.

[79] Pravilnik o tehničkim normativima za izgradnju objekata visokogradnje u seizmičkim područjima, Sl. list br. 31/81, 49/82, 29/83, 21/88 i 52/90.

[80] Iervolino, I.; Galasso, C.; Cosenza, E.: *"REXEL: Computer aided record selection of code-based seismic structural analysis"*, Bulletin of Earthquake Engineering, 8: 339-362, 2010.

[81] Smerzini, C.; Paolucci, R.: *"SIMBAD: a Database with Selected Input Motions for Displacement-Based Assessment and Design-3rd release"*, Research Project DPC-RELUIS, 2010-2013, 2013.

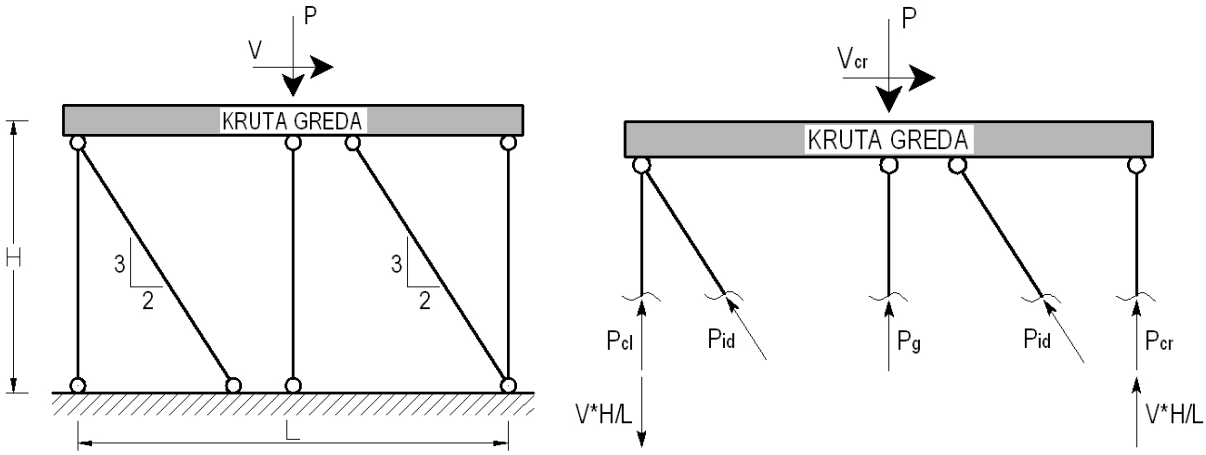
[82] Mihanović, A.: *"Program za spektar odgovora jednostupnjevnih sustava"*, inačica od 20.01.07, Odabrana poglavlja dinamike konstrukcija i potresnog inženjerstva, poslijediplomski studij, Građevinski fakultet Sveučilišta u Spliti, Split, 2010.

[83] European Macroseismic Scale 1998, CONSEIL DE L'EUROPE, Cahiers du Centre Europeen, de Geodynamique, et de Seismologie, Volume 15, ed. Grunthal, G. Luxembourg, 1998.

[84] J. Schwarz; L. Abrahamczyk; M. Leipold; T. Wenk: *"Vulnerability Assesment and Damage Description for R.C. Frame Structures Following the EMS-98 Principles"*; Bulletin of Earhquake Engineering, in press, 2014.

DODATAK A.

A1. Prikaz izvoda analitičkog izraza procjene horizontalne nosivosti ispuna pri pojavi prvih značajnih pukotina



Slika A1.1 Geometrijska idealizacija sustava.

Tlačno naprezanje u ispunu uzrokovano gravitacijskim opterećenjem i interakcijom okvir – ispun određeno je pomoću slijedećih izraza:

$$P_i = P_g + 2 \cdot P_d \qquad \text{A1.1}$$

$$P_g = \frac{P \cdot A_i}{A_e} \qquad \text{A1.2}$$

$$P_d = \frac{3 \cdot H}{4 \cdot L} \cdot V_{i,cr} \qquad \text{A1.3}$$

$$\sigma_0 = \frac{P_i}{A_i} = \frac{2 \cdot P \cdot L \cdot A_i + 3 \cdot A_e \cdot H \cdot V_{i,cr}}{2 \cdot L \cdot A_e \cdot A_i} \qquad \text{A1.4}$$

, gdje je P_i ukupna tlačna sila u ispunu, P_g tlačna sila uzrokovana gravitacijskim opterećenjem, P_d tlačna sila uzrokovana interakcijom okvir – ispun, A_i ploština poprečnog presjeka ispuna, A_e ekvivalentna ploština poprečnog presjeka sustava uokvireno ziđe, H visina, a L raspon okvira. Vrijednosti tlačnih sila određene su na temelju uvjeta ravnoteže presjeka sustava prikazanog slikom A1.1, gdje P_d predstavlja vertikalnu projekciju sile P_{id}.

Vrijednost sile $V_{i,cr}$ određena je na osnovi teorije elastičnosti, uz pretpostavku jednolike raspodjele poprečnih naprezanja na poprečnom presjeku u polovini visine ispuna.

$$f_t = \sqrt{\left(\frac{\sigma_0}{2}\right)^2 + \tau^2} - \frac{\sigma_0}{2}$$

$$f_t + \frac{\sigma_0}{2} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_0}{2}\right)^2 + \tau^2} \quad \Big|^2$$

$$f_t^2 + f_t \cdot \sigma_0 + \frac{\sigma_0^2}{4} = \frac{\sigma_0^2}{4} + \tau^2$$

$$\tau = \frac{V_{i,cr}}{A_i}$$

$$f_t^2 + f_t \cdot \sigma_0 = \frac{V_{i,cr}^2}{A_i^2} \quad \Big| \cdot \frac{1}{f_t^2}$$

$$1 + \frac{\sigma_0}{f_t} = \frac{V_{i,cr}^2}{A_i^2 \cdot f_t^2}$$

$$1 + \frac{2 \cdot P \cdot L \cdot A_i + 3 \cdot H \cdot V_{i,cr} \cdot A_e}{2 \cdot L \cdot A_i \cdot A_e \cdot f_t} = \frac{V_{i,cr}^2}{A_i^2 \cdot f_t^2}$$

$$1 + \frac{P}{A_e \cdot f_t} + \frac{3 \cdot \alpha \cdot V_{i,cr}}{2 \cdot A_i \cdot f_t} = \frac{V_{i,cr}^2}{A_i^2 \cdot f_t^2}$$

$$V_{i,cr}^2 \cdot \frac{1}{A_i^2 \cdot f_t^2} - V_{i,cr} \cdot \frac{3 \cdot \alpha}{2 \cdot A_i \cdot f_t} - 1 + \frac{P}{A_e \cdot f_t} = 0$$

$$V_{i,cr} = \frac{f_t \cdot A_i}{4} \cdot \left(3 \cdot \alpha + \sqrt{9 \cdot \alpha^2 + 16 \cdot \left(1 + \frac{P}{A_e \cdot f_t} \right)} \right)$$

, gdje je $\alpha = H/L$.

U slučaju kada nije moguće sa zadovoljavajućom točnošću odrediti tlačno naprezanje u ispunu uzrokovano gravitacijskim opterećenjem, predlaže se zanemarivanje istog, uslijed čega je tlačna sila u ispuni uzrokovana samo interakcijom okvir – ispun. Tlačno naprezanje u ispunu može se odrediti pomoću slijedećih izraza.

$$P_i = 2 \cdot P_d \qquad \text{A1.5}$$

$$P_d = \frac{3 \cdot H}{4 \cdot L} \cdot V_{i,cr} \qquad \text{A1.6}$$

$$\sigma_0 = \frac{P_i}{A_i} = \frac{3 \cdot H \cdot V_{i,cr}}{2 \cdot L \cdot A_i} \qquad \text{A1.7}$$

Vrijednost sile *Vi,cr* je određena pomoću identičnih pretpostavki kao i u slučaju kada je tlačno naprezanje u ispunu uzrokovano gravitacijskim opterećenjem i interakcijom okvir – ispun.

$$f_t = \sqrt{\left(\frac{\sigma_0}{2}\right)^2 + \tau^2} - \frac{\sigma_0}{2}$$

$$f_t + \frac{\sigma_0}{2} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_0}{2}\right)^2 + \tau^2} \quad \Big|^2$$

$$f_t^2 + f_t \cdot \sigma_0 + \frac{\sigma_0^2}{4} = \frac{\sigma_0^2}{4} + \tau^2$$

$$\tau = \frac{V_{i,cr}}{A_i}$$

$$f_t^2 + f_t \cdot \sigma_0 = \frac{V_{i,cr}^2}{A_i^2} \quad \Big| \cdot \frac{1}{f_t^2}$$

$$1 + \frac{\sigma_0}{f_t} = \frac{V_{i,cr}^2}{A_i^2 \cdot f_t^2}$$

$$1 + \frac{3 \cdot H \cdot V_{i,cr}}{2 \cdot L \cdot A_i \cdot f_t} = \frac{V_{i,cr}^2}{A_i^2 \cdot f_t^2}$$

$$1 + \frac{P}{A_e \cdot f_t} + \frac{3 \cdot \alpha \cdot V_{i,cr}}{2 \cdot A_i \cdot f_t} = \frac{V_{i,cr}^2}{A_i^2 \cdot f_t^2}$$

$$V_{i,cr}^2 \cdot \frac{1}{A_i^2 \cdot f_t^2} - V_{i,cr} \cdot \frac{3 \cdot \alpha}{2 \cdot A_i \cdot f_t} - 1 = 0$$

$$V_{i,cr} = \frac{f_t \cdot A_i}{4} \cdot \left(3 \cdot \alpha + \sqrt{9 \cdot \alpha^2 + 16}\right)$$

A2. Prikaz izvoda analitičkog izraza procjene horizontalne nosivosti ispuna pri pojavi dominantnog mehanizma sloma

Horizontalna nosivost ispuna pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ($V_{i,max}$) određena je na osnovi Mohr – Coloumbova zakona, dok su unutarnje sile u elementima sustava uokvireno ziđe određene na temelju uvjeta ravnoteže presjeka prikazanog slikom A1.1. S obzirom da pravac djelovanja gravitacijskog opterećenja izlazi iz jezgre ekvivalentnog poprečnog presjeka sustava, pretpostavljeno je da samo jedan kosi štap ispuna prenosi tlačna naprezanja. Pretpostavka se dodatno može opravdati činjenicom da pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna tlačno naprezanje u samo jednom

kosom štapu ispuna pridonosi horizontalnoj nosivosti u pogledu sile trenja. Varijable Morh – Coulombova zakona određene su pomoću slijedećih izraza.

$$V_{i,\max} = c_0 \cdot A_i + \mu \cdot P_i \qquad \text{A1.8}$$

$$P_i = P_g + P_d \qquad \text{A1.9}$$

$$P_g = \frac{P \cdot A_i}{A_e} \qquad \text{A1.10}$$

$$P_d = \frac{3 \cdot H}{4 \cdot L} \cdot V_{i,\max} \qquad \text{A1.11}$$

$$P_i = \frac{P \cdot A_i}{A_e} + \frac{3 \cdot H}{4 \cdot L} \cdot V_{i,\max} \qquad \text{A1.12}$$

Uvrštavanjem izraza A1.12 u izraz A1.8 dolazi su do predloženog analitičkog izraza procjene horizontalne nosivosti pri pojavi dominantnog mehanizma sloma ispuna.

$$V_{i,\max} = c_0 \cdot A_i + \mu \cdot \left(\frac{P \cdot A_i}{A_e} + \frac{3 \cdot H}{4 \cdot L} \cdot V_{i,\max} \right)$$

$$V_{i,\max} = c_0 \cdot A_i + \mu \cdot \frac{P \cdot A_i}{A_e} + \mu \cdot \frac{3}{4} \cdot \alpha \cdot V_{i,\max}$$

$$V_{i,\max} - \mu \cdot \frac{3}{4} \cdot \alpha \cdot V_{i,\max} = c_0 \cdot A_i + \mu \cdot \frac{P \cdot A_i}{A_e}$$

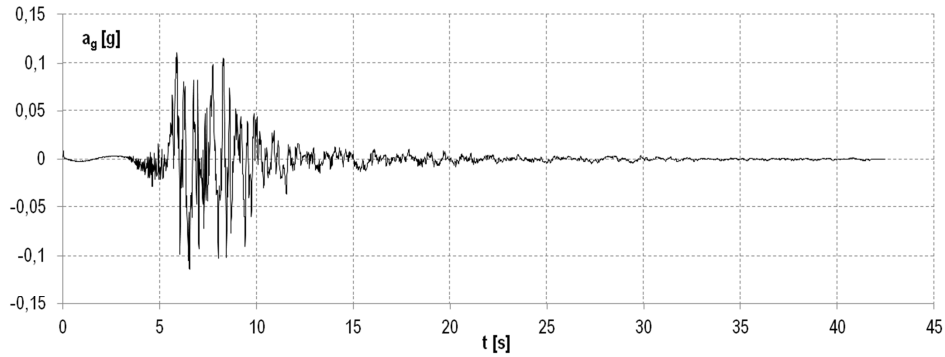
$$V_{i,\max} \cdot \left(1 - \mu \cdot \frac{3}{4} \cdot \alpha \right) = c_0 \cdot A_i + \mu \cdot \frac{P \cdot A_i}{A_e}$$

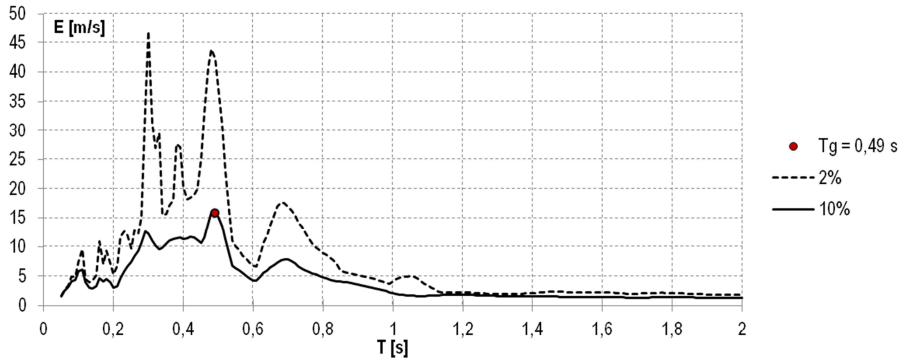
$$V_{i,\max} = \frac{c_0 \cdot A_i + \mu \cdot \dfrac{P \cdot A_i}{A_e}}{1 - \mu \cdot \dfrac{3}{4} \cdot \alpha}$$

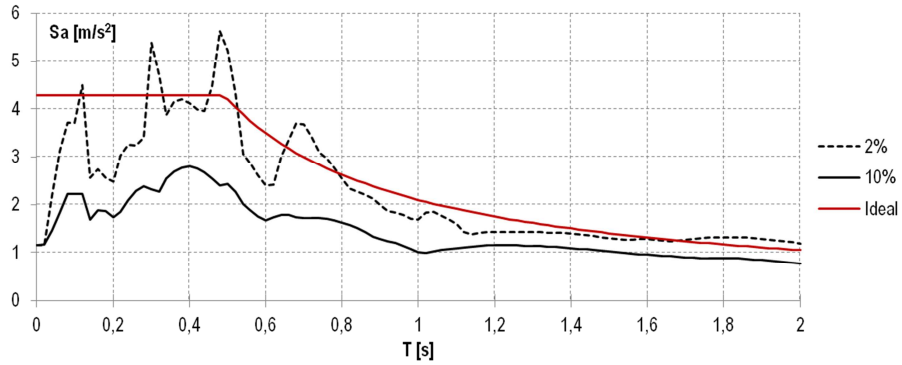
, gdje je c_0 kohezija, μ koeficijent trenja. Sve ostale oznake pojašnjenje su u prethodnom tekstu.

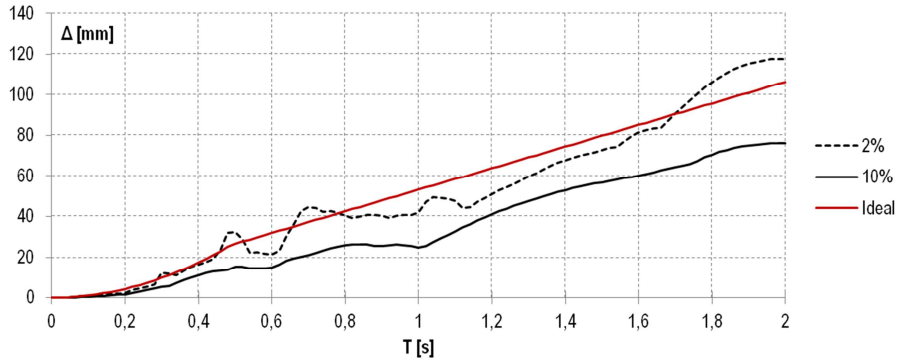
DODATAK B.

B1. Prikaz akcelerograma, spektara energije i idealiziranih spektara ubrzanja i pomaka odabranih zapisa potresa

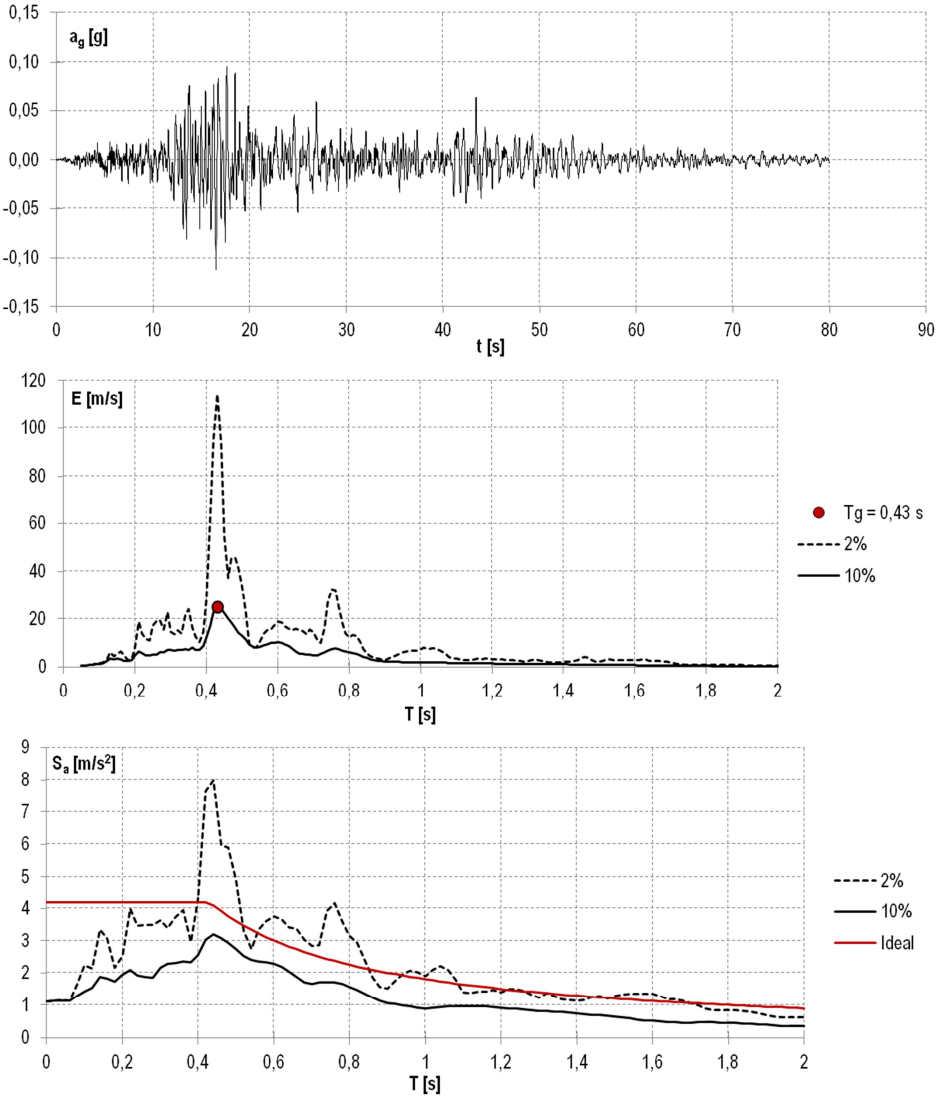


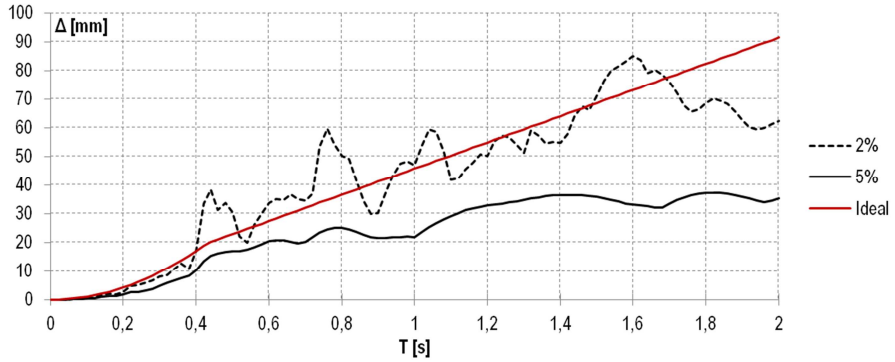




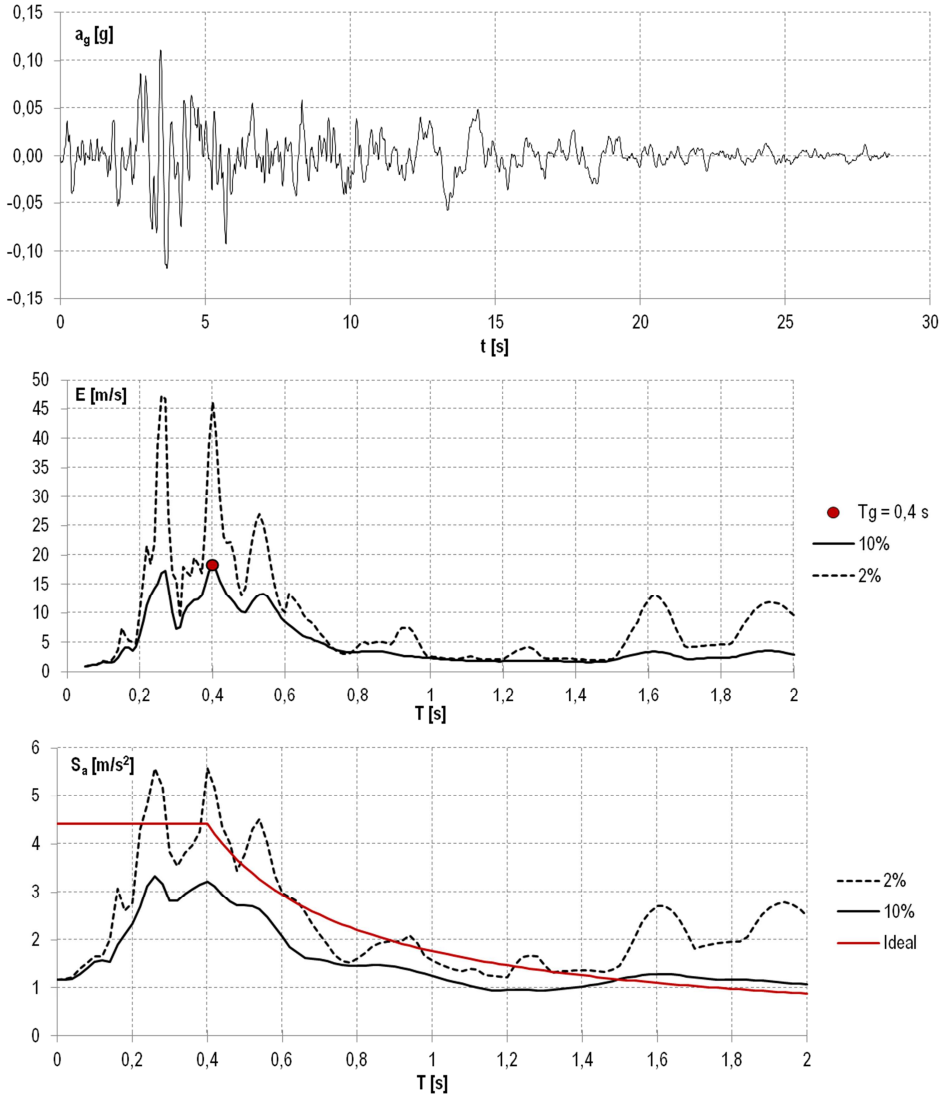


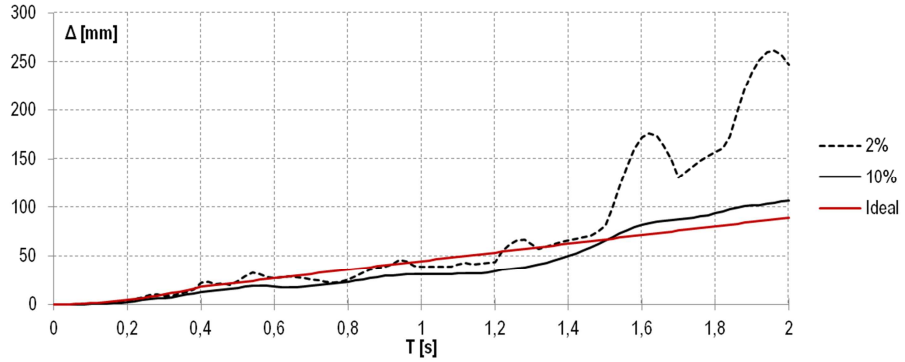
Slika B1.1 *Prikaz akcelerograma, spektra energije i idealiziranih spektara ubrzanja i pomaka za zapis potresa South Iceland_y.*



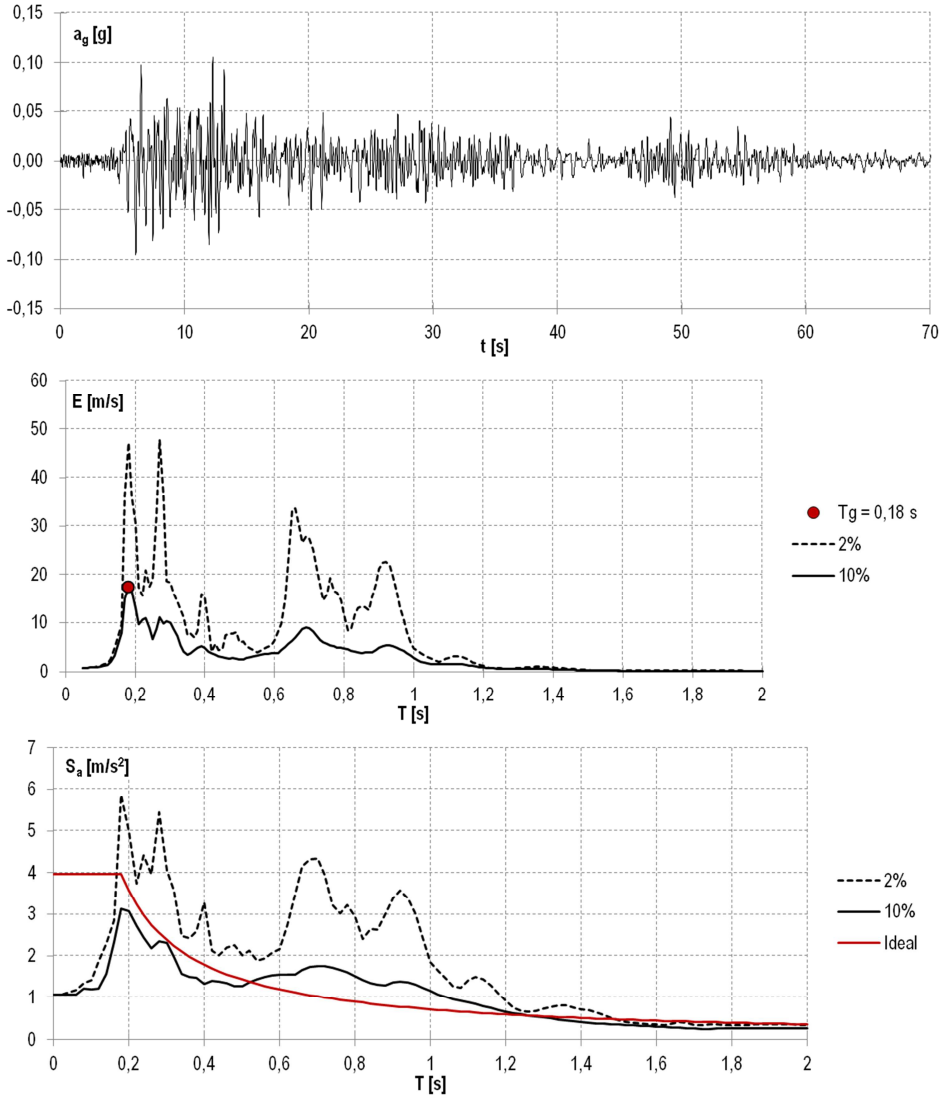


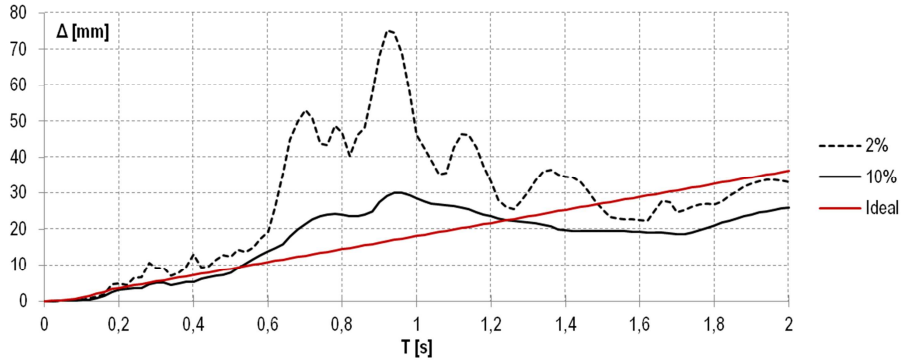
Slika B1.2 *Prikaz akcelerograma, spektra energije i idealiziranih spektara ubrzanja i pomaka za zapis potresa Izmit_y.*



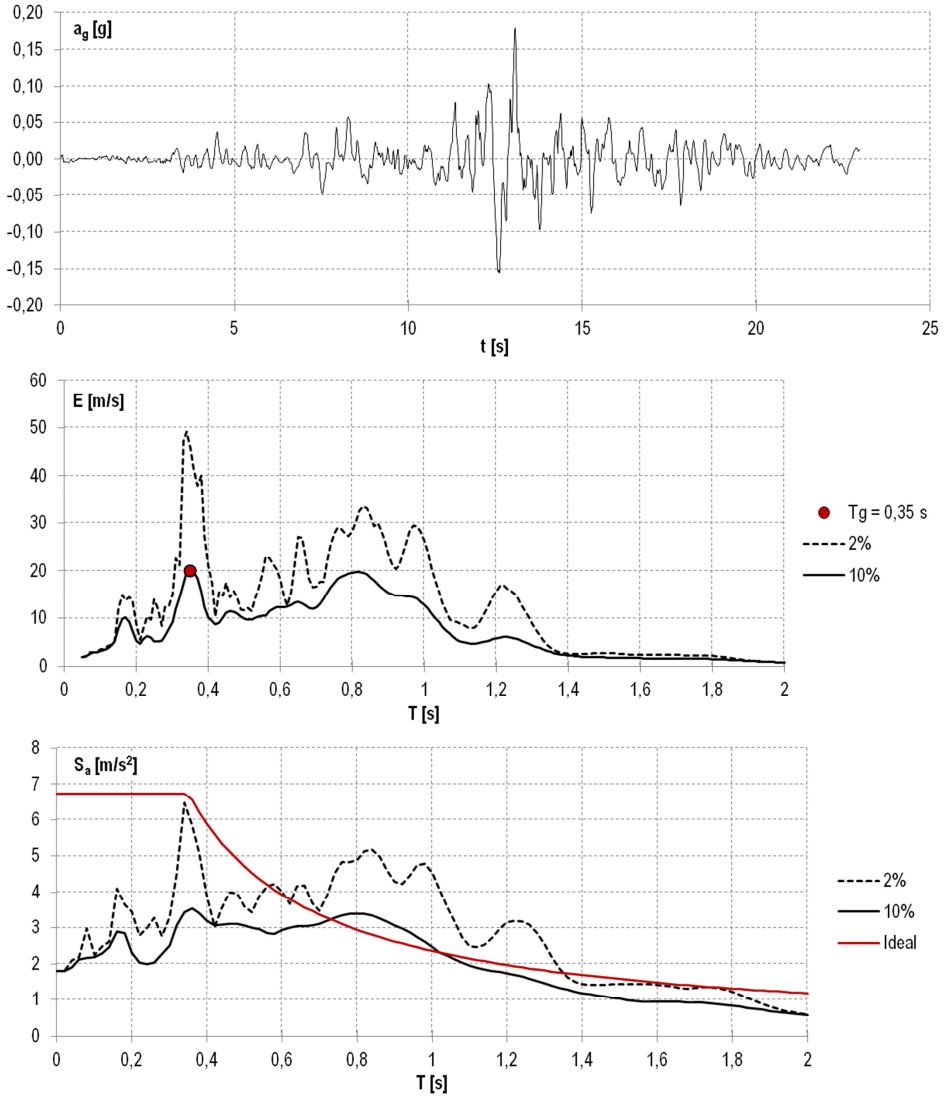


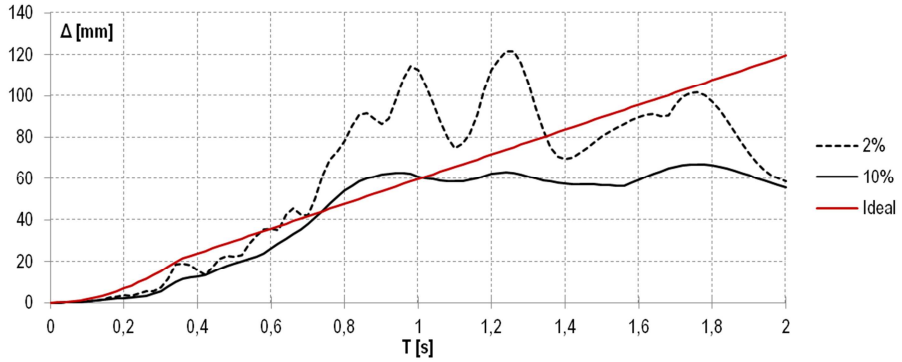
Slika B1.3 *Prikaz akcelerograma, spektra energije i idealiziranih spektara ubrzanja i pomaka za zapis potresa Alkion_y.*



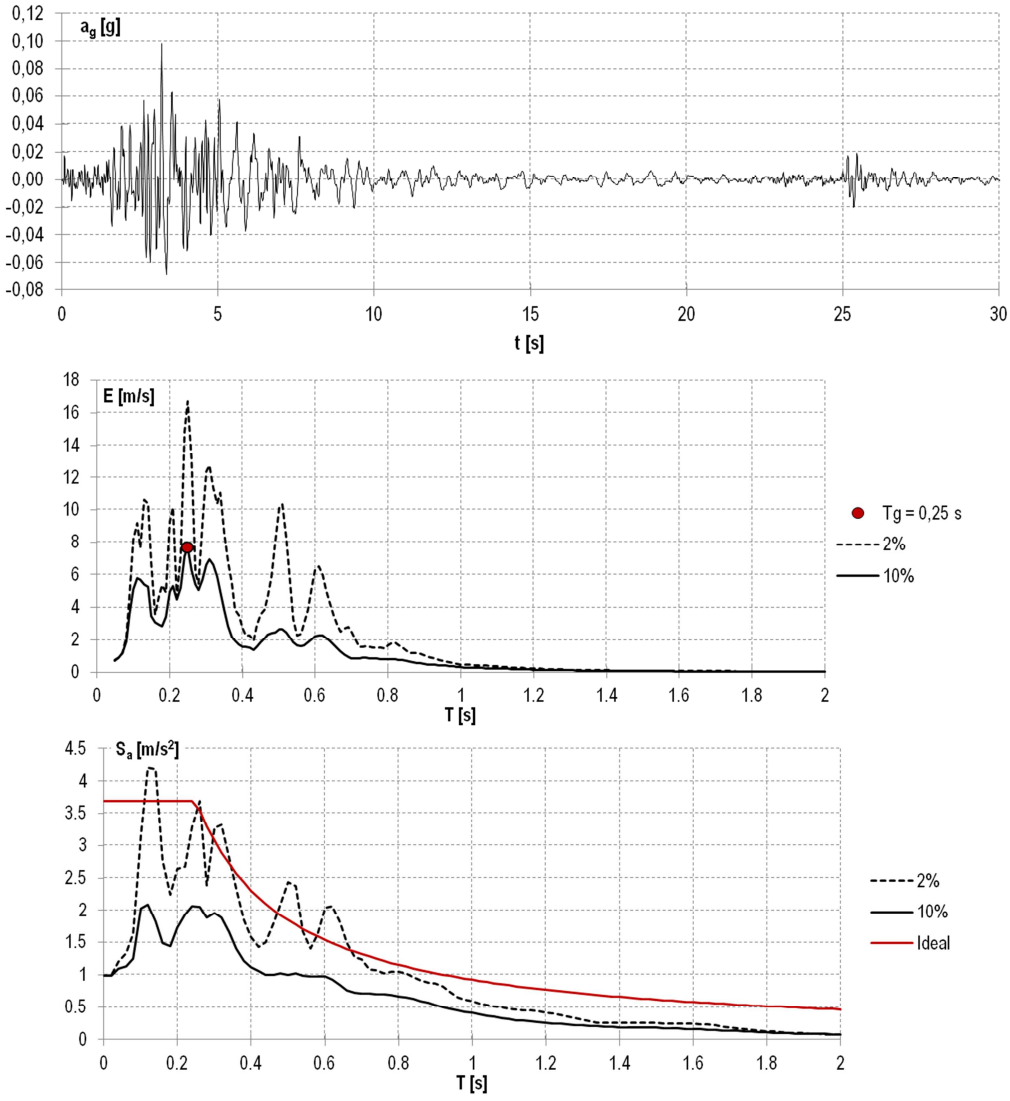


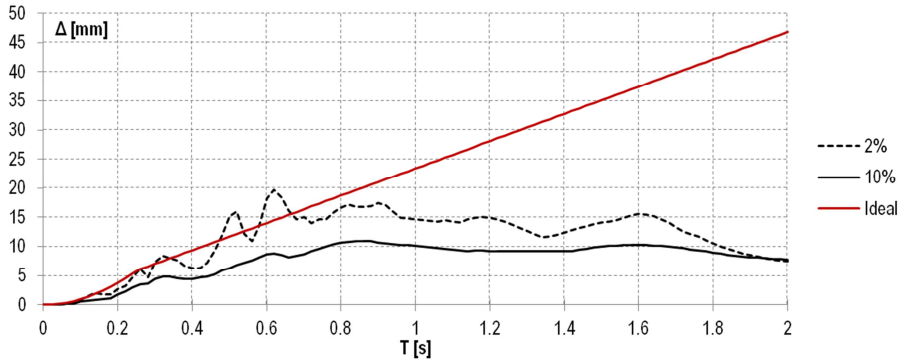
Slika B1.4 *Prikaz akcelerograma, spektra energije i idealiziranih spektara ubrzanja i pomaka za zapis potresa Campano Lucano_x.*



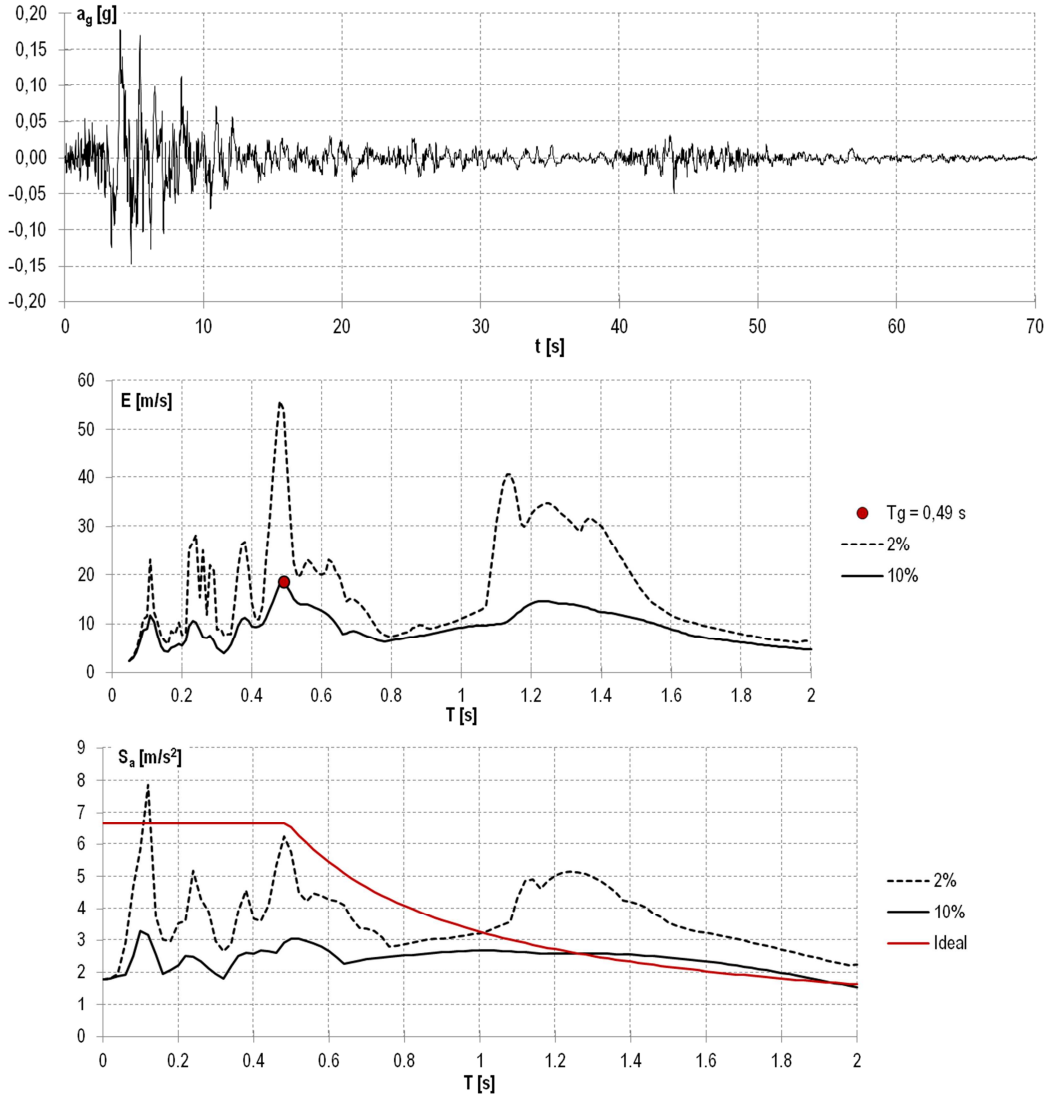


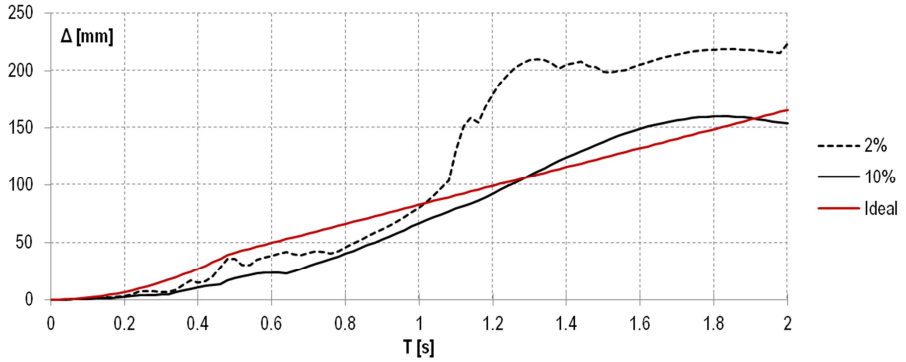
Slika B1.5 *Prikaz akcelerograma, spektra energije i idealiziranih spektara ubrzanja i pomaka za zapis potresa Spitak_y.*



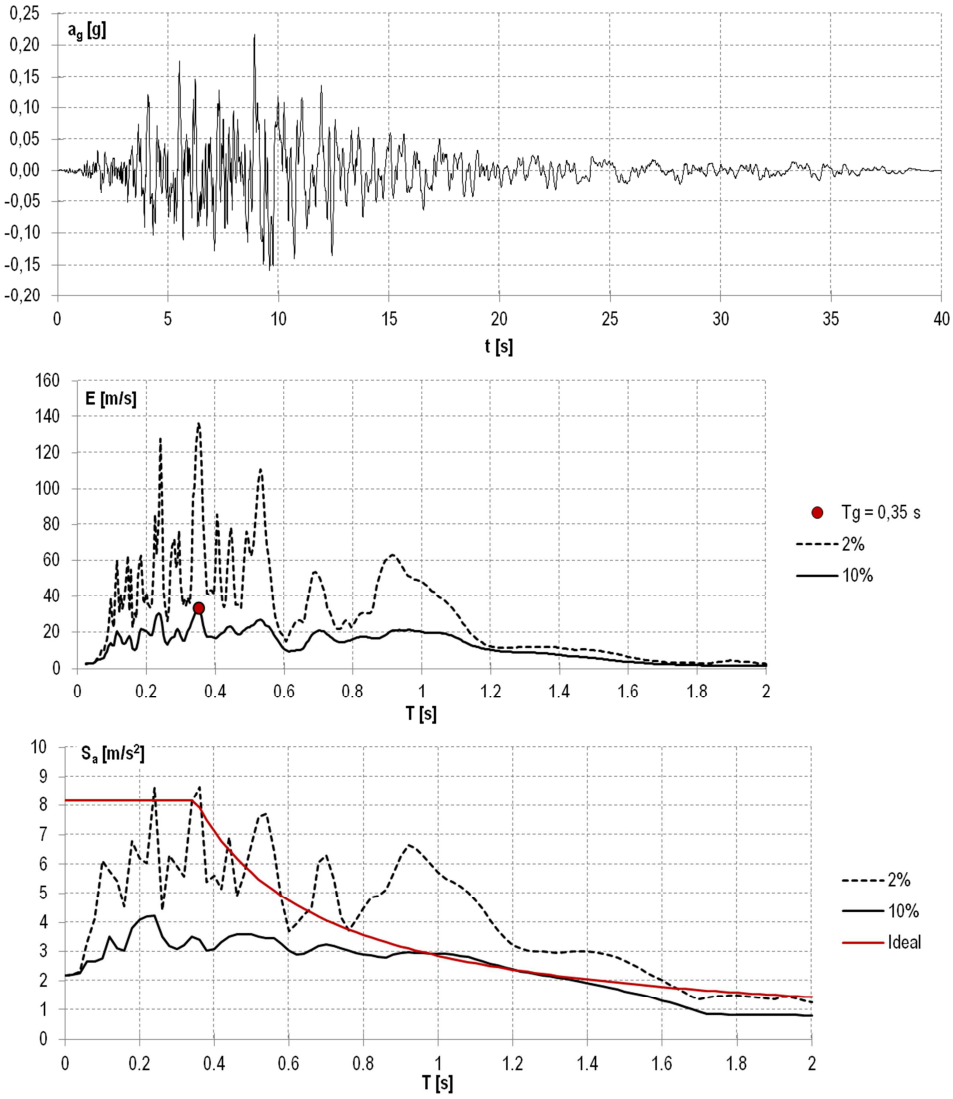


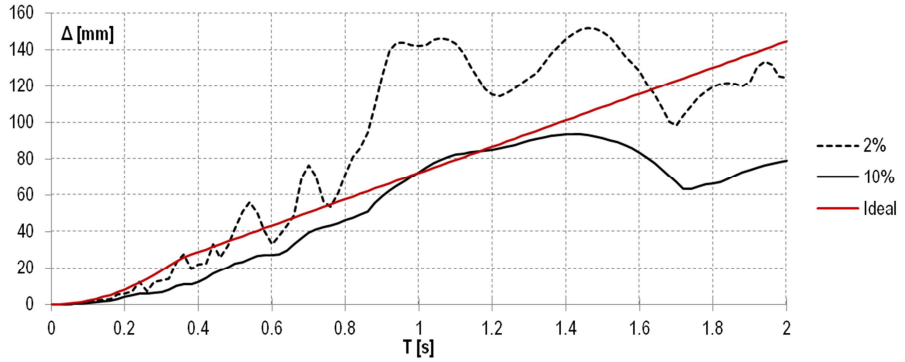
Slika B1.6 *Prikaz akcelerograma, spektra energije i idealiziranih spektara ubrzanja i pomaka za zapis potresa Lazio Abruzo_x.*



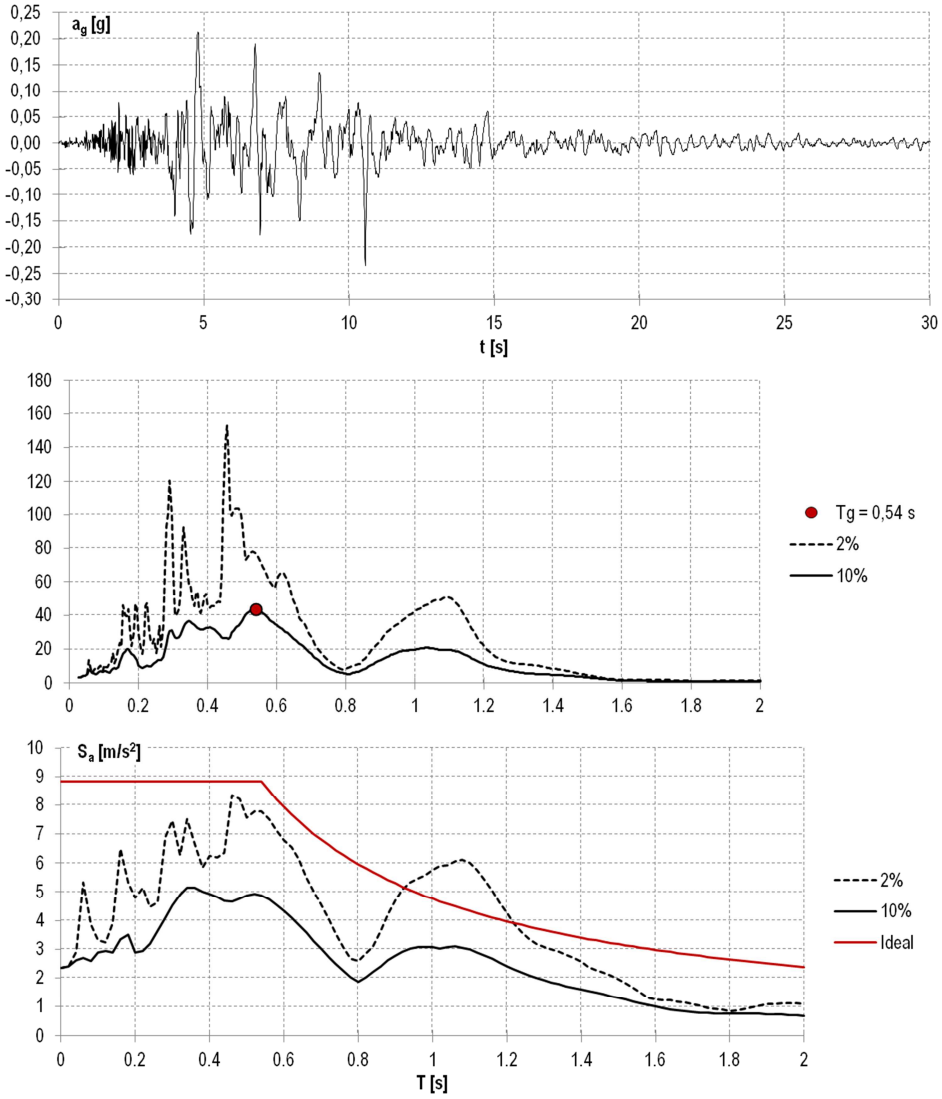


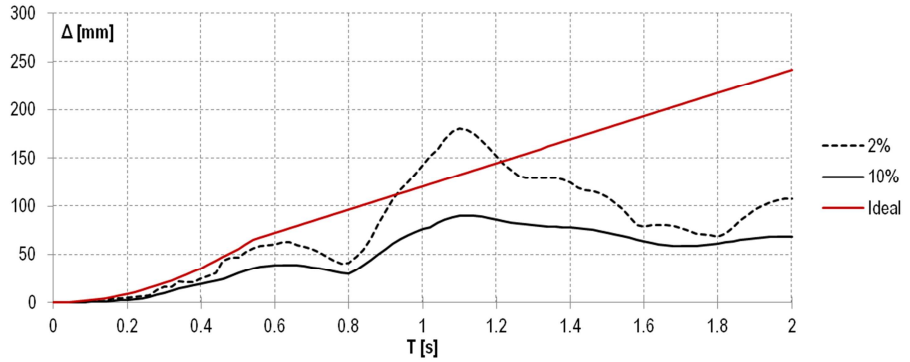
Slika B1.7 *Prikaz akcelerograma, spektra energije i idealiziranih spektara ubrzanja i pomaka za zapis potresa Campano Lucano_y.*



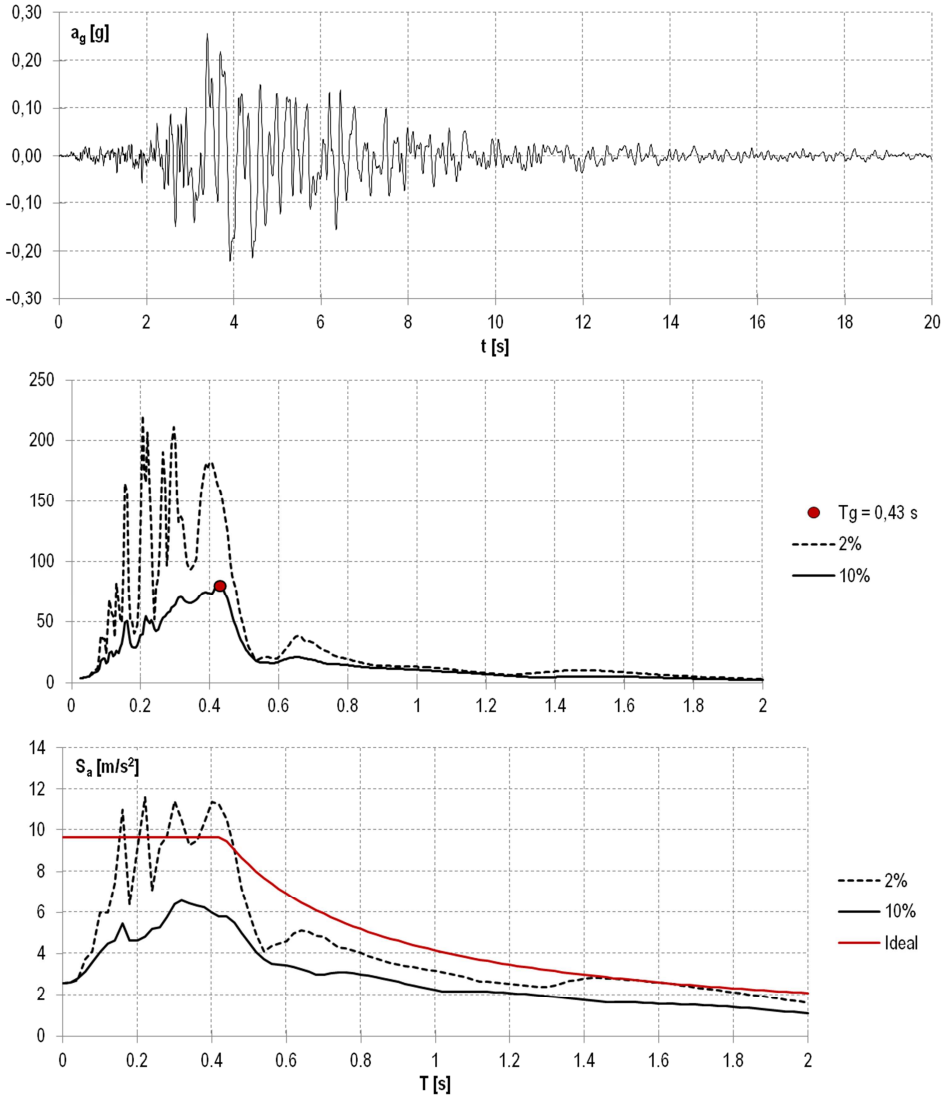


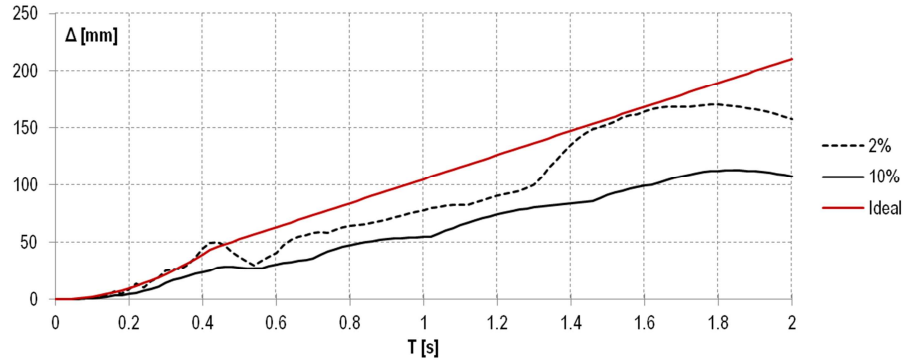
Slika B1.8 *Prikaz akcelerograma, spektra energije i idealiziranih spektara ubrzanja i pomaka za zapis potresa Northridge_y.*



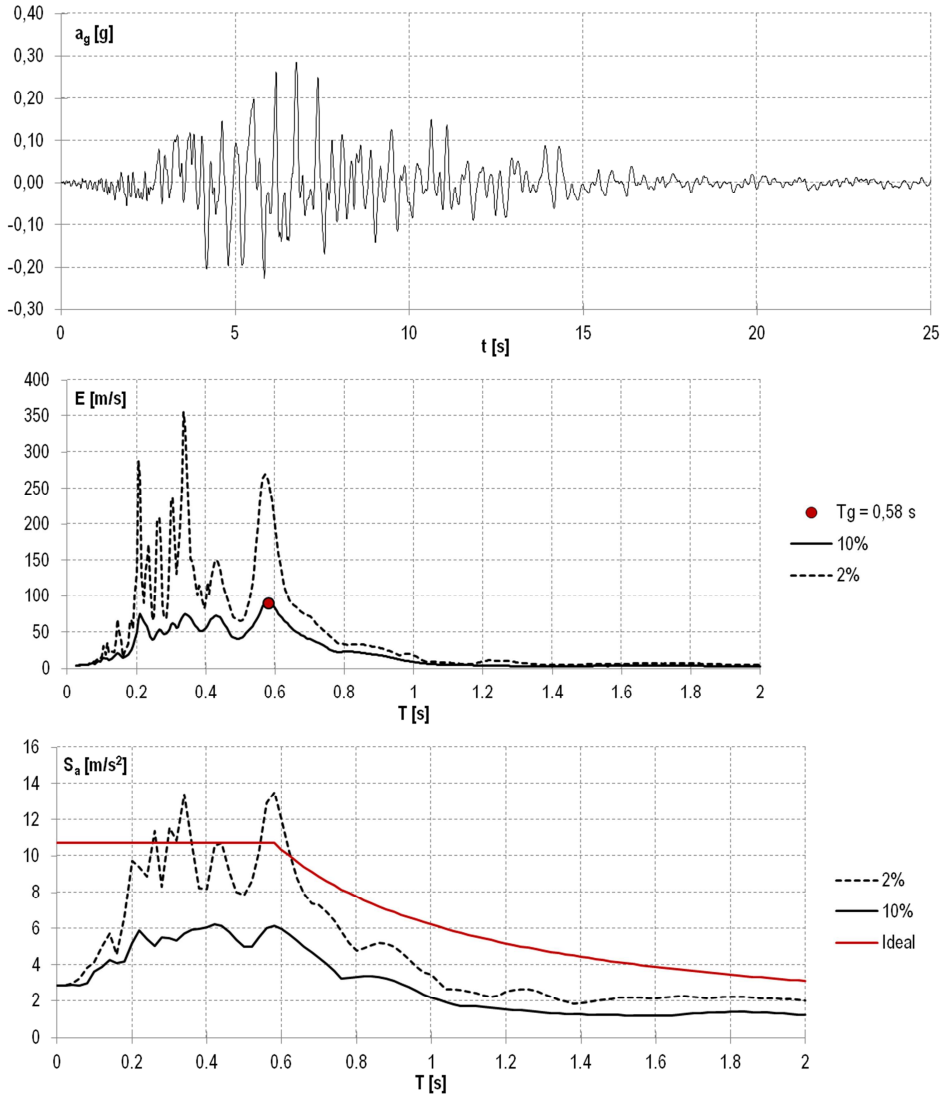


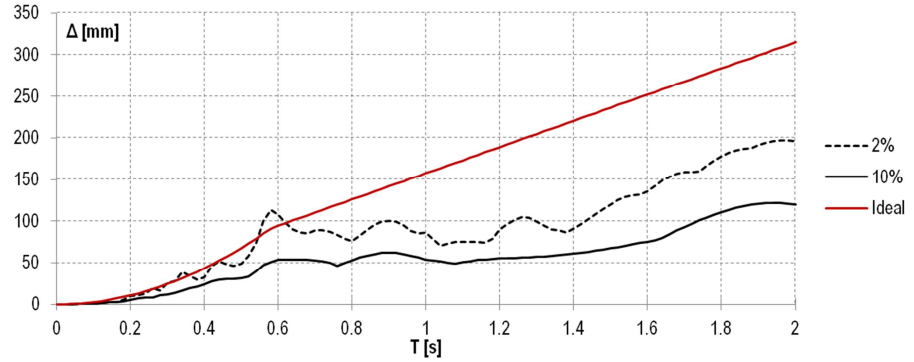
Slika B1.9 *Prikaz akcelerograma, spektra energije i idealiziranih spektara ubrzanja i pomaka za zapis potresa NW Kyushu_x.*



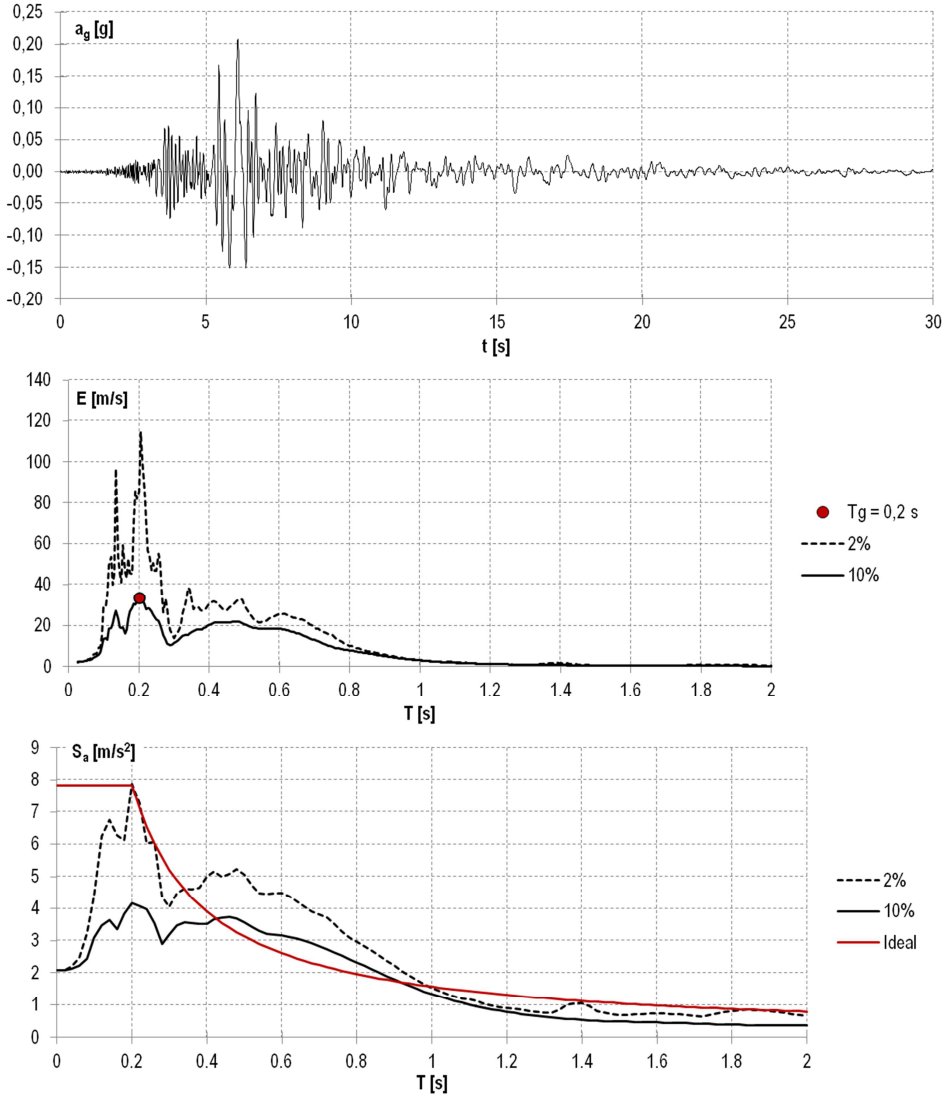


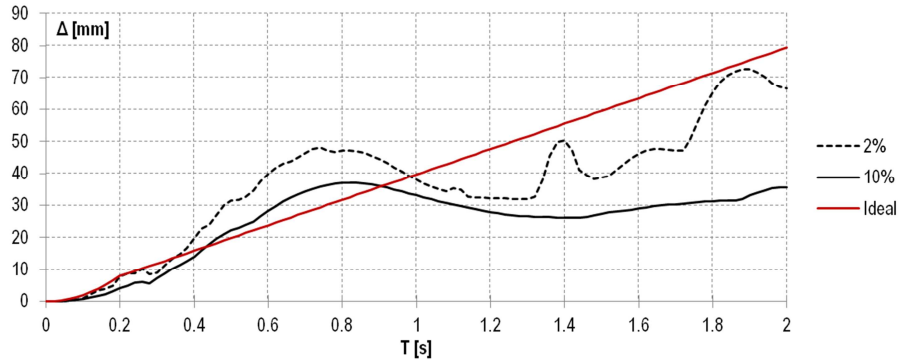
Slika B1.10 *Prikaz akcelerograma, spektra energije i idealiziranih spektara ubrzanja i pomaka za zapis potresa EMILIA Pianura Padana_x.*



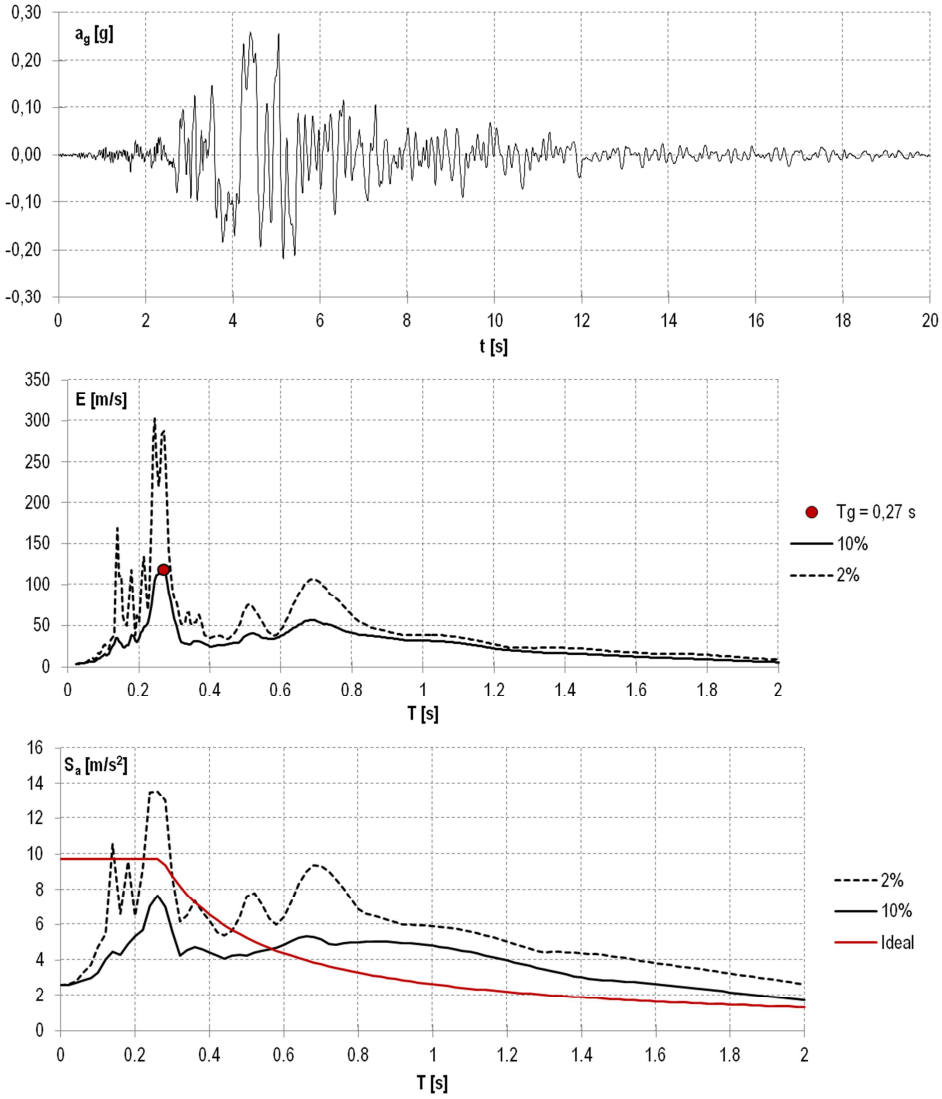


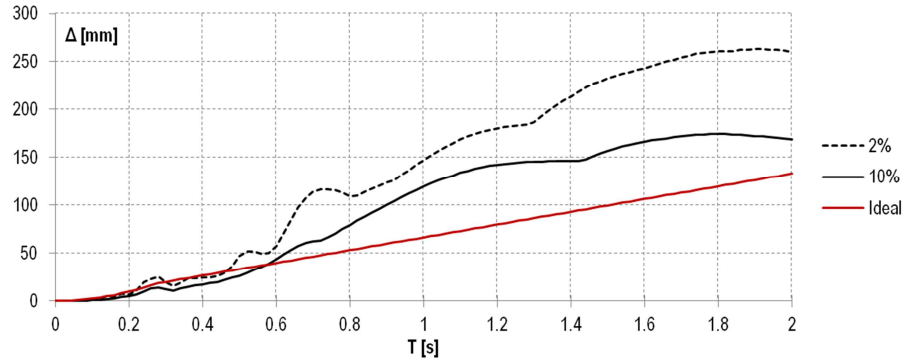
Slika B1.11 *Prikaz akcelerograma, spektra energije i idealiziranih spektara ubrzanja i pomaka za zapis potresa Christchurch_x.*



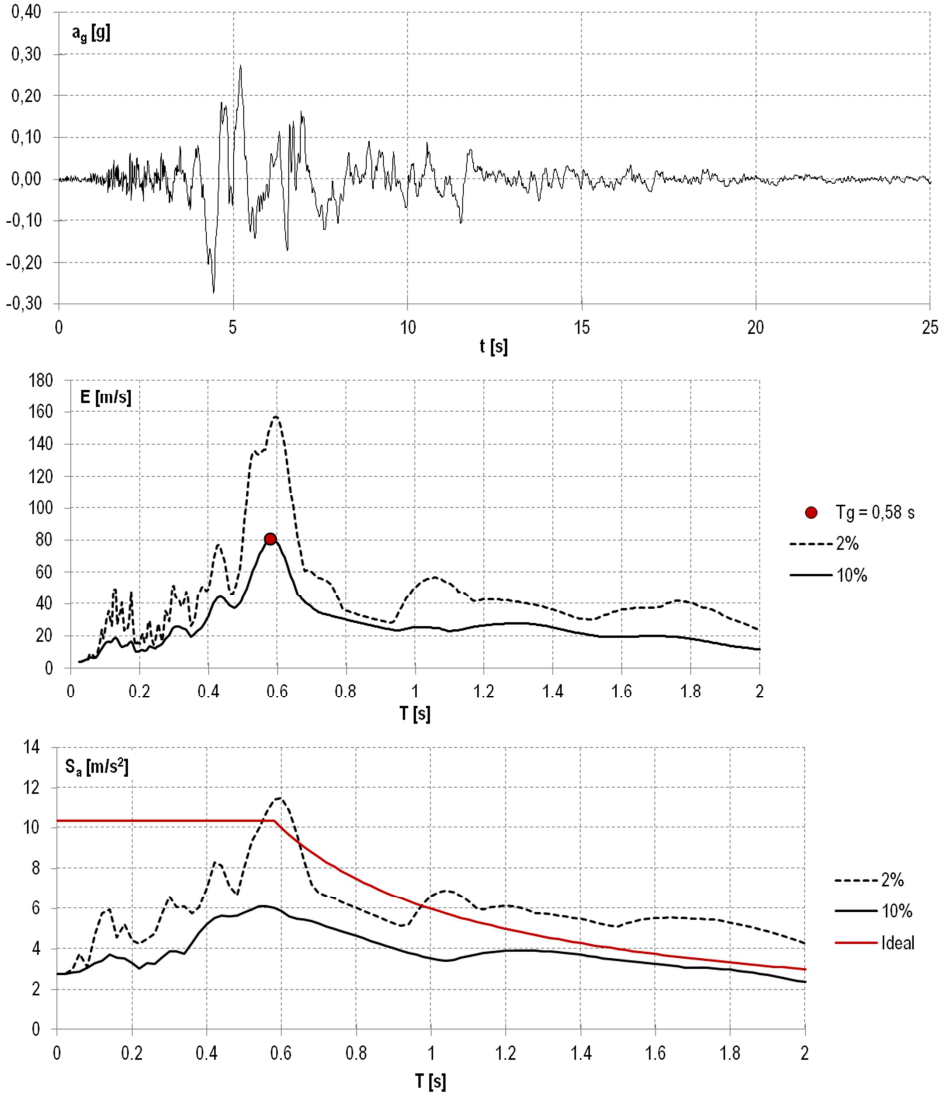


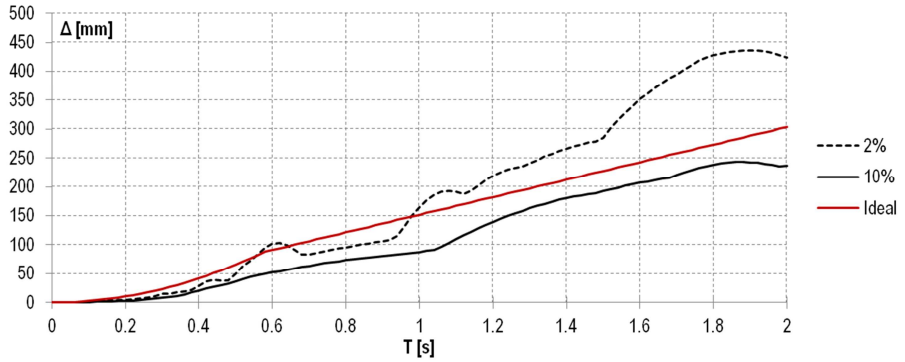
Slika B1.12 *Prikaz akcelerograma, spektra energije i idealiziranih spektara ubrzanja i pomaka za zapis potresa EMILIA Pianura Padana_x1.*



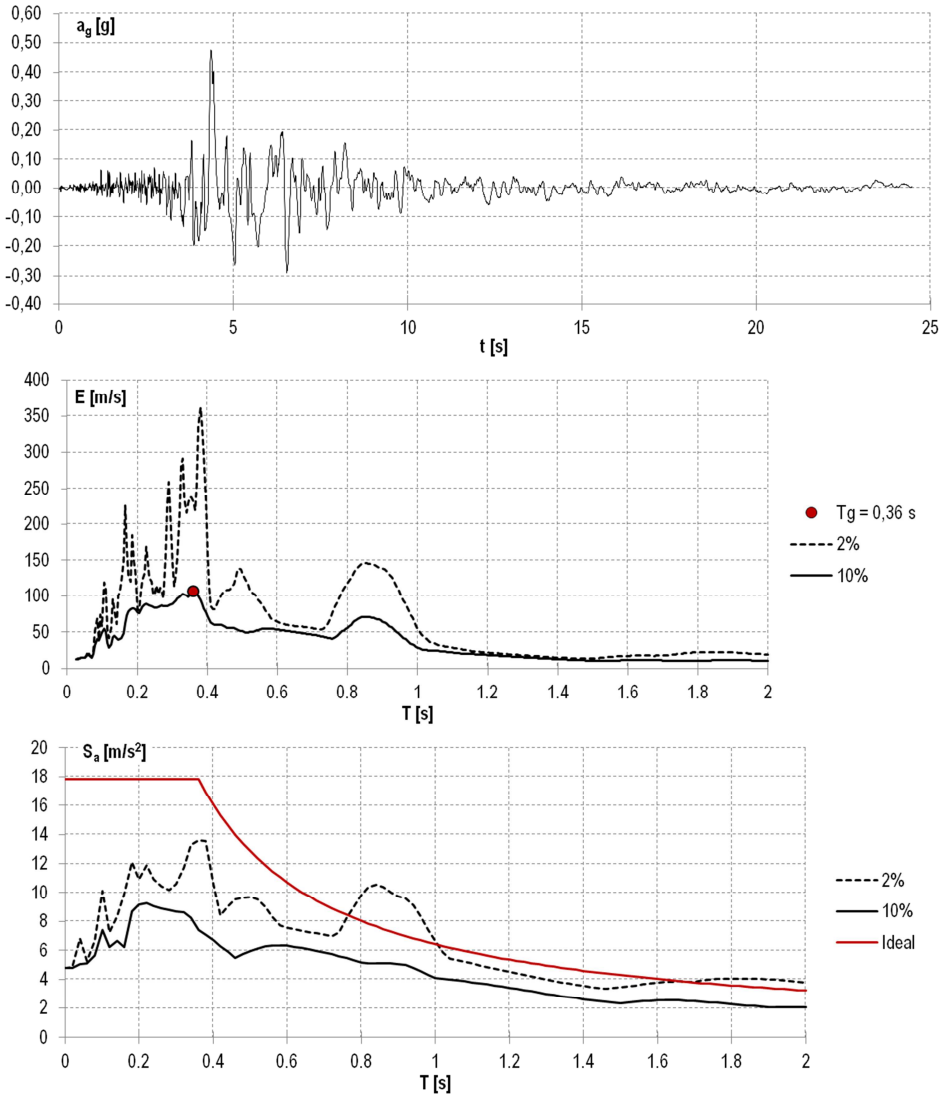


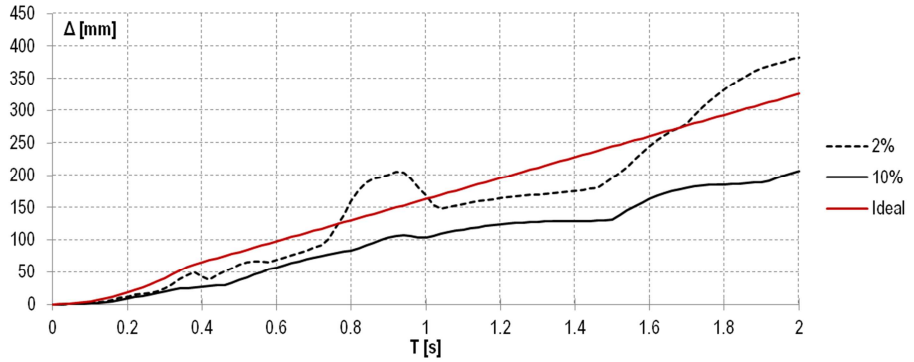
Slika B1.13 *Prikaz akcelerograma, spektra energije i idealiziranih spektara ubrzanja i pomaka za zapis potresa EMILIA Pianura Padana_y.*



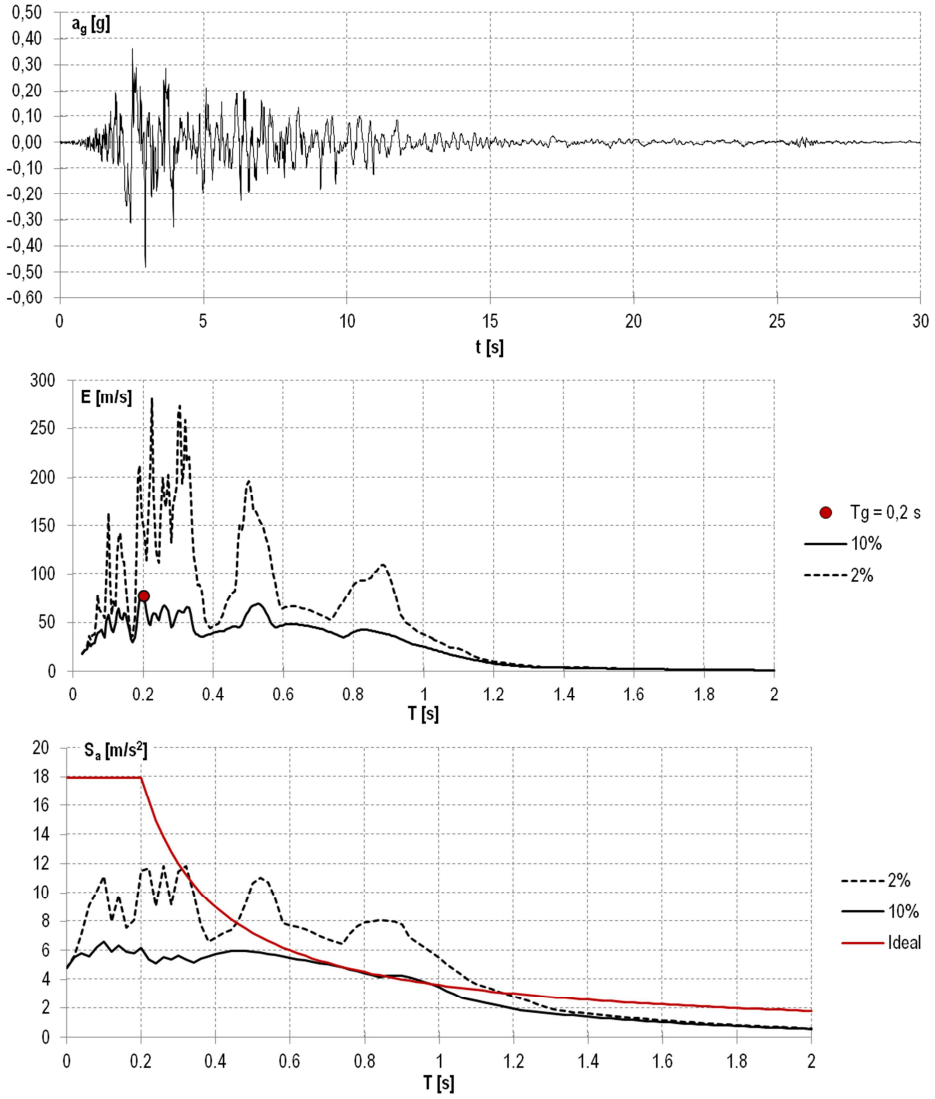


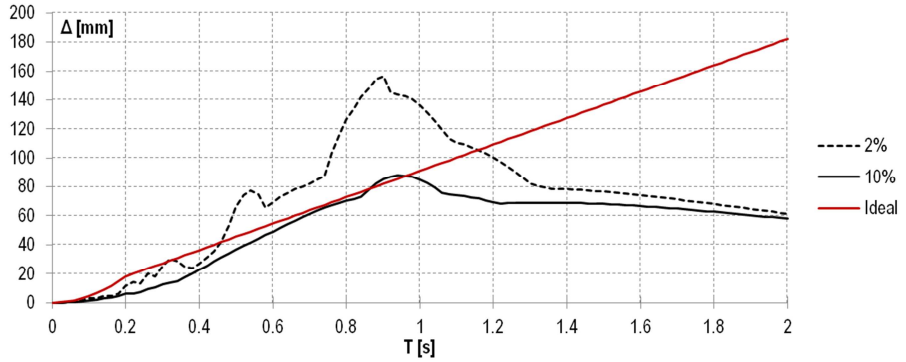
Slika B1.14 *Prikaz akcelerograma, spektra energije i idealiziranih spektara ubrzanja i pomaka za zapis potresa NW Kyushu_y.*



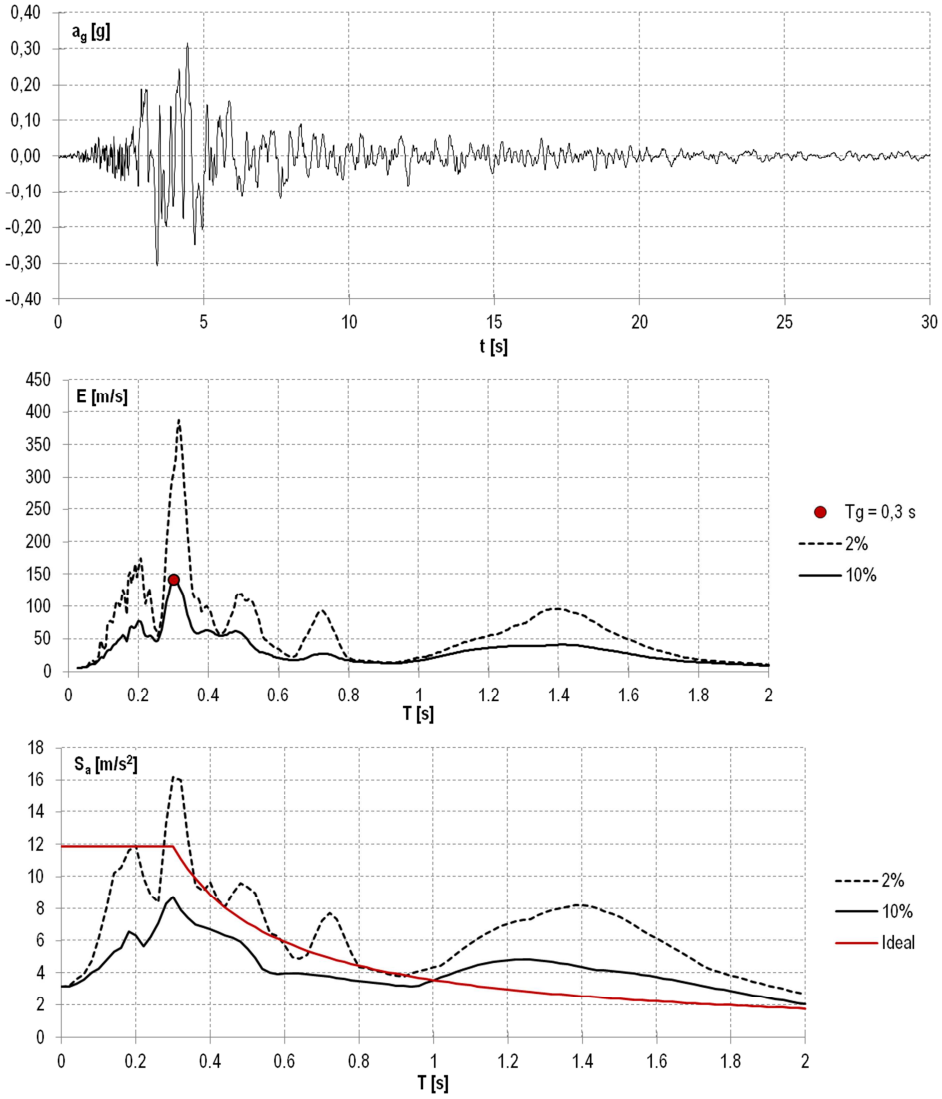


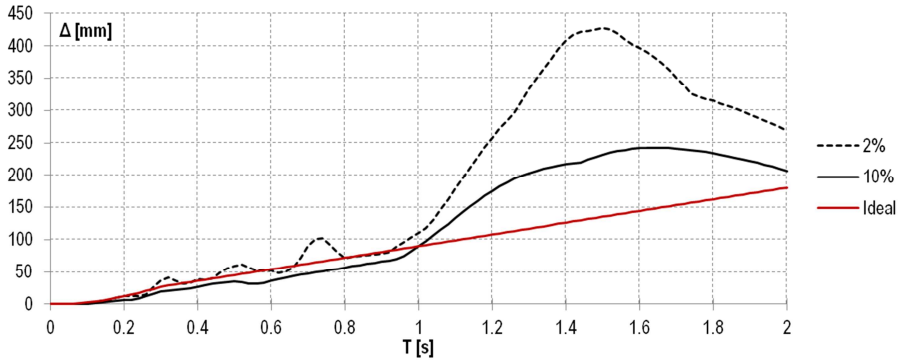
Slika B1.15 *Prikaz akcelerograma, spektra energije i idealiziranih spektara ubrzanja i pomaka za zapis potresa Imperial Valley_y.*



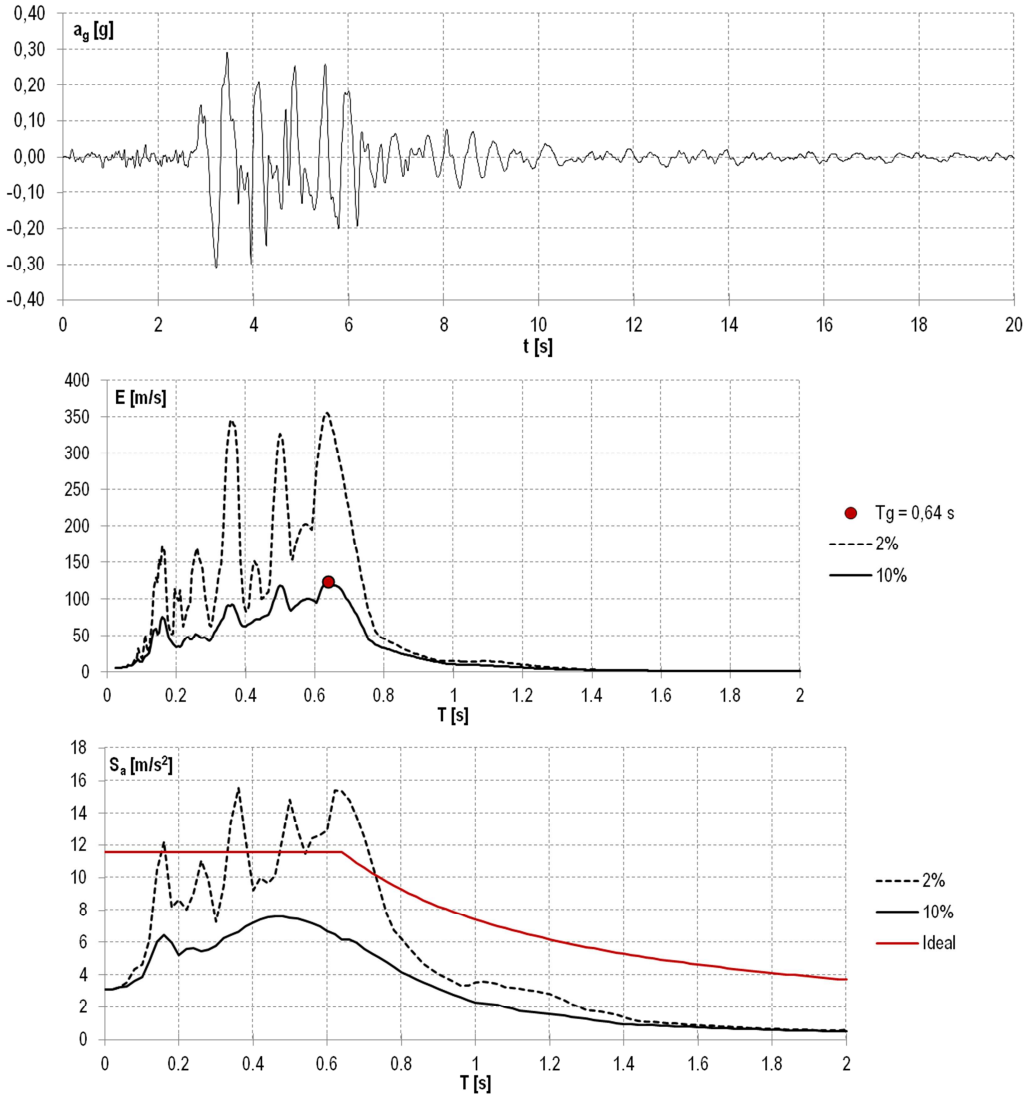


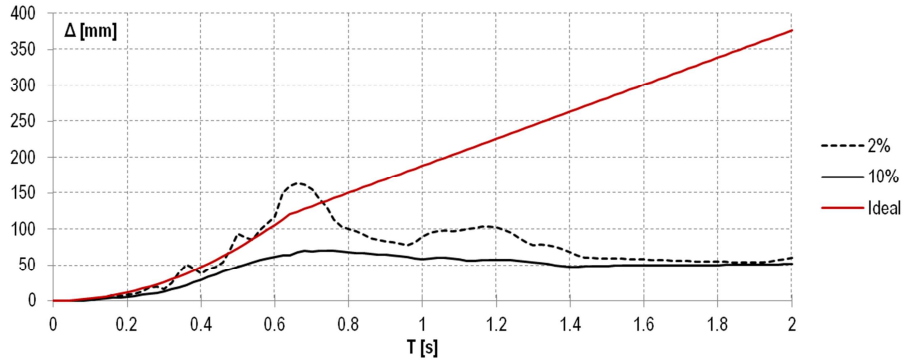
Slika B1.16 *Prikaz akcelerograma, spektra energije i idealiziranih spektara ubrzanja i pomaka za zapis potresa L'Aquila_y.*



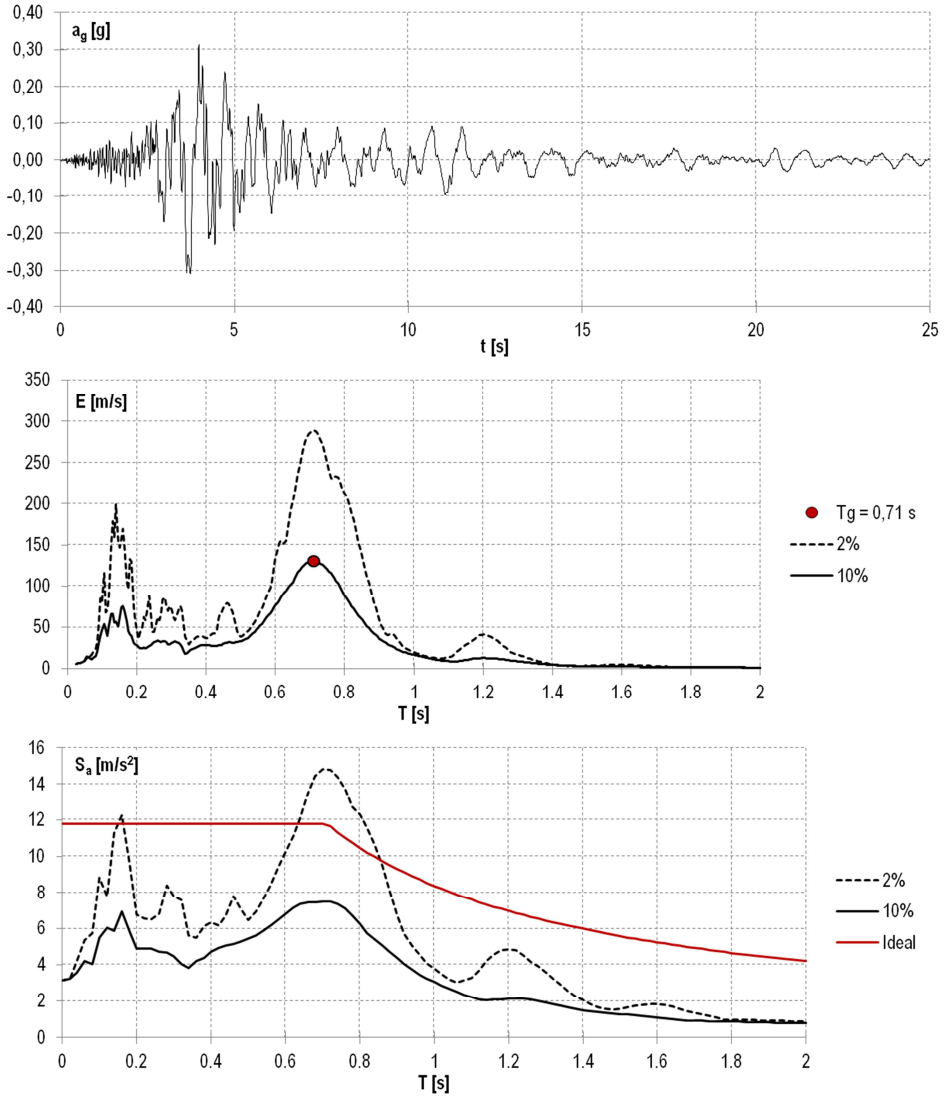


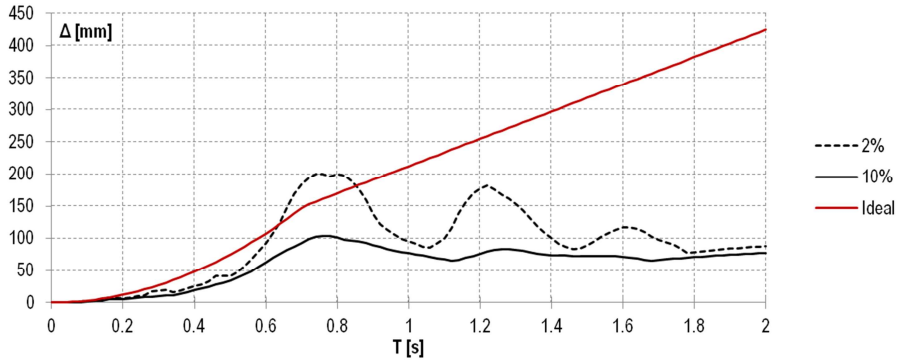
Slika B1.17 *Prikaz akcelerograma, spektra energije i idealiziranih spektara ubrzanja i pomaka za zapis potresa Loma Pieta_x.*



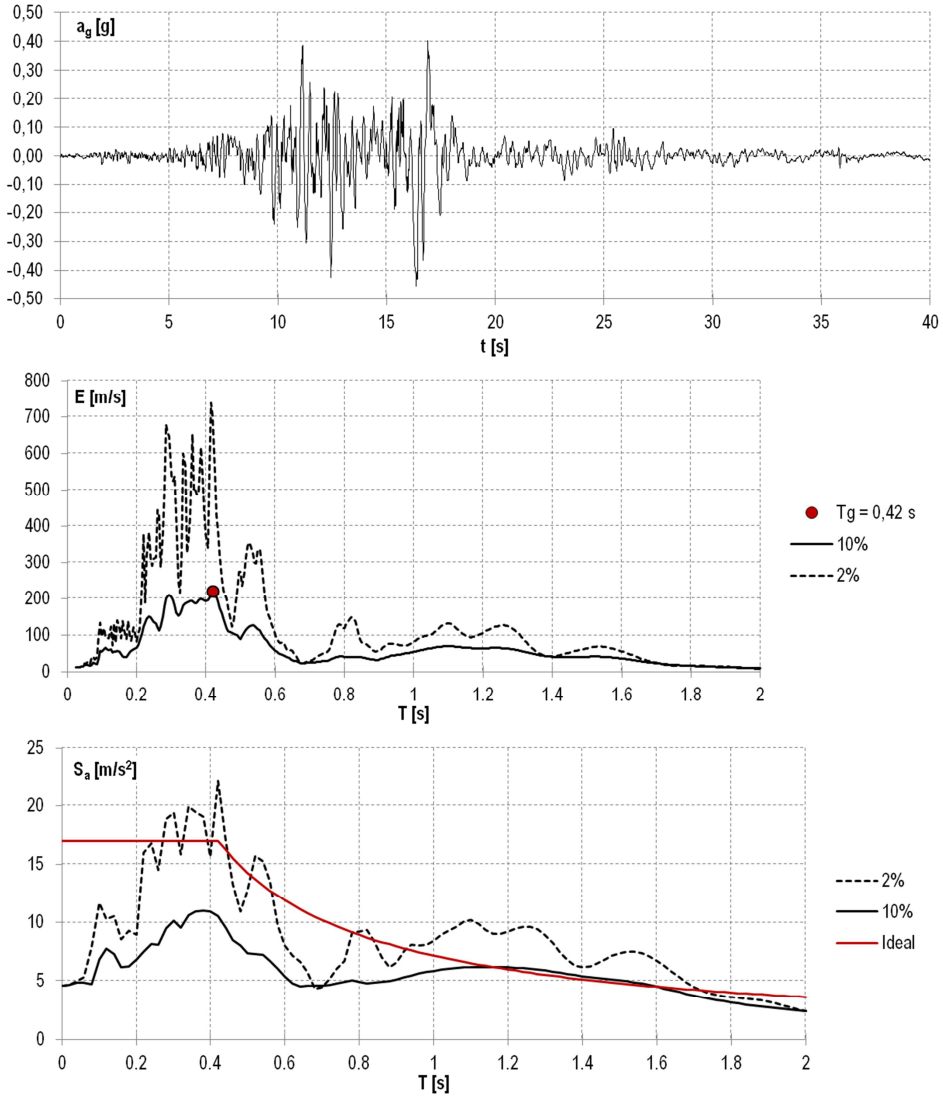


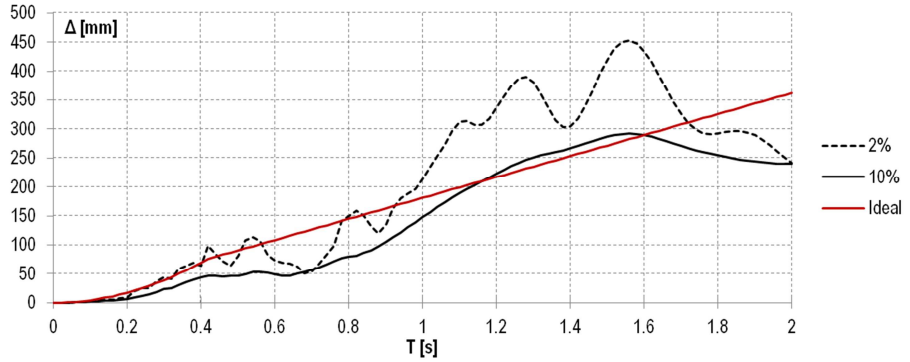
Slika B1.18 *Prikaz akcelerograma, spektra energije i idealiziranih spektara ubrzanja i pomaka za zapis potresa Friuli_x.*



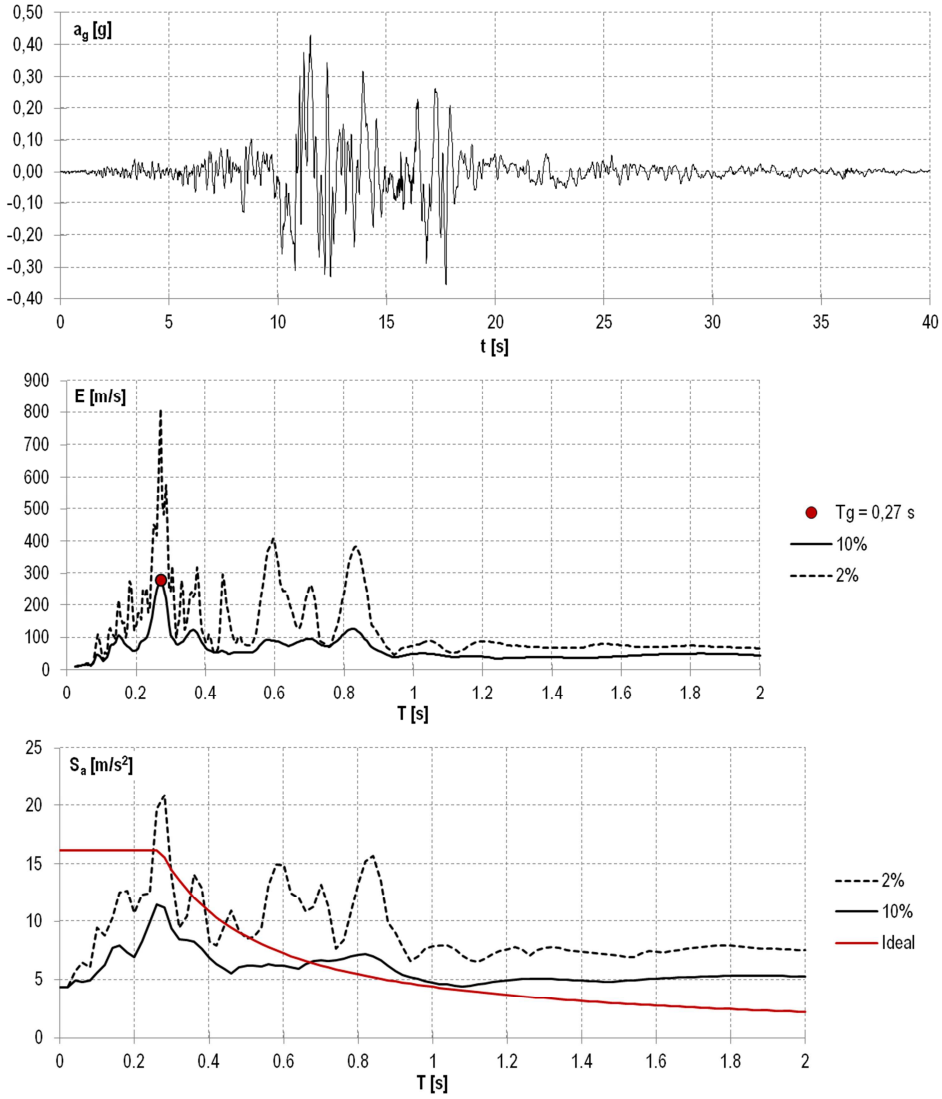


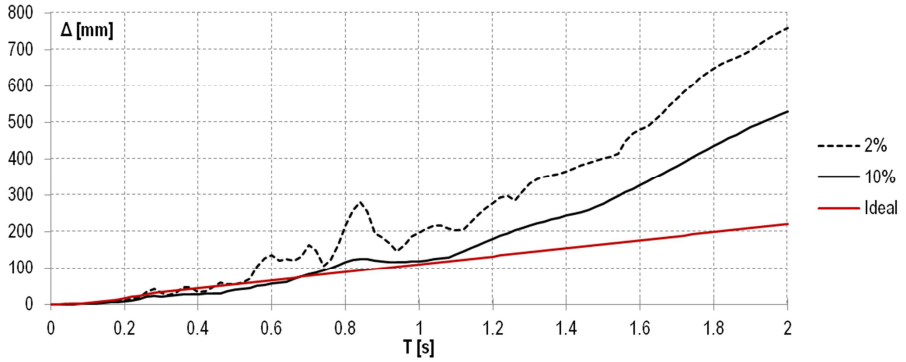
Slika B1.19 *Prikaz akcelerograma, spektra energije i idealiziranih spektara ubrzanja i pomaka za zapis potresa NW Kagoshima_x.*





Slika B1.20 *Prikaz akcelerograma, spektra energije i idealiziranih spektara ubrzanja i pomaka za zapis potresa Darfield_x.*





Slika B1.21 *Prikaz akcelerograma, spektra energije i idealiziranih spektara ubrzanja i pomaka za zapis potresa Darfield_y.*

B2. Prikaz računalnog algoritma za određivanje karakterističnog perioda potresa

```
**************************************************************************
C     PROGRAM ZA SPEKTAR ODGOVORA JEDNOSTUPNJEVNIH SUSTAVA
C     **** Mihanovic, inacica od 20.01.07.***
C*************************************************************************
      DIMENSION AF(50000),A(3,3),O(3,50000),F(3)
      OPEN(7,FILE='T7.DAT')
      OPEN(8,FILE='T8.DAT')
C.......O(N+1)=A*O(N)+F(N+1)....O-GENERALIZIRANI POMAK A-MATRICA.
C.......O-GENERALIZIRANI POMAK
C.......A-MATRICA
C.......F-OPTERECENJE, IT *DT, korak u Spektru odgovora
      DO 201 II=1,50000
201   AF(II)=0.0
      DO 202 II=1,50000
      DO 202 JJ=1,3
202   O(JJ,II)=0.0
      READ(7,101) AK,AC,AM,DT,X0,V0,GAMA,BETA
      WRITE(8,101)AK,AC,AM,DT,X0,V0,GAMA,BETA
101   FORMAT(8F10.5)
111   FORMAT(2X,8F10.5)
      READ(7,102) N,IT
      WRITE(8,102)N,IT
      READ(7,103)(AF(I),I=1,N)
      WRITE(*,104)(AF(I),I=1,N)
102   FORMAT(2I5)
103   FORMAT(F10.5)
104   FORMAT(5X,F10.5)
      H=DT
      H2=H*H
C.....IZRACUN POSTOTKA PRIGUsENJA NA TEMELJU ULAZNIH PODATAKA
            PSI=AC/(2*AM*SQRT(AK/AM))
C.....petlja po periodima
```

```
C.....

            KRAJ=N/IT+1
            DO 999 L=1,KRAJ
            AK=1.0
            T=IT*L*DT
            AM=T**2/(6.28)**2
            AC=2*AM*SQRT(AK/AM)*PSI
      DET=AM+AC*H*GAMA+AK*H2*BETA
      O(1,1)=X0
      O(2,1)=V0
      O(3,1)=(AF(1)-AC*V0-AK*X0)/AM
      DO 502  J=2,N
      DES1=AF(J)
      DES2=-AK*O(1,J-1)-AK*H*O(2,j-1)-AK*H2*(0.5-BETA)*O(3,J-1)
      DES3=-AC*O(2,J-1)-H2*(1-GAMA)*O(3,J-1)
      O(3,J)=(DES1+DES2+DES3)/DET
      O(2,J)=O(2,J-1)+H*(1-GAMA)*O(3,J-1)+H*GAMA*O(3,J)
      O(1,J)=O(1,J-1)+H*O(2,J-1)+H2*(0.5-BETA)*O(3,J-1)+H2*
     1BETA*O(3,J)
      O(2,J)=O(2,J)
      O(3,J)=O(3,J)
502   CONTINUE
C     WRITE(8,108) N,DT
108   FORMAT(I5,F10.5)
      EKSTRUB=0.0
            EKSPOMAK=0.0
            EKSBRZ=0.0
      DO 505 J=1,N
            ELSILA=AK*O(1,J)
      O(2,J)=O(2,J)
      O(3,J)=O(3,J)
            EKSPOMAK=AMAX1(EKSPOMAK,ABS(O(1,J)))
            EKSBRZ=AMAX1(EKSBRZ,ABS (O(2,J)))
            EKSTRUB=AMAX1(EKSTRUB,ABS(O(3,J)))
C     WRITE(*,106)(O(KK,J),KK=1,3)
C     WRITE(8,105)(O(KK,J),KK=1,3)
105   FORMAT(3F10.5)
106   FORMAT(2X,3F10.5)
505   CONTINUE
            EKSINSILA=EKSTRUB*AM
c     WRITE(8,506)T,EKSINSILA
            EPRIG=AM*EKSPOMAK*EKSBRZ
            EKINET=AM*EKSBRZ*EKSBRZ/2
            EPOTEN=AK*EKSPOMAK*EKSPOMAK/2
            EUKUPNO=EKINET+EPOTEN+EPRIG
            WRITE(8,506)T,EPRIG,EKINET,EPOTEN,EUKUPNO
506   FORMAT(5F12.4)
999         CONTINUE
      STOP
      END
```