Doprinos trajnosti zidanih konstrukcija

Vračević, Martina

Doctoral thesis / Disertacija

2019

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:133:078030

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-28**

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

DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek

Poslijediplomski sveučilišni studij Građevinarstvo

Doktorska disertacija

DOPRINOS TRAJNOSTI ZIDANIH KONSTRUKCIJA

mr.sc.Martina Vračević, dipl.inž.građ.

Osijek, prosinca 2018. godine

Josip Juraj Strossmayer University of Osijek

Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek

Postgraduate University Study Programme in Civil Engineering

Doctoral dissertation

A CONTRIBUTION TO DURABILITY OF MASONRY STRUCTURES

MSc.CE Martina Vračević

Osijek, December 2018

Prosudbena povjerenstva i bibliografski podaci

Povjerenstvo za prihvaćanje teme doktorske disertacije imenovano na *160. redovitoj* sjednici Fakultetskog vijeća Građevinskog fakulteta Osijek Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, održanoj *09.12.2014.* godine:

1. *Izv.prof.dr.sc. Ivanka Netinger Grubeša, dipl.ing.građ., Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, predsjednica*
2. *Izv.prof.dr.sc. Nina Štirmer, dipl.ing.građ., Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, članica*
3. *Izv.prof.dr.sc. Ivica Guljaš, dipl.ing.građ., Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, član*

Tema i mentor doktorske disertacije prihvaćeni su odlukom Fakultetskog vijeća Građevinskog fakulteta Osijek Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku na *160. redovitoj* sjednici održanoj *09.12.2014.* godine.

Povjerenstvo za ocjenu doktorske disertacije imenovano na *205. redovitoj* sjednici Fakultetskog vijeća Građevinskog fakulteta Osijek Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, održanoj *19.12.2018.* godine:

4. *Doc.dr.sc. Ivana Miličević, dipl.ing.građ., Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, predsjednica Povjerenstva*
5. *Izv.prof.dr.sc. Ivanka Netinger Grubeša, dipl.ing.građ., Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, članica i mentorica*
6. *Prof.dr.sc. Nina Štirmer, dipl.ing.građ., Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, članica*

Doktorska disertacija prihvaćena je odlukom Fakultetskog vijeća Građevinskog fakulteta Osijek Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku na *206. redovitoj* sjednici održanoj *29.01.2019.* godine.

Povjerenstvo za obranu doktorske disertacije imenovano na *206. redovitoj* sjednici Fakultetskog vijeća Građevinskog fakulteta Osijek Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, održanoj *29.01.2019.* godine:

1. *Doc.dr.sc. Ivana Miličević, dipl.ing.građ., Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, predsjednica Povjerenstva*

2. *Izv.prof.dr.sc. Ivanka Netinger Grubeša, dipl.ing.građ., Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, članica i mentorica*
3. *Prof.dr.sc. Nina Štirmer, dipl.ing.građ., Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, članica*
4. *Prof.dr.sc. Ivica Guljaš, dipl.ing.građ., Građevinski i arhitektonski faklutet, treći član* (zamjena)

Doktorske disertacija javno je obranjena *12.02.2019.* godine na Građevinskom fakultetu Osijek Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku.

Doktorska disertacija sadržava *196 stranica, 81 ilustracije, 62 tablice, 1 dodatak i 196 citiranih publikacija.*

Mentorica doktorske disertacije je *izv.prof.dr.sc. Ivanka Netinger Grubeša, dipl.ing.građ., Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek.*

Istraživanje u okviru doktorske disertacije pripada znanstvenom području tehničkih znanosti, znanstvenom polju građevinarstvo.

Izjava o akademskoj čestitosti

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem kako je doktorska disertacija isključivo rezultat moga vlastitoga rada koji se temelji na osobnim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu, a što pokazuju korištene bilješke i bibliografija. Izjavljujem kako nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno prepisan iz necitiranoga rada te kako nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava.
Izjavljujem kako nisam prijavila doktorsku disertaciju s istovjetnom temom na drugom studiju Sveučilišta ili na drugom sveučilištu.

Osijek, prosinca, 2018.

mr. sc. Martina Vračević, dipl.inž.građ.

PREDGOVOR

Tijekom izrade doktorske disertacije, osim sa djelatnicima Građevinskog i arhitektonskog fakulteta Osijek, ostvarena je suradnja i sa brojnim znanstvenicima iz drugih institucija među kojima se izdvajaju: dr.sc. Vilma Ducman iz Zavoda za gradbeništvo Slovenije, Ljubljana, Slovenija, prof.dr.sc. Janja Ranogajec i dr.sc. Snežana Vučetić sa Tehnološkog fakulteta u Novom Sadu, Novi Sad, Srbija, Maria Tunkiewicz, mag.ing.aedif. sa Faculty of Geodesy and Land Management of the University of Warmia and Mazury in Olsztyn, University of Olsztyn, Poland, izv.prof.dr.sc. Akos Kukovecz sa Faculty of Science and Informatic, Applied and Enviromental Chemistry, University of Szeged, Hungary, izv.prof.dr.sc. Berislav Marković sa Odjela za kemiju i prof.dr.sc. Mirta Benšić sa Odjela za matematiku Sveučilišta J.J. Strossmayera u Osijeku. Ovim putem zahvaljujem svim suradnicima na brojnim savjetima, razumijevanju i velikoj podršci u ovom znanstvenom istraživanju.

Posebnu zahvalnost dugujem svojoj mentorici izv. prof. dr. sc. Ivanki Netinger Grubeša, dipl.inž.građ. na nesebičnom strpljenju, stručnoj i znanstvenoj pomoći, vodstvu i izuzetnoj suradnji tijekom izrade rada. Hvala, prije svega, na svim riječima podrške, ljudskosti i predanosti koji su obilježili ovaj važan period mog života.

Svojim kolegama iz Laboratorija za materijale Instituta IGH d.d. u Osijeku, zahvaljujem na godinama zajedničkog rada obilježenih kolegijalnim i prijateljskim odnosom.

Hvala mojoj lektorici, čije su primjedbe i komentari uvelike poboljšali kvalitetu ovog rada.

I na kraju hvala mojim roditeljima i obitelji koji su vjerovali u mene kada ni sama nisam.

SAŽETAK

Rad se bavi problemom otpornosti materijala zidanih konstrukcija te ziđa na cikluse smrzavanja i odmrzavanja. Istražen je utjecaj režima pečenja opeka na njihovu otpornost na cikluse smrzavanja i odmrzavanja te je zaključeno kako duži period zadržavanja opeka u peći na najvišoj postignutoj temperaturi rezultira boljom otpornošću opeka na cikluse smrzavanja i odmrzavanja te kako način izrade opeke i režim njezina pečenja utječu na sustav pora koji će se razviti u opeci tako da sličan sustav pora razvijaju opeke izrađene na isti način. Na 16 serija opeka su određeni sljedeći parametri: tlačne čvrstoće opeka prije i nakon izlaganja ciklusima smrzavanja i odmrzavanja te njihovi omjeri, koeficijent zasićenja, specifična površina BET metodom, udio pora pojedine veličine te ukupni udio pora, ukupni volumen pora i srednji radijus pora pomoću živinog porozimetra, ukupni udio pora hidrostatskim vaganjem, Maage koeficijent, koeficijent početnoga upijanja, vodoupojnost te je praćeno upijanje i otpuštanje vode kod opeka u vremenu od 24 h. Temeljem niza pobrojanih parametara matematičkim putem provjerena je mogućnost ovih parametara da klasificiraju opeku na otpornu i neotpornu na cikluse smrzavanja i odmrzavanja te potražen matematički model koji opisuje omjer tlačnih čvrstoća opeka nakon i prije izlaganja ciklusima smrzavanja i odmrzavanja. Zaključeno je da su vodoupojnost i koeficijent otpuštanja vode iz opeke u vremenu 180-360 minuta izvrsni klasifikatori za klasifikaciju opeke na otporne i neotporne. Za odabrane opeke provedena je nanotomografija kojom se dobio uvid u udio otvorenih i zatvorenih pora u opeci te je uočeno kako opeke s većim udjelom otvorenih pora u ukupnom udjelu pora imaju veći omjer tlačnih čvrstoća nakon i prije smrzavanja, a time i bolju otpornost na cikluse smrzavanja i odmrzavanja. Ovo u nastavku znači da osim distribucije pora bitnu ulogu kod otpornosti opeke na cikluse smrzavanja i odmrzavanja ima i vrsta pora. U nastavku je istražen utjecaj ciklusa smrzavanja i odmrzavanja na mortove različitih sastava; vapnene, produžne, cementne i cementne s dodatkom aeranta u kojima su volumno varirani omjeri komponenata unutar pojedine skupine. Najbolju otpornost u kontekstu omjera čvrstoća nakon i prije ciklusa smrzavanja i odmrzavanja pokazali su cementni mortovi sa aerantom, potom cementni mortovi dok su se uzorci vapnenog i produžnog morta raspali prilikom izlaganja ciklusima smrzavanja i odmrzavanja te im nije bilo moguće odrediti otpornost. Odabranom cementnom mortu te dvjema serijama opeka određena su toplinska svojstva prije i nakon izlaganja ciklusima smrzavanja i odmrzavanja te je uočeno da ciklusi smrzavanja i odmrzavanja negativno utječu na toplinsku provodljivost te da ona raste nakon izlaganja uzoraka tom djelovanju što znači da materijali nakon ciklusa smrzavanja i odmrzavanja osim na mehaničkim svojstvima gube i na svojstvu toplinske izolacije.
Napravljeno je ziđe od odabranih opeka i odabranoga morta kojem je ispitivanjem određena početna posmična čvrstoća prije i nakon smrzavanja te računski određen koeficijent prolaska topline prije i nakon smrzavanja te isti stavljeni u omjer. Zaključeno je da ciklusi smrzavanja i odmrzavanja slabe kako mehanička tako i toplinska svojstva ziđa što u nastavku znači veću potrošnju energije i veće troškove grijanja u objektima te veću godišnju emisiju CO_2. Ovo ukazuje na potrebu za bržom i cijenom pristupačnijom metodom za ocjenu otpornosti opeke, kao većinskoga dijela zidanih građevina, na cikluse smrzavanja i odmrzavanja te se temeljem u radu provedenog istraživanja kao odabrana metoda preporučuje ispitivanje vodoupojnosti. Ispitivanje vodoupojnosti je jednostavna metoda kojom bi i sami proizvođači opečnih zidnih elemenata mogli provjeriti otpornost opeke na cikluse smrzavanja i odmrzavanja u okviru kontrole tvorničke proizvodnje.

Ključne riječi: zidane konstrukcije, opeka, mort, trajnost, otpornost na cikluse smrzavanja i odmrzavanja, parametri upijanja vode, porozimetrija, specifična površina, mehanička svojstva, toplinska svojstva

ABSTRACT

The paper deals with durability of materials in wall structures and masonry with respect to freeze and thaw cycles. It also examines the effect of the selected brick firing regime on the resistance of bricks to freeze and thaw cycles. Results of the examination lead to the conclusion that the longer a brick is fired in the kiln at a maximum achieved temperature, the better is its resistance to freeze and thaw cycles. Another conclusion is that the brickmaking method and its firing regime also affect the pore system developed and that the pore system will be more similar in bricks made using the same method. The following parameters were determined based on 16 batches of bricks: compressive strength of bricks before and after exposure to freeze and thaw cycles and ratios of measured values; saturation coefficient; specific surface area determined by applying the BET method; portion of pores of particular sizes and total portion of pores; total pore volume and average pore radius measured by a mercury porosimeter; total portion of pores measured based on hydrostatic weighing; Maage's index; initial absorption coefficient and water absorption. In addition, water absorption and desorption of bricks was monitored through a 24-hour period. Based on said parameters, the possibility of their use for the purposes of classifying bricks as resistant or non-resistant to freeze and thaw cycles was mathematically calculated. In addition, a mathematical model describing the ratio of compressive strength values of bricks, measured before and after exposure to freeze and thaw cycles, was also sought. It was concluded that water absorption and the water desorption coefficient of bricks, measured for a period of 180-360 minutes, are excellent classifiers for classification of bricks as resistant or non-resistant. Nanotomography was performed on selected bricks to gain an insight into the portion of open and closed pores in bricks. It was determined that bricks with a higher portion of open pores relative to the total portion of pores have a higher ratio of compressive strength values measured after and before the freezing cycle and are, therefore, more resistant to freeze and thaw cycles. What that indicates is that, in addition to pore distribution, the type of pore also plays a significant role in the resistance of bricks to freeze and thaw cycles. Furthermore, the paper examined the effect of freeze and thaw cycles on different types of mortars: lime; lime-based; cementitious; and cementitious mortar with added air-entraining agent. Ratio of the volume of components in said types of mortars was varied for each individual group. The highest resistance, in terms of compressive strength ratio of values measured before and after the freeze and thaw cycle, was measured in cementitious mortars with added air-entraining agent. They were followed by cementitious mortars, while the lime and lime-based mortar samples decomposed during exposure to freeze and thaw cycles, thus making their resistance impossible to determine. Thermal characteristics of the selected cementitious mortar and of two batches of bricks were determined before and after exposure to freeze and thaw cycles. It was observed that freeze and thaw cycles have a negative effect on thermal conductivity and that it increases after the samples are exposed to such processes. This means that both the mechanical and thermal insulation characteristics decrease after the materials are exposed to freeze and thaw cycles.

Masonry was constructed by using selected bricks and mortar and, through tests, its initial shear strength was measured before and after exposure to the freeze cycle. In addition, the heat transfer coefficient was calculated before and after the freeze cycle, after which a comparison of these two values was made and their mutual ratio determined. The conclusion was that freeze and thaw cycles diminish both the mechanical and thermal characteristics of masonry, which, in turn, leads to greater energy consumption and higher heating costs in buildings, as well as higher annual CO_2 emissions. This points to the need for a faster and more economical method of evaluating the resistance of bricks to freeze and thaw cycles, because masonry structures are, for the most part, constructed from bricks. Based on the research conducted for the purpose of this paper, the recommended method is water absorption testing. Water absorption testing is a simple method which could be used by manufacturers of clay masonry units within their production quality control in the factory to verify the resistance of bricks to freeze and thaw cycles.

Key words: Masonry structures, brick, mortar, durability, resistance to freeze and thaw cycles, water absorption parameters, porosimetry, specific surface area, thermal properties

Sadržaj

PREDGOVOR

SAŽETAK

ABSTRACT

Popis Slika

Popis Tablica

Popis kratica i simbola

1.UVOD 1

2.TRAJNOST KONSTRUKCIJA 7

2.1. Trajnost betonskih konstrukcija 7

2.2. Trajnost drvenih konstrukcija 10

2.3. Trajnost čeličnih konstrukcija 12

2.4. Trajnost zidanih konstukcija 13

2.4.1. Potreba za istraživanjem trajnosti zidanih konstrukcija 14

3. TRAJNOST OPEČNIH ZIDNIH ELEMENATA 17

3.1. Razredba opečnih zidnih elemenata prema europskom zakonodavstvu 18

3.2. Ispitivanja svojstava opečnih zidnih elemenata 21

3.2.1.Određivanje izmjera i paralelnosti naliježućih ploha sukladno normi HRN EN 772-16:2011 22

3.2.2. Određivanje ravnosti ploha sukladno normi HRN EN 772-20:2003/A1:2005 24

3.2.3. Određivanje neto obujma i postotka šupljina sukladno normi HRN EN 772-3:2003 24

3.2.4. Određivanje neto i bruto obujamske mase sukladno normi HRN EN 772-13:2003 26

3.2.5. Određivanje vodoupojnosti sukladno normi HRN EN 772-21:2011 27

3.2.6. Određivanje kapilarne vodoupojnosti opečnih zidnih elemenata sukladno normi HRN EN 772-11:2011 28

3.2.7. Određivanje tlačne čvrstoće sukladno normi HRN EN 772-1:2011 30

3.2.8. Određivanje otpornosti na cikluse smrzavanja/odmrzavanja sukladno normi HRS CEN/TS 772-22:2008 32

3.2.9. Određivanje sadržaja topivih soli sukladno normi HRN EN 772-5:2016 35

3.2.10. Određivanje toplinske otpornosti i paropropustnosti sukladno normi HRN EN 1745:2012 37

3.3. Proizvodnja opečnih zidnih elemenata 38

3.3.1. Sirovina za proizvodnju 38

3.3.1.1. Utjecaj sirovine na otpornost opečnih zidnih elemenata na cikluse smrzavanja/odmrzavanja 42

3.3.2. Oblikovanje elemenata 43

3.3.2.1. Utjecaj načina oblikovanja na otpornost opečnih zidnih elemenata na cikluse smrzavanja/odmrzavanja 45

3.3.3. Sušenje elemenata 46

3.3.4. Pečenje elemenata 49

3.3.4.1. Režim pečenja u pećima 52

3.3.4.1.1. Utjecaj režima pečenja na otpornost opečnih zidnih elemenata na cikluse smrzavanja/odmrzavanja 55

3.4. Trajnost opečnih zidnih elemenata 55

3.4.1. Mehanizmi degradacije opečnih zidnih elemenata 56

3.4.2. Metode procjene trajnosti opečnih zidnih elemenata 58

3.4.2.1. Procjena otpornosti opečnih zidnih elemenata na cikluse smrzavanja/odmrzavanja prema američkim i kanadskim propisima 59

3.4.2.2. Procjena otpornosti opečnih zidnih elemenata na cikluse smrzavanja/odmrzavanja prema Maage-u 61

3.4.2.3. Procjena otpornosti opečnih zidnih elemenata na cikluse smrzavanja/odmrzavanja prema Koroth-u 63

3.4.2.4. Procjena otpornosti opečnih zidnih elemenata na cikluse smrzavanja/odmrzavanja prema Vincenzini-u, Franke-u i Bentrup-u, Litvan, Robinson-u, Arnott-u te Nakamura-i 66

3.4.2.5. Procjena otpornosti opečnih zidnih elemenata na cikluse smrzavanja/odmrzavanja mjerenjem promjene duljine pri kritičnom stupnju zasićenosti 71

3.4.2.6. Utjecaj poroznosti na otpornost opečnih zidnih elemenata na cikluse smrzavanja/odmrzavanja 72

3.4.2.7. Utjecaj upijanja vode na otpornost opečnih zidnih elemenata na cikluse smrzavanja/odmrzavanja 73

4.TRAJNOST MORTOVA ZA ZIĐE 74

4.1. Razredba mortova za ziđe prema europskom zakonodavstvu 74

4.2. Ispitivanje svojstava mortova za zidanje 76

4.3. Izrada morta za zidanje 77

4.4. Trajnost mortova za ziđe 84

4.4.1. Transport vlage u mortovima 85

4.4.2. Trajnost vapnenih i produžnih mortova 86

4.4.3. Trajnost cementnih mortova 88

4.4.4. Metoda procjene trajnosti mortova u sustavu ziđa 91

4.4.5. Ostale metode procjene trajnosti mortova 92

5. UTJECAJ CIKLUSA SMRZAVANJA I ODMRZAVANJA NA SVOJSTVA MATERIJALA ZIĐA - EKPERIMENTALNI DIO 96

5.1. Utjecaj načina izrade i režima pečenja opeka na otpornost pune opeke na cikluse smrzavanja/odmrzavanja 96

5.1.1. Analiza sirovine 96

5.1.1.1. Kemijski sastav 96

5.1.1.2. Mineološki sastav 98

5.1.1.3. Granulometrijski sastav 99

5.1.1.4. Diferencijalno-termička analiza i dilatometrija 101

5.1.2. Izrada opeka 103

5.1.3. Struktura pora nepečenih opeka 107

5.1.4. Struktura pora pečenih opeka 108

5.1.5. Mineološke karakteristike pečenih opeka 112

5.1.6. Ispitivanja otpornosti pečenih opeka na cikluse smrzavanja/odmrzavanja 111

5.1.7. Diskusija 113

5.2. Svojstva opeka 116

5.3. Iznalaženje novih metoda za klasifikaciju otpornosti opeke na cikluse smrzavanja/odmrzavanja 140

5.4. Iznalaženje matematičkoga modela za prognoziranje otpornosti opeke na cikluse smrzavanja i odmrzavanja 148

5.5. Utjecaj vrste pora na otpornost opeke na cikluse smrzavanja i odmrzavanja 151

5.6. Sadržaj aktivnih topivih soli 152

5.7. Otpornost mortova na cikluse smrzavanja/odmrzavanja 153

5.7. Toplinska svojstva opeka i mortova nakon ciklusa smrzavanja/odmrzavanja 158

6. UTJECAJ CIKLUSA SMRZAVANJA I ODMRZAVANJA NA MEHANIČKA I TOPLINSKA SVOJSTVA ZIĐA – EKPERIMENTALNI DIO 160

7. ZAKLJUČAK 165

BIBLIOGRAFIJA 179

Popis Slika:

1. Slika 1.1 Promjena svojstava građevine tijekom vremena
2. Slika 1.2 Prikaz životnoga vijeka slojeva građevine prema S. Brandu
3. Slika 1.3 Niz normi HRN ISO 15686 za planiranje uporabnog vijeka građevina
4. Slika 3.1 Rimska opeka sa lokaliteta Vojarna-Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek
5. Slika 3.2 Razredba zidnih elemenata prema HRN EN 771-1 - nezaštićeno ziđe
6. Slika 3.3 Razredba zidnih elemenata prema HRN EN 771-1- zaštićeno ziđe
7. Slika 3.4 Postupak izmjere duljine, širine i visine ispitnih uzoraka
8. Slika 3.5 Mjerni položaji za ispitivanje planparelelnosti ploha opeke
9. Slika 3.6 Hidrostatsko vaganje opeke
10. Slika 3.7 Vaganje opeke "na zraku"
11. Slika 3.8 Sušenje uzoraka u sušioniku
12. Slika 3.9 Ispitivanje vodoupojnosti opeke
13. Slika 3.10 Ispitivanje početnoga kapilarnoga upijanja
14. Slika 3.11 Određivanje tlačne čvrstoće u preši
15. Slika 3.12 Grafički prikaz ciklusa smrzavanja/odmrzavanja prema HRS CEN/TS 772-22
16. Slika 3.13 Ispitivanje otpornosti ziđa na cikluse smrzavanja/odmrzavanja
17. Slika 3.14 Vakumski agregat i rezaći stol
18. Slika 3.15 Drveni kalup za oblikovanje ručno proizvedene opeke
19. Slika 3.16 Primjer sušenja pune opeke u natkrivenoj sušari prirodnim putem
20. Slika 3.17 Primjer sušenja pune opeke u natkrivenoj sušari prirodnim putem
21. Slika 3.18 Tunelska sušara: a) unutrašnjost; b) ventilator u sušari
22. Slika 3.20 Hofmanova kružna peć u "Opeka Osijek", Pogon Vladislavci
23. Slika 3.21 Prikaz vatrenoga kanala kružne peći sa složenim proizvodima
24. Slika 3.22 Prikaz krova Hofmanove peći: a) krov peći; b) otvori za loženje
25. Slika 3.23 Pogon Našice: a) tunelska peć; b) stropni plamenici
26. Slika 3.24 a) Dijagram odnosa povećanja temperature pečenja i ukupne poroznosti te b) dijagram odnosa povećanja temperature pečenja i tlačne čvrstoće
27. Slika 3.25 Područja različitih oblika vode u porama različitih veličina: 1 adsorpcijska voda, 2 kapilarna voda, 3 gravitacijska voda, 4 kondenzacijska vlaga
28. Slika 3.26 Utjecaj ukupne poroznosti (MIP) i količine pora s veličinom >3 μm na svojstvo trajnosti keramičkih materijala
29. Slika 3.28 Grafički prikaz odnosa koeficijenta trajnosti F_C i vodoupojnosti
30. Slika 3.29 Veza upijanja vode kuhanjem i ukupnog volumena pora u opeci
31. Slika 3.30 Povezanost parametara upijanja vode udjelom pora većih od 3 μm: a) povezanost udjela pora većih od 3 μm (P3) sa (1-C1/B)*100,

b) povezanost udjela pora većih od 3 μm (P3) sa (1-S4/B)*100

32. Slika 4.1. Podjela pora morta prema promjeru pora
33. Slika 3.31 Grafički prikaz odnosa stupnja zasićenosti i dilatacije
34. Slika 4.1 Podjela pora morta prema promjeru pora
35. Slika 4.2 Primjer nekompatibilnoga spoja morta i opeke u konstrukciji
36. Slika 4.3 Utjecaj sadržaja vapna u mortu na koeficijent kapilarnoga upijanja morta
37. Slika 4.4 Prikaz uzorka srednjovjekovnog morta pod mikroskopom
38. Slika 4.5 Distribucija pora a) kamena i crijepa i b) cementnih mortova određena Hg porozimetrijom
39. Slika 4.6 Ispitivanje zidnih panela na terenu
40. Slika 4.7 Mjerenje indeksa abrazije in situ
41. Slika 4.8 Promjena električne otpornosti:

    a) nakon prvog ciklusa smrzavanja i odmrzavanja pri temperaturama od -20 do 52 °C, te pri ponovnom hlađenju na -20° i

    b) nakon zadnjeg ciklusa smrzavanja i odmrzavanja pri temperaturama od -20 do 52 °C, te pri ponovnom hlađenju na -20°
42. Slika 4.9 Mjerni uređaj – dilatometar
43. Slika 5.1 Izgled uzoraka S1 i S2 tijekom XRF analize
44. Slika 5.2 Usporedni prikaz rentgenograma gline
45. Slika 5.3 Granulometrijski sastav glina
46. Slika 5.4 Rezultati DTA i dilatometrije sirovina
47. Slika 5.5 Strojna izrada opeka
48. Slika 5.6 Ručna izrada opeka
49. Slika 5.7 Uzorci kontrolirane proizvodnje:

    a) serija opeka proizvedenih strojno;

    b) serija opeka proizvedenih ručno
50. Slika 5.8 Sirovine za kontroliranu proizvodnju:

    a) boja sirovine kao rezultat sadržaja karbonata;

    b) boja nepečene opeke kao rezultat sirovine
51. Slika 5.9 Sušenje opeke na podu
52. Slika 5.10 Opeke na vagonu priređene za uvoženje u peć
53. Slika 5.11 Režim pečenja uzoraka na 1030°C
54. Slika 5.12 Režim pečenja uzoraka na 1060°C
55. Slika 5.13 AutoPore IV 9500 Hg porozimetar
56. Slika 5.14 Usporedni prikaz rendgenograma uzoraka različitim periodom zadržavanja na najvišoj temperaturi

57. Slika 5.15 Izgled opeka nakon ciklusa smrzavanja/odmrzavanja
58. Slika 5.16 Utjecaj režima pečenja na ručno rađenu opeku sirovine S1
59. Slika 5.17 Utjecaj režima pečenja na ručno rađenu opeku sirovine S2
60. Slika 5.18 Utjecaj režima pečenja na strojno rađenu opeku sirovine S1
61. Slika 5.19 Utjecaj režima pečenja na strojno rađenu opeku sirovine S2
62. Slika 5.20 Utjecaj režima pečenja na promjenu ukupne poroznosti opeke
63. Slika 5.21 Određivanje tlačne čvrstoće zidnih elemenata
64. Slika 5.22 Određivanje vodoupojnosti zidnih elemenata
65. Slika 5.23 Ispitivanje vodoupojnosti kuhanjem zidnih elemenata
66. Slika 5.24 Određivanje kapilarne vodoupojnosti zidnih elemenata
67. Slika 5.25 Određivanje postotka pora opečnih zidnih elemenata hidrostatskim vaganjem
68. Slika 5.26 Ispitivanje specifične površine uzoraka na Tehnološkom fakultetu u Novom Sadu
69. Slika 5.27 Karakteristike BET uređaja Građevinskog i arhitektonskog fakulteta u Osijeku
70. Slika 5.28 Izgled uzorka pripremljenog za BET uređaj Građevinskog i arhitektonskog fakultetu Osijeku
71. Slika 5.29 Krivulje upijanja i otpuštanja vode iz opeka kontrolirane proizvodnje
72. Slika 5.30 Krivulje upijanja i otpuštanja vode iz strojno izrađenih opeka nekontrolirane proizvodnje
73. Slika 5.31 Grafički prikaz rezultata Mann-Whitney-evog testa za distribuciju svojstava opeke
74. Slika 5.32 Ovisnost omjera tlačnih čvrstoća nakon i prije smrzavanja opeke i srednjeg radijusa pora za pretpostavljene udjele krupnih pora
75. Slika 5.33 Nanotomografski snimci uzoraka opeka
76. Slika 5.34 Izgled uzoraka morta za ispitivanje na živinom porozimetru
77. Slika 5.35 Izgled uzoraka za ispitivanje specifične površine mortova BET metodom
78. Slika 5.36 Zastupljenost pora pojedine veličine u mortovima
79. Slika 5.37 Izgled HOT DISK TPS 2500 S ispitnog sustava
80. Slika 6.1 Ispitni uzorci nakon izlaganja ciklusima smrzavanja i odmrzavanja
81. Slika 6.2 Ispitivanje početne posmične čvrstoće

Popis Tablica:

1. Tablica 1.2 Trajnost slojeva građevine
2. Tablica 2.1 Proračunski uporabni vijek (HRN EN 1990)
3. Tablica 2.2 Zahtjevi za betonske konstrukcije prema europskom zakonodavstvu
4. Tablica 2.3 Zahtjevi za drvene konstrukcije prema europskom zakonodavstvu
5. Tablica 2.4 Zahtjevi za čelične konstrukcije prema europskom zakonodavstvu
6. Tablica 2.5 Zahtjevi za zidane konstrukcije prema europskom zakonodavstvu
7. Tablica 2.6 Podaci ukupne proizvodnje opečnih zidnih elemenata u periodu od 2015.-I.-X. mjeseca 2018.
8. Tablica 3.1 Materijali i ograničenja geometrijskih zahtjeva za zidne elemente prema HRN EN 1996-1-1
9. Tablica 3.2 Svojstva glinene opeke i metode po kojima se ispituju
10. Tablica 3.3 Točnost mjerenja izmjera duljine, širine i visine
11. Tablica 3.4 Razredi odstupanje od izmjera duljine, širine i visine
12. Tablica 3.5 Razredi raspona između najmanje i najveće izmjere duljine, širine i visine
13. Tablica 3.6 Prirast sile za ispitivanje tlačne čvrstoće prema HRN EN 772-1
14. Tablica 3.7 Faktor oblika „delta“ za ispitane izmjere uzorka pune opeke nakon obrade površina
15. Tablica 3.8 Vrste oštećenja kao ocjena otporrnosti na cikluse smrzavanja i odmrzavanja
16. Tablica 3.9 Određivanje trajnosti opečnih zidnih elemenata
17. Tablica 3.10 Razredi sadržaja topivih soli opečnih zidnih elemenata
18. Tablica 3.11 Prihvatljive odredbe zidnih elemenata i mortova za trajnost
19. Tablica 3.12 Tablične vrijednosti toplinske provodljivosti, koeficijenta difuzije vodene pare i specifičnog toplinskog kapaciteta opeke
20. Tablica 3.13 Kriteriji za prihvaćanje otpornosti opeke na cikluse smrzavanja i odmrzavanja uslijed oštrih uvjeta izloženosti
21. Tablica 3.14 Faktori trajnosti prema Maage-u i Koroth-u
22. Tablica 3.15 Faktori trajnosti prema Vincenzini-u, Franke-u i Bentrup-u, Litvan-u, Robinson-u, Arnott-u, te Koroth-u
23. Tablica 4.1 Tablica razreda razreda tlačnih čvrstoća morta, prema HRN EN 998-2
24. Tablica 4.2 Obujamski omjeri sastojaka za mortove zadanoga sastava i odgovarajuće tlačne čvrstoće prema HRN EN 1996-1-1/NA
25. Tablica 4.3 Svojstva glinene opeke i metode po kojima se ispituju prema HRN EN 998-2
26. Tablica 4.4 Vrste kalcijevog vapna prema HRN EN 459-1
27. Tablica 4.5 Vrste dolomitnog vapna prema HRN EN 459-1
28. Tablica 4.6 Vrste hidrauličnog vapna HRN EN 459-1

29. Tablica 4.7 Vrste dodataka cementima prema HRN EN 197-1
30. Tablica 4.8 Cementi opće namjene prema HRN EN 197-1
31. Tablica 4.9 Primjer sitnih pora koje utječu na svojstvo otpornosti na smrzavanje i odmrzavanje
32. Tablica 4.10 Metode određivanja poroznosti mortova
33. Tablica 4.11 Volumni odnosi morta i indeksi abrazije za svaku klasu morta (Standards Australia 2001)
34. Tablica 4.12 Ocjena otpornosti morta na smrzavanje i odmrzavanje
35. Tablica 5.1 Prosječne vrijednosti udjela sastavnih elemenata u uzorcima glina
36. Tablica 5.2 Kemijski sastav glina izražen u obliku oksida
37. Tablica 5.3 Rezultati ispitivanja sadržaja sagorljivih, organskih tvari i sadržaja karbonata u sirovini
38. Tablica 5.4 Distribucija pora u nepečenim opekama
39. Tablica 5.5 Distribucija pora u pečenim opekama
40. Tablica 5.6 Omjeri tlačnih čvrstoća opeka nakon i prije ciklusa smrzavanja/odmrzavanja
41. Tablica 5.7 Distribucija pora u strojno rađenim opekama nekontrolirane proizvodnje
42. Tablica 5.8 Distribucija pora u ručno rađenim opekama nekontrolirane proizvodnje
43. Tablica 5.9 Rezultati ispitivanja svojstava opeke – srednje vrijednosti
44. Tablica 5.10 Svojstva strojno i ručno rađene opeke kontrolirane proizvodnje
45. Tablica 5.11 Svojstva strojno rađene opeke nekontrolirane proizvodnje
46. Tablica 5.12 Svojstva ručno rađene opeke nekontrolirane proizvodnje
47. Tablica 5.13 Pojedinačne vrijednosti upijanja opeka
48. Tablica 5.14 Deskriptivna statistika rezultata ispitivanja kontroliranih i nekontroliranih uzoraka – 1. i 2. dio
49. Tablica 5.15 Rezultati Mann-Whitney-evog testa za pojedina svojstva opeke
50. Tablica 5.16 Rezultati Spearman-ovog testa za pojedina svojstva opeke
51. Tablica 5.17 Koeficijenti modela za opis varijable omjer pomoću udjela krupnih pora i srednjeg radijusa pora
52. Tablica 5.18 Bootstrap pouzdani intervali za prilagođeni R^2 modela omjer tlačnih čvrstoća-udio krupnih pora+srednji radijus pora i za koeficijente modela
53. Tablica 5.19 Usporedba rezultata nanotomografije i živinog porozimetra
54. Tablica 5.20 Rezultati ispitivanja sadržaja aktivnih topivih soli uzoraka opeke
55. Tablica 5.21 Sastav mješavina morta
56. Tablica 5.22 Svojstva morta
57. Tablica 5.23 Rezultati ispitivanja toplinskih svojstava opeka i morta
58. Tablica 5.24 Omjeri toplinskih svojstava opeke i morta nakon smrzavanja u odnosu na toplinska svojstva prije smrzavanja

59. Tablica 6.1 Početne posmične čvrstoće uzoraka zida prije i nakon smrzavanja
60. Tablica 6.2 Koeficijenti prolaska topline zida prije i nakon smrzavanja
61. Tablica 6.3 Karakteristike promatrane obiteljske kuće
62. Tablica 6.4 Karakteristike godišnje potrebe za energijom

Popis kratica i simbola:

IGCC	International Green Construction Code: Međunarodni zakon o građevinarstvu (IGCC) regulira izgradnju novih i postojećih poslovnih zgrada (javna verzija 1.0, objavljenja je 11. ožujka 2010., a javna verzija 2.0, objavljena je 19. studenog 2010.) IGCC je uspostavljen kako bi pomogao u izgradnji održivih zgrada u poslovnom i stambenom sektoru.
EXC1, EXC2, EXC3 ili EXC4	razredi izvedbe zida prema HRN EN 1996-1-1
I. razred zidnih elemenata	elementi karakteristične tlačne čvrstoće s vjerojatnošću podbačaja koja nije veća od 5%
II. razred zidnih elemenata	elementi koji ne zadovoljavaju razinu pouzdanosti za I. razred
ℓ_u	duljina zidnog elementa (mm)
w_u	širina zidnog elementa (mm)
h_u	visina zidnog elementa (mm)
T_1, T_2, T_m	razredi odstupanja izmjera (mm)
R_1, R_2, R_m	razredi raspona izmjera (mm)
M_{wu}	prividna masa ispitanog uzorka pod vodom (g)
M_{au}	masa ispitnog uzorka na zraku (g)
ℓ_u	duljina zidnog elementa (mm)
w_u	širina zidnog elementa (mm)
h_u	visina zidnog elementa (mm)
V_{gu}	bruto obujam ispitnog uzorka (mm^3)
$V_{v,u}$	obujam šupljina (mm^3)
$V_{n,u}$	netoobujam ispitnog uzorka (mm^3)
ρ_w	gustoća vode (g/mm^3, oko 0,001 g/mm^3)
$m_{dry,u}$	masa opeke nakon sušenja do stalne mase (g)
$\rho_{n,u}$	neto obujamska masa u suhom stanju (kg/m^3)
$\rho_{g,u}$	bruto obujamska masa u suhom stanju (kg/m^3)
m_w	masa vlažnih uzoraka, 24 h u vodi (g)

w_m	maseni sadržaj vode pojedinačnog uzorka (%)
$m_{so,s}$	masa ispitnog uzorka nakon močenja u vremenu t (g)
A_s	bruto površina lica ispitnog uzorka uronjenog u vodu, (mm^2)
t_{so}	vrijeme močenja (s)
$c_{wi,s}$	početno upijanje vode opečnih zidnih elemenata ($kg/(m^2 \cdot min)$)
f_b	normalizirana tlačna čvrstoća zidnog elementa (N/mm^2)
Δ	faktor oblika za pretvorbu tlačne čvrstoće zidnih uzoraka sušenih na zraku u normnu tlačnu čvrstoću
m_d	masa uzorka nakon sušenja (g)
F0, F1, F2	razredi otpornosti ciklusima smrzavanja i odmrzavanja
S0,S1,S2	razredi sadržaja aktivnih topivih soli
MX1-MX5	prihvatljive odredbe razreda izloženosti zidnih elemenata i mortova za trajnost
f_Ψ	koeficijent konverzije vlage, 10 m^3/m^3
$\lambda_{10,dry}$ (W/mK)	toplinska provodljivost suhog materijala pri 10 ºC
μ	koeficijent difuzije vodene pare
c	specifični toplinski kapacitet
DTA	diferencijalno-termička analiza
TGA	termogravimetrijska analiza
CSA	Kanadski standardi/norme za ispitivanje materijala
ASTM	Američki standardi/norme za ispitivanje materijala
W	upijanje vode kuhanjem 5 h (%)
m_k	masa uzorka nakon kuhanja 5 h (g)
m_d	masa uzorka u suhom stanju (g)
F_C	Maage koeficijent
Pv	ukupno volumen pora (ml/g)
P_3	ukupni volmen pora iznad 3µm

MIP	živina porozimetrija (mercury intrusion porosimetry)
C1	upijanje vode u trajanju 1 sat (%)
B	upijanje vode kuhanjem u trajanju 5 sati (%)
S4	kapilarno upijanje pri izloženosti opeke kontaktu sa vodom u trajanju 4 sata (%)
ϕ_{90}	kritični radijus/promjer pora, (µm)
ϕ_{50}	median pora, (µm)
BET	sorpcija dušika prema ISO 9277, (m^2/g)
IRA	početno upijanje (g/min 193.55 cm^2)
C	vodoupojnost u 24 sata (%)
CS	tlačna čvrstoća (MPa)
C/B	koeficijent zasićenja
Bs	168-dnevna vodoupojnost izražena kao postotak ukupne zapunjenosti pora (%)
Cs	postotak ukupnog volumena pora većih od 1,1 (µm)
Ds	4 satna vodoupojnost izražena kao postotak ukupne zapunjenosti pora (%)
A_v	ukupni volumen pora većih od 2.8 µm (%)
B_v	168 dnevna vodoupojnost kao postotak ukupne zapunjenosti pora (%)
C_v	omjer upijanja vode kuhanjem u trajanju 5 sati i upijanja pod vakumom (%)
D_v	odnos masa 4 satnog upijanja vode i 5 satnog upijanja vode kuhanjem (%)
E_v	odnos masa 56 dnevnog upijanja vode i 5 satnog upijanja vode kuhanjem (%)
F_v	ukupni volumen popunjenjih pora kod početnog upijanja u trajanju t=15 min (%)
G_v	modul oštećenja osnovan na neto površini pukotine (psi)

H_v	specifična masa čvrste tvari u opeci (g/cc)
I_v	udio pora većih od 4,4 μm (%)
J_v	udio pora popunjenih kod početnog upijanja u trajanju t=2 min (%)
K_v	početno upijanje u trajanju t=120 min, uzimajući u obzir neto površinu uzorka izloženog početnom upijanju
L_v	tlačna čvrstoća temeljem neto površine (psi)
N	broj svojstava uzetih u obzir
WA	vodoupojnost (%)
DS	stupanj zasićenosti vlagom (%)
AP	otvorena poroznost (%)
A45	upijanje vode pri 45 % rh (%)
D45	količina zaostale vode pri sušenju kod 45 % rh
H45	razlika u količini upijene vode između A45-D45(%)
A98	upijanje vode pri 98 % rh (%)
CP	razlika u količini upijene vode između A98-A45(%)
ED	linearno širenje pri A98
EB	linearno širenje pri WA
DIR	model prema Robinsonu
DIS	model I prema Arnottu
DIV	model II prema Arnottu
FIDX	model prrema Nakamuri
S_{crit}	kritični stupanj zasićenosti vlage (%)
M1-Md	razredi čvrstoće morta prema HRN EN 998-2
CL	oznake vrste vapna prema HRN EN 459-1, živo ili hidratizirano vapno
DL	oznake vrste vapna prema HRN EN 459- 1, poluhidratizirano ili potpuno hidratizirano
CL 90 S,CL 80 S, CL 70 S	vrste kalcijevog vapna prema HRN EN 459-1

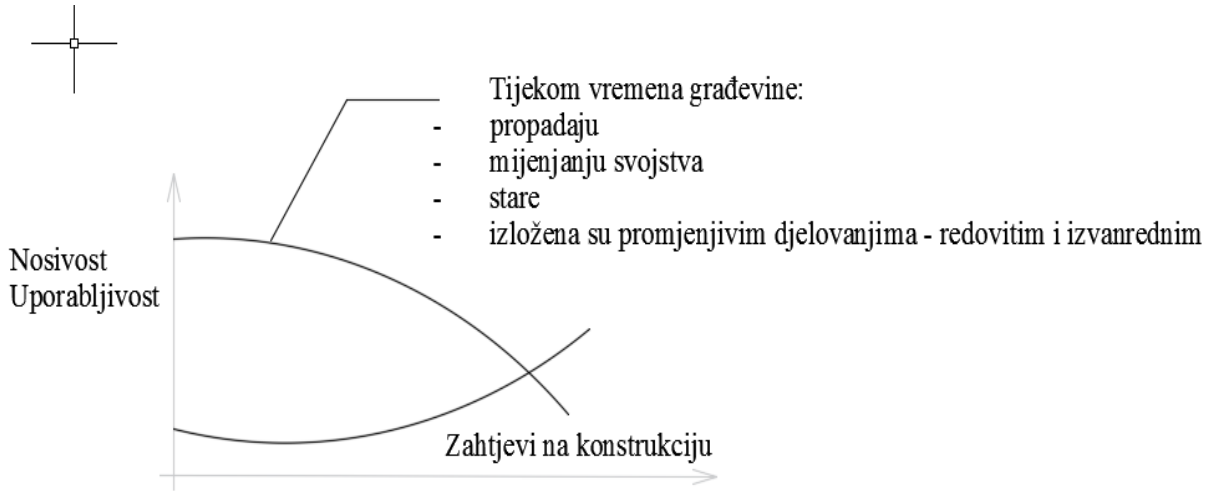
DL 90-30,DL 90-5, DL 85-30, DL 80-5	vrste dolomitnog vapna prema HRN EN 459-1
HL 2,HL 3,5, HL 5, NHL 2, NHL 3,5, NHL 5	vrste hidrauličnog vapna HRN EN 459-1
CEM I-V	oznake za cemente opće namjene prema HRN EN 197-1
S, D, P, Q, V, W, T, LL, L, M	vrste dodataka cementima prema HRN EN 197-1
$\Delta V/V$	promjena volumena, (%)
XRF analiza	X-Ray Fluorescence Spectroscopy
ARTAX SPECTRA 7	softver razvijen od strane BRUKER-a
Net	pikovi prisutnih elemenata pri rendgenskoj flourescentnoj spektrometriji
Conc	koncentracija prisutnih elemenata pri rendgenskoj florurescentnoj spektrometriji
FE_SEM	pretražna elektronska mikroskopija
EDS	spektroskopija rendgenskog zračenja
XRD	rendgenskostrukturna analiza
$K_{u,t0-t1}$	upijanje vode u trenutku t_1-upijanje vode u trenutku t_0)/10 – koeficijent upijanja vode
$K_{o,t0-t1}$	upijena voda u trenutku t_0-upijena voda u trenutku t_0)/180 – koeficijent otpuštanja vode
Percentilni bootstrap	pouzdani interval za prilagođeni R^2 matematički model
p-vrijednost t-testa	koeficijnet Shapiro-Wilks modela
Energyair LP K 200	aerant
Spearman	korelacijski koeficijent
HOT DISK TPS 2500 S	ispitni sustav
α	toplinska difuzivnost (m^2/s)
λ	toplinska provodljivost (W/(mK))
ρ	gustoća (kg/m^3)
c_p	volumni toplinski kapacitet ($J/(m^3K)$)

A_i	površina poprečnog presjeka ispitnog uzorka usporedno s posmičnom silom s točnošću od 1%
$F_{i,max}$	najveća sila pri čemu se za svaki ispitni uzorak proračunava posmična čvrstoća (N/mm^2)
f_{voi}	početna posmična čvrstoća (N/mm^2)
R_u	unutrašnji otpor prijelazu topline (m^2K/W)
R_v	vanjski otpor prijelazu topline (m^2K/W)
d	debljina sloja materijala u građevnom dijelu, debljina opeke (m)
A_k	korisna površina promatrane obiteljske kuće (m^2)
V	volumen promatrane obiteljske kuće (m^3)
f_0	faktor oblika promatrane obiteljske kuće
KI expert	Software za izračun proračun godišnje potrošnje energije, troškova grijanja, godišnje emisije CO_2, specifične godišnje potrebe za energijom za grijanje prema referentnim klimatskim podacima zida

1.UVOD

Svjedoci smo kako su neke povijesne građevine i danas u dobrom stanju. Razlog tome dijelom leži u masivnosti njihovih konstrukcija te velikim količinama materijala ugrađenih u takve građevine čime one pružaju otpor agresivnom okruženju a dijelom i u trajnosti materijala toga doba. Danas se pak prednost daje vitkim konstrukcijama koje se izvode s puno manje materijala te time imaju povećanu osjetljivost na vanjske utjecaje što dodatno ističe potrebu za trajnošću materijala. Kada govorimo o trajnosti, ona je definirana kao sposobnost neke građevine da se odupre propadanju tijekom određenoga vremenskog razdoblja. Prema Bloku i sur. [1], trajnost građevina je podijeljena u nekoliko kategorija: tehnička, funkcionalna i estetska trajnost/održivost. Tehnička trajnost ili tehnički vijek trajanja građevine odgovara vremenskom razdoblju u kojem građevina zadovoljava projektirane zahtjeve za namjeravanu uporabu uzimajući u obzir adekvatno održavanje. Funkcionalna trajnost ili funkcionalni tehnički vijek odnosi se na vremensko razdoblje u kojem građevina zadovoljava zahtjeve svojih korisnika. Ukoliko građevina tijekom uporabnoga vijeka zadovolji estetske zahtjeve sukladne projektnom zadatku, smatramo da ima estetsku trajnost.

Očekuje se da građevina tijekom svoga životnog vijeka doživi određene promjene svojstava, ovisno o provedenom održavanju građevina. Slika 1.1 prikazuje promjenu svojstava građevine tijekom vremena, promatrajući je kroz aspekt tehničke trajnosti, odnosno nosivosti i uporabljivosti koja opada tijekom vremena uslijed raznih vanjskih i unutarnjih promjenjivih djelovanja. S druge strane, obzirom na propadanje određenih dijelova građevine ili njenih materijala, povećava se utjecaj zahtjeva na oštećenu ili oslabljenu konstrukciju čiji je neminovni rezultat potreba za kvalitetnim održavanjem ili sanacijom u cilju održavanja uporabnoga vijeka.



Slika 1.1. Promjena svojstava građevine tijekom vremena [2]

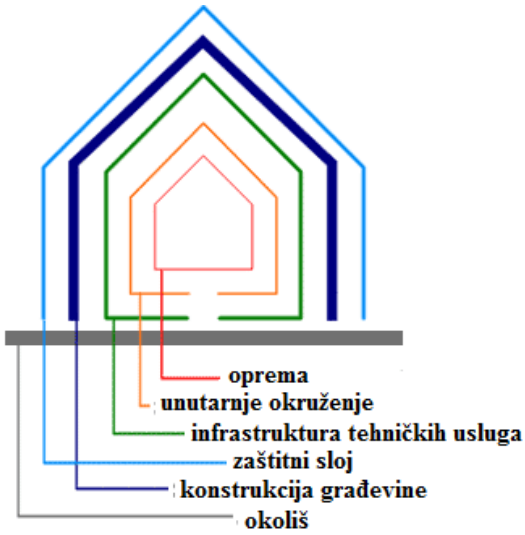
Ukoliko bi se pri projektiranju građevine uspostavili linearni odnosi njenog funkcionalnog i tehničkog uporabnog vijeka, to bi značilo kako je građevinu moguće prilagoditi budućim promjenama zbog potencijalnih visokih troškova povezanih s promjenama, a ujedno je konstruirana i održavana da izdrži degradacije tijekom vremena [1].

Prosječna trajnost građevine ovisi o obliku i funkciji građevine, tehnologiji izvođenja, uvjetima okoliša, lokalnoj kulturi, ekonomskoj i političkoj situaciji.

Oblik i funkcija građevina stalno se mijenja zbog razvoja tehnologije, ekonomije i novih stilova u arhitekturi. Zbog smanjenih trajnosnih svojstava građevina, obnavljanje, preoblikovanje ili demontaža građevine, rezultirat će povećanjem financijskih, ali i ekoloških problema. Istraživanja su pokazala kako je trošak izmjena oštećenih dijelova u zgradama tijekom njihova 50 - godišnjeg postojanja dvostruko veći od troškova izgradnje same građevine [2,3]. Stoga se danas međunarodni standard za zelenu gradnju (International Green Construction Code, IGCC) usmjerava prema održivoj arhitekturi koji određuje potrebu za ugradnjom građevinskih materijala koji će omogućiti rekonstrukciju, skidanje i rastavljanje pregradnih zidova, modifikaciju rasvjete i električnih sustava, spuštenih stropova, podignutih podova i sustava distribucije unutarnjeg zraka za najmanje trajanje od 25 godina. Ovim standardom je propisano da unutarnji materijali, dijelovi i sklopovi imaju minimalni vijek trajanja od 25 godina i prilagodljivi su budućim preoblikovanjima unutar unutarnjim prostorima [4].

Tehnologija izvođenja utječe na tehničku trajnost građevina. Optimalan izbor materijala i njihova primjena, kao i opće stanje građevine (ako se radi o sanaciji), utječu na krajnje trajanje građevine. Vanjski utjecaji poput vlage, temperature, vjetra i kiše, sunca, kemijskih tvari i „specifičnosti na lokacijama“ uzrokuju postupnu degradaciju materijala pa i same građevine. Otpornost i prikladnost građevinskih materijala danas se dokazuje prihvaćenim ispitnim metodama u toku proizvodnje kao i ispitivanjima gotovih proizvoda. Postoji cijeli niz normiranih metoda koje određuju načine ispitivanja, ali i normi specifikacija u kojima su određeni tehnički zahtjevi za gotov proizvod među kojima i zahtjevi na trajnost. Osim izbora materijala, velik utjecaj na trajnost građevine ima i ugradnja te održavanje toga materijala kao i njegova kompatibilnost s drugim materijalima u građevini. Minimalno prihvatljive kategorije izvođenja važne za procjenu uporabnog vijeka građevina opisane su u BS 8000-0 [1,5] za standardne materijale, dok će za nove, još nestandardizirane materijale biti potrebno izraditi upute. Britanci čak imaju i standard BS 7543 [1,6,7] "Vodič za trajnost zgrada i građevinskih elemenata, proizvoda i komponenti" koji daje smjernice o trajnosti, potrebnom i predviđenom vijeku trajanja i određivanju životnoga vijeka zgrade i njihovih dijelova i/ili dijelova. Primjenjuje se prvenstveno na nove zgrade i njihove dijelove, a ne na sanacije i održavanje postojećih. Standard navodi više informacija potrebnih za modeliranje mogućeg uporabnog vijeka sastavnih materijala i dijelova građevine, predviđajući troškove degradacija i oštećenja [6]. Pored ovih čimbenika treba procijeniti pitanja kao što su razina održavanja i uvjeti korištenja.

Lokalni *uvjeti okoliša* često imaju najznačajniji utjecaji na trajnost građevina. Promjene vlage i temperature uzrokuju degradacije materijala te dovode do oštećenja građevine. Različite klimatske zone određuju i različitosti u rasponu temperatura tako da ne postoji jednoznačna definicija uvjeta okoline što dodatno otežava njihovu simulaciju u laboratorijskim ispitivanjima. Kombinacija razina izloženosti koju materijal može doživjeti u nekoj građevini mora odgovarati njegovoj otpornosti. U različitim uvjetima izloženosti nalaze se čak i materijali u istoj građevini ali različitim dijelovima građevine kako je to prikazano Slikom 1.2. i Tablicom 1.2.



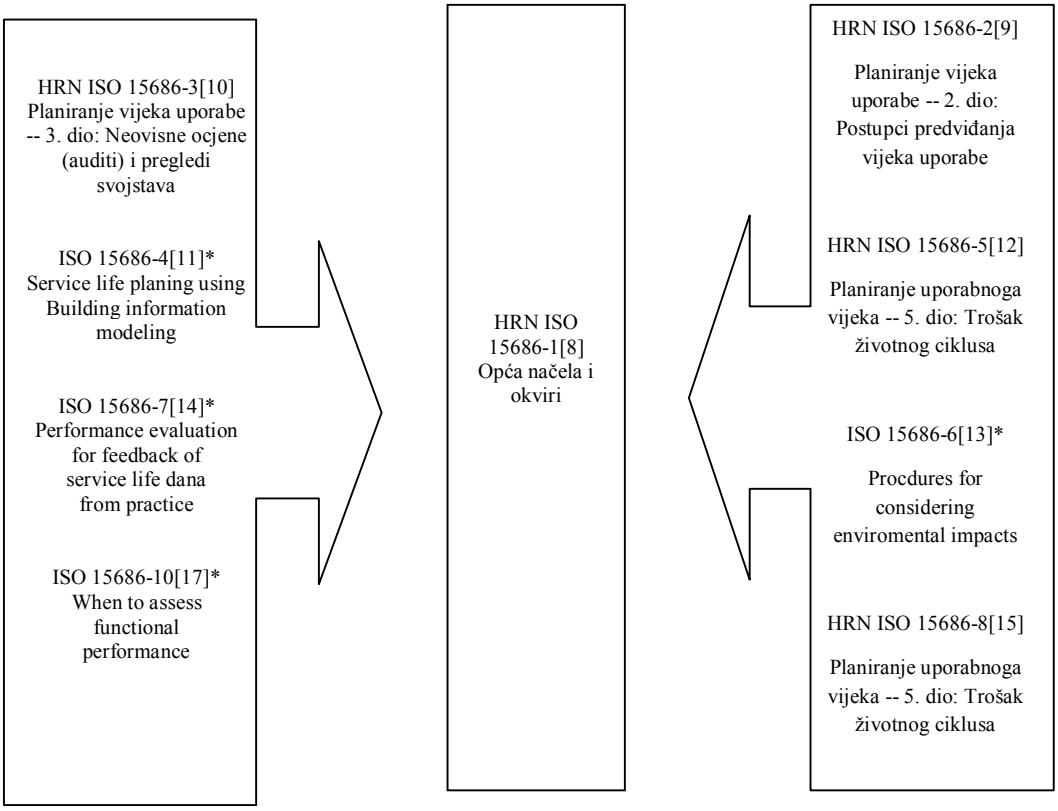
Slika 1.2 Prikaz životnoga vijeka slojeva građevine prema S. Brandu [3,4]

Tablica 1.2 Trajnost slojeva građevine [3,4]

Sloj	Komponenta	Životni vijek (godina)
Okoliš	Geografski i prostorni smještaj	Stalan
Konstrukcija građevine	Temelji, nosivi elementi	30-300 godina, prosječno 50-60 godina
Zaštitni sloj	Vanjska obloga	Prosječno 20 godina
Intrastruktura tehničkih usluga	Tehničke instalacije	7-15 godina
Unutarnje okruženje	Untarnji zidovi, stropovi, podovi, vrata	Javni prostori 3 godine, obiteljske kuće 30 godina
Oprema građevine	Namještaj, uređaji	10-20 godina

Kratak uporabni vijek često proizlazi i iz *lokalnih kultura/običaja* koji npr. zahtijevaju izgradnju novih kuća za svaku sljedeću generaciju. Međutim, preporuke za produljenjem uporabnoga vijeka građevina, temelj nalaze u *ekonomskim i političkim situacijama* koje pokazuju da zamjena kuća svakih 25 godina nosi sa sobom ogromne društvene i ekološke posljedice i troškove.

Trajnost građevina je pojam o kojem se u posljednje vrijeme puno raspravlja u području građevinarstva o čemu svjedoči i niz HRN ISO 15686 [8-17] koja omogućuje procjenu uporabnoga vijeka građevine temeljem čimbenika trajnosti. Niz normi HRN ISO 15686 [8-17] sastoji se od deset dijelova koji se koriste pri planiranju uporabnoga vijeka građevina kako je to prikazano Slikom 1.3.



* norma nije još prihvaćena kao hrvatska norma te nema službeni prijevod naslova

Slika 1.3 Niz normi HRN ISO 15686 za planiranje uporabnoga vijeka građevina [18]

Metoda procjene uporabnoga vijeka građevina određena nizom ISO 15686 [8-17] pripremljena je za opću uporabu, ali za dobivanje preciznijih podataka, potrebno je formirati bazu podataka o trajnosti materijala i sastavnih dijelova konstrukcija kojoj će osnova biti određena zajedničkim mehanizmima degradacije [18,19,20,21].

Glavni čimbenik u razvoju ove norme je mogućnost upravljanja troškovima životnoga ciklusa građevine, obzirom da se u mnogim zemljama javlja veća količina starijih građevina te se računa kako će više od polovine svih troškova izgradnje biti utrošeno na održavanje i obnovu starijih građevina. I dok se ovakvim pristupom ukazuje na potrebu povećanja životnoga vijeka građevina, neki autori [4] smatraju kako se trajnost građevina u Europi danas znatno smanjuje

te da očekivani vijek trajanja za poslovne građevine iznosi tek 50 godina. Iz nekih tradicionalnih razloga, očekivana trajnost građevina u Japanu iznosi tek 30tak godina. Takav kratak uporabni vijek proizlazi iz običaja da svaka generacija zahtjeva izgradnju novih objekata [1]. Predviđanje životnog vijeka je multidisciplinarno područje istraživanja, koje bi trebalo biti utemeljeno na znanju stečenom iz znanosti o materijalima, laboratorijskim ispitivanjima (npr. ubrzani testovi starenja) te temeljem uvida ponašanja materijala u stvarnim uvjetima izloženosti okoliša [3,21,22,23].

2. TRAJNOST KONSTRUKCIJA

U odnosu na građevinske konstrukcije kroz povijest, moderno graditeljstvo preferira stvaranje većih konstrukcije uz manju potrošnju materijala što postavlja velike zahtjeve na kvalitetu i proizvodnju materijala. Tako je i pojam trajnosti građevine, osim kroz segment njene mehaničke otpornosti i stabilnosti, načina izvedbe, održavanja i saniranja, orijentiran i na odabir kvalitetnoga građevinskog materijala koji može odoljeti zahtjevima raznih vanjskih i unutarnjih utjecaja. Pri projektiranju konstrukcija potrebno je definirati uporabni vijek građevine, a koji je u europskom/i hrvatskom zakonodavstvu propisan normom HRN EN 1990 [24] kako to prikazuje Tablica 2.1.

Tablica 2.1 Proračunski uporabni vijek (HRN EN 1990) [24]

Razred	Proračunski uporabni vijek	Namjena građevine
1	10	Privremene konstrukcije, npr. skele
2	10-25	Zamjenski dijelovi konstrukcije npr. grede pokretnih kranova
3	15-30	Poljoprivredne i slične konstrukcije npr. građevine za smještaj životinja u koje obično ne ulaze ljudi
4	50	Konstrukcije zgrada ili druge uobičajene konstrukcije npr. bolnice, škole
5	100	Monumentalne građevine, mostovi i druge inženjerske konstrukcije npr. crkve

Obzirom na materijal iz kojeg su dominantno izvedene, građevine danas dijelimo u četiri osnovne skupine: betonske, čelične, drvene i zidane te će se pojam trajnosti u nastavku ovoga poglavlja i obraditi sukladno ovakvoj podjeli građevina.

2.1 Trajnost betonskih konstrukcija

Beton su u svom najranijem obliku razvili Rimljani kombinirajući vulkanske pepele, vapno i pijesak u kompozit koji se nije otapao pod vodom. Kao djelotvorno sredstvo za uvlačenje zraka u svježu mješavinu (danas poznato kao aerant), Rimljani su dodavali životinjsku krv, a osim toga dodavali su i životinjsku mast, mlijeko i ulja kako bi poboljšali svojstva betona [25]. Ono što oduševljava jest trajnost građevina iz njihova doba i funkcionalnost koju su

neke uspjele sačuvati do današnjih dana [26]. Kao primjer jedne od najpoznatijih živućih rimskih građevina navodi se Panteon u Rimu, nastao 27. g. pr. Krista. Ispitivanja su pokazala da se u strukturi rimskih betona razlažu kristali vulkanskoga materijala te da se na njihovom mjestu kristaliziraju aluminijski tobermorit i filipsit koji doprinose svojstvima trajnosti tijekom vremena, ali na žalost recepture za spravljanje takvih betona nisu ostale zabilježene [27].

Trajnost betona jedan je od važnih parametara trajnosti konstrukcije u cjelini. Različiti su vanjski utjecaji na očvrsli beton a u pravilu ih možemo podijeliti na fizikalne, mehaničke, kemijske i biološke. Ovi utjecaji mogu djelovati pojedinačno, ali ovisno o uvjetima okoline, može djelovati i združeno na konstrukciju. Fizički utjecaji odnose se na abraziju, eroziju i kavitaciju betona, te utjecaje ekstremnih temperatura ili deformacija koje nastaju uslijed promjena volumena očvrslog betona. Mehanička oštećenja nastaju uslijed povećanja opterećenja na konstrukciju, zamora, udara, popuštanja temelja, namjernih rušenja ili požara. Kemijska oštećenja nastaju uslijed djelovanja kiselina na alkalnu sredinu cementne matrice uslijed čega dolazi do oslabljenja strukture. Najčešći uzroci kemijske degradacije betona jesu karbonatizacija, hidroliza sastavnih dijelova cementne paste, alkalno sulfatne reakcije i korozija armature. Dodatno, biološka oštećenja nastaju djelovanjem vegetacije (lišajeva, mahovine, algi i sl.), koje mogu sadržavati različite vrste štetnih kiselina ili mogu poput školjaka prodrijeti u strukturu zaštitnoga sloja betona i oštetiti ga ili pak mogu zadržavati vlagu na površinama betona te na tim mjestima uzrokovati oštećenja uslijed smrzavanja i odmrzavanja.

Svojstva betona poput homogenosti, poroznosti, vodonepropusnosti, plinopropusnosti, prionjivosti cementnog kamena i agregata, tlačne i vlačne čvrstoće te mineroloških i kemijskih karakteristika uvjetuju trajnost betona u konstrukciji. Presudnu ulogu u svojstvima trajnosti betona svakako ima struktura pora, o kojoj ovisi transport vlage i drugih štetnih tvari za strukturu betona uključivo i armaturu. Na strukturu betona, osim karakteristika njegovih sastavnih komponenti, cementa i agregata, utjecaj imaju i aditivi koji se dodaju upravo radi modifikacije njegovih svojstava. Sastavni dijelovi mješavine koji direktno utječu na trajnost betona su aeranti, plastifikatori, pucolani, dodaci za umanjenje deformacije skupljanjem te inhibitori korozije [25].

Nedovoljna trajnost betonskih konstrukcija posljedica je i propusta pri projektiranju, izvođenju i održavanju konstrukcija. Trajnost same konstrukcije izravno ovisi o vrsti i kvaliteti ugrađenog betona, odabranim detaljima projektiranja i izvođenja a pri čemu treba uzeti u obzir rješenja kojima se smanjuje izloženost betonskih konstrukcija vodi tj. na neki

način projektirati zaštitu elemenata konstrukcije od negativnih vanjskih utjecaja. Za betonske se konstrukcije koriste materijali i građevni proizvodi koji su navedeni u hrvatskoj normi HRN EN 1992-1-1 [28], njihova su svojstva u skladu s HRN EN 206 [29], te nacionalnim dodatkom HRN 1128 [30] koji određuje svojstva trajnosti betona. Pri projektiranju betonske mješavine potrebno je osigurati što manji v/c omjer, minimalno zahtijevanu količinu cementa, minimalno zahtjevan razred tlačne čvrstoće betona, minimalno zahtjevan sadržaj zraka te po potrebi i dodavanje dodataka u beton. Norma HRN EN 1992-1-1 [28] predviđa pet razreda izloženosti ovisno o uvjetima okoliša i najmanju debljinu zaštitnoga sloja za uobičajeni beton. Projektiranje betonskih konstrukcija određeno je normama nizova HRN EN 1990 [24], HRN EN 1991 [31], HRN EN 1992 [32], HRN EN 1997 [33] i HRN EN 1998 [34]. Pravilno izvođenje betonske konstrukcije određeno je normom HRN EN 13760 [35] i nacionalnim dodatkom HRN EN 13670/NA [36].

Tablicom 2.2. prikazani je niz normi koje prema europskom zakonodavstvu određuju zahtjeve za trajnost betonske konstrukcije:

Tablica 2.2 Zahtjevi za betonske konstrukcije prema europskom zakonodavstvu [37]

Zahtjevi trajnosti konstrukcije	Norma koja uvažava zahtjev
Materijali i građevni proizvodi	HRN EN 1992-1-1 [28], HRN EN 206 [29], HRN 1128 [30].
Projektiranje	HRN EN 1990 [24] i norme nizova : HRN EN 1991 [31], HRN EN 1992 [32], HRN EN 1997 [33] i HRN EN 1998 [34], s pripadajućim nacionalnim dodacima.
Trajnost	HRN EN 1992-1-1 [28]
Izvođenje	HRN EN 13670[35] i HRN EN 13670/NA[36]

Betonske konstrukcije, za razliku od ostalih konstrukcija, imaju normama propisanu trajnost [28] i način izvođenja [35,36].

2.2 Trajnost drvenih konstrukcija

Drvo je od paleolitika korišteno u proizvodnji velikoga broja proizvoda. Jedna od najstarijih drvenih konstrukcija i danas se nalazi u Japanu, Horyuji hram, koji je izgrađen prije više od 1400 godina [1]. Zahvaljujući svojim karakterističnim svojstvima drvo je i danas jedan od glavnih izvora građevinskih materijala iako se, zahvaljujući drugim materijalima kao što su beton i čelik, njegova uporaba ipak smanjila. Osim mnogih ekoloških prednosti koje drvo ima, poznato je po estetici i raznolikosti boja. Korištenjem naprednih tehnologija, drvo kao građevinski materijal može se koristiti za izgradnju mostova i drugih konstrukcija [1]. Uvažavajući zahtjeve trajnosti, drvo kao obnovljivi prirodni resurs i materijal za čiju se obradu troši malo energije, daje veću ekonomičnost u izgradnji u odnosu na beton i čelik, a može osigurati i dug uporabni vijek građevina [39].

Vanjski utjecaji u obliku vlage i padalina, sunca, okolišnih temperaturnih uvjeta, gljivica, kukaca/insekata, bakterija i morskih organizama izravna su prijetnja trajnosti drveta [38,39,40]. Prema autoru iz rada (Bien)-[41], najveću prijetnju trajnosti drvenih konstrukcija čine gljivice koje se javljaju na drvetu čija je vlažnost veća od 22% **[41].** Ukoliko je sadržaj vlage u intervalu između 6-8 %, drvo se može koristiti za unutarnje prostore ili pak ukoliko je sadržaj vlage u inervalima od 15-18 %, drveni proizvod je prikladan za vanjsku uporabu **[39].**

Drvo i drveni proizvodi imaju odgovarajuću „prirodnu“ trajnost, ali uz to svakako trebaju biti dodatno zaštićeni odgovarajućim zaštitnim sredstvima od negativnih vanjskih utjecaja. Razlikujemo nekoliko kategorija zaštite drveta kao materijala: građevinsko-fizikalne mjere zaštite od vlage i vremenskih utjecaja, konstruktivne mjere zaštite koje služe za osiguranje od zadržavanja vode i snijega na površinama, kemijske koje se primjenjuju ako se građevinsko fizičkim i konstruktivnim ne postiže propisana mjera zaštite ili ako klimatske prilike doprinose razvoju insekata, gljivica i sl. i organizacijske mjere zaštite koje se odnose na način sanacije, uvjete gospodarenja, adekvatno održavanje i sl. Građevinsko-fizikalne mjere zaštite svode se na zaštitu konstrukcije od utjecaja vlage ili padalina, eventualnog kontakta s tlom i drugim izvorima vlage te ujedno omogućavaju protok zraka i dostupnost svih elemenata radi lakšega održavanja. Konstruktivne mjere zaštite trebaju osigurati otjecanje tekućina s površina, odnosno onemogućiti njihovo zadržavanje, te zaštititi poprečne presjeke od oborinskih voda. Organizacijske zaštitite trebaju spriječiti da projektna rješenja konstrukcija budu izložena okolini relativne vlage veće od 80% [2], te zbrinuti otpad pri održavanju ili uklanjanju građevine. Kemijske se mjere primjenjuju ukoliko građevinsko-fizikalne i konstruktivne nisu učinkovite, odnosno uslijed posebno štetne klime. Kemijske mjere imaju

ulogu sprječavanja propadanja površina uslijed negativnih utjecaja iz okoline, a važno je odrediti vrstu i postupak nanošenja koji će doprinijeti svojstvima trajnosti. Dodatno, potrebno je voditi računa i o koroziji zaštitnih spajala drvenih konstrukcija. Nepropisno održavanje također doprinosi oštećenju uslijed korištenja. U mnogim slučajevima može biti teško otkriti početne znakove degradacije, budući da nisu vidljive do kasnijih faza.

Kod drvenih konstrukcija koriste se materijali i građevni proizvodi prema normama HRN EN 1995-1-1 [42] i HRN EN 1995-2 [43] te ljepila također u skladu s HRN EN 1995-1-1[42] i HRN EN 1995-2 [43] . Norma HRN EN 460 [44] određuje trajnost drva i proizvoda na osnovi drva, norma HRS CEN/TS 1099 [45] daje smjernice za upotrebu uslojenog drva, te norma HRN CEN/TR 12872 [46] određuje smjernice za uporabu nosivih ploča za podove, zidove i krovove. Projektiranje drvenih konstrukcija definirano je normom HRN EN 1990 [24] i nizovima HRN EN 1991 [31], HRN EN 1995 [47], HRN EN 1997 [33] i HRN EN 1998 [34], s pripadajućim nacionalnim dodacima, a sustav zaštite konstrukcije odabire projektant prema karakteristikama konstrukcije, uvjetima okoliša, uvjetima korištenja konstrukcije. U Tablici 2.3. prikazane su norme koje određuju zahtjeve za drvene konstrukcije prema europskom zakonodavstvu:

Tablica 2.3 Zahtjevi za drvene konstrukcije prema europskom zakonodavstvu [37]

Zahtjevi trajnosti konstrukcije	Norma koja uvažava zahtjev
Materijali i građevni proizvodi	HRN EN 1995-1-1 [43] i HRN EN 1995-2 [43], HRN EN 460 [44] HRS CEN/TS 1099 [45] HRN EN 599-2 [48] HRI CEN/TR 12872 [46]
Projektiranje	HRN EN 1990 [24] i norme nizova HRN EN 1991 [31], HRN EN 1995 [42,43,47], HRN EN 1997 [33] i HRN EN 1998 [34], s pripadajućim nacionalnim dodacima

2.3 Trajnost čeličnih konstrukcija

Čelik je jedan od najodrživijih građevinskih materijala, praćen je sposobnošću da se opetovano reciklira bez gubitka kvalitete što ga neraskidivo veže s dugoročnim održivim razvojem. Njegova uporaba kreće još početkom 18. stoljeća, u izgradnji građevina sa čeličnim okvirima [49]. U 19. stoljeću izgradnjom željezničkih pruga uvelike se širi uporaba čelika kao materijala u izgradnji [49]. Godine 1855. Sir Henry Bessemer je u Engleskoj razvio tzv. Bessemerovu metodu proizvodnje koja je proizvodnju čelika učinila jednostavnijom [50]. Ta metoda omogućila je proizvodnju čelika viših čvrstoća. Čelik je danas svestran građevinski materijal što je dovelo do njegovog uključivanja u skoro svaku fazu procesa gradnje od okvira i podnih greda do krovnih materijala. Tržišni udio čelika kao vrste građevinskog materijala u odnosu na ostale materijale u proteklih je 15 godina bio oko 90% za industrijske zgrade i 70% za višekatne nestambene zgrade [51].

Utjecaji na degradaciju čelika mogu biti mehaničke, biološke ili električne prirode, pa tako nastaju naponska, erozijska, kavitacijska, tarna, biokorozija, korozija uzrokovana lutajućim strujama ili pojava koju nazivamo umaranje pri koroziji [2]. Korozija se može definirati kao razgradnja ili uništavanje metala uslijed njihove kemijske reakcije s okolinom. Prema [2], korozije pak mogu biti točkasta, pukotinska, bimentalna, naponska i opća korozij.

Pri projektiranju treba odabirati materijale, nehrđajuće čelike, u skladu s razredima korozivnosti okoliša, normi HRN EN 1993 [52], razredu izvedbe (EXC1, EXC2, EXC3 ili EXC4), i normi HRN EN 1990 [24]. Osim toga, odabirom detalja u projektiranju potrebno je spriječiti zadržavanje prljavštine, začepljenja, izbjegavati horizontalne površine koje zadržavaju vodu, glatke rubove, voditi računa o redoslijedu varenja radi smanjivanja nastajanja naponske korozije, voditi računa o ravnoteži u primjeni varenja i vijaka, uvoditi postupak kugličarenja (postupak povećanja početnog tlačnog naprezanja površine u cilju produljenja uporabnog vijeka), izbjegavati pukotine, točkaste i bimetalne korozije.

Vrste zaštite za konstruktivni čelik, kao i aluminijske legure, mogu biti organske prevlake i obloge, anorganske prevlake, metalni slojevi, katodna i anodna zaštita [2]. Prije nanošenja bilo kakve zaštite, potrebno je kvalitetno pripremiti podlogu. Projektant pri projektiranju odabire sustav zaštite čelične konstrukcije od korozije sukladno svojstvima konstrukcije, uvjetima okoliša, uvjetima korištenja konstrukcije te zahtjevanom stupnju trajnosti zaštite. Zaštita čelične konstrukcije od korozije smatra se sastavnim dijelom tehničkog rješenja čelične konstrukcije.

Za čelične konstrukcije koriste se materijali i proizvodi prema normama niza HRN EN 1993 [52], za projektiranje čeličnih konstrukcija primjenjuje se hrvatska norma HRN EN 1990 [24] i norme nizova HRN EN 1991 [31], HRN EN 1993 [52], HRN EN 1997 [33] i HRN EN 1998 [34], s pripadajućim nacionalnim dodacima. Tablica 2.4. prikazuje zahtjeve za osiguranje trajnosti čeličnih konstrukcija u skladu sa spomenutim normama.

Tablica 2.4 Zahtjevi za čelične konstrukcije prema europskom zakonodavstvu [37]

Zahtjevi	Norma koja uvažava zahtjev
Materijali i građevni proizvodi	HRN EN 1993 [52]
Projektiranje	HRN EN 1990 [24] i norme nizova: HRN EN 1991 [31], HRN EN 1993 [52], HRN EN 1997 [33] i HRN EN 1998 [34], s pripadajućim nacionalnim dodacima.

2.4 Trajnost zidanih konstrukcija

Zidane su konstrukcije u svom izvornom obliku nastale slaganjem neobrađena kamena ili posušenih komada gline (nepečene opeke) međusobno povezanih mortom. Upravo su opeke bile građevni elementi mnogih velikih svjetskih građevina kao što su piramide Gize, rimski Colosseum i Taj Mahal [53]. Zidni elementi – danas šuplji blokovi od gline, betona, lakog betona, plinobetona i sl. svojom geometrijom i masom prilagođeni rukovanju čovjeka, slažu se prema pravilima koja propisuju njihove dimenzije, način i raspored slaganja u odnosu na vanjska i unutarnja djelovanja uz povezivanje mortom u zidnu cjelinu-ziđe. Na trajnost zidanih konstrukcija utječu mnogi čimbenici, uključujući trajnost obje zidne jedinice, i blokova i morta [54].

Faktori koji utječu na degradaciju ziđa potječu od kemijsko bioloških utjecaja na zidne elemente i mort uslijed kretanja vlage, kiselina, sulfata, klorida, vapna, željeza, vanadija i dr. [2]. Korozija uzrokovana djelovanjem čelika u armiranom ziđu također može djelovati na-trajnost konstrukcije. Oštećenja ziđa mogu biti posljedica erozije morta uslijed transporta vlage i djelovanja vjetra, smrzavanja i kristalizacije soli. Slijeganje temelja zbog konsolidacije tla, vibracija ili prevelikoga opterećenja još je jedan od faktora degradacije ziđa [55].

Ostvarenje trajnosti provodi se odabirom materijala, zidnih elemenata i morta koji moraju biti prilagođeni uvjetima okoliša. Osim trajnosti svakog pojedinog elementa ziđa (opeke i morta),

potrebno je uvažiti i njihovu međusobnu kompatibilnost kako bi se dobilo zide dostatne trajnosti.

Za zidane konstrukcije upotrebljavaju se materijali i proizvodi navedeni u hrvatskoj normi HRN EN 1996-1-1 [56], a čija su svojstva u skladu s odgovarajućim tehničkim specifikacijama. Za projektiranje zidanih konstrukcija primjenjuje se hrvatska norma HRN EN 1990 [24] i hrvatske norme nizova HRN EN 1991 [31], HRN EN 1992 [32], HRN EN 1996 [57], HRN EN 1997 [33] i HRN EN 1998 [34], s pripadajućim nacionalnim dodacima. Projektant pri projektiranju odabire sustav zaštite prema uvjetima okoliša i namjene konstrukcije. Tablicom 2.5. prikazane su norme koje određuju zahtjeve za zidane konstrukcije prema europskom zakonodavstvu:

Tablica 2.5 Zahtjevi za zidane konstrukcije prema europskom zakonodavstvu [58]

Zahtjevi za svojstva trajnosti	Norma koja uvažava zahtjev
Materijali i građevni proizvodi	HRN EN 1996-1-1[56]
Projektiranje	HRN EN 1990[24] i norme nizova HRN EN 1991[31] , HRN EN 1992[32] , HRN EN 1996[57] , HRN EN 1997[33], HRN EN 1998[34]

2.4.1 Potreba za istraživanjem trajnosti zidanih konstrukcija

Prema neslužbenih izvorima, udio zidanih građevina u ukupnom broju građevina u Hrvatskoj iznosi oko 60 %, od čega je oko 90 % građevina izvedenih opečnim elementima. Danas svjetska industrija opeke proizvodi oko 1,5 bilijuna opeke godišnje opečnih elemenata [59], dok je proizvodnja opečnih elemenata na hrvatskom tržištu u kontinuiranom porastu (Tablica 2.6). Prosječne količine škarta u proizvodnji opečnih elemenata iznose oko 1,5 % ukupne proizvodnje a dio tog škarta čine i opečni elementi ocijenjeni neotpornima na cikluse smrzavanja i odmrzavanja. Obaveza je proizvođača objava deklaracija pojedinačnih svojstava proizvoda, a prema nizu normi HRN EN 771 [60]. Ukoliko proizvod ne zadovoljava deklarirana svojstva, odnosno ne nalazi se u intervalu dozvoljenih odstupanja definiranim nizom HRN EN 771 [60], proizvođač tada takav proizvod ima obavezu deklarirati što objavljuje na proizvodu i deklaracijama paleta takvih proizvoda i na Izjavama o svojstvima, te

na taj način pružiti obavijest o promjeni svojstva kupcu. Međutim, norma ostavlja mogućnost stavljanja na tržište proizvoda kojima određena svojstva, pa tako i svojstva otpornosti na smrzavanje i odmrzavanje nisu deklarirana, označavajući ih pri tom oznakom „NPD“ što može dovesti do nepravilne uporabe zidnih elemenata. Ukoliko se takvi zidni elementi ugrade u ziđe bez vanjske zaštite, isto može dovesti do smanjenja planiranoga uporabnog vijeka građevine. Tablicom 2.6. prikazani su podaci ukupne proizvodnje opečnih zidnih elemenata u periodu od 2015. - I.-X mjeseca 2018, a prema službenim podacima Hrvatske gospodarske komore, Odjela prerađivačke industrije, Sektora za industriju.

Tablica 2.6 Podaci ukupne proizvodnje opečnih zidnih elemenata u periodu od 2015. do I.-X. mjeseca 2018. Prema podacima Hrvatske gospodarske komore, Odjela prerađivačke industrije, Sektora za industriju

Naziv proizvoda	Mjerna jedinica	Godina			
		2015.	2016.	2017.	I.-X. 2018.
Nevatrostalna keramička građevinska opeka, za uporabu u zidarstvu	m³	386.475	450.177	464.619	419.427
Nevatrostalna keramička građevinska opeka, blokovi za podove, blokovi nosači i slično	m³	107.069	79.406	78.077	77.284
Keramički krovni crjepovi	tis. kom.	45.581	55.432	44.444	37.529

Mjere kontrole proizvoda tijekom procesa proizvodnje sastavni su dio mjera koje je nužno uključiti u osiguranje trajnosti građevinskih konstrukcija, neovisno o vrsti materijala. Dokazivanje svojstava, odnosno stalnosti svojstava zahtijevaju ispitne metode koje trebaju biti dovoljno precizne, ali i efikasne obzirom na količinu uzoraka na kojima je potrebno ispitati i dokazati svojstva. Istraživanja u ovom radu usmjerena su na metode ispitivanja otpornosti na cikluse smrzavanja i odmrzavanja opeke, čiju su neprikladnost dokazale razne postojeće studije. Metode kojima do sada raspolažemo prilično su dugotrajne i zahtjevne, a razna istraživanja su dokazala kako je upitna i njihova vjerodostojnost što se posebno odnosi na kriterije ocjene rezultata ispitivanja. Tako uzorci koji su ocjenjeni kao osjetljivi, možda ipak mogu odoljeti utjecajima okoline i pokazati se otpornima i obratno. Takva situacija dovodi u pitanje i problem određivanje škarta u proizvodnji koji nije samo financijske prirode nego i

pitanje kvalitete ocjene svojstva trajnosti na gotovom proizvodu, u konačnici procjene trajnosti kompletne građevine.

Cilj ovoga rada je iznaći metodu koja bi svojom jednostavnošću i većom točnošću doprinijela ocjeni otpornosti opeke na cikluse smrzavanja i odmrzavanja te obzirom na jednostavnu primjenu bila kontinuirano uključena u proizvodnji i doprinjela otklanjanju nedostataka svojstava trajnosti i povećanju trajnosti opeke kao gotovoga proizvoda.

3. TRAJNOST OPEČNIH ZIDNIH ELEMENATA

Opeka je najstariji građevinski materijal i tek nekoliko drugih građevnih proizvoda je polučilo takvu široku i kontinuiranu popularnost. Ovakvu prihvaćenost može zahvaliti jedinstvenoj kombinaciji svojstava koju nudi vlasnicima objekata u koje je ugrađena i graditeljima. Ovaj jedinstveni materijal može se koristiti kako u dekorativne tako i u nosive svrhe te je iznimno trajan i gotovo ne zahtijeva održavanje ukoliko je ispravno konstruiran. Raznovrsnost sirovine za izradu koja se može oblikovati u velik broj oblika i veličina te fleksibilnost koju to nudi u projektiranju i izgradnji daje opeci veliku prednost u odnosu na neke druge građevinske materijale. Iako se nekad opeka koristila kako za izgradnju stambenih i industrijskih građevina tako i za izradnju tunela, mostova i akvadukata te popločavanje, danas se ona prvenstveno upotrebljava u izgradnji stambenih građevina. Pozitivne osobine uporabe opeke u građevinama ogledaju se u sljedećem: osigurana toplina življenja u objektima izgrađenim od opeke kao produkta upotrebe prirodnog materijala - gline, dobra toplinska izolacija, veliki kapacitet akumulacije topline, sposobnost samoregulacije vlažnosti kao rezultata visoke otpornosti na difuziju vodene pare, dobra zaštita od buke, dobra požarna otpornost i trajnost [61,62,63].

Najstarijim opekama smatraju se one pronađena na nalazišu drevnog grada Babilona i neke od njih stare su čak 6 000 godina [63]. U to vrijeme opeke se izrađivale ručno i sušile na suncu [63,64]. Period kada se opeka počela peći nije jednoznačno određen u literaturi. Prema nekoj literaturi, pečena je opeka nastala sasvim slučajno još u Mezopotamiji kada je tada nepečena opeka izgorjela u požaru a stanovnici zamijetili poboljšana svojstva tako nastalog proizvoda [63,64,65,66]. Prema drugoj literaturi [63,65,67,68,69] opeku su prvi počeli peći Rimljani. Iako možda nisu bili prvi u povijesti koji su opeku termički tretirali, Rimljani su prvi koji su proces pečenja opeke s ciljem dobivanja trajnijeg proizvoda proširili u Europi. Proizvodnja opeka, posebno u regiji grada Rima, postala je tako glavna industrija. Gradnja je u opeci bila jeftinija od gradnje kamenom zbog veće dostupnosti sirovine i nižeg stupnja stručnosti i vještine potrebne za gradnju. Opeke toga doba izrađivale su se u različitim širinama i duljinama dok im je visina uglavnom bila ista i iznosila 5,5 cm (Slika 3.1). Smatra se kako je upravo ta opeka bila prethodnik današnjoj opeci normalnog formata čije izmjere iznose 12/25/6,5 cm.

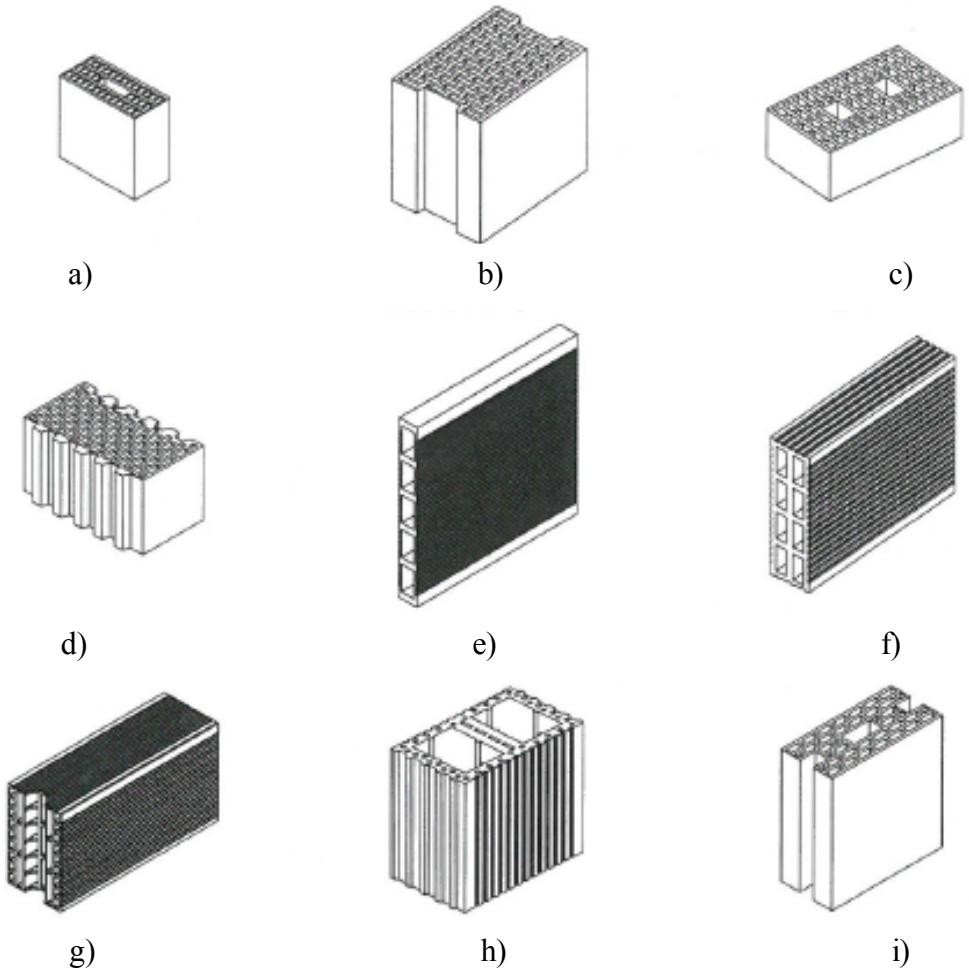
Slika 3.1 Rimska opeka sa lokaliteta Vojarna-Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek [63]

I dok su se prije opeke izrađivale ručno a sirovina dopremala pomoću životinjske snage, prije otprilike 100 godina osmišljeni su prvi učinkoviti strojevi za izradu opeke te uspostavljeni trendovi prema mehanizaciji postupaka za iskapanje i rukovanje sirovinom [63,70]. Naime, prvi patent za izradu strojeva za izradu opeka osmišljen je 1619. godine no ipak, mehanizacija nije istisnula ručnu proizvodnju sve do sredine 19-tog stoljeća [62,70]. Opeka se nakon sušenja pekla u relativno neučinkovitim naizmjeničnim ili statičnim pećima sve do 1858. godine kada je Hoffman uveo kontinuiranu peć koja je omogućila povezanost svih procesa kontinuiranim paljenjem [62,63,70]. Na cijelom prostoru Slavonije i Srijema 1881. godine proizvelo se oko 30 milijuna komada opeke [69]. Od 1858. do danas opeka je proživjela brojne modifikacije u izgledu i izmjerama u nastojanju da se dobije što ekonomičniji i energetski učinkovitiji proizvod. Tako se ona danas pojavljuje u oblicima kako je to navedeno u točki 3.1. [62,63,71].

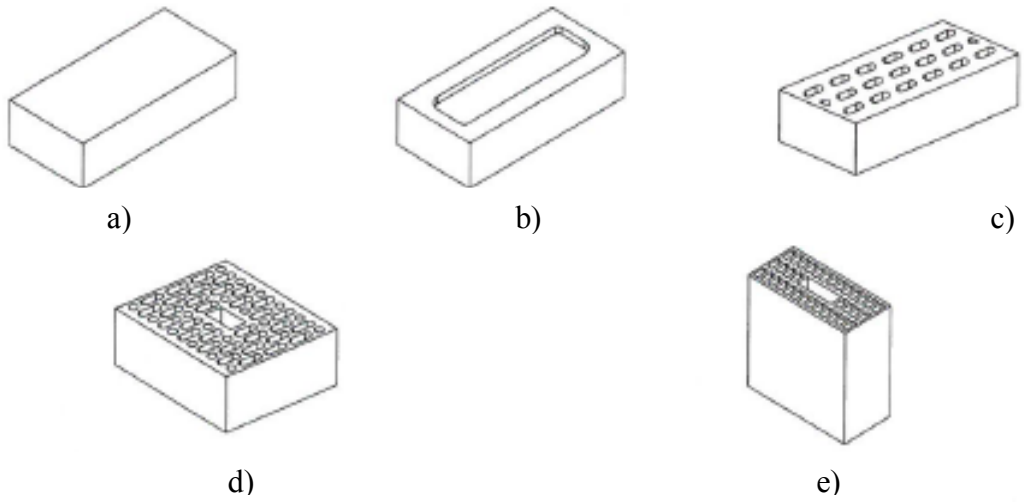
3.1. Razredba opečnih zidnih elemenata prema normi u europskom zakonodavstvu

Asortiman opečnih zidnih elemenata obično obuhvaćaju šuplji blokovi s vertikalnim i horizontalnim šupljinama, pune i šuplje opeke i blokovi olakšane mase. Punu opeku, obzirom na različite karakteristike, možemo podijeliti specifikaciji HRN EN 771-1 [60], na punu opeku za zidanje, fasadnu i opeku olakšane osnovne mase. Obična se opeka uglavnom upotrebljava za izradu nosivih i pregradnih zidova i nosivih stupova, obloge betonskih zidova, ispunu skeletnih konstrukcija, izradu ograda, dimnjačkih i ventilacijskih kanala.

Ovisno o kvaliteti gline i nivou procesa proizvodnje, zidni elementi mogu se proizvoditi različitih kvaliteta i svojstava. Tako sukladno normi specifikaciji HRN EN 771-1 [60], opečne zidne elemente možemo generalno podijeliti u dvije osnovne kategorije: elemente male volumne mase čija je namjeravana uporaba u zaštićenom ziđu i elemente velike volumne mase koji su namijenjeni ugradnji u nezaštićenom ziđu.



Slika 3.2 Razredba zidnih elemenata prema HRN EN 771-1 - nezaštićeno ziđe [60]: a) element s vertikalnim šupljinama, b) element s vertikalnim šupljinama i mortnim džepom, c) element s vertikalnim šupljinama i rukohvatom, d) element s vertikalnim šupljinama s perom i utorom, e) element s horizontalnim šupljinama (za pregradne zidove), f) element s horizontalnim šupljinama i utorima za žbukanje, g) element s horizontalnim šupljinama i mortnim džepom, h) element za punjenje betonom ili mortom, i) element za zidne panele



Slika 3.3 Razredba zidnih elemenata prema HRN EN 771-1 - zaštićeno zide [60]

Prema navedenoj normi, možemo ih podijeliti i prema kontroli kvalitete u proizvodnji na zidne elemente razreda I i razreda II. Po postotku šupljina u volumenu zidnog elementa, možemo ih podijeliti na skupinu 1, 2, 3, ili 4 (Tablica 3.1.).

Tablica 3.1 Materijali i ograničenja geometrijskih zahtjeva za zidne elemente prema HRN EN 1996-1-1 [56]

Svojstvo	Materijali i ograničenja za zidne elemente				
	Skupina 1		Skupina 2	Skupina 3	Skupina 4
		Zidni elementi	Vertikalne šupljine		Horizontalne šupljine
Obujam svih šupljina (% od bruto obujma)	≤ 25	Opečni	> 25; ≤ 55	≥ 25; ≤ 70	> 25; ≤ 70
		Vapneno silikatni	> 25; ≤ 55	Ne upotrebljava se	Ne upotrebljava se
		betonski	> 25; ≤ 60	> 25; ≤ 70	> 25; ≤ 50
Obujam bilo koje šupljine (% od bruto obujma)	≤ 12,5	Opečni	Svaka od višestrukih šupljina ≤ 2 udubine za prihvat od ukupno 12,5	Svaka od višestrukih šupljina ≤ 2 udubine za prihvat od ukupno 12,5	Svaka od više šupljina ≤ 30
		Vapneno silikatni	Svaka od višestrukih šupljina ≤ 15 udubine za prihvat od ukupno 30	Ne upotrebljava se	Ne upotrebljava se
		betonski	Svaka od višestrukih šupljina ≤ 30 udubine za prihvat od ukupno 30	Svaka od višestrukih šupljina ≤ 30 udubine za prihvat od ukupno 30	Svaka od višestrukih šupljina ≤ 25

Prilikom ugradnje zidnih elementa u konstrukciju, potrebno je uskladiti njihova svojstva sa zahtjevima postavljenim normama za projektiranje, a koja se odnose na konfiguraciju i tlačnu

čvrstoću. U konstruktivne elemente ugrađujemo zidne elemente srednje tlačne čvrstoće okomito na sljubnice min 10 N/mm^2, dok je horizontalna čvrstoća minimalno 2,0 N/mm^2. Norme također definiraju minimalne debljine stijenki zidnih elemenata [56].

3.2. Ispitivanja svojstava opečnih zidnih elemenata

Osim navedenih svojstava, niz je drugih svojstava koje je potrebno ispitati na glinenim opekama kao gotovim građevnim proizvodima sukladno pozitivnim propisima. Sumarni prikaz svih ispitnih metoda opečnih zidnih elemenata kao i popis normi u kojima su te metode opisane dan je Tablicom 3.2.

Tablica 3.2 Svojstva glinene opeke i metode po kojima se ispituju [60]

Svojstvo	Norma u kojoj je metoda opisana
Konfiguracija: Određivanje ukupnih izmjera, debljine stijenki i rebara, dubine šupljina	HRN EN 772-16:2011 Metode ispitivanja zidnih elemenata-16. dio: Određivanje izmjera [72]
Ravnost naliježućih ploha	HRN EN 772-20:2003/A1:2005 Metode ispitivanja zidnih elemenata - 20. dio: Određivanje ravnosti površine zidnih elemenata[73]
Neto volumen hidrostatskim vaganjem, postotak šupljina hidrostatskim vaganjem	HRN EN 772-3:2003 Metode ispitivanja zidnih elemenata-3. Dio: Određivanje neto obujma i postotka šupljina opečnih zidnih elemenata hidrostatskim vaganjem[74]
Bruto obujamska masa suhog elementa, neto obujamska masa suhog elementa	HRN EN 772-13:2003 Metode ispitivanja zidnih elemenata-13. Dio: Određivanje neto i bruto obujamske mase suhih zidnih elemenata[75]
Vodoupojnost	HRN EN 772-21:2011 Metode ispitivanja zidnih elemenata - 21. dio: Određivanje vodoupojnosti opečnih i vapnenosilikatnih zidnih elemenata upijanjem hladne vode[76]
Početno upijanje vode	HRN EN 772-11:2011Metode ispitivanja zidnih elemenata-11. Dio: Određivanje kapilarne vodoupojnosti zidnih elemenata od betona, porastog betona, umjetnog i prirodnog kamena i početne vodoupojnosti opečnih zidnih elemenata[77]
Tlačna čvrstoća	HRN EN 772-1:2015 Metode ispitivanja zidnih elemenata-2. Dio: Određivanje tlačne čvrstoće[78]
Otpornost na zamrzavanje i odmrzavanje	HRS CEN/TS 772-22:2008 Metode ispitivanja zidnih elemenata - 22. dio: Određivanje otpornosti opečnih zidnih elemenata na zamrzavanje i odmrzavanje[79]
Sadržaj aktivnih topivih soli	HRN EN 772-5:2016 Metode ispitivanja zidnih elemenata - 5. dio: Određivanje sadržaja aktivnih topivih soli u opečnim zidnim elementima[80]
Toplinska otpornost Paropropustnost	HRN EN 1745:2012 Zidovi i proizvodi za zidanje -- Metode određivanja toplinskih svojstava[81]
Otpornost na požar	HRN EN 13501-1:2010 Razredba građevnih proizvoda i građevnih elemenata prema ponašanju u požaru — 1. dio: Razredba prema rezultatima ispitivanja reakcije na požar [82]

U nastavku će ukratko biti opisani principi ispitivanja po onim iz Tablice 3.2 prikazanih normi koje se direktno ili pak indirektno odnose na trajnosna svojstva opečnih zidnih

elemenata. Dodatno, bit će opisano i ispitivanje toplinske otpornosti opečnih zidnih elemenata obzirom da se rad u svojem eksperimentalnom dijelu bavi i utjecajem ciklusa smrzavanja/odmrzavanja na toplinska svojstva zidnih elemenata.

3.2.1. Određivanje izmjera i paralelnosti naliježućih ploha sukladno normi HRN EN 772-16

Ova metoda prikazuje postupak određivanja ukupnih izmjera opečnih zidnih elemenata. Ispitivanju se pristupa, nakon što se čeličnom četkom odstrani sav materijal koji strši izvan izmjera zidnih elemenata, a koji je rezultat procesa proizvodnje.

Oznake:

ℓ_u duljina zidnog elementa (mm),

w_u širina zidnog elementa (mm),

h_u visina zidnog elementa (mm).

Uređaji za ispitivanje:

-*prikladan uređaj* za ispitivanje koji zadovoljava točnost mjerenja prema Tablici 3.3. Moguća odstupanja od izmjera prikazana su Tablicom 3.4. Raspon tj. razlika između najmanje i najveće određene izmjere po pojedinom elementu određuju se kako je to prikazano Tablicom 3.5.

Tablica 3.3 Točnost mjerenja izmjera duljine, širine i visine [72]

Dopušteno odstupanje izmjera	Najveća dopuštena pogreška mjerenja (mm)
≤ 1	0,1
>1	0,2
-	0,5

Tablica 3.4 Razredi odstupanja od izmjera duljine, širine i visine [60]

Razredi odstupanja od izmjera	Vrijednosti odstupanja (mm)
T1	Veća od vrijednosti: ± 0,4(radna izmjera) $^{1/2}$; 3 mm
T2	Veća od vrijednosti: ± 0,25(radna izmjera) $^{1/2}$; 2 mm
Tm	Druga vrijednost objavljena od strane proizvođača

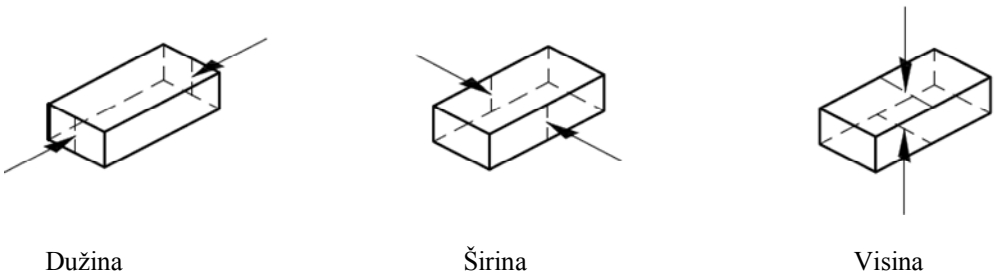
Tablica 3.5: Razredi raspona između najmanje i najveće izmjere duljine, širine i visine [60]

Razred raspona izmjera	Raspon (mm)
R1	0,6 (radna izmjera) $^{1/2}$
R2	0,3 (radna izmjera) $^{1/2}$
Rm	Drugi Raspon objavljen od strane proizvođača

-*ravna ploča* od brušenoga stakla ili nehrđajućega čelika koji ne odstupa od ravnine za više od 0,1 mm na svakih 100 mm.

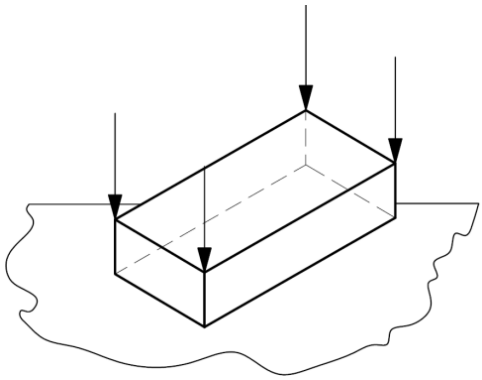
Postupak ispitivanja:

Duljinu (ℓ_u), širinu (w_u) i visinu (h_u) uzoraka određujemo mjerenjem svakog uzorka u sredini duljine, širine i visine prema Slici 3.4. Svi rezultati mjerenja dimenzija zaokružuju se na najbližih 0,1 mm ako je dopuštena pogreška mjerenja 0,1 mm te na 0,5 mm ako je dopuštena pogreška mjerenja 0,2 mm ili 1 mm ako je dopuštena pogreška mjerenja 0, 5 mm.



Slika 3.4 Postupak izmjere duljine, širine i visine ispitnih uzoraka [72]

Za mjerenje paralelnosti naliježućih ploha uzorak se postavi na ravnu plohu kako je to prikazano Slikom 3.5 te se mjere udaljenosti od ravne plohe do gornje naliježuće plohe na sva četiri ugla opeke, a rezultat svakog mjerenja zaokruži na najbližih 0,1 mm, 0,2 mm ili 0,5 mm ovisno o odstupanju dimenzije koja se mjeri (Tablica 3.3.). Odstupanje se od paralelnosti zatim izračuna kao razlika između najveće i najmanje udaljenosti i zaokruži na najbližih 0,2 mm. Odstupanje se od paralelnosti naliježućih ploha uzima kao najveća ovako izračunata vrijednost na svim ispitnim uzorcima (Slika 3.5.).



Slika 3.5 Mjerni položaji za ispitivanje planparelelnosti ploha opeke [72]

3.2.2 Određivanje ravnosti ploha sukladno normi HRN EN 772-20

Prije početka ispitivanja treba odstraniti sav materijal koji strši izvan izmjera zidnih elemenata, a koji je rezultat procesa proizvodnje.

Uređaji za ispitivanje:

- *ravnalo*
- *set špijuna točnosti 0,05 mm*

Postupak ispitivanja:

Potrebno je opeku položiti na stabilnu plohu prije ispitivanja. Za svaku plohu koja se smatra ravnom potrebno je izmjeriti dvije nasuprotne dijagonale opeke pomoću ravnala te ih zaokružiti na najbližih 0,5 mm. Srednju vrijednost duljine dijagonala potrebno je zaokružiti na najbliži milimetar. Potom je potrebno ravnalo postaviti po dijagonalama i setom špijuna odrediti odstupanje od ravnosti površine te zaokružiti svako pojedinačno i srednje odstupanje od ravnosti na najbližih 0,1 mm [73].

3.2.3. Određivanje neto obujma i postotka šupljina sukladno normi HRN EN 772-3

Ova metoda definira postupak određivanja neto obujma vaganjem na zraku i pod vodom, te postotnog udjela šupljina zidnih elemenata oduzimanjem netoobujma od brutoobujma određenog izmjerom svakoga elementa.

Oznake:

M_{wu} prividna masa ispitanog uzorka pod vodom (g)
M_{au} masa ispitnog uzorka na zraku (g)
ℓ_u duljina zidnog elementa (mm),
w_u širina zidnog elementa (mm),
h_u visina zidnog elementa (mm).
V_{gu} bruto obujam ispitnog uzorka (mm^3)
$V_{v,u}$ obujam šupljina (mm^3)
$V_{n,u}$ netoobujam ispitnog uzorka (mm^3)
ρ_w gustoća vode (g/mm^3, oko 0,001 g/mm^3)

Uređaji za ispitivanje:

-*spremnik (kada)* u kojoj je moguće uzorak u cijelosti potopiti u vodi

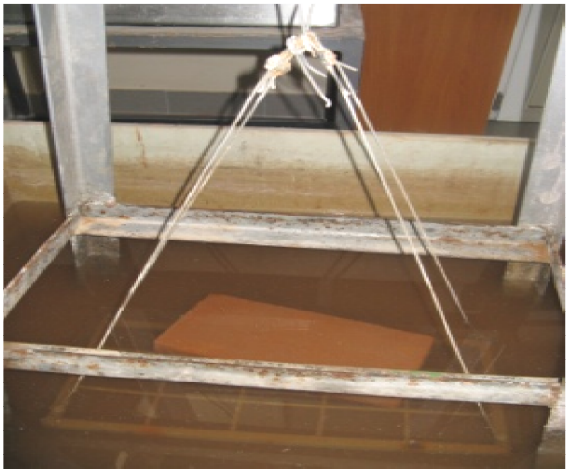
-*vaga* točnosti 0,1% mase uzoraka u suhom stanju, te mogućnost hidrostatskog vaganja.

Postupak ispitivanja:

Ispitni se uzorak potopi u vodu barem jedan sat tj. dok se vrijednosti prividne mase M_{wu} pri dva uzastopna vaganja u razmaku od 30 minuta ne razlikuju više od 0,2%, nakon čega se zabilježi mase dobivene vaganjem pod vodom (M_{wu}). Nakon toga, ispitni uzorak se izvadi iz vode te se zapiše podatak vaganja na zraku – M_{au} (Slika 3.6). Kako bismo utvrdili masu zidnog elementa na zraku (M_{au}), potrebno je prethodno obrisati višak vlage s površine uzorka te uzorak izvagati (Slika 3.7) [74] . Dimenzije uzoraka određujemo u skladu s HRN EN 772-16 [72].

Neto obujam ($V_{n,u}$) proračuna se kao:

$$V_{nu}=(M_{au}-M_{wu})/\rho_{w.}$$



Slika 3.6 Hidrostatsko vaganje opeke

Slika 3.7 Vaganje opeke "na zraku"

Srednja vrijednost pri određivanju neto obujma zaokruži se na 10^4 mm^3.

Bruto obujam ($V_{g,u}$) određuje se kao:

$$V_{gu}=l_u \cdot w_u \cdot h_u$$

Rezultat se zaokruži na 10^4 mm^3.

Obujam šupljina (V_{vu}) se izračunava kao:

$$V_{vu}=V_{gu}-V_{nu}$$

Postotni udio šupljina se izračunava kao:

$$p=(V_{vu}/V_{gu})\cdot 100$$

i zaokruži na 1%.

Srednja vrijednost postotnog udjela šupljina, ako se zahtijeva, proračuna se i zaokruži na 1%.

3.2.4 Određivanje neto i bruto obujamske mase sukladno normi HRN EN 772-13

Norma HRN EN 772-13 [75] definira izračun bruto i neto volumne mase u suhom stanju, a mjerenje neto volumena definirano je normom HRN EN 772-3 [74].

Oznake:

ℓ_u duljina opeke (mm),

w_u širina opeke (mm),

h_u visina opeke (mm),

$m_{dry,u}$ masa opeke nakon sušenja do stalne mase(g),

V_{gu} bruto obujam ispitnog uzorka (mm^3),

$V_{v,u}$ obujam šupljina (mm^3),

$\rho_{n,u}$ neto obujamska masa u suhom stanju (kg/m^3),

$\rho_{g,u}$ bruto obujamska masa u suhom stanju (kg/m^3).

<u>*Uređaji za ispitivanje:*</u>

-*ventilirajući sušionik* s mogućnošću regulacije temperature na 105±5° C,

-*vaga* točnosti 0,1% mase uzoraka u suhom stanju.

<u>*Postupak ispitivanja:*</u>

Nakon sušenja do stalne mase te određivanja neto i bruto obujma, proračunaju se neto i bruto obujamska masa opeke u suhome stanju. Stalna je masa ($m_{dry,u}$) postignuta ako za vrijeme postupka sušenja u sušioniku (Slika 3.8) u dva uzastopna vaganja u razmaku od 24 sata, gubitak mase između dva mjerenja nije veći od 0,2 % ukupne mase.

Neto obujamska masa se izračunava kao:

$$\rho_{n,u}=10^6 \cdot m_{dry,u}/V_{n,u}\ (kg/m^3).$$

Neto obujamska masa u suhom stanju svake opeke zaokruži se na 5 kg/m^3 za mase do 1000 kg/m^3 i na 10 kg/m^3 za mase veće od 1000 kg/m^3.

Bruto obujamska masa se izračunava kao:

$$\rho_{g,u}=10^6 \cdot m_{dry,u}/V_{g,u}\ (kg/m^3).$$

Bruto obujamsku masu u suhom stanju svake opeke zaokružuje se na 5 kg/m^3 za obujamske mase do 1000 kg/m^3 i na 10 kg/m^3 za obujamske mase veće od 1000 kg/m^3.

Slika 3.8 Sušenje uzoraka u sušioniku

3.2.5. Određivanje vodoupojnosti sukladno normi HRN EN 772-21

Ovdje se određuje udio vode kojom se opeka može zasititi u 24 h.

Uređaji za ispitivanje:

-*spremnik za vodu* prikladna za potapanje uzorka,

-*vaga* točnosti 0,1% mase suhoga uzorka,

-*ventilirajući sušionik* s mogućnošću regulacije temperature na 105±5° C.

Postupak ispitivanja:

Prema ovoj metodi, uzorci se prvo suše u sušioniku pri (105±5) °C do stalne mase. Ispitni se uzorci izvažu te se zapiše njihova masa "m_d". Smatra se da je postignuta stalna masa ako gubitak mase pri dva uzastopna vaganja u razmaku od najmanje 24 sata tijekom sušenja nije veći od 0,2% ukupne mase. Ispitne uzorke treba ohladiti prije vaganja na sobnoj temperaturi. Svaka se opeka pri sobnoj temperaturi potopi u spremnik s vodom (Slika 3.9). Dodir s vodom svih površina opeke osigura se postavljanjem opeka na razmačnike. Opeke se drže u vodi neprekidno 7 dana. Zatim se izvade iz vode, a višak vode ukloni se s površine mokrom krpom ili spužvom. Ispitni se uzorci izvažu te se zapiše masa vlažnih uzoraka m_w.

Sadržaj vode w_m svake opeke proračuna se prema formuli:

$$w_m = 100*(m_w - m_d)/m_d$$

Slika 3.9 Ispitivanje vodoupojnosti opeke

i zaokruži na najbližih 1% [76].

3.2.6 Određivanje kapilarne vodoupojnosti opečnih zidnih elemenata sukladno normi HRN EN 772-11

Ova metoda definira postupak određivanja koeficijenta upijanja vode zbog kapilarnog djelovanja na zidne elemente, tako da se nakon sušenja do stalne mase, jedno lice zidnog elementa uroni u vodu i drži određeno vrijeme "pod opterećenjem", te se nakon toga odredi povećanje mase. Obzirom na način ugradnje opeke u zide, određuje se početno upijanje vode horizontalne sljubnice.

Oznake:

$m_{so,s}$ masa ispitnog uzorka nakon močenja u vremenu t (g),
$m_{dry,s}$ masa ispitnog uzorka nakon sušenja (g),
A_s bruto površina lica ispitnog uzorka uronjenog u vodu, (mm^2),
t_{so} vrijeme močenja (s),
$c_{wi,s}$ početno upijanje vode opečnih zidnih elemenata ($kg/(m^2 \cdot min)$).

Uređaji za ispitivanje:

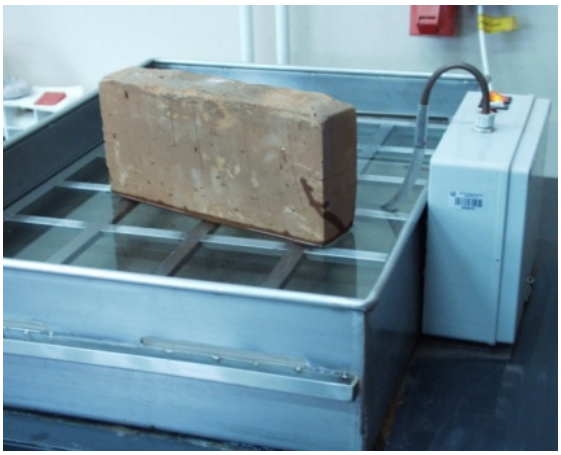
-veliki spremnik sa mogućnošću stalnog održavanja razine vode,
-potpore/ležajevi za oslanjanje za odvajanje uzoraka od spremnika,
-zaporni sat sa sekundnom podjelom,
-ventilirajući sušionik, s mogućnošću regulacije temperature na 105±5° C,
-vaga točnosti 0,1% mase uzoraka u suhom stanju.

Postupak ispitivanja:

Ispitni uzorak suši se do stalne mase $m_{dry,s}$ u provjetravanom sušioniku na temperaturi od

(105±5) ^{o}C. Stalna masa je postignuta, ako za vrijeme postupka sušenja između dva uzastopna vaganja u razmaku od 24 sata, gubitak mase između ta dva mjerenja nije veći od 0,2% ukupne mase.

Prije nego se urone u vodu, treba dopustiti da se uzorci ohlade do sobne temperature. Kada su hladni, izmjere se ploštine koje će biti uronjene u vodu u skladu s normom HRN EN 772-16 [72] te proračuna bruto ploština A_s. Ispitni se uzorci postavljaju na način da su njihova lica tj. sljubnice oslonjene na potpore tako da ne naliježu na dno spremnika, te da su uronjeni u vodu do dubine (5±1) mm za vrijeme trajanja ispitivanja kako to prikazuje Slika 3.11. Treba aktivirati mjerač vremena. Razinu vode treba držati stalnom za vrijeme ispitivanja [77] (Slika 3.10).



Slika 3.10 Ispitivanje početnog kapilarnog upijanja

Nakon što se zabilježi povećanje mase uzorka, proračuna se početno upijanje vode za svaku opeku u uzorku, zaokruženo na 0,1 kg/(m^2.min) prema sljedećoj formuli:

$$C_{wi,s}=10^3\cdot(m_{so,s}-m_{dry,s})/(A_s\cdot t)\ [kg/(m^2\cdot min)]$$

gdje je t = 1 min.

Oznake:

$C_{wi,s}$ vrijednost početnog upijanja vode [kg/(m^2·min)],
$m_{so,s}$ masa ispitnog uzorka nakon močenja u vremenu t (g),
$m_{dry,s}$ masa ispitnog uzorka nakon sušenja (g),
A_s bruto površina lica ispitnog uzorka uronjenog u vodu (mm^2),
t vrijeme močenja (s).

Nakon što se izračuna srednja vrijednost početnoga upijanja vode, ista se zaokruži na 0,1 kg/(m^2 min).

3.2.7. Određivanje tlačne čvrstoće sukladno normi HRN EN 772-1

Prethodno pripremljen ispitni uzorak u odgovarajućoj ispitnoj opremi se opterećuje sve do pojave loma na uzorku.

Oznake:

f_b normalizirana tlačna čvrstoća zidnog elementa (N/mm^2),

Δ faktor oblika za pretvorbu tlačne čvrstoće zidnih uzoraka sušenih na zraku u normnu tlačnu čvrstoću.

Uređaji za ispitivanje:

-preša stroj s dvije ploče preko kojih se prenosi opterećenje, odgovarajućih ravnosti, krutosti, tvrdoće i hrapavosti,

-vaga točnosti 0,1% mase uzoraka u suhom stanju,

-ventilirajući sušionik s mogućnošću regulacije temperature na 105±5° C,

-stroj za brušenje uzoraka.

Prethodna priprema uzorka podrazumijeva pripremu površine uzorka i njegu uzoraka.

Površinu uzoraka moguće je pripremiti jednom od sljedećih metoda:

- brušenjem ili
- izradom sloja za izravnanje

U slučaju brušenja, ispitne površine se bruse sve dok nisu ispunjeni zahtjevi za ravnošću i paralelnošću dok se kod izrade sloja za izravnanje izrađuje sloj cementnog morta koji u trenutku ispitivanja mora imati tlačnu čvrstoću najmanje onoliku kolika se očekuje od opeke ili 30 N/mm^2 tj. manju od ove dvije navedene vrijednosti. Ovako izrađeni uzorci njeguju se do trenutka ispitivanja jednom od sljedećih metoda:

- njega sušenjem na zraku,
- njega sušenjem u sušioniku,
- njega do 6% sadržaja vlage,
- njega uranjanjem u vodu.

Postupak ispitivanja:

U postupku ispitivanja, uzorci se postavljaju centrično na ploče stroja za ispitivanje - preši (Slika 3.11). Jednolično raspoređeno opterećenje nanosi se u istom smjeru kao i u stvarnoj primjeni, bez udaraca i povećava kontinuirano do sloma uzorka. U početku treba rabiti bilo koju prikladnu brzinu opterećenja ali, na otprilike polovici očekivanog najvećeg opterećenja, treba brzinu prilagoditi tako da se najveće opterećenje dosegne u ne manje od približno jedne

minute. Tablica 3.6 daje orijentacijske vrijednosti odabira prikladnih brzina opterećenja. Bilježi se maksimalno opterećenje pri slomu svakog uzorka [78].

Slika 3.11 Određivanje tlačne čvrstoće u preši

Tablica 3.6 Prirast sile za ispitivanje tlačne čvrstoće prema HRN EN 772-1 [78]

Očekivana tlačna čvrstoća (N/mm^2)	Brzina prirasta sile/opterećenja ($(N/mm^2)/s$)
<10	0,05
11 do 20	0,15
21 do 40	0,3
41 do 80	0,6
>80	1,0

Bruto površinu svakoga uzorka mora se proračunati u kvadratnim milimetrima, množeći duljinu i širinu svakog uzorka koje su određene u skladu s HRN EN 772-16 [72] , ako se radi o ispitivanju tlačne čvrstoće okomito na sljubnice. Ako će se na uzorku ispitivati tlačna sila koja nije okomita na sljubnice, sukladno tome treba uzeti odgovarajuće izmjere u izračun bruto površine.

Tlačna čvrstoća izračunava se kao srednja vrijednost tlačne čvrstoće pojedinačnih uzoraka, tako da se maksimalno opterećenje pri slomu podijeli s opteretnom površinom svakog elementa u uzorku, te zaokruži na 0,1 N/mm^2. Za ocjenu ispitnih rezultata potrebno je prikazati i koeficijent varijacije za kompletan ispitani uzorak. Tlačna je čvrstoća vrijednost koja se upotrebljava za procjenu sukladnosti s deklaracijama proizvođača i mora se za primjenu u proračunu svesti na normnu-svedenu vrijednost.

U tom slučaju prema Dodatku A, norme HRN EN 772-1 [78], tlačna čvrstoća se prvo pretvori

u istovrijednu tlačnu čvrstoću koja odgovara režimu njegovanja uzorka sušenjem na zraku. Vrijednosti koje se upotrebljavaju kao faktori pretvorbe, kada je to potrebno, jesu:

- za opeku njegovanu sušenjem na zraku ili do 6% vlage – 1,0
- za opeku njegovanu u sušioniku – 0,8
- za opeku njegovanu uranjanjem u vodu – 1,2.

Kako bi se dobila normna (svedena) tlačna čvrstoća, f_b, tlačna čvrstoća zidnih elemenata propisno njegovanih pomnoži se faktorom oblika danim u Tablici 3.7. Pritom širina i visina trebaju biti određene u skladu s normom HRN EN 772-16 [72].

Tablica 3.7 Faktor oblika „delta“ za ispitane izmjere uzorka pune opeke nakon obrade površina [78]

Visina zidnog elementa	Najmanja horizontalna dimenzija zidnog elementa (mm)				
	50	100	150	200	≥250
40	0,8	0,7	-	-	-
50	0,85	0,75	0,7	-	-
65	0,95	0,85	0,75	0,70	0,65
100	1,15	1,0	0,9	0,8	0,75
150	1,3	1,2	1,1	1,0	0,95
200	1,45	1,35	1,25	1,15	1,10
≥250	1,55	1,45	1,35	1,25	1,15

Svedena tlačna čvrstoća izvedena u skladu s točkom 3.1.2.1. HRN EN 1996-1-1 [56] ne smije biti manja od vrijednosti:

- okomito na sljubnicu: f_b= 2,5 N/mm^2
- usporedno sa sljubnicom u ravnini zida: f_{bh}= 2,0 N/mm^2.

3.2.8. Određivanje otpornosti na cikluse smrzavanja/odmrzavanja sukladno normi HRS CEN/TS 772-22

Kod ove metode se zid izrađen od opeke čija se otpornost na cikluse smrzavanja/odmrzavanja procjenjuje izlaže ciklusima smrzavanja/odmrzavanja u klima komori.

Oznake:

m_d masa uorka nakon sušenja (g),

m_w masa vlažnog uzorka (g),

w_m maseni sadržaj vode pojedinačnog uzorka (%).

<u>Uređaji za ispitivanje:</u>

-prikladni uređaj kojim se može postići izmjenično smrzavanje i odmrzavanje u skladu s normom,

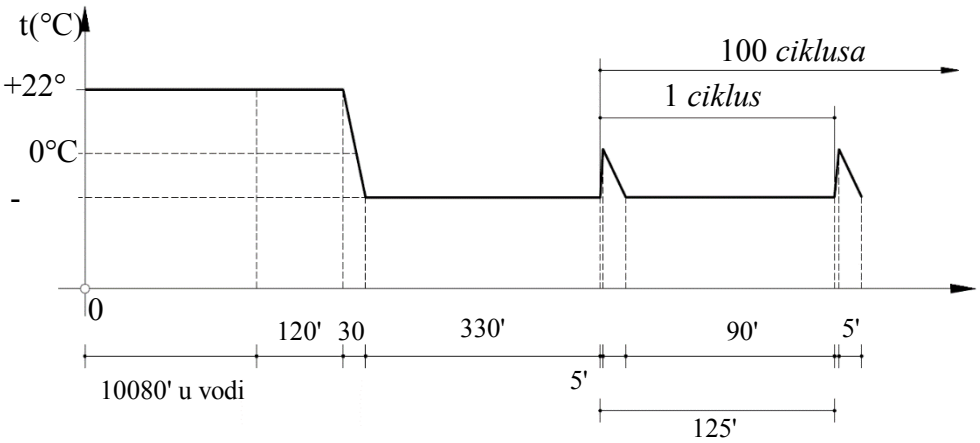
-spremnik (kada) za vodu prikladna za potapanje uzorka,

-vaga točnosti 1 g,

-ventilirajući sušionik s mogućnošću regulacije temperature na 120° C.

Postupak ispitivanja:

Prema navedenoj normi svaki uzorak opeke treba označiti brojem i utvrditi i obilježiti njeno oštećenje prije ispitivanja, te odložiti u vodu zadano vrijeme. Potom se izrađuje ispitni zid od opeke površine 0,25 m^2. Za izradu ispitnog zida upotrebljava se za sljubnice pjenasta guma ili brzostvrdnjavajući mort. Sve površine ispitnog zida, osim onih izloženih smrzavanju i odmrzavanju treba obložiti dobro naliježućom oblogom od polistirolne ekstrudirane pjene, debljine min 50 mm, na vanjskim rubovima min 25 mm. Uzorak se uranja u vodu do potpunoga zasićenja. Početak izmjeničnog zamrzavanja i odmrzavanja prikazan Slikom 3.12 započinje najkasnije 30 min nakon vađenja ispitnog uzorka iz spremnika s vodom. Zatim se ispitni zid unese u ispitni uređaj. Prska se (15±0,1) minutu vodom temerature 25±2 °C u količini od 12±0,1 l/m^2/min, tako da je površina pokrivena slojem vode koji otječe. Ispitni zid se ispituje na 100 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja i pri tome se ocjenjuju eventualna oštećenja.



Slika 3.12 Grafički prikaz ciklusa smrzavanja/odmrzavanja prema HRS CEN/TS 772-22 [79]

Prvi ciklus smrzavanja mora trajati 6 sati ±1 min, a svaki idući 120±1 min. Unutar 30 min nakon početka ciklusa mora temperatura zraka iznositi -15 °C (±3°C). Ovu se temperaturu mora zadržati tijekom ostatka vremena zamrzavanja. Gubitak topline pri temperaturi -15°C i temperaturi od 0 °C od (400±50) W/m^2. Odmrzavanje se postiže prskanjem ispitnog zida

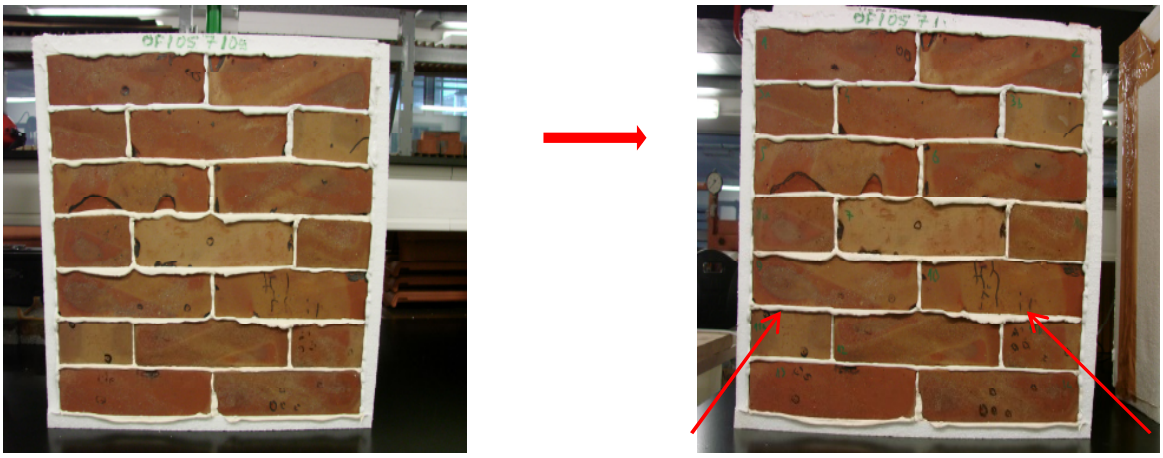
vodom čija temperatura (25±2) °C u količini od (12±0,1) l u trajanju od (5±0,1) minuta ili dovođenjem kružećeg toplog zraka u trajanju od najviše 20 min iza kojeg slijedi najmanje 2-minutno prskanje vodom. Potrebno je osigurati toplinu vrijednosti (400±50) W/m^2.

Površina zida promatra se prije ciklusa smrzavanja/odmrzavanja i nakon pet ciklusa smrzavanja i odmrzavanja, te se zabilježe eventualna oštećenja. Može se napraviti i međuispitivanje između 5. i 100. ciklusa, uvijek nakon odmrzavanja. Za ispitivanje se zid iz ispitnog uređaja izvadi u trajanju do 10 minuta. Na kraju 100. og ciklusa ispitni zid se potpuno odmrzne, te se zapišu sva vidljiva oštećenja na izloženoj površini. Zatim se obloga oprezno ukloni sa zida, a na naliježućim površinama zida se pregledaju pukotine. Nakon 5. i 100. ciklusa smrzavanja i odmrzavanja zapiše se koliko je opeka u ispitnom zidu nastupilo oštećenje prema Tablici 3.8.

Tablica 3.8 Vrste oštećenja kao ocjena otporrnosti na cikluse smrzavanja i odmrzavanja [79]

Opis oštećenja	Vrste-stupanj oštećenja
Nema	0
Krater (npr. izbijanje vapna)	1
Vlasasta pukotina ≤ 0,15 mm	2
Pukotina	3
Površinska pukotina	4
Pukotina koja prolazi kroz opeku	5
Odlamanje, ljuštenje, otpadanje	6
Slom	7
Ljuskanje	8

Primjer izgleda površine zida prije i nakon ispitivanja prikazan je Slikom 3.13.



a) prije ciklusa smrzavanja/odmrzavanja b) nakon ciklusa smrzavanja/odmrzavanja

Slika 3.13 Ispitivanje otpornosti zida na cikluse smrzavanja/odmrzavanja

Potrebno je ustanoviti na kojem je broju opeka ispitnog zida, između početka ispitivanja i

nakon 5. og i 100. og ciklusa nastupilo oštećenje vrste (stupnja) 4 i više prema gornjoj Tablici. Otpornost opeke na smrzavanje i odmrzavanje određuje se tada prema Tablici 3.9. Otpornost se svodi na broj ciklusa pri kojem ni kod jedne opeke ili polovice opeke nije nastupilo oštećenje vrste ili stupnja 4 ili više.

Tablica 3.9 Određivanje trajnosti opečnih zidnih elemenata [60]

Razred	Broj ciklusa smrzavanja i odmrzavanja
F0 – pasivna izloženost	Nema zahtjeva
F1 – umjerena izloženost	5
F2 – oštra izloženost	100

3.2.9. Određivanje sadržaja topivih soli sukladno normi HRN EN 772-5

Odabrani postupak utemeljen je na vodenoj ekstrakciji smanjenog reprezentativnog ispitnog uzorka opečnog zidnog elementa i određuje količinu topivih magnezijskih, natrijskih i kalijskih iona, koji bi se pod uvjetima koji odgovaraju ispitnim, pod određenim okolnostima, mogli osloboditi i imati štetno djelovanje soli tih iona na cementni mort ili na zidni element. Temeljem razreda navedenih u Tablici 3.10 potrebno je objaviti sadržaj aktivnih topivih soli, ako je u predviđenoj uporabi proizvoda osigurana ograničena zaštita (npr. tankim slojem žbuke) ili je proizvod predviđen za uporabu izložen atmosferskim djelovanjima [60]. Prema HRN EN 771-1[60], topivih soli ne smije biti veći od objavljene vrijednosti.

Tablica 3.10 Razredi sadržaja topivih soli opečnih zidnih elemenata [60]

Razred	Ukupno % mase ne veće od	
	Na+ + K+	Mg^{2+}
S0	Nema zahtjeva	Nema zahtjeva
S1	0,17	0,08
S2	0,06	0,03

Prihvatljive specifikacije opeke obzirom na razrede izloženosti okoliša prikazane su Tablicom 3.11.

Tablica 3.11 Prihvatljive odredbe zidnih elemenata i mortova za trajnost [56 ili 57]

Razred	Prihvatljivi razredi otpornosti na smrzavanje i odmrzavanje i sadržaja topivih soli
MX1	svi
MX2.1	F0,F1 ili F2/S1 ili S2
MX2.2	F0,F1 ili F2/S1 ili S2
MX3.1	F1 ili F2/S1 ili S2
MX3.2	F2/S1 ili S2
MX4	Savjetovati se s proizvođačem.
MX5	Savjetovati se s proizvođačem.

Oznake razreda iz tablice 3.11 imaju sljedeće značenje:

- MX1 - u suhom okolišu: unutrašnjost zgrada za obično stanovanje i za urede, uključujući unutarnje slojeve vanjskih šupljih zidova kod kojih nije vjerojatno vlaženje. Žbukano zide vanjskih zidova, koji nisu izloženi srednjoj ili jakoj, vjetrom nošenoj kiši, i koji su izolirani od vlaženja susjednog zida ili materijala.
- MX2.1 – izloženo vlazi, ali nije izloženo ciklusima smrzavanja i odmrzavanja ili vanjskim izvorima znatne razine sulfata ili agresivnih kemikalija: unutarnje zide izloženo visokoj razini vodene pare kao što je u praonici rublja. Zide vanjskih zidova zaštićeno strehom ili kapom, koje nije izloženo jakoj vjetrom nošenoj kiši, ili smrzavici. Zide ispod zone smrzavanja u dobro dreniranom neagresivnom tlu.
- MX2.2 – izloženo jakom močenju ali nije izloženo ciklusima smrzavanja i odmrzavanja ili vanjskim izvorima znatne razine sulfata ili agresivnih kemikalija: zide koje nije izloženo smrzavici ili agresivnim kemikalijama, smješteno u vanjskim zidovima s kapama ili preljevnim strehama, u parapetima, u slobodnostojećim zidovima, u tlu, pod vodom.
- MX3.1 – izloženo vlaženju i ciklusima smrzavanja i odmrzavanja ali nije izloženo vanjskim izvorima znatne razine sulfata ili agresivnih kemikalija: zide kao kod razreda MX2.1 izloženo ciklusima smrzavanja i odmrzavanja.
- MX3.2 – izloženo jakom močenju vlaženju i ciklusima smrzavanja i odmrzavanja ali nije izloženo vanjskim izvorima znatne razine sulfata ili agresivnih kemikalija: zide kao kod razreda MX2.2 izloženo ciklusima smrzavanja i odmrzavanja.
- MX4 – izloženo zraku zasićenom solju ili morskoj vodi: zide u obalnim područjima.
- MX5 - u kemijski agresivnom okolišu: zide u dodiru s prirodnim tlima, nasutim tlom

ili tlom s podzemnom vodom gdje su prisutni vlaga i sulfati. Ziđe u dodiru s vrlo kiselim tlima, zagađenom tlu ili podzemnom vodom; ziđe blizu industrijskih područja gdje se agresivne kemikalije prenose zrakom.

3.2.10.Određivanje toplinske otpornosti i paropropustnosti sukladno normi HRN EN 1745

Toplinske vrijednosti kod opeke iskazuju se njezinom toplinskom provodljivošću, λ, koja se može ispitati ili prema normi HRN ISO 8302 ili odrediti tablično [81]. Vrijednosti toplinske provodljivosti su dane u Tablici 3.12 kao 50% i 90% fraktile postojećeg raspona vrijednosti λ za opeku obzirom na njezinu gustoću. Istom su Tablicom prikazane i vrijednosti koeficijenata difuzije vodene pare, μ, te specifični toplinski kapacitet opeke, c, ovisno o gustoći opeke kao i koeficijent konverzije vlage, f_Ψ, kojim se opisuje porast toplinske provodljivosti sa svakim postotkom povećanja njezine vlažnosti.

Tablica 3.12 Tablične vrijednosti toplinske provodljivosti, koeficijenta difuzije vodene pare i specifičnog toplinskog kapaciteta opeke [81]

Gustoća materijala	Toplinska provodljivost suhog materijala pri 10 ºC, $\lambda_{10,dry}$ (W/mK)		Koeficijent difuzije vodene pare	Specifični toplinski kapacitet, c
(kg/m^3)	P=50%	P=90%	μ	(kJ/kgK)
1000	0,2	0,27	5/10	1,0
1100	0,23	0,30		
1200	0,26	0,33		
1300	0,3	0,36		
1400	0,34	0,40		
1500	0,37	0,43		
1600	0,41	0,47		
1700	0,45	0,51		
1800	0,49	0,55		
1900	0,53	0,60		
2000	0,58	0,64		
2100	0,62	0,69		
2200	0,67	0,74		
2300	0,72	0,79		
2400	0,77	0,84		
f_Ψ=10 m^3/m^3				

Obzirom kako je koeficijent difuzije vodene pare dan kao faktor, da bi se usporedile paropropustnosti dvaju materijala, potrebno je koeficijent difuzije vodene pare pomnožiti s debljinom elementa.

3.3. Proizvodnja opečnih zidnih elemenata

3.3.1. Sirovina za proizvodnju

Sirovina za proizvodnju opečnih zidnih elemenata je glina. Utvrđivanje prihvatljivosti gline kao sirovine za proizvodnju opekarskih proizvoda, ne može se izvesti bez utvrđivanja svojstva sirovine, a ona obuhvaćaju sljedeća ispitivanja [83,84,85,86]:

- kemijski sastav,
- granulometrijski sastav,
- mineralni sastav i
- tehnološko - keramičke karakteristike.

Kemijski sastav gline je osnova za identifikaciju i ocjenu kvalitete gline. Određuje se kemijskom analizom uzorka što podrazumijeva određivanje masenog udjela SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, MnO, CaO, MgO, Na_2O, K_2O i gubitak žarenjem (H_2O^-, H_2O^+, CO_2 i organske tvari). Dobiveni rezultati kemijske analize određuju prisutnosti određenih oksida koji usmjeravaju na određenu kvalitetu gline i upućuju na odabir ostalih metoda ispitivanja kojima će se bliže ocjeniti kvaliteta gline i njene pogodnosti za proizvodnju opekarskih proizvoda [64,85,86]. Uz glinene minerale, u sastavu opekarskih sirovina se nalaze i sporedni minerali kao što su kvarc, kalcit, dolomit, oksidi željeza, sulfidi, gips, organske tvari. Ove primjese također mogu imati različite utjecaje na svojstva sirovine.

Kvarc, sitnije granulometrije, u glinama se nalazi u obliku pijeska i treba ga biti u iznosima od 20-50 %. Ako je sitnije granulometrije obično popravlja mehanička svojstva gotovoga proizvoda. Promjena kvarca u druge forme u procesu pečenja praćena je pojavom povećanja volumena što uzrokuje pukotine. Krupnije zrno također uzrokuje mehanička oštećenja, ali ona su izraženija u procesu hlađenja gotovoga proizvoda. Kvarc ima ulogu i opošćivača, ako se dodaje plastičnijim sirovinama, može smanjiti njihovu osjetljivost pri sušenju [64,85,86, 87,88].

Karbonati se u opekarskoj glini mogu naći u obliku kalcita, dolomita i siderita, u obliku fino raspršenih čestica, količine 20-50 % i nisu štetni. Upravo te sitne i fino raspršene čestice pomiješane s kremenom i glinom pri pečenju tvore spojeve kalcijevih silikata koja pridonose povećanju mehaničkih svojstava gotovoga proizvoda. Sadržaj karbonata utječe i na plastičnost i skupljanje pri sušenju. Vodoupojnost gotovoga proizvoda je funkcija sadržaja karbonata u sirovini, a koeficijent zasićenja je proporcionalan njihovoj količini [64,85,86, 87,88].

Kalcit je lako prepoznatljiv u sastavu neke opekarske gline jer se otapa u solnoj kiselini, kada se polije kiselinom, šušti. Količina slobodnoga kvarca i kalcij karbonata u sirovini je obrnuto proporcionalna [64].

Vapno se ipak može pojaviti u obliku lesnih „lutkica“ te ga je zbog kasnije pojave iscvjetavanja u gotovom proizvodu, potrebno ograničiti na manje od 5 %. Vapno se oslobađa pri temperaturama od 565-1060°C, dok mu je najveći efekt pri temperaturi od 900 °C pri kojima utječe na promjenu strukture pora. Ako je prisutno u većim količinama u sirovini, točku sinteriranja može sniziti za 30-50°C. Ako je u sirovinama prisutno u malim količinama, ne utječe na njihovu međusobnu različitost [64,85,86,87,88]. Vodoupojnost i poroznost povećavaju se povećanjem sadržaja vapna [89].

Organske tvari se nalaze u obliku humusnih tvari, utječu na vatrostalnost i skupljanje proizvoda jer pri pečenju izgore, ali i na gustoću sirovoga proizvoda. Posljedica prisutnosti organskih tvari očituje se kao gubitak pri žarenju [64,85,86,87,88].

Voda/vlaga u opeci može biti slobodna ili kemijski vezana, a ukazuje na osjetljivost pri procesima sušenja i pečenja. Higrovlaga se gubi sušenjem na 105 °C, kemijski vezana voda ili konstitucijska voda (vlaga koju glina sadrži u svom kemijskom sastavu), gubi se tek pri višim temperaturama, proporcionalno svojstvu plastičnosti. Vezana voda je količina vode koja je neophodna za dobivanje plastičnoga tijesta za oblikovanje [64,83,84]. Voda kao dodatak sirovini presudna je za cijeli tehnološki proces. Stanje plastičnosti ovisi o količini dodane vode. Ukoliko se sirovini dodaje previše vode, masa sirovine prelazi u tekuće stanje i obrnuto, ako je ima premalo, sirovina postaje kruta – neplastična. Voda isto tako, prolazi kroz mršavu sirovinu većim intenzitetom i brže, a kroz masniju sirovinu polaganije – masnija se sirovina teže priprema za proizvodnju. Ako se odležavanje sirovine produži u nekom zimskom periodu, razornost vode u sirovini uslijed povećanja volumena pri smrzavanju, djeluje korisno jer ju rastvara i usitnjuje.

Topive soli koje gline sadrže u većim ili manjim količinama mogu se javiti na površini proizvoda još u procesu sušenja, ili kasnije na gotovom proizvodu pri eksploataciji na atmosferilijama u obliku iscvjetavanja. Ako su temperature pečenja više od 900 °C, onda se gubi utjecaj topivih soli [85,86].

Oksidi željeza smanjuju vatrostalnost, prilikom pečenja mogu uzrokovati pojavu tamnijeg pigmenta ili čak mjehura na površini opeke, daju boju gotovom proizvodu. Sadržaj Fe_2O_3 pokazatelj je vatrostalnosti sirovine te daje crvenu boju konačnom proizvodu. Veći sadržaj željeza smanjuje vatrostalnost sirovine [85,86,89].

Oksidi kalija i natrija formiraju lako topive silikate koji zatvaraju pore proizvoda, one gline koje sadrže veće količine alkalnih oksida dobro sinteriraju [85,86,89]. Manja količina topitelja Na_2O, K_2O, MgO neće značajno doprinijeti smanjenju potrebne vlage, niti će sadržaj MgO uzrokovati velike ekspanzije [83,86,92], iako će dijelom povećati amorfne faze pri pečenju [85,86,88,89].

Iz kemijske analize također možemo saznati sadržaj Al_2O_3, CaO , TiO_2 i MnO koji utječu na ponašanje gline pri pečenju [83,86,92].

Granulometrijski sastav tj. raspodjela veličine čestica glina igra značajnu ulogu u kvaliteti opekarskih proizvoda. Čestice ispod 2 μm nazivaju se glinenim frakcijama, od 2 do 20 μm frakcijama prašine, a iznad 20 μm je frakcija pijeska [71,84]. Najsitnije frakcije su i najbogatije u sadržaju glinenih minerala i značajno utječu na plastičnost opekarskih glina.

Porastom masenog udjela čestica ispod 2 μm doprinosi se kako povećanju mehaničkih karakteristika proizvoda, tako i povećanom skupljanju gline tijkom procesa sušenja i pečenja te povećanju gustoće proizvoda.

Dok porastom masenog udjela neglinenih čestica (na primjer u slučaju kada je udio pijeska prekoračuje dozvoljenu količinu), pretpostavlja se, gotov proizvod ima grublju teksturu i povećanu poroznost [63,86,90].

Reguliranjem omjera glinenih i neglinenih minerala sirovine, moguće je izvršiti modeliranje svojstva plastičnosti sirove opeke [63,84,86,91]. Povećanjem ukupne količine najkrupnije frakcije sirovine smanjuje se skupljanje sirovine, a time smanjujemo i pojavu pukotina i iskrivljenost proizvoda. Povećanjem ukupne količine glinenih minerala osigurava se neophodna plastičnost, ali i čvrstoća sirovoga proizvoda [86,88].

Mineralni sastav se utvrđuje provedbom sljedećih ispitivanja [63,84,86,91]:

- diferencijalno - termička analiza,
- termogravimetrijska analiza,
- rentgenska analiza,
- dilatometrijska analiza i
- termo-mikroskopska analiza.

Diferencijalno-termička analiza (DTA) temelji se na usporednom mjerenju količine topline koja se oslobađa ili veže pri kemijskim reakcijama i kristalografskim transformacijama za vrijeme zagrijavanja ispitivane mineralne sirovine usporedno s nekom inertnom tvari koja se pri zagrijavanju kristalografski ne transformira. Naime, prilikom zagrijavanja inertnog uzorka njegova temperatura ostaje jednaka temperaturi u peći dok je temperatura mineralnog ispitivanog uzorka drugačija. Razlozi za to su endotermni i egzotermni efekti koji se

odražavaju trošenjem ili oslobađanjem topline a koji su posljedica kristalnih transformacija minerala gline prilikom zagrijavanja. Rezultat diferencijalno-termičke analize je termogram kod kojega se na ordinati nalazi razlika temperature između ispitivane i inertne materije (Δt) i temperatura peći na apscisi. Obzirom da svaki mineral ima karakterističnu DTA krivulju, temeljem termograma određuje se mineralni sastav sirovine.

Termogravimetrijska analiza (TGA) temelji se na mjerenju mase uzorka tijekom njegovog kontinuiranoga žarenja od sobne do željene temperature tj. praćenju gubitka mase u ovisnosti o visini temperature na kojoj se termički tretira uzorak [71] . Tijek gubitka mase u ovisnosti od porasta temperature iskazuje se na termogramu u koordinatnom sustavu u kojem se na ordinatu nanose gubici mase u postotcima (%) a na apscisu temperature na koje se uzorak zagrijava. Svaka glina ima svoju termogravimetrijsku krivulju temeljem koje se određuje kvalitativan mineralni sastav jedne gline.

Rentgenska ispitivanja kvalitativnog mineralnog sastava gline obavljaju se pomoću rentgen - uređaja na uzorcima najfinije frakcije gline tj. veličine do 11 mikrona. Metoda difrakcije X – zraka koristi se za strukturnu analizu samo kristalnih mineral [63].

Dilatometrijska analiza izvodi se pomoću dilatometra. Dilatometrijskim ispitivanjem utvrđuje se ponašanje glina na skupljanje prilikom pečenja, to jest odnos između skupljanja i temperatura kojima je uzorak gline izložen pri procesu pečenja [63]. Temeljem tako dobivene krivulje i karakterističnih temperatura pri kojima se pojedini minerali skupljaju/šire, može se utvrditi udio pojedinih mineralnih vrsta u sirovini.

Termo - mikroskopskim ispitivanjima određuju se temperature karakteristične za ponašanje gline pri termičkom tretiranju na najvišim temperaturama kao što su:

- temperatura početka skupljanja,
- temperatura sinteriranja,
- temperatura početka bubrenja,
- temperatura maksimalnog bubrenja i
- temperatura topljenja.

Određivanje karakterističnih temperatura ponašanja glina pri termičkom tretiranju do temperature topljenja obavlja se pomoću termomikroskopa.

Mineološka analiza određene sirovine može ukazati na izražena svojstva plastičnosti i higroskopnosti, odnosno na pojavu „masnijih“ glina, a to u praksi znači da su procesi sušenja i pečenja nešto zahtjevniji. Tako će sporiji postupak sušenja ostaviti površinske pore dovoljno dugo prohodnima da omoguće što veći gubitak vlage iz unutrašnjosti opeke. U tom slučaju

spriječit će se pojava nejednolikoga skupljanja, odnosno pukotina prouzrokovanih nejednolikim skupljanjem.

Tehnološko-keramička svojstva gline podrazumijevaju sljedeća ispitivanja [63,85]:

- linearno skupljanje pri sušenju,
- linearno skupljanje pri pečenju,
- gubitak mase pri pečenju,
- boja pečenja,
- upijanje vode,
- čvrstoća na savijanje i tlak osušenih i pečenih ispitnih uzoraka,
- prisustvo topivih soli.

Za ova se ispitivanja glina pripremi u laboratoriju te izrade ispitni uzorci / epruvete pomoću vakuum preše i usnika. Na uzorcima se određuju:

- linearne promjene gline pri sušenju i pečenju određuju se pomoću kljunastog mjerila mjerenjem dimenzija uzoraka nakon sušenja, odnosno pečenja,
- gubitak mase određuje se razlikom mase uzorka prije i nakon sušenja i prije i nakon pečenja.
- boja se određuje na pečenim uzorcima i dodjeljuje se broj prema definiranoj karti boja za opekarske proizvode,
- upijanje vode obavlja se određivanjem razlike mase suhog pečenog uzorka i uzorka potopljenog u vodi u trajanju od 24 sata,
- čvrstoće na savijanje i tlak se određuju na pečenim uzorcima uporabom laboratorijskih preša i
- prisustvo topivih soli određuje se vizualnim pregledom pečenih uzoraka koji se uparavaju u komori s parom i opisno ocjenjuje jesu li soli prisutne ili ne.

3.3.1.1. Utjecaj sirovine na otpornost opečnih zidnih elemenata na cikluse smrzavanja i odmrzavanja

Sukladno udjelima mineralnih komponenata, gline se dijele na: nekarbonatne, s malim udjelima karbonata i velikom količinom kvarca (preko 50%) i karbonatne, s udjelima karbonata između 15% i 30% i malom količinom kvarca (manje od 15%) [63,92]. Nekarbonatne gline sadrže veći udio SiO_2 i Al_2O_3 u kemijskom sastavu, a karbonatne veći udio Ca i Mg [92]. Granica kojom se prema udjelu CaO gline opisuju kao karbonatne/nekarbonatne su različite prema različitoj literaturi. Tako se npr. u [92,93] naziva

karbonatnim glinama one sa više od 6% CaO a prema [92,93,94] karbonatne gline su one s više od 16% CaO. Već temeljem mineraloškog ili kemijskog sastava glina moguće je donijeti neke zaključke o otpornosti zidnih elemenata na cikluse smrzavanja/odmrzavanja. Tako će gline sa manjim udjelom $CaCO_3$ u mineraloškom sastavu, omogućiti bolju otpornost na cikluse smrzavanja/odmrzavanja [95]. Prosuđuje li se temeljem kemijskog sastava, bolju otpornost zidnim elementima osigurat će gline s manjim udjelom CaO [92,93,94,96]. Naime, kod glina s većim udjelom CaO pri višim temperaturama karbonati se raspadaju povećavajući tako ukupnu poroznost i ujedno umanjujući otpornost na cikluse smrzavanja/odmrzavanja [92,93,94,96]. U prisutnosti vode, kalcijev oksid koji nije ušao u reakciju s alumosilikatnom fazom se pretvara u portlandit $Ca(OH)_2$ koji kasnije može prijeći u $CaCO_3$ pri prisutnosti CO_2 iz atmosfere. Ovo će u nastavku rezultirati povećanjem volumena nastalog produkta i cvjetanjem vapna što dodatno povećava poroznost. S ciljem prevencije cvjetanja vapna, elemente izrađene iz karbonatne gline se preporuča uroniti u vodu neposredno nakon pečenja na vrijeme od dva sata [86]. Pretpostavlja se kako obilna količina vode ispire CaO i umanjuje lokalnu pojavu portlandita. Unatoč manjoj otpornosti na cikluse smrzavanja/odmrzavanja opeka izrađenih iz karbonatnih glina u odnosu na one od nekarbonatnih glina, karbonatne gline osiguravaju veću tlačnu čvrstoću pri nižim temperaturama pečenja [97]. Osim toga, kod karbonatnih je glina lakše kontrolirati temperaturu pečenja jer se morfologija karbonatne gline ne mijenja preko širokog raspona temperatura. Također, temperatura i atmosfera u peći imaju manji utjecaj na konačnu boju elemenata izrađenih od karbonatne nego nekarbonatne gline [86,97]. Osim utjecaja kemijskog/mineraloškog sastava gline, važnim se za otpornost elemenata na cikluse smrzavanja/odmrzavanja pokazalo i vrijeme odležavanja gline nakon iskapanja. Sukladno [86,97,98], duže vrijeme odležavanja gline rezultira boljom otpornošću opeke na cikluse smrzavanja/odmrzavanja.

3.3.2. Oblikovanje elemenata

Priprema sirovine za proizvodnju odvija se višestupanjskim mljevenjem, usitnjavanjem i homogenizacijom dok oblikovanje proizvoda može biti ručno ili strojno. Strojni način oblikovanja obavlja se postupkom ekstrudiranja vakuum agregatom koji se sastoji od miješalice koja se završava sa vakuum komorom i cilindrom u kome se nalazi puž kojim se istiskuje glina (Slika 3.14). U miješalici se glina još jedanput promiješa, nakon čega se vakumizira u vakum komori i tlači se u cilindru preše.

Slika 3.14 Vakumski agregat i rezaći stol

Na kraju cilindra je postavljena ploča s usnikom kojim su definirane dužina i širina proizvoda. Nakon ekstruzije, rezaćim stolom obavlja se siječenje vakumirane glinene trake na točno definiranu mjeru. Kako bi se dobilo na estetici, na glinenu traku se može nanositi pijesak ili reljef pomoću valjaka. Nakon odsijecanja opečni elementi se automatski slažu na vagone sušare i transportiraju u sušaru. Prednost strojnog oblikovanja je visoka produktivnost i kontinuitet proizvodnje [63]. Osim ekstrudiranja, opeke se dodatno mogu proizvoditi oblikovanjem u kalupima – strojno i ručno, te postupkom suhog prešanja.

Kod ručnog oblikovanja koriste se drveni (Slika 3.15) ili metalni kalupi u koje se ručno utiskuje sirovina. Kalupi se vlaže i posipaju pijeskom kako bi se oblikovana opeka lakše „izbacila“ iz kalupa. Za ovakav način oblikovanja koristi se sirovina s većim sadržajem vode kako bi se lakše utisnula u kalup. Tako oblikovana opeka se reda u slogove jedna na drugu u nekoliko redova na otvorenom ili nadkrivenom prostoru gdje se suše.

Slika 3.15 Drveni kalup za oblikovanje ručno proizvedene opeke

3.3.2.1. Utjecaj načina oblikovanja na otpornost opečnih zidnih elemenata na cikluse smrzavanja/odmrzavanja

Osnovna razlika između strojne i ručne proizvodnje je u poroznosti proizvedene opeke. Ukupni volumen pora veći je kod strojno proizvedene opeke u odnosu na ručno proizvedenu opeku. Ujedno, kod strojnoga načina proizvodnje formiraju se uglavnom srednje pore u intervalima između 0,1-1 μm [99,100], te prema nekim autorima u intervalu 0,25-1,4 [101] odnosno u intervalu od 0,6-1,65 [102]. Tako dobivene pore su paralelne sa smjerom istiskivanja sirovine, horizontalne su, i nisu vidljive na samoj površini proizvoda, a homogenu sirovinu pretvaraju u anizotropan gotov proizvod. Rezultat navedenoga je proizvod slabije otpornosti na procese smrzavanja i odmrzavanja. Kod ručne proizvodnje opeke je pak distribucija pora uglavnom u intervalu 0.1-10 μm [99,1001,1,102] (s manjim udjelom pora u rasponu 0,1-1 μm nego je to slučaj kod strojno proizvedene opeke), a pore su jednolično raspoređene po presjeku što rezultira manjim devijacijama karakteristika gotovoga proizvoda, a time i većom trajnošću opeke.

3.3.3. Sušenje elemenata

Sušenje je proces uklanjanja vode iz glinenoga tijesta pri čemu se voda transportira sustavom kapilara iz unutrašnjosti materijala k njegovoj površini s koje isparava. Pri procesu sušenja dolazi do niza fizičko mehaničkih promjena od kojih su karakteristične gubitak plastičnosti gline, skupljanje i povećanje mehaničke čvrstoće koje omogućuju transport svježe oblikovanog proizvoda do mjesta pečenja. Uz skupljanje pri sušenju javljaju se i deformacije te različita naprezanja koja mogu biti destruktivne prirode. Zbog toga se ponašanje sirovine pri sušenju određuje ispitivanjem linearnog skupljanja i gubitka mase unaprijed pripremljenih uzoraka.

Početnu fazu sušenja proizvoda označava uvijek veliki gubitak vode i veliko skupljanje. Svaka slijedeća faza sušenja također je praćena promjenom volumena, ali one nisu tako značajne kao u početnoj fazi sušenja [63,86]. Zato je potrebno pažljivo provesti ovu fazu proizvodnje jer loše osušeni proizvod ne može rezultirati konačnim gotovim proizvodom željenih karakteristika. [63,86].

Pored karakteristika sirovine, na parametre sušenja utječu još tip sušare i oblik elementa koji se suši. Vrijeme sušenja ovisi od vrste sirovine, dimenzija proizvoda, debljine zidova i veličine i raspodjele šupljina u samom proizvodu i kreće se od 24 sata do 70 sati [63]. Kod poljskih ciglana sušenje se odvija na otvorenom prostoru prirodnim putem (Slike 3.16). Proizvodi koji se nakon oblikovanja slažu na otvorenom prostoru koji je u većini slučajeva nenatkriven i sam proces sušenja se vodi iskustveno (slogovi vlažnih proizvoda se pokrivaju najlonima i pažljivo odkrivaju kako ne bi došlo do pucanja) (Slika 3.17.) Sam proces sušenja vrlo ovisi od vremenskih uvjeta, te se vrlo često događa da kiša i mraz, a i prejako sunce i vjetar dovedu do pucanja proizvoda.

a) b)

Slika 3.16 Primjer sušenja pune opeke u natkrivenoj sušari prirodnim putem

a) b)

Slika 3.17 Primjer sušenja pune opeke u natkrivenoj sušari prirodnim putem

U industrijskim sušarama koje mogu biti po konstrukciji *komorne ili tunelske* (učestalije danas) proces se sušenja odvija prema točno definiranom režimu promjene temperature i vlage. Sušare su opremljene vagonima na koje se postavlja oblikovani proizvod i sistemom transporta vagona. Za sušenje se koristi otpadni topli zrak s peći s mogućnošću dogrijavanja. Temperatura zraka za sušenje se kreće do 150° C i vlažnosti do 30 g vlage/kg zraka. Sustavom cjevovoda koji su opremljeni klapnama i žaluzinama obavlja se dovođenje i regulacija količine toploga zraka potrebnog za sušenje. Suvremene sušare opremljene su i cjevovodima za reguliran odvod vlažnoga zraka s mogućnošću recirkulacije toplog i zasićenog zraka, bitnog za početnu fazu sušenja. Sam prostor u kome se nalazi proizvod opremljen je ventilatorima i distributerima zraka kako bi se u svakom dijelu prostora odvijalo ravnomjerno

sušenje proizvoda (Slika 3.18). Sušare su opremljene i sondama za mjerenje tlaka, temperature i vlage kojima se odvija regulacija procesa sušenja. Cjelokupan sustav regulacije podržan je računalima. Vrijeme sušenja u industrijskim sušarama ovisi od vrste sirovine, dimenzija proizvoda, debljine zidova i veličine i raspodjele šupljina u samom proizvodu i kreće se od 24 sata do 40 sati.

a) b)

Slika 3.18 Tunelska sušara: a) unutrašnjost; b) ventilator u sušari

Kako bi se proizvodi pravilno sušili, temperatura u tunelima lagano raste, a vlaga opada. Slika 3.19. prikazuje primjer krivulje sušenja proizvoda tvornice opečnih zidnih elemenata "Dilj" d.o.o., Pogon Našice i to za sušenje šupljih glinenih blokova. Temperaturni vrhovi na krivulji rezultat su zahtjeva specifičnosti sirovine i konfiguracije šupljih blokva tvornice "Dilj" d.o.o., Pogon Našice. Na Slici 3.19. vidljivo je kako se temperatura u tunelima provjerava na četiri mjesta; ulazu 35˚C, na prvoj trećini 38˚C, drugoj trećini 40˚C, te na izlazu sušare 60˚C (Slika 3.19.). Postotak relativne vlažnosti zraka mjeri se na ulazu, gdje se, kako je već navedeno, održava na 95% i u drugoj trećini tunela gdje iznosi oko 75%.

Pogreške nastale u procesu sušenja su uglavnom sistemske i one su posljedica neadekvatnog režima. Proces sušenja je faza u kojoj dolaze do izražaja i pogreške nastale u procesu oblikovanja.

3.3.4. Pečenje elemenata

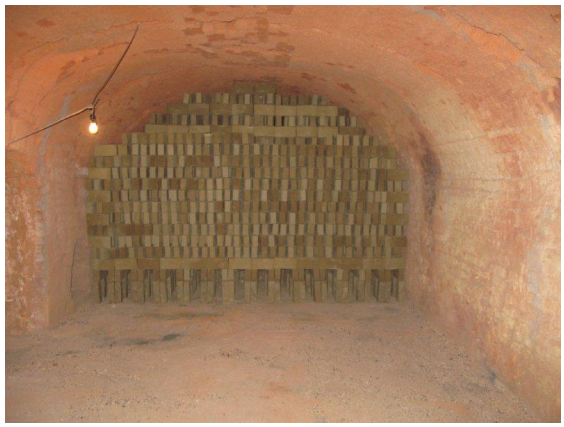
Pečenje se danas odvija ili kružnim Hoffmanovim pećima ili u tunelskim pećima.

Kružne peći karakteriziraju stacionarni slogovi opeke koji se formiraju u samoj peći, dok se zona pečenja pomiče. Peć je elipsoidnog oblika s bočnim vratima kroz koja se odvija manipulacija s osušenim i pečenim proizvodima. Na Slikama 3.20 a) i b), prikazana je Hofmanova kružna peć [63].

a) b)

Slika 3.20 Hofmanova kružna peć u pogonu Vladislavci, "Opeka" Osijek

Vatreni je kanal peći podijeljen na komore u kojima se obavlja predgrijavanje, pečenje i hlađenje. Na Slici 3.22 prikazana je unutrašnjost vatrenoga kanala kružne peći, te krov i otvori za loženje Hofmanove peći (Slika 3.21)



Slika 3.21 Prikaz vatrenog kanala kružne peći sa složenim proizvodima

a) b)

Slika 3.22 Prikaz kova Hofmanove peći: a) krov peći; b) otvori za loženje

Vrijeme pečenja u ovim pećima se kreće i do 70 sati. Kod ovakvih peći gorivo koje se koristi je u najvećem broju slučajeva ugljen. Krov peći (Slika 3.22. a)) se sastojao od mnogo otvora prekrivenih s metalnim kapama koje su poznate kao "otvori za loženje" (Slika 3.22 b)). Režim pečenja u ovoj vrsti peći je vrlo kompleksan i odlučujuće je iskustvo rukovatelja – ložača. Ovaj tip peći danas je malo zastupljen i vezuje se za seoske sredine u kojima se najviše proizvodi puna opeka.

Tunelske peći su peći koje su konstrukcijski izvedene kao jedan tunel kroz koji prolaze vagoni sa proizvodom, dok su uređaji za pečenje (gorionici) stacionarni (Slika 3.23 a) i b)) [63]. Peći u zavisnosti od proizvoda za koje su namenjeni i kapaciteta cjelokupnog postrojenja su dužine od 90 m pa čak i do 150 m. Samo tijelo vatrenog kanala je ozidano od šamotnih opeka koje su otporne na visoke temperature, s izolacijskim slojem i vanjskim ozidom od opeke, a u novije vreme izvana se postavlja čelični lim. Vagoni tunelske peći su čelične konstrukcije na koje su ugrađeni šamotni materijali otporni na visoke temperature i velike nosivosti i visokokvalitetni izolacijski materijali [63].

a) **b)**

Slika 3.23 Pogon Našice: a) tunelska peć; b) stropni plamenici

Kod tunelskih se peći kao gorivo koristi mikronizirani ugljen, mikronizirani petrol koks, mazut i prirodni plin. Sve peći su opremljene ventilatorima za odsis produkata sagorjevanja i ventilatorima za hlađenje proizvoda s pripadajućim cjevovodima i klapnama. Gorionička postrojenja su opremljena gorionicima, a broj i raspored je definiran kapacitetom i vrstom proizvoda koji se proizvodi. Na peći su po zonama raspoređeni mjerači temperatura kojima se prati i upravlja procesom pečenja.

U zavisnosti od karakteristika sirovine,vrste proizvoda i karakteristika proizvoda koji se želi postići temperatura pečenja se kreće od 900 °C do 1100 °C. Vrijeme pečenja se kreće od 24 sata do 40 sati.

Neadekvatnim režimom pečenja nastaju pogreške i to najčešće:

-zbog brzog predgrijavanja - pojava ljuskanja proizvoda,

- brzog zagrijavanja u fazi raspada karbonatnih minerala - bubrenje proizvoda i pojave „crnog jezgra“,

- visoke temperature pečenja - deformaciju proizvoda i

-brzog hlađenja u zoni fazne transformacije kvarca - nastajanje „mikropukotina„ [63,88,103,104].

3.3.4.1. Režim pečenja u pećima

Proces pečenja mora zadovoljavati dvije zahtjevne kategorije: mora rezultirati gotovim proizvodima koji sadrže određena specificirana svojstva i istovremeno mora biti ekonomski opravdan. Duljina pečenja i vršne temperature, odnosno zadržavanje pojedinih faza pečenja na vršnim temperaturama određeni su, za razliku od procesa sušenja, i kemijskom i mineološkom kvalitetama opekarske sirovine. Ukoliko sirovina postiže realizaciju svojstava na nižim vršnim temperaturama i kraćim vremenom pečenja, proces će biti ekonomičniji. Dodatne utjecaje na režim pečenja svakako imaju i oblik i dimenzije gotovoga proizvoda i vrsta peći [103,104].

U pravilu, proces pečenja sastoji se od nekoliko faza kroz koje sirovina prolazi određene transformacije. Nakon početnih faza otpuštanja higrovlage, suhe opeke prolaze procese dehidracije, dehidroksilacije, sinteriranja i vitrifikacije koje određuju konačne fizičko - mehaničke karakteristike gotovoga proizvoda. Tako postoje četiri osnovne faze procesa pečenja, a dijelimo ih prema vršnim temperaturama na:

-prvu fazu *oslobađanja slobodne/preostale vlage koja nije uklonjena sušenjem na temperaturama* do 105 °C. Nakon gubitka slobodne vlage, minerali gube i jedan dio kemijski vezane vode [85,86,103]. U ovoj je fazi potrebno postići što jednoličnije skupljanje opeke kao posljedicu gubitka vlage i povećanja gustoće, a sve kako bi se izbjegla pojava pukotina. Također je važno je postići i potpuno izgaranje organskih tvari. Naknadno izgaranje organske tvari u nekim kasnijim fazama pečenja suzbijajući ispuštanje CO_2 nastalog dekarbonatizacijom, može dovesti do pojave dodatnog bubrenja [85,86].

-*druga faza pečenja* uz povećanje temperature iznad 400-700 °C termičkog razlaganja glinenih minerala (dehidroksilacija i sinteriranje) završava potpunim gubitkom plastičnosti, povećanjem gustoće proizvoda i smanjenjem specifične površine sirovine. [85,86]. Kvarc prelazi u inverznu fazu.

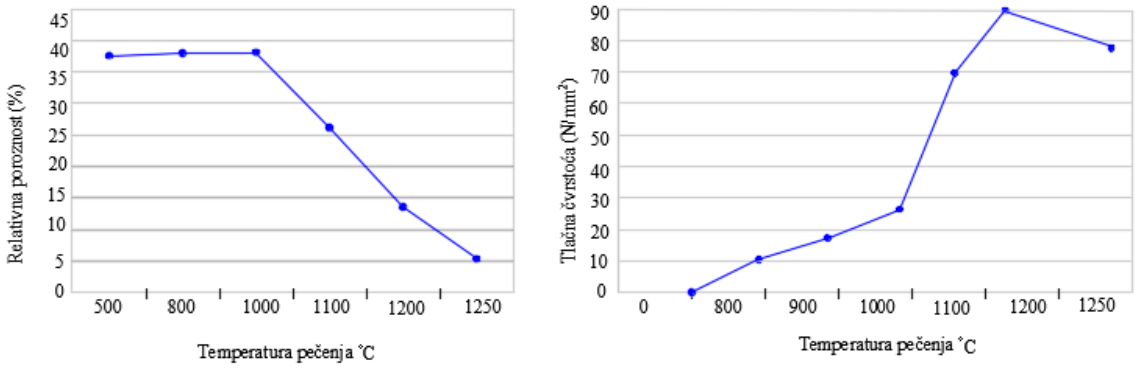
-treća faza *mineralnih transformacija* odvija se u temperaturnom intervalu od 900-1250 °C – glineni minerali prelaze u drugi kristalni oblik, kako bi se pri temperaturama bližim 1200 °C konačno transformirali u mulit. U ovom temperaturnom intervalu nastaje kristalni kvarc [85,87,104] dok tekuće faze silikatnog karaktera [88] potiču naglo povećanje plastičnosti, smanjuju poroznost i povećavaju gustoću. Transformacije nastale u ovoj fazi pečenja omogućuju formiranje krupnijih pora, tako da plinoviti produkti karbonatizacije (CO_2) iz prethodne faze pečenja lakše prodru van uzorka [86,87,90,92].

U temperaturnom intervalu između 1000 i 1100 °C sinteriranje postaje značajno, skupljanje se povećava za oko 70 %, poroznost se može smanjiti do 30 %, dok se tlačna čvrstoća može udvostručiti. [92,105]

Temperaturni interval od 1100-1200 °C obilježen je dodatnim skupljanjem i smanjenjem vodoupojnosti zbog intenzivne vitrifikacije [105]. Rezultat daljnjeg povećanja temperature jest smanjenje poroznosti i vodoupojnosti, smanjenje specifične površine čestica, ali i međusobno loša povezanost pora [90,92,107,108] uz efekt smanjenja specifičnih površina [107,109] iako postoje istraživanja koja bilježe rast specifične površine kao rezultat promjena u morfologiji i veličini čestica koje dovode do povećanja volumena sitnih pora, a samim tim povećanja ukupne poroznosti [105,109,110]. Ako je nastala staklasta faza dovoljna da popuni pore, ukupna će čvrstoća proizvoda rasti. S druge strane, ako je ima previše, proizvod postaje krt i čvrstoća se smanjuje [88,105,111]. Pojava staklaste faze ne mora imati naglašenu vezu s koeficijentom zasićenosti [103].

-četvrta i zadnja faza je *hlađenje* proizvoda gdje je potrebno izbjeći naprezanja i pucanja u materijalu koja mogu biti rezultat očvršćivanja prethodno nastale tekuće faze i kristalizalicije mulita. Posebno važna temperatura u ovoj fazi formiranja gotovoga proizvoda je temperatura od 573 °C, pri kojoj dolazi do inverzne reakcije transformacije kvarca. Faza hlađenja završava kada se proizvod ohladi na temperaturu okoline i time poprimi svoja konačna svojstva [86,88].

Kvalitetno definiranje režima pečenja može aproksimirati manjkavosti mineološkog sastava opekarske gline, ali u cilju postizanja kranjih traženih svojstava gotovoga proizvoda. Tako prema nekim autorima u temperaturnom intervalu od 800-1200 °C dolazi do porasta čvrstoće, i promjene ukupne poroznosti koja nije proporcionalna porastu čvrstoća. Povećanjem vršnih temperatura na interval od 1000 – 1100 °C postižemo čvrstoće između 40-70 N/mm^2, poroznost manju od 20 %. Daljnjim povećanjem temperatura od 1100-1200 °C proizvodi se značajnije skupljaju, pore se reduciraju, a zbog stvaranja tekuće faze, smanjuju se dodatno i poroznost i vodoupojnost. Međutim, prilikom promjene poroznosti dolazi do stvaranja sitnih pora koje nepovoljno utječu na svojstva trajnosti. Slika 3.24. prikazuje pad poroznosti u odnosu na povećanje temperature pečenja, dok Slika 3.27. prikazuje porast čvrstoća u odnosu na porast temperature pečenja.



Slika 3.24: a) Dijagram odnosa povećanja temperature pečenja i ukupne poroznosti te b) dijagram odnosa povećanja temperature pečenja i tlačne čvrstoće [105,112]

Režim pečenja određen je sastavom opekarske sirovine [90], odnosno ukupnim sadržajem SiO_2 koji pospješuje sinteriranje čvrstih čestica, ukupnim sadržajem Al_2O_3 koji formira staklastu fazu [88], te sadržajem topivih minerala Na_2O i K_2O koji snižavaju temperaturu vitrifikacije [88,103]. Različitim transformacijama tijekom pečenja sirovine, opeka mijenja fizikalna svojstva kao što su čvrstoće, poroznosti, strukture pora.

U prvim fazama pečenja, pri nižim temperaturama, potrebno je obratiti pažnju na izgaranje organskih primjesa kako iste ne bi imale negativne utjecaje na transformacije prilikom pečenja pri višim temperaturama. Tada se mogu očekivati brža izdvajanja plinovitih nusprodukata pri promjenama brzina zagrijavanja. Sadržaj Fe_2O_3 pokazatelj je crvene boje konačnoga proizvoda. S dodatnim utjecajem načina proizvodnje na strukturu proizvoda, očekuje se distribucija pora koja će odgovarati svojstvima trajnosti.

Visoke temperature pečenja svakako doprinose trajnosti gotovoga proizvoda, točnije doprinose razvoju krupnih pora. Pri dovoljno visokim temperaturama pečenja, pri temperaturama na kojima minerali sinteriraju, sitne se pore zatvaraju tekućim komponentama, događa se tzv. „okrupljavanje“ pora, pri čemu zbog skupljanja nastaju i zvjezdaste pukotine [86,103].

3.3.4.1.1. Utjecaj režima pečenja na otpornost opečnih zidnih elemenata na cikluse smrzavanja i odmrzavanja

Osim postupka proizvodnje, na veličinu i sustav pora koji će se formirati u opeci utječe i temperatura njezina pečenja. Sukladno [87,92,94], kod uzoraka pečenih na temperaturi od 900 ºC stvara se najveća količina pora radiusa od 0.1-0.5 µm i pora radiusa od 100 µm. Na 1000 ºC, uglavnom se stvaraju pore radiusa 1-2 µm a ujedno se smanjuje količina nastalih pora radiusa 100 µm. Na 1100 ºC, naglo se smanjuje rast pora veličine 1-2 µm, dok na 1200 ºC, raste količina pora radiusa 0,1-0,5 µm [113]. Utjecaj temperature pečenja na strukturu pora ovisi i o kemijskom sastavu materijala. Kod gline s većim udjelom CaO s povećanjem temperature raste i ukupna poroznost dok se kod gline s manjim udjelom CaO zbog prisustva alkalnih komponenata događa suprotno [87,90]. Prema [97], karbonatne gline razvit će najveći udio krupnih pora (a time i najbolju otpornost na cikluse smrzavanja/odmrzavanja) pri temperaturi 1100 °C a nekarbonatne na temperaturi između 1000 i 1100 °C. Pri istoj temperaturi pečenja, opeke za čiju izradu je korištena glina s većim sadržajem $CaCO_3$ imat će veću vodoupojnost [89,92,114].

Prema [92,102] na temperaturama oko 900 °C stvaraju se pore promjera oko 0,8-0,4 µm, na temperaturama oko 1000 °C, stvaraju se pore 1,6 - 0,8 µm, a na temperaturama oko 1100 °C, stvaraju se pore veće od 1,6 µm. Dodatna skupljanja događaju se pri 1050-1100 °C, kada se tope komponente koje smanjuju poroznost, a čvrstoće postaju vrlo visoke. Općenito govoreći prilikom „okrupljivanja“ pora, javlja se povratna reakcija smanjivanja poroznosti i povećanja čvrstoće.

3.4. Trajnost opečnih zidnih elemenata

Bilo da je upotrijebljena kao samostalni materijal za izgradnju konstruktivnih elemenata ili pak kao materijal za oblaganje nekog drugog konstruktivnog elementa, sustavno raspadanje opeke/opečnih zidnih elemenata može ozbiljno ugroziti stabilnost objekta. Stoga, trajnost je jedan od glavnih zahtjeva koji se postavljaju na opeku kao građevni materijal.

3.4.1. Mehanizmi degradacije opečnih zidnih elemenata

Porozni građevinski materijali u svojoj strukturi skoro uvijek sadrže određenu količinu vlage, odnosno fizički vezane vode. Prisutna vezana voda direktno utječe na svojstva materijala, kao što su njegova čvrstoća, skupljanje/širenje, paropropusnost i otpornost na vanjske uvjete. Sposobnost materijala da akumulira vlagu unutar poroznog sustava jedan je od osnovnih parametara koji određuju njegovu postajanost ali i primjenu u zidanim strukturama tijekom uporabe [2, 7].

Za bolje razumijevanje mehanizma vlaženja ziđa vlagu možemo, ovisno o izvoru vlaženja, podijeliti na:

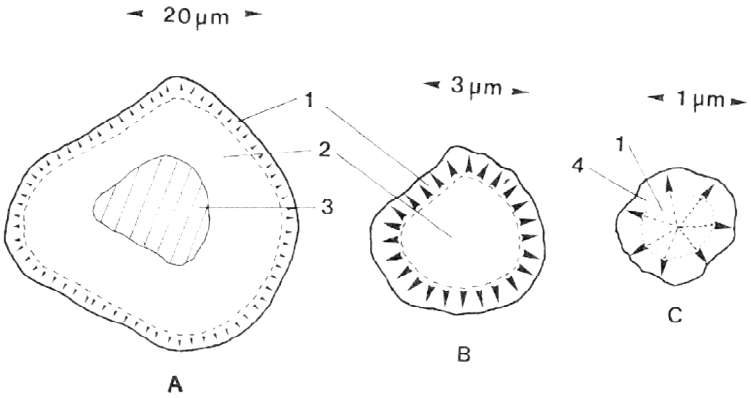
- tekuću (likvidnu),
- higroskopnu i
- kondenzacijsku vlagu.

Uzroci kapilarne vlage kao jedne od oblika *tekuće ili likvidne vlage* u ziđu su različiti: saturirano tlo, visoka podzemna voda, poplava i visoka plima te otapanje velikih količina snijega. Do prodora kiše u unutrašnjost građevine može doći zbog loše položenih crjepova, oštećenja krova, korozije žljebova ili njihove zapunjenosti lišćem, zbog neispravno izvedenih spojeva krova sa zidom, neadekvatno izvedenih okapnica na balkonima, terasama i prozorima, pogrešnih nagiba pločnika, terasa, balkona i prozorskih klupčica ili neprimjerene vodonepropusnosti materijala vanjske površine ziđa. Osim navedenih djelovanja koja uzrokuju natapanje ziđa vodom, treba napomenuti mehaničko djelovanje (erozija) i kemijsko djelovanje (korozija) uzrokovano kišom ili, općenito, vlagom. Erozijsko djelovanje očituje se u udaru kišnih kapi na žbuku, opeku ili kamen i mehaničko odvajanje slabije vezanih čestica. Štetno korozijsko djelovanje uglavnom se odnosi na građevinski materijal karbonatnog sastava. Curenjem vodovodnih instalacija, kanalizacijskih cijevi i instalacija radijatora ili podnog grijanja, također dolazi do natapanja ziđa i, pri tome, akumuliranja topivih soli u zoni isparivanja.

Higroskopna vlaga je karakteristična za porozne građevinske materijale kao što su kamen, opeka, mort i žbuka. Takvi materijali pokazuju higroskopna svojstva, tj. upijaju vlagu iz zraka. Ova se pojava znatno povećava ako građevni materijal u svojoj strukturi sadrži topive, higroskopne soli. Takve su soli višestruko higroskopnije od kamena, opeke ili žbuke pa srazmjerno sadržaju soli i povećanju vlage u zraku dolazi i do porasta vlage u materijalu. Higroskopna vlaga može biti uzrokovana i aerosolom tj. sitnim krutim česticama ili kapljicama u zraku nastalim u onečišćenoj urbanoj ili industrijskoj atmosferi te maritimnim

okolnostima. Štetan utjecaj na građevine u takvom okolišu nastaje djelovanjem sumporne kiseline koja na građevinu dospijeva u obliku kisele kiše ili smoga i tamo se kondenzira.

Kondenzacijska vlaga se javlja uglavnom na unutrašnjim površinama zida kada je zid hladniji od okolnog zraka, odnosno kada topli zrak dospije do površine hladnoga zida, odnosno, uvijek kada postoji temperaturna razlika zraka i zida. Očituje se kao tanki film sićušnih kapljica izlučene vodene pare na hladnoj površini i privlači sve tipove zračnoga onečišćenja što ga čini aktivnim čimbenikom u razaranju materijala. U grijanom prostoru sa slabom termoizolacijom zida dolazi do kondenzacije: ako se snizi temperatura vanjskoga zraka pa se zidovi ohlade, ako se poveća apsolutna vlaga u unutrašnjosti ili naglo poveća temperatura zraka u unutrašnjosti. Osim u navedenim slučajevima kondenzacija može biti inicirana i higroskopnim solima u zidu te nazočnošću mnoštva ljudi u zatvorenom prostoru. Kod debelih zidova može doći do izjednačenja temperature površina zidova s temperaturom okolnoga zraka, no u unutarnjem dijelu zida temperatura može biti niža. Ako ta temperatura dostigne temperaturu rosišta vanjskoga zida, doći će u dubini zida do kondenzacije (intersticijalna kondenzacija) koja je izrazito štetna pri niskim temperaturama.



1 adsorpcijska vlaga 3 gravitacijska vlaga

2 kapilarna vlaga 4 međuslojna vlaga

Slika 3.25 Područja različitih oblika vode u porama različitih veličina [115]: 1 adsorpcijska voda, 2 kapilarna voda 3 gravitacijska voda, 4 kondenzacijska vlaga

Slika 3.25. prikazuje različite oblike vlage koje se u porama različitih veličina 1,3,20 μm. Tako je: A krupna pora s adsorpcijskom vlagom. Ukupna količina vlage u ovim porama može iznositi približno 1/20 ukupnog volumena pora; B je kapilarna pora gdje je količina vlage oko 1/3ukupnog volumena pora i C pokazuje poru ispunjenu adsorpcijskom vodom [115].

Uslijed razlike tlakova koji su rezultat vanjskih utjecaja, dolazi do transporta zraka, vlage, vodene pare kroz pore zidnog elementa. Vodena para se kroz zidni element prenosi difuzijom i ona nema negativan utjecaj na zidni element. Ukoliko dođe do narušavanja ravnoteže vlage zidnoga elementa u odnosu na okolinu, ista će u kapilarama uzrokovati kondenzaciju vlage. Na tim razinama vlažnosti, osim kondenzacijske, struktura materijala može sadržavati i adsorpcijsku te tekuću (likvidnu) vlagu. Struktura pora odnosno kapilarne sile u porama materijala utjecat će na količinu upijanja sve dok se ne dostigne zasićenje koje će ovisiti o količini zraka u porama, strukturi pora te relativnoj vlažnosti okoline. Tekuća (likvidna) vlaga podrazumijeva oblike vlage koji su u zide prispjeli u obliku tekuće vode. To je kapilarna vlaga, vlaga od prodora kiše i vlaga od curenja neispravnih kućnih instalacija. Kapilarnim silama transportira se vlaga iz tla kroz temelje u zidove. Visina kapilarnoga dizanja ovisi o sustavu kapilara u građevnom materijalu zida tako da je kod materijala sa sitnijim sustavom kapilara kapilarno dizanje veći uzlaz zbog većeg kapilarnog potencijala porozne strukture.
Negativan utjecaj vlage na zidni element uslijedit će radi djelovanja smrzavanja kada uslijed pada temperatura okoline, započinje proces smrzavanja vode. Tada dolazi do širenja leda što rezultira razvojem naprezanja unutar materijala. Intenzitet naprezanja nastalog smrzavanjem ovisit će o količini pora u materijalu i stupnju njegovog zasićenja [7,116,117]; veći udio pora uzrokovati će veći razvoj naprezanja dok će u slučaju malog stupnja zasićenja razvoj naprezanja biti zanemariv obzirom da slobodan prostor u porama dopušta širenje vode pri smrzavanju. Ukoliko pak nastalo naprezanje prijeđe čvrstoću opeke, dolazi do oštećenja uslijed opetovanih ciklusa smrzavanja/odmrzavanja.

3.4.2. Metode procjene trajnosti opečnih zidnih elemenata

Glavnim čimbenicima degradacije svojstava opeke smatraju se kristalizacija soli i ciklusi smrzavanja i odmrzavanja [2,7,83,117,118,119]. Sukladno europskim propisima, trajnost opeke uvažava se kroz provjeru inicijalnih soli prema HRN EN 772-5 [80] i provjeru otpornosti na cikluse smrzavanja/odmrzavanja prema HRS CEN/TS 772-22 [79].
Međutim, osim navedene direktne metode za provjeru otpornosti opeke na cikluse smrzavanja/odmrzavanja, svjetska literatura navodi i neke indirektne postupke i granične/kritične vrijednosti po pojedinom postupku za ocjenu otpornosti opeke na cikluse smrzavanja i odmrzavanja. U praksi, preporučljivo je koristiti obje vrste metoda (direktne i indirektne) uz koreliranje svojstava sirovine i načina proizvodnje [112,118,119,120,121]. Naime, često se direktne metode ispitivanja otpornosti na cikluse smrzavanja/odmrzavanja

pokazuju neprikladnima. Osim što ispitivanja traju dugo, standardi koji definiraju način ispitivanja često ne uključuju stvarno opterećenje proizvoda. Tako npr. metode koje propisuju direktnu izloženost svih ploha pojedinačnih uzoraka opeke ciklusima smzavanja i odmrzavanja, mogu pokazati kako je uzorak osjetljiv na cikluse smrzavanja/odmrzavanja uslijed oštećenja nastalih pojavom hidrauličkog tlaka u središtu uzorka koji se ne bi dogodio pod jednoosnim opterećenjem. S druge strane, tijekom ciklusa odmrzavanja, može se dogoditi da stupanj zasićenosti zidnoga elementa ne bude u skladu sa stvarnim stanjem, uzorak će se pokazati osjetljivim, iako u stvarnoj okolini ne bi bio, i obratno. Uzorci koji pokažu osjetljivost prilikom ponavljanja 50 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja, prema CSA standardu A82-06 [121], također su izloženi umjetno induciranom intenzitetu opterećenja koje u stvarnosti nije tako [121]. Najrealniju metodu ispitivanja otpornosti na cikluse smrzavanja/odmrzavanja osmislili su Robinson, Holman, Edwards ugradivši opeku u zide, ostavivši je tako pet godina na svim vremenskim prilikama [122]. Međutim, poboljšanja predložena njihovim istraživanjem nisu upotpunila ispitne metode niti specifikacije svojstava trajnosti do te mjere da ih možemo smatrati apsolutno točnima [121,122]. Ipak, ispitivanje u realnim uvjetima izloženosti okoliša zida nije uvijek moguće te se u nastavku rada opisuju postupci ocjene otpornosti opečnih elemenata na cikluse smrzavanja/odmrzavanja sukladno nekim standardima izvan Europe a i neki indirektni postupci dostupni u svjetskoj literaturi na razini zidnoga elementa.

3.4.2.1. Procjena otpornosti opečnih zidnih elemenata na cikluse smrzavanja i odmrzavanja prema američkim i kanadskim propisima

Tlačna čvrstoća materijala je u indirektnoj vezi s njegovom otpornošću na cikluse smrzavanja/odmrzavanja [123]. Naime, prilikom pretvorbe vode u led u materijalu dolazi do stvaranja naprezanja kojima se materijal svojom vlačnom čvrstoćom mora moći oduprijeti. Veća vlačna čvrstoća odgovara ujedno i većoj tlačnoj čvrstoći materijala iz čega se može zaključiti kako veća tlačna čvrstoća materijala osigurava njegovu bolju otpornost na cikluse smrzavanja/odmrzavanja. Kako je tlačna čvrstoća obrnuto proporcionalna ukupnoj poroznosti materijala, opeke male čvrstoće ujedno će imati veliku poroznost, što ih čini podložnim oštećenjima uslijed ciklusa smrzavanja/odmrzavanja. Najmanja zahtjevana vrijednost tlačne čvrstoće opeke sukladno američkim i kanadskim propisima [124] prikazana je Tablicom 3.13.

Tablica 3.13 Kriteriji za prihvaćanje otpornosti opeke na cikluse smrzavanja i odmrzavanja uslijed oštrih uvjeta izloženosti [124]

Propis		Najmanja zahtjevana tlačna čvrstoća (MPa)	Najveće dopušteno upijanje pri kuhanju u trajanju od 5 sati (%)	Najveći dopušteni koeficijent zasićenja	Najveće dopušteno upijanje vode u trajanju od 24 sata (%)
CSA – kanadski propisi	pojedinačna opeka	17,2	17,0	0,78	8,0
	srednja vrijednost na pet opeka	20,7	-	-	-
ASTM – američki propisi	pojedinačna opeka	17,2	20,0	0,80	-
	srednja vrijednost na pet opeka	20,7	17,0	0,78	-

Osim tlačne čvrstoće, kanadski i američki propisi prilikom ocjene otpornosti opeke na cikluse smrzavanja/odmrzavanja uzimaju još i neke druge elemente kao što su upijanje vode kuhanjem, koeficijent zasićenja i vodoupojnost. Kod određivanja upijanja pri kuhanju, potpuno suhi uzorci uranjaju se u kipuću vodu i ostavljaju na kuhanju 5 sati. Nakon kuhanja, uzorci se hlade u posudi u kojoj su se kuhali. Upijanje pri kuhanju računa se tada kao:

$$w=100 \times (m_k-m_d) / m_d ,$$

gdje su m_k i m_d mase uzoraka nakon kuhanja i u suhom stanju.

Upijanje pri kuhanju 5 sati koje opeci ovisno o klasi izloženosti okoliša osigurava dostatnu otpornost na cikluse smrzavanja/odmrzavanja je propisano Tablicom 3.13.

Kako bi se utvrdila količina upijene vode s kojom neće doći do oštećenja materijala uslijed djelovanja smrzavanja/odmrzavanja, koristi se pojam koeficijenta zasićenja. Koeficijent zasićenja prikazuje odnos količine upijene vode na uzorku pri postupnom potapanju u vodu pod normalnim atmosferskim tlakom u periodu od 24 sata i količine upijene vode nakon kuhanja u vodi koje traje 5 sati. Jednostavnije, koeficijent zasićenja određuje pore koje se lako pune vodom u odnosu na ukupni volumen pora. Obzirom na navedeno, koeficijent zasićenja postaje prvi pokazatelj svojstava trajnosti, točnije pokazatelj slobodnog prostora u volumenu pora koji ostaje nakon što su one zapunjene vodom, a isti može poslužiti kao akomodacija volumena vode nastalog smrzavanjem. Prema [89] koeficijent zasićenja osim što se može dovesti u vezu s veličinom pora, on je proporcionalan količini pora srednjeg radijusa. Također

ako se radi o strukturi s velikim brojem krupnih pora, koeficijent zasićenja se povećava, dok ga veća količina finih pora smanjuje. Također, prema nekim autorima, količinu ukupnog slobodnog prostora možemo pretpostaviti granulometrijskom krivuljom, gdje onda veći udio čestica gline pridonosi većem koeficijentu zasićenja, dok krupnije čestice pridonose smanjenju koeficijenta zasićenja [103].

Iako najveći dopušteni koeficijent zasićenja, tzv. „kritični“ koeficijent zasićenja, kojim se osigurava otpornost na cikluse smrzavanja/odmrzavanja ovisi o sirovini za proizvodnju i načinu proizvodnje opeke te se sukladno tome kreće između 0,75 i 0,8 [89,90], američki i kanadski propisi [124] navode jedinstvene vrijednosti. Obzirom na matematičku povezanost koeficijenta zasićenja i vodoupojnosti, opeke moraju zadovoljiti samo jedan od ta dva kriterija.

Metoda za određivanje vodoupojnosti opisana je unutar norme HRN EN 772-21:2011 [76].

Sukladno američkim i kanadskim propisima, opeka koja ne zadovoljava uvjete za vodoupojnošću, upijanjem pri kuhanju 5h i koeficijentom zasićenja propisane Tablicom 3.13, može se podvrgnuti direktnom ispitivanju otpornosti na cikluse smrzavanja/odmrzavanja. Trajanje jednog ciklusa smrzavanja/odmrzavanja iznosi cca 24 sata. Opeke se izlažu djelovanju 50 ciklusa smrzavanja/odmrzavanja ili do potpunog raspadanja. Ukoliko je gubitak mase opeke nakon 50 ciklusa u granicama dopuštenoga te ne postoje pukotine, opeka se smatra otpornom na cikluse smrzavanja/odmrzavanja.

3.4.2.2. Procjena otpornosti opečnih zidnih elemenata na cikluse smrzavanja i odmrzavanja prema Maage-u

Struktura pora ima veliki utjecaj na fizička svojstva gotovih proizvoda, što je i dokazano do te mjere da se njihovi odnosi mogu prikazati matematičkim formulama. Obzirom na kompleksnost strukture pečenoga proizvoda i oštećenja koja nastaju kao posljedica smrzavanja i odmrzavanja, većina autora smatra kako je za te odnose potrebno promatrati nekoliko parametara istovremeno, a nekoliko autora pokušalo je pronaći vezu između parametara kao što su volumen pora, kapilarnost, srednji radijus pora, vodoupojnost i cikluse smrzavanja i odmrzavanja.

Jedna od vrlo priznatih indirektnih metoda je Maage koeficijent za predviđanje otpornosti na cikluse smrzavanja/odmrzavanja [97,117,125]. Koeficijent se temelji na eksperimentalnim rezultatima i statističkom modelu sa dvije glavne varijable: ukupni volumen pora (P_V) i udio

pora određenog promjera, tj. pora većih od 3 μm (P3). Maage [97,117,125] predlaže sljedeću jednadžbu kojom se dobiva koeficijent otpornosti na cikluse smrzavanja/odmrzavanja F_C:

$$F_C = (3/2*P_V) + (2,4*P_3).$$

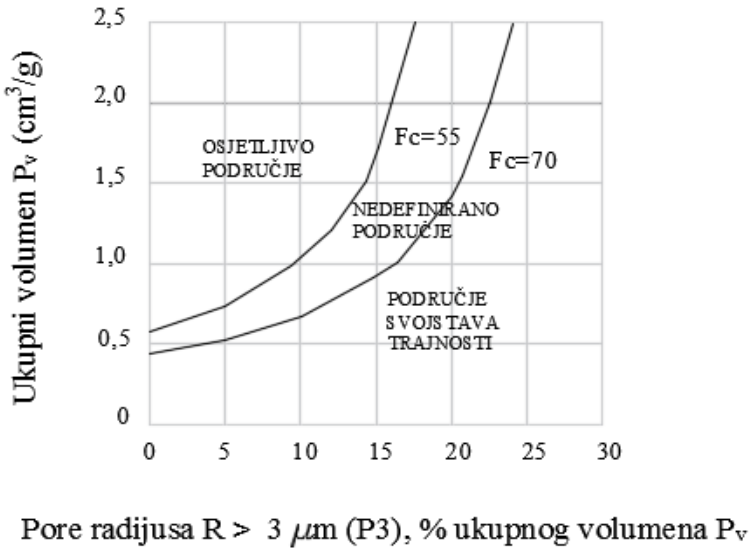
Nadalje je predložena sljedeća klasifikacija (Slika 3.26):

$F_C > 70$ – visoka vjerojatnost da će materijal biti otporan na cikluse smrzavanja/odmrzavanja u oštrim klimatnim uvjetima,

$55 < F_C < 70$ – neizvjesna zona otpornosti na cikluse smrzavanja/odmrzavanja i

$F_C < 55$ – niska vjerojatnost da će materijal biti otporan na cikluse smrzavanja/odmrzavanja.

Slijedi grafički prikaz graničnih vrijednosti koeficijenta trajnosti:



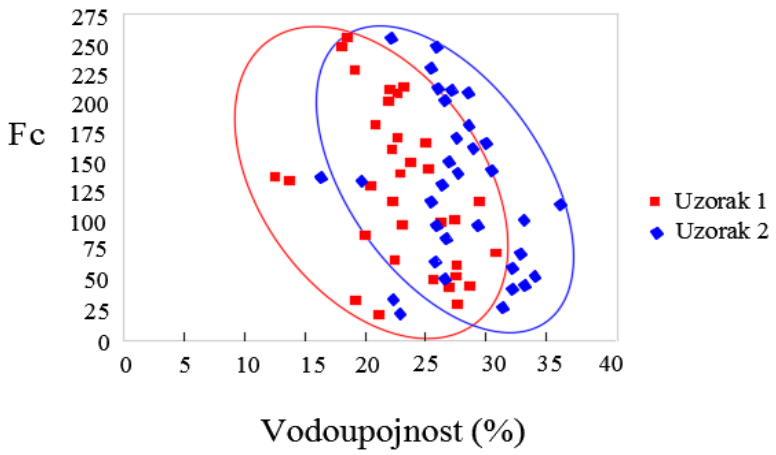
Slika 3.26 Utjecaj ukupne poroznosti (MIP) i količine pora veličine >3 μm na svojstvo trajnosti keramičkih materijala [117]

Prema Maage, procjena trajnosti smrzavanja temelji se, osim na ukupnom volumenu i na distribuciji pora opeke [97,117,126]. Međutim, nekoliko je razloga zašto je ocjenu trajnosti smrzavanja nekog elementa potrebno dopuniti nekim dodatnim uvjetima. Za početak, način izračuna koeficijenta trajnosti je potvrđen, ali granice intervala u kojima se rade ocjene, nisu. Tako su materijali nižih vrijednosti koeficijenata ipak znali pokazati otpornost na smrzavanje, iako bi trebali biti ocijenjeni kao osjetljivi [117]. Uz to, istraživanja su pokazala kako se ne može postaviti empirijska veza između koeficijenta trajnosti F_c i broja ciklusa smrzavanja i

odmrzavanja u kojima se uzorak pokazuje otpornim [117] te je činjenica kako uzorci sličnoga volumena pora, a različitih koeficijenata zasićenosti pokazuju različite stupnjeve, cikluse smrzavanja i odmrzavanja [97,117]. U sljedećoj točki su prikazane nadogradnje metode prema Maage-u.

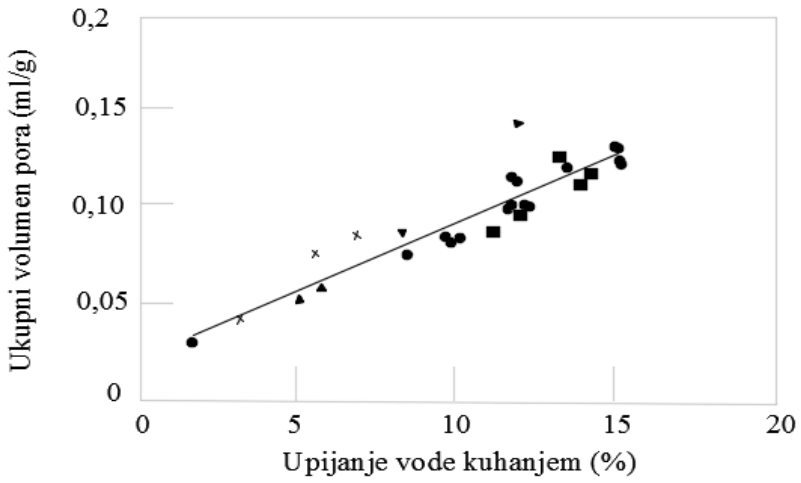
3.4.2.3. Procjena otpornosti opečnih zidnih elemenata na cikluse smrzavanja i odmrzavanja prema Koroth-u

U [97,127] je istraživana povezanost Maage koeficijenta s vodoupojnošću kao jednih od parametara prema kojima se sukladno američkom i kanadskom zakonodavstvu ocjenjuje otpornost opeke na cikluse smrzavanja i odmrzavanja te je utvrđen nedostatak jasnoga odnosa između Maage koeficijenta i vodoupojnosti kako je to prikazano Slikom 3.28.



Slika 3.28 Grafički prikaz odnosa koeficijenta trajnosti F_C i vodoupojnosti [117]

Obzirom kako se i Maage i vodoupojnost zasebno koriste kao parametri temeljem kojih se opeka klasificira na otpornu ili neotpornu na cikluse smrzavanja i odmrzavanja, Koroth je u nastavku Maage koeficijent pokušao nadograditi parametrima vezanim za upijanje vode tj. vodoupojnošću i kapilarnim upijanjem. Vrijednosti upijanja kuhanjem u trajanju od 5 sati (B) povezao je s ukupnim volumenom pora (PV) kako je to prikazano Slikom 3.29.

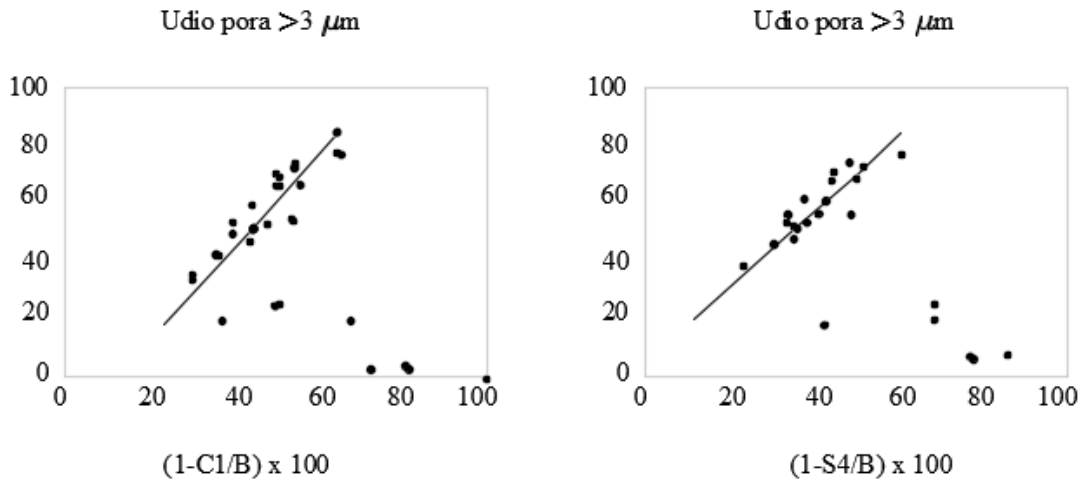


Slika 3.29 Veza upijanja vode kuhanjem i ukupnog volumena pora u opeci [97]

Jednadžba kojom je Koroth povezao ukupan volumen pora u opeci s upijanjem vode kuhanjem glasi:

$$PV=0,0209+0,0071B$$

Nadalje, Koroth je uočio povezanost između udjela pora većih od 3 µm (P3) i upijanja vode u trajanju 1 sat (C1) te upijanja vode kuhanjem u trajanju 5 sati (B) kao i povezanost između udjela pora većih od 3 µm (P3) i kapilarnoga upijanja pri izloženosti opeke kontaktu s vodom u trajanju 4 sata (S4) te upijanja vode kuhanjem u trajanju 5 sati (B) kako je to prikazano Slikama 3.30 a) i b).



a) b)

Slika 3.30 Povezanost parametara upijanja vode sa udjelom pora većih od 3 µm: a) povezanost udjela pora većih od 3 µm (P3) s (1-C1/B)*100, b) povezanost udjela pora većih od 3 µm (P3) s (1-S4/B)*100 [97,127]

Jednadžbe kojima je Koroth povezao udio pora većih od 3 µm u opeci s upijanjem vode kuhanjem, upijanja vode u trajanju 1 sat i kapilarnim upijanjem pri izloženosti opeke kontaktu s vodom u trajanju 4 sata glase:

$$P_3 = 1{,}6166\ [(1-C_l/B)100] - 20.8704$$
$$P_3 = 1{,}3742\ [(1-S_4/B)100] - 4.3779$$

Uvrštavanjem gornjih izraza za P_V i P_3 u jednadžbu:

$$DIM = 3{,}2/P_V + 2{,}4 \times P_3$$

Koroth je došao do modificiranih Maage modela. Originalan model prema Maage-u te modificirani modeli prema Koroth-u s kriterijima otpornosti i osjetljivosti te ocjenom efikasnosti modela su prikazani Tablicom 3.14.

Tablica 3.14: Faktori trajnosti prema Maage-u i Koroth-u [97,127]

Faktor trajnosti		Model	Opis oznaka u modelu	Kriterij otpornosti	Kriterij osjetljivosti	Ocjena efikasnosti
MAAGE, DIM		3,2/Pv+2,4 P_3	PV - ukupni volumen pora (ml/g); P3 - količina pora >3µm (%)	>70	<55	**EFIKASNA METODA**
K O R O T H	Maage indeks dopunjen svojstvom upijanja vode u trajanju 1 sat te upijanja vode kuhanjem u trajanju 5 sati, DIAP (C)	450,70/ (2,94+B)+3 87.98 (0,87-Cl/B)	C1 - upijanje vode u trajanju 1 sat (%) B - upijanje vode kuhanjem u trajanju 5 sati (%)	> 90	< 75	**EFIKASNA METODA**
	Maage indeks dopunjen svojstvom kapilarnog upijanja pri izloženosti opeke kontaktu sa vodom u trajanju 4h te upijanja vode kuhanjem u trajanju 5 sati, DIAP (S)	450,70/ (2,94+B)+3 29,81(0,97-S4/B)	B - upijanje vode kuhanjem u trajanju 5 sati (%) S4 - kapilarnog upijanja pri izloženosti opeke kontaktu sa vodom u trajanju 4 sata (%)	>85	< 70	**EFIKASNA METODA**

3.4.2.4. Procjena otpornosti opečnih zidnih elemenata na cikluse smrzavanja i odmrzavanja prema Vincenzini-u, Franke-u i Bentrup-u, Litvan-u Robinson-u, Arnott-u te Nakamura-i

Prema do sada navedenom, dokazano je kako je osim ukupnog volumena pora i distribucija veličine pora također važan faktor koji utječe na trajnost opeke. Krupne pore radijusa većeg od 3μm doprinose otpornosti na smrzavanje i odmrzavanje, dok su one manje od 1μm, deklarirane kao štetne [97,127,128].

Vincenzini te Franke i Bentrup su svoje metode za ocjenu otpornosti opeke na cikluse smrzavanja i odmrzavanja također temeljili na distribuciji pora u opečnim elementima. Tako Vincenzini za parameter temeljem kojeg klasificira opečne elemente na otporne i neotporne uzima kritični radijus pora, F90, koji se smatra 90 % -tnom fraktilom dok Franke i Bentrup uzimaju median pora, F50. Oba parametra moguće je očitati i izračunati temeljem rezultata ispitivanja živinim porozimetrom i u proporcionalnoj su vezi s brojem ciklusa smrzavanja i odmrzavanja u kojem su opečni elementi otporni [127,128]. Nasuprot prethodno rečenom, istraživanja provedena u [121] su pokazala kako korelaciju između eksperimentalnog ponašanja otpornosti na smrzavanje i odmrzavanje i izračunatih indeksa niti jedan model ne može pouzdano povezati, što dokazuje i činjenica kako su podaci ovisini o količini podataka, homogenosti uzorka i tehnologiji proizvodnje.

Litvan je istražio povezanost specifične površine pora s otpornošću opeke na cikluse smrzavanja i odmrzavanja [117,127]. Specifična površina je teksturalna karakteristika opekarske sirovine određena granulometrijskom krivuljom, postupkom proizvodnje i režimom pečenja, izražava se u cm^2/g ili m^2/g, a određuje ukupnu površinu po jedinici mase nekoga materijala. Kod poroznih materijala, ona predstavlja ukupnu vanjsku i unutrašnju površinu nekog materijala po jedinici čvrste tvari. Standardna metoda određivanja specifične površine neke krute tvari, bazira se na Braunauer – Emmett – Teller (BET) mulitumolekularnoj teoriji adsorpcije plina [129] koja je propisana normom HRN ISO 9277 [127,129]. Veća specifična površina proporcionalana je ukupnoj poroznosti, posebno količini sitnih pora. Specifičina površina jedan je od parametara koji u međusobnom odnosu sa strukturom pora može doprinjeti ocjeni svojstva trajnosti, pogotovo ako se radi o opekama jednakog sirovinskog sastava [89].

Robinson je osmislio koeficijent za ocjenu otpornosti opeke na cikluse smrzavanja i odmrzavanja temeljen na parametrima prema američkim i kanadskim propisima; tlačnoj čvrstoći, parametrima upijanja vode te koeficijentu zasićenja.

Arnott je mjerio koeficijente trajnosti temeljem čvrstoća te temeljem vizualnih oštećenja. Koeficijent trajnosti temeljen na čvrstoćama (DIS) dobio je mjerenjem brzine prolaza ultrazvučnih impulsa kroz opeku prije njezina izlaganja ciklusima smrzavanja i odmrzavanja te nakon tih ciklusa. Koeficijent trajnosti temeljen na vizualnim oštećenjima (DIV) dobio je praćenjem broja ciklusa smrzavanja i odmrzavanja koji su uzrokovali prvu pukotinu u opeci ili neki drugi oblik oštećenja. Dobivene koeficijente trajnosti opisao je parametrima vezanim za upijanje vode te parametrima vezanim za udjele pora pojedinih veličina s vrlo visokom R2 vrijednošću. Ipak, kod ove metode nisu određene granične vrijednosti koje će klasificirati opeke na otporne i neotporne. Prema rezultatima njegova istraživanja, pore veće od 1-3 μm su poželjne za svojstva trajnosti opečnih elemenata.

Nakamura je pak razvio tri koeficijenta trajnosti; jedan temeljen na fizikalnim svojstvima opečnih elemeneta, drugi temeljen na specifičnom volumenu pora a treći temeljem kombinacije specifičnog volumena pora i distribucije pora u opeci pri čemu pozitivne vrijednosti ovih koeficijenata klasificiraju opečni element kao skloniji oštećenjima pri ciklusima smrzavanja i odmrzavanja. Prema ovom autoru, pore promjera <0,2 μm nisu poželjne za svojstvo trajnosti. Modeli prema navedenim autorima s kriterijima otpornosti i osjetljivosti te ocjenom efikasnosti svakoga od modela prikazani su Tablicom 3.15.

Tablica 3.15. Faktori trajnosti prema Vincenzini-u, Franke-u i Bentrup-u, Litvan, Robinson-u, Arnott-u, te Koroth-u [127]

Faktor trajnosti		Model	Opis oznaka u modelu	Kriterij otpornosti	Kriterij osjetljivosti	Ocjena efikasnosti
Vincenzini		Kritični promjer pora, F_{90} (µm)	Parametar se očitava živinim porozimetrom.	≥1,80µm	≤1,80µm	**EFIKASNA METODA**
Franke i Bentrup		Median pora, F_{50} (µm)	Parametar se očitava živinim porozimetrom.	≥1,65µm	≤0,60µm	**EFIKASNA METODA**
Litvan		Specifična površina pora (m^2/g)	Očitava se uređajem za mjerenje specifične površine materijala BET metodom.	<1	>1,5	**NEEFIKASNA METODA**
Robinson		DIR=[IRA/10(1-C/B]-[(145*CS-6000)/100]-C-10	IRA početno upijanje (g/min 193.55 cm^2); C vodoupojnost u 24 sata (%); B upijanje vode kuhanjem 5 sati (%); CS tlačna čvrstoća (MPa); C/B koeficijent zasićenja	>7	<7	**NEEFIKASNA METODA** - uzorci sa velikim razlikama u indeksima imaju sličnu otpornost na smrzavanje i odmrzavanje.
Arnott	Indeksi trajnosti temeljeni na čvrstoći, DIS	DIS1= -160,3C/B+213,4 DIS2= -151,2C/B+0,3694B_s+174,2 DIS3= -132C/B+0,367B_s+0,42C_s+154 DIS4= -66,72C/B+0,8039B_s+0,7686C_s-0,6509D_s+102,1 DIS5= -40,92C/B+1,392B_s+0,4409C_s-1,0826D_s+77,1	C/B - koeficijent zasićenja Bs - 168-dnevna vodoupojnost izražena kao postotak ukupne zapunjenosti pora (%) Cs - postotak ukupnog volumena pora većih od 1,1 µm Ds - 4 satna vodoupojnost izražena kao postotak ukupne zapunjenosti pora (%) C - 24 satna vodoupojnost izražena kao postotak suhe mase (%)	-	-	**NEEFIKASNA METODA** - nisu utvrđene granične vrijendosti za ocjenu otpornosti na smrzavanje i odmrzavanje.

Tablica 3.15. Faktori trajnosti prema Vincenzini-u, Franke-u i Bentrup-u, Litvan, Robinson-u, Arnott-u, te Koroth-u [127]

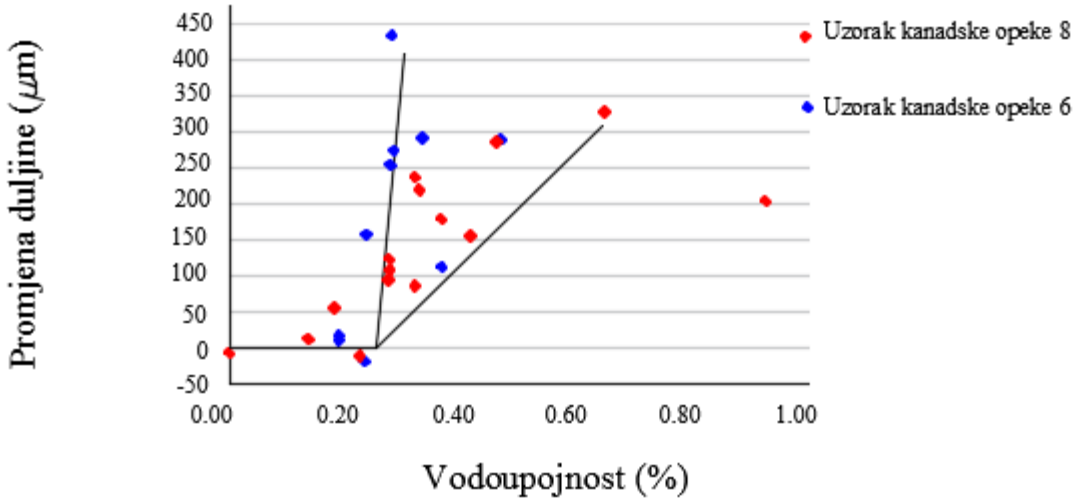
Faktor trajnosti		Model	Opis oznaka u modelu	Kriterij otpornosti	Kriterij osjetljivosti	Ocjena efikasnosti
	Indeksi trajnosti temeljeni na vizualnim oštećenjima, DIV	DIV1=15,37Av+39,7 DIV2=14,97Av-0,594Bv+119,6 DIV3=11,5Av-0,6481Bv+292,6Cv-131,2 DIV4=9,187Av-0,4870Bv+423,8Cv-2,408Dv-84,5 DIV5=8,220Av-0,613Bv+599,7Cv-3,492Dv+3,253Ev-452,3 DIV6=5,4988Av-1,4241Bv+355,3Cv-5,084Dv+5,584Ev-4,468Fv-306,9 DIV7=6,720Av-1,1518Bv+429,5Cv-5,144Dv+5,331Ev+3,714Fv+0,0171Gv+5,59Hv-411 DIV8=1,14Av-2,1580Bv+441Cv-5,894Dv+5,089Ev+9,268Fv+0,0189Gv+7,208Hv-7,274Iv-4,127Jv-0,4386Kv+0,00198Lv-454	A_v - ukupni volumen pora većih od 2.8 µm (%) B_v - 168 dnevna vodoupojnost kao postotak ukupne zapunjenosti pora (%) C_v - omjer upijanja vode kuhanjem u trajanju 5 sati i upijanja pod vakumom (%) D_v - odnos masa 4 satnog upijanja vode i 5 satnog upijanja vode kuhanjem (%) E_v - odnos masa 56 dnevnog upijanja vode i 5 satnog upijanja vode kuhanjem (%) F_v - ukupni volumen popunjenjih pora kod početnog upijanja u trajanju t=15 min (%) G_v - modul oštećenja osnovan na neto površini pukotine (psi) H_v - specifična masa čvrste tvari u opeci (g/cc) I_v - udio pora većih od 4,4 µm /%) J_v - udio pora popunjenih kod početnog upijanja u trajanju t=2 min (%) K_v - početno upijanje u trajanju t=120 min, uzimajući u obzir neto površinu uzorka izloženog početnom upijanju L_v - tlačna čvrstoća temeljem neto površine (psi).	–	–	

Tablica 3.15. Faktori trajnosti prema Vincenzini-u, Franke-u i Bentrup-u, Litvan, Robinson-u, Arnott-u, te Koroth-u [127]

Faktor trajnosti		Model	Opis oznaka u modelu	Kriterij otpornosti	Kriterij osjetljivosti
Nakamura	Indeks razvijen u skladu s fizikalnim svojstvima, FIDX	FIDX (n=l) = 0,85 + 1,341n(A45) FIDX (n=2) = 1,80 + 0,50 ln(EB) + 0,791n (D45) FIDX (n=3) = 4,02 + 0,50 ln(AP) + 0,54 1n(ED) + 0,82 ln(D45) FIDX (n=7) = 6,95 – 1,20 ln(DS) – 0,61 ln (AP) + 0,54 1n(ED) – 2,801n(A98)+1,341n(CP)+0,261n(H45) + 2,141n(A45) FIDX (n=10) = 7,82 + 0,47 1n(WA) – 1,10 ln (DS) – 1,14ln(AP) + 0,71 ln(ED) – 0,23 1n (EB) – 2,751n(A98) + 1,241n(CP)+0,431n(H45) – 0,431n(D45)+ 2,491n(A45) ;	N - broj svojstava uzetih u obzir WA - vodoupojnost (%) DS - stupanj zasićenosti vlagom (%) AP - otvorena poroznost (%) A45 - upijanje vode pri 45 % rh (%) D45 - količina zaostale vode pri sušenju kod 45 % rh H45 - razlika u količini upijene vode između A45-D45(%) A98 - upijanje vode pri 98 % rh (%) CP - razlika u količini upijene vode između A98-A45(%) ED - linearno širenje pri A98 EB - linearno širenje pri WA	-pozitivne vrijednost indeksa ukazuju na veću osjetljivost	**NEEFIKASNA METODA** - jednadžbe se mogu koristiti samo za pronalaženje relativne trajnosti, ne i za ocjenu trajnosti,
	Indeks razvijen u skladu sa specifičnim volumenom pora za specifičnu veličinu pora, FIDX	FIDX (n=l) = -0,24 + 0,15(Bp) FIDX (n=2) = -0,06 + 0,15(Bp – 0,01(Gp) FIDX (n=3) = -0,04 – 0,06(Ap) + 0,17(Bp – 0,01 (Gp) FlDX (n4) = -0,25 – 0,09(Ap) + 0,15(Bp + 0,08(Cp) – 0,01(Dp) FIDX (n=5) = -0,11 – 0,09(Ap)+0,15(Bp)+ 0,07(Cp)-0,01(Dp)-0,01(Gp) FIDX (n=6) = -0,05 – 0,09(Ap) + 0,15(Bp) +0,07(Cp)-0,01(Dp)-0,01(Gp)-0,01(Ep)-0,01 (Fp) FIDX (n=7) = -0,12 – 0,09(Ap) + 0,15(Bp) +0,08(Cp) - 0,01(Dp)-0,01(Ep) - 0,01(Fp)-0,01 (Gp)	Specifični volumen pora ($10^{-3}cm^3/g$) ranga: 5-10 nm (Ap), 10-50 nm (Bp), 0,05-0,1µm (Cp), 0,1-0,4µm (Dp), 0,4-0,7µm (Ep), 0,7-1,0 µm (Fp), 1,0-7,5µm (Gp)		**NEEFIKASNA METODA** - nisu utvrđene granične vrijendosti za ocjenu otpornosti na smrzavanje i odmrzavanje

3.4.2.5 Procjena otpornosti opečnih zidnih elemenata na cikluse smrzavanja i odmrzavanja mjerenjem promjene duljine pri kritičnom stupnju zasićenosti

Ova metoda temelji se na određivanju odnosa između stanja kritične zasićenosti opeke i njene maksimalne zasićenosti koju će doživjeti tijekom smrzavanja, a pri kojoj materijal doživljava oštećenja. Prilikom ispitivanja mjeri se promjena duljina uzoraka pri različitim stupnjevima zasićenja vlagom nakon čega se ista uspoređuje s maksimalnom duljinom u trenutku kada uzorak dostigne kritični stupanj zasićenosti pri kojem će se oštećenje smrzavanjem i odmrzavanjem vjerojatno dogoditi. Slikom 3.31. prikazane su promjene duljina uzoraka pri različitim stupnjevima zasićenja [114,124].



Slika 3.31 Grafički prikaz odnosa stupnja zasićenosti i dilatacije [124]

Fagerlund je dokazao, ukoliko uzorak opeke bude opterećen vlagom ispod kritičnog stupnja zasićenosti („S_{crit}“), isti se može opteretiti stotinama i tisućama puta ciklusima smzavanja bez ikakvih mjerljivih oštećenja. Stupanj zasićenja S_{crit} dostignut je kada su sve otvorene pore zasićene vlagom [114,124].

Iz navedenoga slijedi kako određivanje svojstava opeke mora biti usklađeno s očekivanim opterećenjem vlage, s tim da ista mora biti manja od „kritične vlage“. Dodatno, pravilnim projektiranjem detalja vanjskih površina također se doprinjelo svojstvima trajnosti ugrađene opeke. Na taj način, ovaj pristup trebao bi biti prilagođen svim klimatskim zonama i načinima izlaganja opeke (uključujući i razlike između opeke od lica, jezgrene opeke i unutarnje opeke).

Prednost ove metode svakako je moguća primjena procjene ciklusa smrzavanja i odmrzavanja na svim vrstama opeka, tako i na povijesnim opekama, te njenoj mogućoj implementaciji kao jedne od brzih i jednostavnih indirektnih metoda.

3.4.2.6 Utjecaj poroznosti na otpornost opečnih zidnih elemenata na cikluse smrzavanja i odmrzavanja

Poroznost osim o mineološkom (udio pijeska, sadržaj kalcita), ovisi i o kemijskom sastavu sirovine, sadržaje vlage tijekom oblikovanja, udjelu kemijski vezane vode, granulometriji sirovine, tlaku tijekom oblikovanja, intenzitetu stezanja i širenja tijekom sušenja te režimu pečenja. Opekarski proizvodi sadrže uglavnom otvorene pore, odnosno pore koje se mogu zasititi vodom. Struktura pora elementa važan je parametar jer određuje mehanička svojstva, ponašanje u kontaktu s vlagom, plinopropusnost, cikluse smrzavanja i odmrzavanja, toplinsku provodljivost, ponašanje pri promjenama temperature. Struktura pora ne može se u potpunosti opisati, ispitivanjima možemo utvrditi samo trodimenzionalne šupljine, ali ne i rascjepe kao ni međusobnu povezanost pora, ni izometrijske šupljine. Iz tog je razloga za ocjenu potrebno raditi kombinaciju indirektnih parametara otpornosti na smrzavanje i odmrzavanje.
Poznato je kako veličina pora i razmak između pora značajno utječu na svojstva trajnosti [89,90,139]. Sukladno navedenoj literaturi, pore veće od 1 μm (velike pore) [89,63,107], odnosno prema drugim autorima pore veće od 3 μm [97,98,128] se lako pune i prazne vodom te zbog toga poboljšavaju svojstva trajnosti opeke [98,130,131]. Prema [89,97,98], male pore (manje od 0,1 μm) imaju vrlo mali utjecaj na otpornost opeke na cikluse smrzavanja/odmrzavanja jer se voda u njima smrzava tek pri vrlo niskim temperaturama. Ipak, prilikom formiranja nukleusa leda može doći do kretanja vode iz malih pora k nukleusu i tom prilikom do rasta veličine nastaloga leda u krupnim porama i do naprezanja stijenki pora (ice-lens mechanism) [132]. Ovaj mehanizam utemeljen je na razlici slobodne energije između nezamrznute vode u malim kapilarnim porama i leda u krupnim porama što omogućuje transfer vode k zoni u kojoj već postoji led. Pore srednje veličine prema nekim autorima od 0,1 μm do 1 μm [89,98,115], odnosno od 0,1 μm do 3 μm [97,126] su najpodložnije djelovanju smrzavanja/odmrzavanja i djelovanju topivih soli. Iz navedenoga može se zaključiti kako poroznost i raspodjela veličine pora predstavljaju kritičan faktor za trajnost građevinskih materijala, pa samim tim i opeka [69, 123]. Stoga, cilj je pri proizvodnji opeke dobiti najmanji udio upravo pora srednje veličine a ujedno i najveći udio krupnih pora. Visoka poroznost opeke može značiti veću količinu srednjih pora koje smanjuju trajnost

opeke (veći udio kalcita). Međutim, istraživanja do sada nisu pokazala koji je to omjer pora adekvatan dostatnim svojstvima trajnosti, osim obrnuto proporcionalnog odnosa količine srednjih pora i otpornosti na smrzavanje i odmrzavanje. [98,115,131,132,133]

3.4.2.7. Utjecaj upijanja vode na otpornost opečnih zidnih elemenata na cikluse smrzavanja/odmrzavanja

Vrijednost početnoga upijanja vlage horizontalnih sljubnica, ovisno je o mikrostrukturnim karakteristikama opeke, o količini, veličini i obliku pora. Pema nekim autorima, postoji linearna povezanost otvorene poroznosti i vodoupojnosti [128].

Europska metoda za određivanje početnoga upijanja vode propisana je unutar norme HRN EN 772-11:2011 [77] no ne određuje granicu u pogledu ovog svojstva koja će osigurati dostatnu otpornost opeke na cikluse smrzavanja/odmrzavanja. Veza između početnoga upijanja vode i koeficijenta zasićenja istražena je u [98] te je utvrđeno proporcionalno povećanje koeficijenta zasićenja pri povećanju početnoga upijanja vode. Stupanj korelacije ova dva parametra funkcija je homogenosti sirovine te je izraženiji u slučaju uporabe samo jedne sirovine nego u slučaju miješanja više sirovina. Također, izraženija je korelacija koeficijenta zasićenja i upijanja vode u trajanju od jednoga sata od korelacije koeficijenta zasićenja i upijanja vode u trajanju od jedne minute koje može biti uvjetovano površinskom teksturom uzorka. Veća brzina upijanja vode u vremenu trebala bi upućivati na veći udio krupnih pora a time i veću otpornost na cikluse smrzavanja/odmrzavanja. Sukladno tome, veća brzina isušivanja trebala bi također ukazivati na veći udio krupnih pora. Ova je posljednja hipoteza istraživana u radu [104,107,134,135] te je uočena povezanost sposobnosti upijanja i otpuštanja vode s otpornošću opeke na cikluse smrzavanja/odmrzavanja direktnim postupkom. Naime, brzina zapunjavanja i otpuštanja vlage iz pora rezultat je odnosa veličine i međusobne povezanosti pora. Proces popunjavanja pora započinje popunjavanjem pora bolje međusobne povezanosti, točnije onih koje međusobno čine tzv. “mrežu pora”. Nakon toga se popunjavaju šire, diskontiunirane pore. Propusnost pora definirana je dakle, ukupnim volumenom kontinuiranih pora i njihovim radijusom. Visoki postotak krupnih pora doprinosti svojstvima trajnosti, ali je važna i međusobna povezanost pora unutar strukture gotovoga proizvoda, odnosno “stupanj njihove povezanosti” [136,137,138,139].

4.TRAJNOST MORTOVA ZA ZIĐE

Trajnost ziđa pod utjecajem je mnogih čimbenika, a osim zidnih elemenata, određuju ju i svojstva morta. Trajnost morta određena je njegovom čvrstoćom i strukturom na koje utječu razni vanjski i unutarnji čimbenici.

Tako vanjski utjecaji mogu biti:

- opetovano vlaženje i sušenje,
- utjecaj vjetra,
- aerosoli,
- karbonatizacija (koja može imati pozitivan učinak).

Unutarnji utjecaji mogu biti:

- svojstva zidnih elemenata,
- vrsta cementa i prisutnost vapna,
- sadržaj pijeska i glina,
- prisutnost aditiva,
- opća kvaliteta ugradnje ziđa.

Različiti čimbenici, i vanjski i unutarnji, međusobno složeno djeluju i uzrokuju fizičke i mehaničke degradacije morta. Tako fizički oblici degradacije mogu biti uzrokovani abrazijom od djelovanja vjetra, kristalizacijom soli i ciklusima smrzavanja i odmrzavanja, dok je kemijski oblik propadanja uzrokovan reakcijama s topivim solima. Adekvatna otpornost različitim oblicima degradacije uvjetovana je svojstvima očvrslog morta, a to se posebno odnosi na stupanj zasićenosti, ukupni volumen, veličinu i distribuciju pora [140,141].

4.1. Razredba mortova za ziđe prema europskom zakonodavstvu

Prema HRN EN 998-2 [142], mortove za zidanje, a obzirom na njihova tehnička svojstva i/ili prema uporabi možemo podijeliti na mortove opće namjene (G), tankoslojne (T) s maksimalnim zrnom agregata do 2 mm te lagane mortovi maksimalne gustoće do 1300 kg/m^3, dok se prema načinu proizvodnje mogu podijeliti na tvorničke, polugotove tvorničke koji mogu biti pripremljeni u tvornici ili prethodno zamiješani. Treću skupinu morta u odnosu na način proizvodnje čini mort proizveden na gradilištu. Osim toga, mortove možemo podijeliti na projektirane čiji je sastav i metodu proizvodnje kako bi postigao određena svojstva,

odabrao proizvođač ili propisane čija se svojstva pretpostavljaju temeljem utvrđenih volumnih omjera.

Tehnička svojstva mortova moraju ispunjavati opće i posebne zahtjeve svoje namjene, a ista su definirana normama HRN EN 998-2 [142], HRN CEN/TR 15225 [143] te HRN EN 13501-1 [82]. Sukladno normi HRN EN 998-2 [142], određeni su sljedeći zahtjevi na svježi mort:

- Vrijeme ugradnje mora biti definirano od strane proizvođača i ne smije biti kraće od objavljene vrijednosti,
- Sadržaj klorida ne smije prijeći 0,1% u odnosu na masu morta u suhom stanju,
- Sadržaj zraka, upijanje i obujamska masa moraju biti unutar objavljenog raspona,
- Omjeri sastojaka moraju biti objavljeni od strane proizvođača (obujamski ili težinski) te se uz omjer mora objaviti i razred tlačne čvrstoće (Tablica 4.1.),
- Za projektirani mort čija je namjeravana uporaba u elementima s konstrukcijskim zahtjevima, mora biti objavljena početna posmična čvrstoća koja može biti preuzet pripadajući tablični podatak ili podatak utemeljen na ispitivanju,
- Toplinsku vrijednost koja može biti izražena u obliku proračuna ili utemeljena na ispitivanju.

Tablica 4.1. Tablica razreda tlačnih čvrstoća morta, prema HRN EN 998-2 [142]

Klase	M1	M2,5	M5	M10	M15	M20	Md
Čvrstoća N/mm^2	1	2,5	5	10	15	20	*

*„d“ je čvrstoća morta nakon 28 dana

Različit sastav i omjer komponenata po sastavu određuje i različite fizičko-mehaničke karakteristike. Odnos pojedinih komponenata izražava se u volumnom omjeru, a klasificira se prema postignutoj proračunskoj tlačnoj čvrstoći. Tako se za izradu morta za ziđe zadanoga sastava smije upotrijebiti mješavina obujamskih omjera prema Tablici 4.2.

Tablica 4.2. Obujamski omjeri sastojaka za mortove zadanoga sastava i odgovarajuće tlačne čvrstoće prema HRN EN 1996-1-1/NA [145]

Približni obujamski omjeri sastojaka cement:hidratizirano vapno:agregat	Odgovarajuća tlačna čvrstoća i oznaka (N/mm^2)
1:1,25 do 2,5:8 do 9	M2,5[a]
1:0,5 do 1,25:5 do 6	M5
1:0,25 do 0,50:4 do 4,25	M10
[a] Upotreba morta M2,5 nije dopuštena u potresnim područjima. Vidjeti normu HRN EN 1996-1-1[56]	

4.2. Ispitivanje svojstava mortova za zidanje

Sumarni prikaz svih ispitnih metoda za dokazivanje svojstava mortova kao i popis normi u kojima su te metode opisane dan je Tablicom 4.3.:

Tablica 4.3. Svojstva glinene opeke i metode po kojima se ispituju prema HRN EN 998-2[142]

Svojstvo	Norma u kojoj je metoda opisana
Određivanje konzistencije svježeg morta	HRN EN 1015-3:2000 [146] HRN EN 1015-3:2000/A1:2005[146] HRN EN 1015-3:2000/A2:2008[146] Metode ispitivanja mortova za ziđe -- 3. dio: Određivanje konzistencije svježega morta (stolićem za potresanje) (EN 1015-3:1999) Methods of test for mortar for masonry -- Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table) (EN 1015-3:1999)
	HRN EN 1015-4:2000[147] Metode ispitivanja mortova za ziđe -- 4. dio: Određivanje konzistencije svježeg morta (penetracijskim uređajem) (EN 1015-4:1998)
Određivanje gustoće svježeg morta	HRN EN 1015-6:2000[148] HRN EN 1015-6/A1:2008[148] Metode ispitivanja mortova za ziđe -- 6. dio: Određivanje gustoće svježega morta (EN 1015-6:1998/A1:2006)
Određivanje udjela pora u svježem mortu	HRN EN 1015-7:2000[149] Metode ispitivanja mortova za ziđe -- 7. dio: Određivanje udjela pora u svježemu mortu (EN 1015-7:1998)
Određivanje vremena ugradnje i vremena obradivosti svježeg morta	HRN EN 1015-9:2000[150] HRN EN 1015-9:2000/A1:2008 Metode ispitivanja mortova za ziđe -- 9. dio: Određivanje vremena ugradnje i vremena obradivosti svježeg morta
Određivanje gustoće suhog očvrsnulog morta	HRN EN 1015-10:2000[151] HRN EN 1015-9:2000/A1:2008[151] Metode ispitivanja mortova za ziđe -- 10. dio: Određivanje gustoće suhog očvrsnulog morta (EN 1015-10:1999/A1:2006)
Određivanje čvrstoće pri savijanju i tlačne čvrstoće	HRN EN 1015-11:2000, [152] Metode ispitivanja mortova za ziđe – 11. dio: Određivanje čvrstoće pri savijanju i tlačne čvrstoće očvrslog morta (EN 1015-11:1999)
Određivanje topljivih klorida u svježemu mortu	HRN EN 1015-17:2000[153] HRN EN 1015-17:2000/A1:2005[153] Metode ispitivanja mortova za ziđe -- 17. dio: Određivanje topljivih klorida u svježemu mortu
Određivanje koeficijenta kapilarne vodoupojnosti	HRN EN 1015-18:2003[154] Metode ispitivanja mortova za ziđe -- 18. dio: Određivanje koeficijenta kapilarne vodoupojnosti (EN 1015-18:2002)

4.3. Izrada morta za zidanje

Specifikacije *agregata* za proizvodnju mortova definirane su normom HRN EN 13139 [155] na način da se definira vrsta pijeska koji može biti kalcijev, dolomitni ili silikatni, pri čemu se ne preporučuje prekoračenje maksimalne veličine zrna do 4 mm.

Specifikacije i potvrđivanje sukladnosti *vode* za pripremu morta određene su u normi HRN EN 1008 [156] te ujedno određuju kako se pitka voda bez prethodnih ispitivanja upotrijebljava za pripremu betona.

Aditivi se dodaju u malim količinama (njihov udio ne prelazi 5% mase veziva), a osiguravaju specificirane zahtjeve na svojstva svježega i očvrsloga morta.

Upotrebi aditiva treba prethoditi odgovarajuća ispitivanja kako bi se utvrdila točnost doziranja i kompatibilnost s ostalim komponentama sastava. Aditivi za mortove moraju biti u skladu s odredbama HRN EN 934-3 [157] i HRN EN 998-2 [142]. Postoje dvije osnovne kategorije aditiva – oni koji modificiraju samo jedno svojstvo morta i oni koji dodatno mijenjaju i ostala svojstva. Dijelimo ih na [157]:

a) aerante/plastifikatore,
b) usporivače vezivanja za mort s odgođenim vezivanjem,
c) aerante,
d) plastifikatore,
e) dodatake za zadržavanje vode,
f) dodatake za odbijanje vode,
g) ubrzivače vezivanja,
h) usporivače vezivanja,
i) dodatake za poboljšanje prionljivosti,
j) dodatake za snižavanje točke zamrzavanja,

Učinak aeranata sastoji se u uvođenju malih mjehurića zraka unutar smjese morta koji u očvrsnulom stanju prekidaju kapilare unutar morta te tako sprječavaju podizanje razine vode u uzorku morta a posljedično i oštećenja nastala uslijed ciklusa smrzavanja i odmrzavanja. Ovaj aditiv poboljšava i obradivost morta te pomaže u izbjegavanju segregacije no njegovom količinom u mortu treba biti oprezan jer previše aditiva može rezultirati velikim gubitkom konačne čvrstoće očvrsloga morta.

Vapno se dobiva pečenjem vapnenca ili dolomita u posebnim pećima na visokim temperaturama koje određuju poroznu strukturu vapna, odnosno njegova konačna svojstva. Postupkom žarenja, odnosno kalcinacijom dobiva se tzv. živo vapno [158] koje onda

hidratacijom prelazi u gašeno ili hidratizirano vapno ($Ca(OH)_2$) kako je to prikazano sljedećim reakcijama, pri čemu se oslobađaju velike količine topline [158].

$$CaCO_3 \text{-->} CaO + CO_2,$$
$$Cao + H2O \text{-->} Ca(OH)_2$$

Norma specifikacija HRN EN 459-1 [159] utvrđuje sljedeće vrste vapna u skladu s njihovim kemijskim sastavom:

- *zračno vapno* koje može biti kalcijsko/kalcijevo (živo ili hidratiziano) CL ili dolomitno (poluhidratizirano ili potpuno hidratizirano), DL. Kalcijska vapna se najviše koriste u spravljanju mortova za zidanje, ali obzirom kako u svom sastavu nemaju hidrauličkih i pucolanskih dodataka, konačne mehaničke čvrstoće su niže od cementnih mortova. Živo vapno može se koristiti u obliku granula ili fino mljevenoga praha, a hidratizirano vapno koristi se u obliku praha ili u obliku vodene suspenzije različitih gustoća (vodena pasta ili tijesto).

  Obzirom kako očvršćavaju reakcijom CO_2 iz zraka (donja jednadžba), od koje i potječe naziv „zračno vapno“, važno je da izvedba ovoga materijala bude nezaštićena tijekom procesa očvršćavanja [160]. Prilikom ove reakcije (karbonatizacije) također dolazi do oslobađanja određene količine topline, ali obzirom kako je sam proces prilično dugotrajan, količina oslobođene topline je bezopasna [158] :

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \text{ --> } CaCO_3 + H_2O$$

  Koliko je karbonatizacija bitna za očvršćavanje mortova, pokazali su Ergenc i Forta [162] kada su uzorke mortova izložili komorama s visokom koncentracijom CO_2. Dio uzoraka stavljeni su u klima komore s konstantnim uvjetima okoline (20° C, vlaga 60%) tijekom šest mjeseci, a ostatak uzoraka je ostavljen u konstantnim laboratorijskim uvjetima (25° C, vlaga 34%). Stupanj karbonizacije, te mehanička i fizikalna svojstva uzoraka određeni su nakon očvršćavanja od 28, 90, 120 i 180 dana. Uzorci podvrgnuti većoj količini CO_2 (izloženi uvjetima u komori) pokazali su poboljšane rezultate ispitivanja čvrstoća te na taj način dokazali kako je na proces očvršćavanja značajan utjecaj ima količina CO_2 [162].

  Za razliku od kalcijskih/kalcijevih vapna, dolomitna vapna sadrže nešto veći udio MgO. Mikrostrukturne karakteristike očvrslih dolomitnih mortova upućuju na to kako

su, obzirom na strukturu pora otporniji na cikluse smrzavanja i odmrzavanja, ali Cultrone i dr. autori upozoravaju na kemijski sastav te veću ukupnu količinu razvijenih sulfata u odnosu na kalcijevo vapno [163]. Proces pečenja dolomitnoga vapna razlikuje se od kalcijeva vapna (donje jednadžbe), a i žarenje se odvija pri višim temperaturama [158,164]:

$$CaMg(CO_3)_2 + \text{toplina} \rightarrow CaO \cdot MgO + CO_2$$
$$CaMg(CO_3)_2 + \text{toplina} \rightarrow CaCO_3 \cdot MgO + CO_2$$
$$CaCO_3 \cdot MgO + \text{toplina} \rightarrow CaO \cdot MgO + CO_2$$

- *hidraulična vapna* dobivaju se pečenjem vapnenca s 6-22 % gline koje se vrlo sporo gasi, ali daje smjesu koja otvrdne radi hidratacije hidrauličnih sastojaka, bez prisustva CO_2 [158]. Hidraulična vapna mogu biti slabe ili jako izražene hidrauličnosti, ovisno o sadržaju slobodnoga vapna. Hidraulično se vapno primjenjuje u vidu fino samljevenoga praha. Koristi se za dobivanje morta za upotrebu u suhim ili vlažnim sredinama, kao i za dobivanje betona nižih kvaliteta, obzirom na sadržaj kiselih sastojaka [158].

Obzirom na spektar mogućnosti, projektnim zadatkom svakako mora biti specificirana vrsta veziva koja se koristi u svakom specifičnom slučaju.

Prema zahtjevu HRN EN 459-1 [159] s obzirom na udio CaO + MgO, kalcijska vapna imaju podjelu koja je prikazana u Tablici 4.4. Oznaka CL u kratici naziva kalcijevog vapna proizlazi iz engleskog nazivlja (Calcium Lime), dok oznaka S znači kako se radi o gašenom vapnu (eng. gašeno – slaked). [166]

Tablica 4.4. Vrste kalcijevog vapna prema HRN EN 459-1 [159]

Vrsta kalcijevog vapna	Maseni udio (%)	
	CaO + MgO	MgO
CL 90 S	> 90	< 5
CL 80 S	> 80	< 5
CL 70 S	> 70	< 5

Tablicom 4.5. prikazana je klasifikacija dolomitnoga vapna prema HRN EN 459-1 [159].

Tablica 4.5. Vrste dolomitnoga vapna prema HRN EN 459-1 [159]

Vrsta dolomitnoga vapna	Maseni udio (%)	
	CaO + MgO	MgO
DL 90-30	> 90	> 30
DL 90-5	> 90	> 5
DL 85-30	> 85	> 30
DL 80-5	> 80	> 5

Hidraulična vapna dijele se prema HRN EN 459-1 [159] ovisno o vrsti proizvodnje istih, i to na prirodna hidraulična vapna (NHL) i umjetna hidraulična vapna (HL). Razlika je u procesu proizvodnje, prirodna hidraulična vapna dobivena su obradom prirodnih sirovina dok su kod umjetnih hidrauličnih vapana ,uz postojeće kalcijeve okside, ciljano dozirani dodaci kao što su silikati, aluminati, fileri itd. Obje vrste vapana klasificirana su po tlačnoj čvrstoći prema HRN EN 495-1 što je prikazano u Tablici 4.6. [159]

Tablica 4.6. Vrste hidrauličnog vapna HRN EN 459-1 [159]

Vrsta vapna	Tlačna čvrstoća nakon 28 dana (MPa)	Sadržaj slobodnoga vapna $Ca(OH)_2$
HL 2	2 – 7	> 10
HL 3.5	3.5 – 10	> 8
HL 5	5 – 15	> 4
NHL 2	2 - 7	> 40
NHL 3.5	3.5 – 10	> 25
NHL 5	5 – 15	> 15

Cement može biti cement opće namjene ili cement posebne namjene. Cement opće namjene je cement na bazi portland cementa, te se dobiva termičkom obradom ili žarenjem odgovarajuće sirovine (kombinacija vapnenca i gline) na temperaturama oko 1350 – 1450 °C [160,168-173]. Kao rezultat pečenja nastaje portland cementni klinker koji se nakon hlađenja i uklanjanja slobodnoga vapna melje zajedno s primjesama prirodnoga gipsa ili sadre. Čisti portland cement nosi oznaku CEM I, portland cement s miješanim dodacima nosi oznaku CEM II, portland cement sa dodatkom zgure visokih peći je oznake CEM III, a mljevenjem portland cementnog klinkera, sadre, i pucolana dobiva se CEM IV kod se dodavanjem veće količine pucolana dobiva CEM V. [168-173]. Cementi opće namjene proizvode se u tri razreda čvrstoće: 32,5, 42,5 i 52,5 N/mm2 te s moguće dvije brzine prirasta čvrstoće: N što označava normalan prirast čvrstoća, te R što označava brzi prirast/razvoj čvrstoća u vremenu (najčešće se misli na 2 dana starosti uzorka ovdje). Zbog smanjenja cijene portland cementima najčešće se dodaju dodaci koji modificiraju njegova svojstva u pozitivnom smislu.

Moguće vrste dodataka cementima prema HRN EN 197-1 [174], prikazane su Tablicom 4.7. Vrlo su često dodaci cementu otpadni materijali neke industrije čime se ujedno i rješava problem njihova zbrinjavanja.

Tablica 4.7. Vrste dodataka cementima prema HRN EN 197-1 [174]

Oznake dodataka u cementima	Naziv dodataka cementima
S	granulirana zgura (troska) visokih peći
D	elektrofilterski SiO2 prah
P	prirodni pucolan
Q	prirodni pucolan termički obrađen
V	leteći pepeo pucolanskih svojstava
W	leteći pepeo pucolanskih i hidrauličnih svojstava
T	škriljevac pečen na oko 800 stupnjeva celzijusa
LL	vapnenac s najviše 0,20 % ugljika organskoga porijekla
L	vapnenac s najviše 0,50 % ugljika organskoga porijekla
M	mješavina dodataka

Prema europskom zakonodavstvu [158] ukupno postoji 27 različitih cemenata opće namjene a oni su ovdje prikazani Tablicom 4.8.

Tablica 4.8 Cementi opće namjene prema HRN EN 197-1 [174]

Glavna vrsta	Podjela podvrsta	Sastav (maseni udio u %)										
		Glavni sastojci										sporedni dodatni sastojci
		klinker	granulirana zgura visoke peći	SiO_2 prašina	pucolan		leteći pepeo			vapnenac		
					prirodni	prirodni kalcinirani	silicijski	kalcijski	pečeni škriljevac			
		K	S	D	P	Q	V	W	T	L	LL	
CEM I	Portlandski cement	95-100										0-5
CEM II	Portlandski cement s dodatkom zgure, CEM II/A-S	80-94	6-20									0-5
	Portlandski cement s dodatkom zgure, CEM II/B-S	65-79	21-35									0-5
	Portlandski cement s dodatkom prašine, CEM II/A-D	90-94		6-10								0-5
	Portlandski cement s dodatkom pucolana, CEM II/A-P	80-94			6-20							0-5
	Portlandski cement s dodatkom pucolana, CEM II/B-P	65-79			21-35							0-5
	Portlandski cement s dodatkom pucolana, CEM II/A-Q	80-94				6-20						0-5
	Portlandski cement s dodatkom pucolana, CEM II/B-Q	65-79				21-35						0-5
	Portlandski cement s dodatkom letećeg pepela, CEM II/A-V	80-94					6-20					0-5
	Portlandski cement s dodatkom letećeg pepela, CEM II/B-V	65-79					21-35					0-5
	Portlandski cement s dodatkom letećeg pepela, CEM II/A-W	80-94						6-20				0-5
	Portlandski cement s dodatkom letećeg pepela, CEM II/B-W	65-79						21-35				0-5
	Portlandski cement s dodatkom pečenog škriljevca, CEM II/A-T	80-94							6-20			0-5
	Portlandski cement s dodatkom pečenog škriljevca, CEM II/B-T	65-79							21-35			0-5
	Portlandski cement s dodatkom vapnenca, CEM II/A-L	80-94								6-20		0-5
	Portlandski cement s dodatkom vapnenca, CEM II/B-L	65-79								21-35		0-5

Tablica 4.8 Cementi opće namjene prema HRN EN 197-1 [174]

Glavna vrsta	Podjela podvrsta	Sastav (maseni udio u %)										
		Glavni sastojci										sporedni dodatni sastojci
		klinker	granulirana zgura visoke peći	SiO_2 prašina	pucolan		leteći pepeo			vapnenac		
					prirodni	prirodni kalcinirani	silicijski	kalcijski	pečeni škriljevac			
		K	S	D	P	Q	V	W	T	L	LL	
CEM II	Portlandski cement s dodatkom vapnenca, CEM II/A-LL	80-94									6-20	0-5
	Portlandski cement s dodatkom vapnenca, CEM II/B-LL	65-79									21-35	0-5
	Miješani portlandski cement, CEM II/A-M	80-94	6-20									0-5
	Miješani portlandski cement, CEM II/B-M	65-79	21-35									0-5
CEM III	Metalurški cement, CEM III/A	35-64	36-65									0-5
	Metalurški cement, CEM III/B	20-34	66-80									0-5
	Metalurški cement, CEM III/C	5-19	81-95									0-5
CEM IV	Pucolanski cement, CEM IV/A	65-89	11-35									0-5
	Pucolanski cement, CEM IV/B	45-64	36-55									0-5
CEM V	Miješani cement, CEM V/A	40-64	18-30	18-30								0-5
	Miješani cement, CEM V/B	20-38	31-50	31-50								0-5

Dodatno, postoje i cementi posebne namjene kao što su bijeli cement, aluminatni cement, supersulfatni cement, ekspanzivni cement i sl.

4.4. Trajnost mortova za zide

Mortovi koji se koriste u zidu izloženi su agresivnom okruženju te moraju biti projektirani na način da se mogu oduprijeti mogućim fizičkim i kemijskim degradacijama. Sastavne komponente morta određuju njegova svojstva, a to su prvenstveno vrsta veziva i agregat, te je važno paziti na njihove volumne odnose. Udio veziva može doprinijeti otpornosti na smrzavanje i odmrzavanje mortova [175], a važan je odnos veziva i vode jer će bitno utjecati će na ukupnu poroznost i mehanička svojstva očvrsloga morta. Naime, povećani sadržaj vode može olakšati miješanje i obradivost, ali uzrokuje povećanu poroznost, što dovodi do smanjenja čvrstoća i strukturnih promjena [161,176].

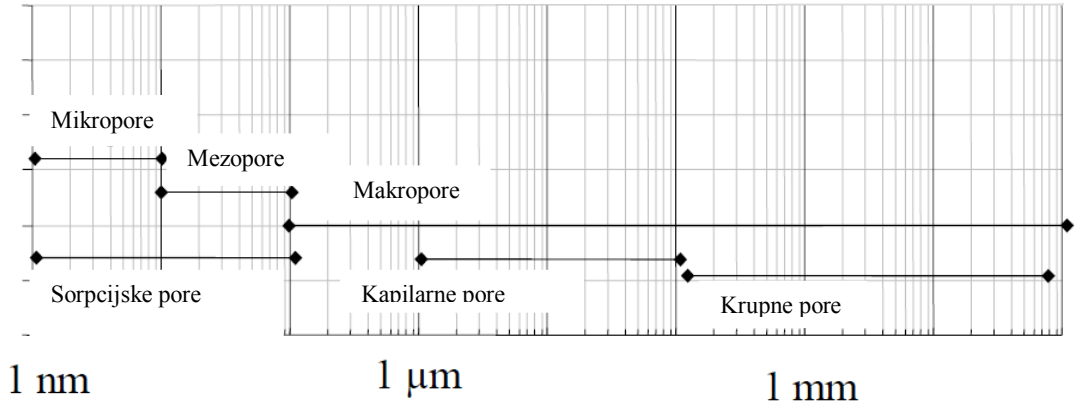
Preporučena praksa za spravljanje i ugradnju mješavina morta u zide uključuje sljedeća pravila:

- mort mora biti kompatibilan zidnom elementu - pri projektiranju sastava potrebno je voditi računa o volumnim odnosima, vrsti sastavnih komponenti i krajnjim svojstvima koje se postavljaju na konstrukciju u praksi,
- mora se voditi računa o volumnim odnosima aditiva koji mogu oslabiti mehanička svojstva očvslog morta,
- udio vapna u sastavu poboljšava obradivost svježega, povećava poroznost i prionjivost očvrsloga morta,
- kao agregat valja odabrati isključivo čisti pijesak bez primjesa koja smanjuje prionjivost očvrsloga morta u zidu,
- dostatan sadržaj vlage u svježoj mješavini kako bi se omogućila hidratacija cementna i veza između zidnoga elementa i morta,
- adekvatna tekstura zidnoga elementa koja doprinosi boljoj prionjivosti,
- izvoditi radove u skladu sa zahtjevima struke i pozitivnim propisima.

Otpornost na smrzavanje i odmrzavanje očvrslog morta visoko je ovisna o sadržaju cementa i vapna koji u kombinaciji s načinom proizvodnje čine osnovu za formiranje strukture morta u očvrslom stanju. Dodavanjem aditiva kao sastavne komponente, možemo pridonijeti otpornosti na smrzavanje i odmrzavanje, ali je potrebno voditi računa da istovremeno ne smanjujemo njegovu prionjivost u zidu [177].

4.4.1. Transport vlage u mortovima

Mort ima ulogu da akomodira nesavršenost geometrije zidnih elemenata i zbog toga mora biti dovoljno obradiv, ali obzirom na prijenos opterećenja u konstrukciji, mora imati dostatne mehaničke čvrstoće [178]. Strukturu morta čine mikro i mezo pore, odnosno gel pore, koja su opet, obilježja hidrauličnih mortova. Krupnije od toga su kapilarne pore, koje se formiraju dok je mješavina svježa, ovisit će o omjeru veziva i agregata u mješavini i mogu dostići do 10% ukupnoga volumena pora. Grube pore formira zarobljeni zrak u mješavini, nepravilnoga su oblika i nepravilne distribucije, i mogu iznositi do 8% ukupne poroznosti (Slika 4.1.). Jedan dio ukupne poroznosti čine i pukotine radi pojave skupljanja pri sušenju morta [141].



Slika 4.1. Podjela pora morta prema promjeru pora [141]

Transport vlage prispjele u mort može se odvijati difuzijom ili kapilarnim putem, ovisno o tome gdje se nalazi izvor vlage, iz krupnijih pora prema sitnijima. Međutim, problem nastaje ukoliko dođe do promjene smjera transporta vlage. Takvo je slabo mjesto kontaktna ploha između morta i zidnih elemenata. Nekoliko je faktora koji imaju utjecaj na čvrstoću veze između ta dva različita materijala, ali osnovu veze čine različite poroznosti, točnije različite distribucije pora. Ukoliko se radi o slučaju kada distribucija pora dodirnih površina nije kompatibilna, onda ona sprječava prirodni transport vlage među njima te postaje mjesto gdje dolazi do oštećenja struktura tih dvaju materijala [180]. Zbog toga razloga potrebno je prilagoditi sastav morta zidnom elementu te voditi računa da se pri izvedbi zidni elementi dovoljno navlaže kako ne bi preuzimali vlagu iz svježe mješavine. Obzirom na to kako mort kompenzira geometrijske nepravilnosti zidnih elemenata, mora biti dovoljno obradiv, pri

čemu je potrebno voditi računa da se ne formira sloj vode na spoju dodirnih ploha koji može oslabiti čvrstoću njihove veze. Ukoliko se radi o mortu neprilagođenoga sastava, sigurnost izvedbe konstruktivnog elementa postaje upitna. Slikom 4.2 prikazan je primjer nekompatibilnog spoja morta i opeke u konstrukciji.

Slika 4.2 Primjer nekompatibilnog spoja morta i opeke u konstrukciji

Iz navedenoga slijedi kako je poroznost, točnije distribucija pora kontaktne površine morta i zidnoga elementa, odlučujuća komponenta u njihovoj međusobnoj prionjivosti [181]. Stupanj zasićenosti, ukupni volumen pora kao i veličina i distribucija pora doprinose trajnosti pri smrzavanja i odmrzavanju ziđa [181]. Ispitivanja su dokazala kako su distribucija pora i poroznost zajedno dovoljna za predviđanje fizičkih svojstava s prihvatljivom točnošću [183].

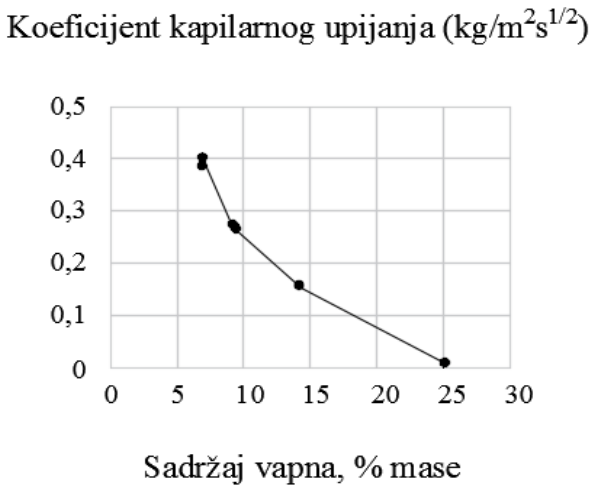
4.4.2. Trajnost vapnenih i produžnih mortova

Vapneni mort za zidanje koristili su još graditelji staroga Rima, sve do vremena Prvog svjetskog rata. Radi ubrzanih procesa stvrdnjavanja, nastupio je period evolucije cementnih mortova, naglašavajući pri tome prednost većih mehaničkih čvrstoća. Međutim, veće skupljanje cementnih mortova, pucanje i mehanička krutost doveli su do situacije da vapno opet zauzima značaj u proizvodnji mortova, posebno pri sanacijama povijesnih građevina, bilo kao jedinstveno vezivo ili u kombinaciji s cementom kao što je to slučaj kod produžnih mortova. Vapno ima sposobnost razvijanja takve strukture pora u mortovima koji omogućuju kvalitetniju cirkulaciju vlage u zidovima, poboljšavaju kvalitetu unutarnjeg zraka u građevinama i istodobno štiti od vlage. Tako od vapnenih mortova možemo očekivati sljedeća svojstva:

- stalnost volumena u promjenjivim uvjetima vlažnosti,
- smanjenu pojavu deformacija i pukotina: sadržaj vapna pojačava sposobnost prilagodbe naprezanjima bez prekomjernog pucanja,
- bolja svojstva trajnosti [181], odnosno bolju kompatibilnost sa zidnim elementima što dokazuje trajnost konstrukcija izvedenih još prije ranih 1930-ih kada se kao mort za zidanje koristio isključivo vapneni mort,
- dostatnu elastičnost, paropropusnost, toplinsku i zvučnu izolaciju, vatrootpornost;
- smanjivanje učestalosti pojave iscvjetavanja,
- ekološku prihvatljivost obzirom na njegovo prirodno porijeklo.

Prema nekim autorima, visoka ukupna poroznost (> 20%) s malim količinama pora <1 μm karakteristična je za vapneni mort [182]. Tako može poslužiti kao referenca za usporedbu promjena svojstava očvrsloga morta tijekom vremena. Ukoliko nakon nekog vremena dođe do povećanja vrijednosti ukupne poroznosti te suženja pora takvoga morta, to će ukazivati na izmijenjenu strukturu i povećanu lomljivost kao posljedicu različitih vanjskih (utjecaja vlage i temperature) i unutrašnjih opterećenja. S druge strane, niske vrijednosti ukupne poroznosti i finije pore mogu ukazivati na prisutnost hidrauličkoga vapna [182-186].

Značajnoj prednosti mortova s potpunim ili djelomičnim udjelom vapna u odnosu na cementne mortove u pogledu trajnosti doprinose svakako specifične strukture pora. Istraživanja svojstava vapnenih mortova na starim građevinama ukazala su kako visok sadržaj vapna kao veziva, formira specifičnu strukturu finih pora na kontaktnim površinama zidnih elemenata i morta, koje doprinose manjem kapilarnom upijanju, dok krupne pore unutrašnjosti omogućavaju lakši transport već prispjele vlage prema van. Prema Nielsen i Anders, povećanjem udjela vapna u mortu dolazi do smanjenja kapilarnoga upijanja vode što se pozitivno odražava na trajnost morta (Slika 4.3). Na Slici 4.4. prikazan je mikroskopski snimak uzorka srednjovjekovnog morta na bazi vapna na kojem je istražena struktura pora. Tamna je boja na Slici 4.4. vezivo na bazi vapna dok je na vrhu Slike vidljiv gusti sloj kalcijevog karbonata nastao pri izloženosti morta uvjetima okoliša.



Slika 4.3 Utjecaj sadržaja vapna u mortu na koeficijent kapilarnoga upijanja morta [140]

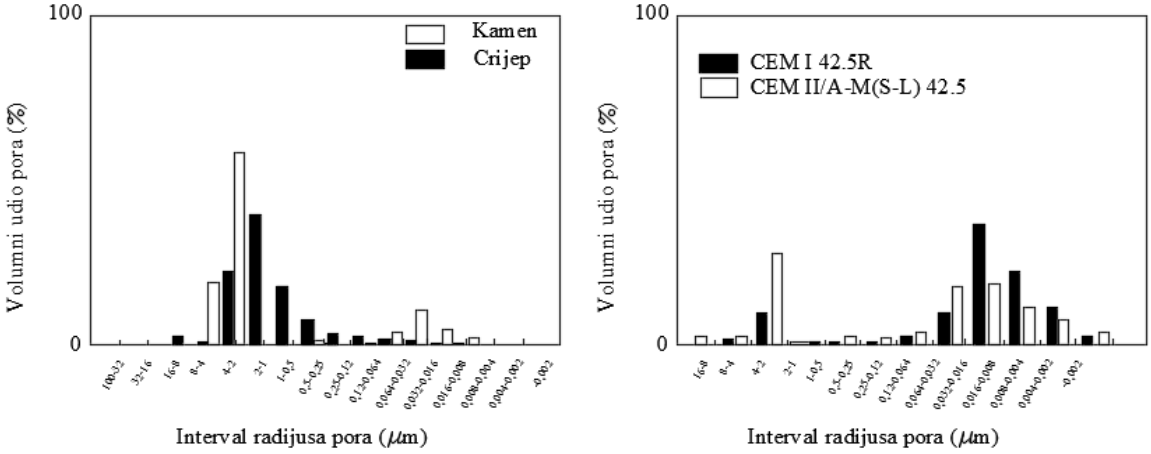
Slika 4.4 Prikaz uzorka srednjovjekovnog morta pod mikroskopom [140]

4.4.3. Trajnost cementnih mortova

Razvoj cementnih mortova, odnosno njihova brža ugradnja, veće mehaničke čvrstoće uz pristupačnu cijenu, utjecali su na smanjenu uporabu vapnenoga morta. Međutim, mortovi za zide na bazi cementa imaju nekoliko nedostataka obzirom na sadržaj soli koji može dovesti do kasnije degradacije materijala, uz nisku fleksibilnost obzirom na promjene dimenzija od puzanja ili temperaturnih razlika.

Ispitivanja su pokazala kako osim navedenih svojstava, postoje velike razlike između distribucije pora u strukturi standardnoga cementnoga morta i materijala poput kamena i crijepa ili pak opečnog elementa (Slika 4.5.) te ukazuju na pojavu slabih mjesta upravo na kontaktnim površinama zidnih elemenata i cementnog morta [135,180,181]. Ovakve razlike u

raspodjeli pora između cementnog morta s jedne strane i kamena/opečnog elementa s druge strane ukazuju kako u zidu mogu nastati oštećenja kada su ti materijali u kontaktu. Do oštećenja može doći djelovanjem mehanizma formiranja leda u obliku mikroleće ako se u kamenu/opečnom elementu u kapilarnoj pori formira kristal leda. Nezamrznuta voda koja se nalazi u mezo i mikro kapilarama morta će se djelovanjem mehanizma formiranja mikroleće kretati k kapilarnim porama s kristalima leda u kamenu/opečnom elementu te povećavati volumen kristala leda i dovesti do oštećenja materijala [180].



a) b)

Slika 4.5 Distribucija pora a) kamena i crijepa i b) cementnih mortova određena Hg porozimetrijom [180]

Na kontaktnoj površini krupnih pora zidnih elemenata formiraju se sitne pore cementnoga morta koje međusobno nisu kompatibilne. Pri niskim temperaturama u krupnih porama zidnoga elementa dolazi do formiranja leda, dok u sitnim porama cementnoga morta koje odolijevaju niskim temperaturama, vlaga ostaje u tekućem stanju. Zbog razlike u slobodnim energijama dolazi do kretanja vode iz sitnih pora k ledu koji se formirao u krupnim porama, odnosno dolazi do dodatnoga pritiska u krupnim porama zidnoga elementa zahvaljujući dotoku vode koje uzrokuju oštećenja pora [180,181]. Takve slabe i oštećene kontaktne plohe zidnoga elementa i morta utječu na nosivost konstruktivnoga elementa.

Dodatno, istraživanja pokazuju kako se dodavanjem različitih vrsta vlakana mogu poboljšati svojstva očvrsloga cementnoga morta. Osim što povećavaju savojnu čvrstoću, smanjuju padove tlačnih čvrstoća, dinamičkog modula elastičnosti i specifičnu masu nakon izlaganja mortova ciklusima smrzavanja i odmrzavanja. Ispitivanja [183-188] su pokazala kako su cementni mortovi sa dodatkom vlakana pokazali manje padove mehaničkih svojstava pri

ispitivanju otpornosti na 100 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja u odnosu na cementne mortove bez vlakana.

Otpornost očvrsloga morta na destruktivne učinke oštećenja uslijed ciklusa smrzavanja i odmrzavanja poboljšava se dodavanjem uvučenog zraka u svježu mješavinu. Uvlačenje zraka je postupak koji doprinosi razvoju odgovarajuće strukture pora u mortu koja regulira hidraulička naprezanja u porama te tako doprinosi povećanju otponosti materijala na cikluse smrzavanja i odmrzavanja [170,180,185]. Uvučene zračne šupljine u očvrslom mortu daju akomoditet prispjeloj količini vlage ili povećanju volumena uslijed smrzavanja vlage u volumenu pora, odnosno ublažavaju pritisak na stijenke i sprječavaju oštećenja[180]. Međutim, treba biti oprezan prilikom dodavanja aeranta u mortove i biti svjestan činjenice kako će velik udio pora umanjiti tlačnu čvrstoću. Prema [180,182,183], pore različite veličine imaju različitu ulogu u svojstvima morta, te je Tablicom 4.9. prikazano kako pore određene veličine utječu na čvrstoću morta i na njegovu otpornost na cikluse smrzavanja i odmrzavanja a ujedno je i prikazana distribucija pora za konkretan aerirani mort.

Tablica 4.9 Primjer sitnih pora koje utječu na svojstvo otpornosti na smrzavanje i odmrzavanje [183]

Promjer pora (nm)	Količina pora u aeriranom mortu (%)	Svojstvo
200-250	-	Ne utječu na smanjenje tlačne čvrstoće
100-2500	-	Smanjuju tlačne čvrstoće
>2500	-	Zanemariv utjecaj na tlačnu čvrstoću
<100 (<50)	6	Pridonose tlačnim čvrstoćama; Osiguravaju otpornost na smrzavanje i odmrzavanje
35-100	>10	Pridonose otpornosti na smrzavanje i odmrzavanje
100-1000	<60	

Iz tablice je vidljivo kako sitne pore (<50 nm) čak pridonose tlačnoj čvrstoći morta, dok one krupnije (100-2500 nm) negativno utječu na tlačnu čvrstoću ali i pozitivno (100-1000 nm) na otpornost morta na cikluse smrzavanja i odmrzavanja. Najkrupnije pore (>2500 nm) imaju zanemariv utjecaj na tlačnu čvrstoću. Prikazani rezultati ispitani su živinim porozimetrom i svojstveni su aeriranim mortovima iako će prisutnost različitih sastavnih materijala pridonositi određenoj promjeni mikrostrukture u odnosu na prikazanu [182,183,184].

4.4.4. Metoda procjene trajnosti mortova u sustavu zida

Edgell i Wilson radili su na ispitivanju panela od opeke otpornih na cikluse smrzavanja i odmrzavanja i morta, u laboratorijskim i vanjskim (stvarnim) uvjetima. Dio panela bio je izložen stvarnim vanjskim uvjetima dvije godine (Slika 4.5), pri čemu su praćeni i svi vremenski uvjeti. Laboratorijski paneli tretirani su i ispitani sukladno HRS CEN/TS 772-22 [79]. Nakon provedenih laboratorijskih ispitivanja, izvršena je usporedba laboratorijskih i terenskih ispitnih rezultata, i uočeno je kako se rezultati ovih dvaju ispitivanja dobro prate, te zaključeno da HRS CEN/TS 772-22 [79] može poslužiti kao metoda za određivanje otpornosti na smrzavanje i odmrzavanje [184]. Prema [184] HRS CEN/TS 772-22 [79] je u razmatranju kao norma kojom bi se ocjenjivala otpornost mortova na cikluse smrzavanja i odmrzavanja. Međutim, drugi autori [185] smatraju princip opterećenja opetovanim ciklusima smrzavanja i odmrzavanja neodgovarajućim stvarnom opterećenju zida u vanjskoj okolini te da je potrebno iznaći drugačiji način analize ponašanja materijala na osnovu koje možemo sa sigurnošću izdvojiti proizvode koji imaju dostatna svojstva trajnosti.

Slika 4.6 Ispitivanje zidnih panela na terenu [184]

Lawrence [188] pojašnjava kako postoji niz varijabli koje se moraju uzeti u obzir ako želimo izvesti ispitivanje trajnosti mortova u skladu sa svim kompleksnim uvjetima koje se nameću u vanjskome okruženju. Uzimajući u obzir dugi vremenski period trajanja ovakvih ispitnih metoda, svakako je preporučljivo iznaći indirektne parametre kojima se može izvršiti procjena osjetljivosti očvrsloga morta.

4.4.5. Ostale metode procjene trajnosti mortova

Način kretanja vlage unutar porozne strukture morta praćen distribucijom pora morta, mora biti usklađen s načinom kretanja vlage u zidnom elementu i njegovom distribucijom pora, posebno na njihovoj kontaktnoj površini te su parametri vezani za sustav pora vrlo važni u indirektnoj procjeni otpornosti na smrzavanje i odmrzavanje mortova. Tablicom 4.10. prikazane su u literaturi zabilježene metode korištene za ocjenu stanja mortova pri čemu se naglasak stavlja na mikroskopske tehnike kao najpouzdanije, dok ostale metode mogu biti dopuna mikroskopskim tehnikama.

Tablica 4.10 Metode određivanja poroznosti mortova [184,187, 188, 190]

Ispitivanje poroznosti uzorka morta		
Vizualna kontrola	Mikroskopska analiza	Indirektne metode
-prostim okom	-optički mikroskop	-ukupni volumen pora
-dodirom	-petrograska analiza	-upijanje pod vakumom
	-elektronski mikroskop	-piknometrijska analiza
	-tomografija	-BET analiza
		-distrubucija pora
		-MIP metoda – uporaba živinog porozimetra
		-NI metoda – uporaba nanoskopa (mikroskopija atomskih sila)

Većina mikroskopskih tehnika istražuje ukupni volumen pora, specifičnu površinu i faktor razmaka pora. Tehnike za određivanje strukture pora mogu se podijeliti u dvije osnovne skupine: izravne metode i neizravne metode. Tako izravnim metodama strukturu pora procjenjujemo izravnim promatranjem; dok kod neizravnih metode prisutnost ili veličinu pora računamo mjerenjem. Prema nekim izvorima, usporedbom tih dviju različitih metoda možemo dobiti odstupanja u strukturi pora promatranoga uzorka [184,188]. Nažalost, granične vrijednosti po pojedinim metodama nisu pronađene u literaturi.

Obzirom kako ne postoji normirana metoda za ocjenu trajnosti mortova, logički se nameće da bi se praćenjem promjene fizičkoga izgleda, volumena, mase ili čvrstoće nakon što su uzorci podvrgnuti kontroliranim ciklusima smrzavanja i odmrzavanja moglo dobiti neke konkretne rezultate, no autori (R. Borinaga-Treviño, P. Pascual-Muñoz, Calzada-Pérez, A. Miguel, D. Castro-Fresno)[186] smatraju da takve metode ipak ne daju dostatne informacije o svojstvima trajnosti morta.

Nadalje, kao jednu od metoda za ispitivanje otpornosti mortova na smrzavanje i odmrzavanje literatura navodi „in situ“ ispitivanje mjerenjem indeksa abrazije morta ugrađenog u zidu izloženoga vanjskim djelovanjima u odnosu na referentni uzorak u laboratoriju, starosti minimalno sedam dana, do tri godine (Slika 4.6.). Autori (Lawrence & Samarasinghe 2000) opisuju ispitivanje površine izloženoga morta uređajem koji se sastoji od sonde s oprugom s abrazivnim krajem, koji omogućuje da površina morta dobije ogrebotinu pod određenom silom. Okretanje sonde ograničeno je fiksnim brojem zavoja i mjeri se prodiranje u površinu morta. Indeks abrazije izračunava se kao prosjek od 5 zasebnih mjerenja prodiranja. Indeks abrazije opada s vremenom a time i otpornost morta na cikluse smrzavanja i odmrzavanja [187,188]. Što je indeks niži, to je veća potencijalna trajnost morta. Ova je metoda prihvaćena kao australijska norma AS 3700 [187], 2002. godine, s kriterijima za najveći dopušteni indeks strugotine navedenima u Tablici 4.11. u ovisnosti o klasi morta [187,188].

Slika 4.7 Mjerenje indeksa abrazije in situ [186, 187, 189]

Tablica 4.11. Volumni odnosi morta i indeksi abrazije za svaku klasu morta (Standards Australia 2001) [186],

Klasa morta/ izloženost	Volumni odnosi			Indeks (mm)
	Cement	Vapno	Pijesak	
M2 blaga, unutarnja	1	2	9	0,5
M3 Vlažna i suha, morska	1 1	1 0	6 5	0,3
M4 Agresivna, morska	1 1 1	0,5 0 0-0,25	4,5 4 3	0,1

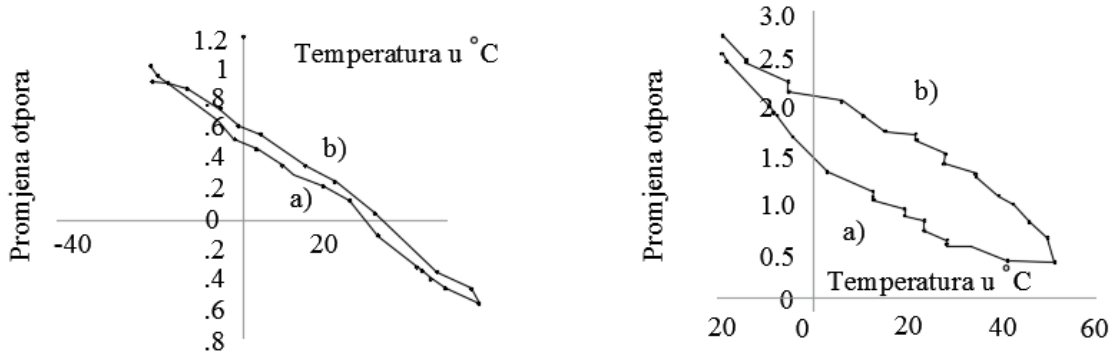
Ova ispitivanja mogu biti dobar pokazatelj otpornosti na cikluse smrzavanja i odmrzavanja, obzirom kako je njegova ponovljivost dokazana na širokom rasponu mortova [186].

Autori Testone , Sugo , Page , Lawrence [189] dokazali su da rezultati pokazuju snažnu korelaciju između indeksa abrazije i sadržaja cementa, pri čemu se indeks abrazije smanjuje s povećanjem sadržaja cementa. Ovu tvrdnju pokazuju i neka ranija istraživanja (Lawrence & Samarasinghe, 1998). Međutim, ispitivanja produžnih mortova pokazala su da, bez obzira na viši sadržaj cementa, sadržaj vapna čini veliku ulogu u povećanju svojstava trajnosti, ali tu ulogu vapna još treba dodatno istražiti. [189]

Litvan [131] tvrdi kako se indirektne metode za procjenu otpornosti na cikluse smrzavanja i odmrzavanja mogu temeljiti na određivanju sadržaja zraka, faktora razmaka pora, kritičnoga stupnja zasićenja, raspodjele veličine pora i specifične površine. Svaki navedeni parametar daje vrijedne informacije o trajnosti uslijed smrzavanja i odmrzavanja, međutim, nijedna od ovih indirektnih metoda neće pružiti jasnu sliku osjetljivosti mješavine te je iste potrebno dodatno analizirati [131].

Druga nerazorna metoda kojom se može ocijeniti trajnost morta zasniva se na mjerenju električne otpornosti uz istovremeno praćenje temperature i pojave oštećenja uslijed promjena ciklusa smrzavanja i odmrzavanja [179] kako je to prikazano Slikom 4.7, pri čemu je smrzavanje praćeno povećanjem otpora dok je odmrzavanje popraćeno smanjenjem otpora.

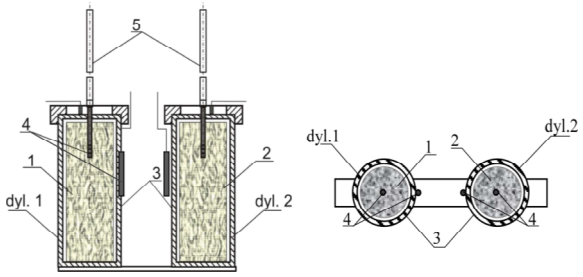
Autori Cao i Chung smatraju kako oštećenja nastala tijekom procesa hlađenja u intervalu od 52 do -20 °C prije prouzročena toplinskim skupljanjima i činjenicom kako se površina brže hladi od sredine uzorka nego učinkom smrzavanja, no ona ipak doprinose ukupnoj oštećenosti uzorka. Pri tome najveće oštećenje nastaje pri najnižoj temperaturi. Uzorci na kojima su obavljena ispitivanja bili su izmjera 70x10x5 mm.



a) b)

Slika 4.8 Promjena električne otpornosti: a) nakon prvog ciklusa smrzavanja i odmrzavanja pri temperaturama od -20 do 52 °C, te pri ponovnom hlađenju na -20° i b) nakon zadnjega ciklusa smrzavanja i odmrzavanja pri temperaturama od -20 do 52 °C, te pri ponovnom hlađenju na -20° [179]

Analizom i usporedbom rezultata ispitivanja volumetrijskih promjena upijanja različitih uzoraka cementnog morta pri smrzavanju i odmrzavanju, na uzorcima veličine 100 × 100 × 100 mm pohranjenim na 14, 76, 166 i 256 dana na temperaturi 20 ± 2 ◦ C, i relativnoj vlažnosti RH 50 ± 5% (Slika 4.8), dokazano je kako se mikrostrukturna svojstva uzoraka stabiliziraju nakon 90 dana, te da se kao mogući indikator osjetljivosti na smrzavanje može uzeti odnos promjene volumena [190] kako je to prikazano Tablicom 4.12.



Slika 4.9 Mjerni uređaj – dilatometar: 1-zasićeni uzorak, 2-referentni uzorak, 3-dilatometri, 4-temperaturni senzori, 5 – mjerne posude [190]

Tablica 4.12 Ocjena otpornosti morta na smrzavanje i odmrzavanje [190]

Promjena volumena, ΔV/V (‰)	Ocjena otpornosti na smrzavanje i odmrzavanje
<2	Visoka otpornost
2 >ΔV/V< 4	Potreban dodatan parametar za bolju ocjenu
>4	Osjetljiv

Ipak, normirana europska metoda po kojoj bi se otpornost mortova procjenjivala u laboratorijskim uvjetima kao što je to slučaj kod opeka - ne postoji.

5.UTJECAJ CIKLUSA SMRZAVANJA I ODMRZAVANJA NA SVOJSTVA MATERIJALA ZIĐA – EKSPERIMENTALNI DIO

U sklopu ovog poglavlja istražen je utjecaj režima pečenja na otponost opeke kao gotovog proizvoda na cikluse smrzavanja i odmrzavanja. U tu svrhu ispitivanje je izvedeno na uzorcima kontrolirane proizvodnje dviju različitih sirovina. Dodatno, u svrhu istraživanja utjecaja različitog načina oblikovanja, uzorci opeke kontrolirane proizvodnje oblikovani su ručno i strojno. Vršna temperatura pečenja definirana je u skladu sa utvrđenom kvalitetom i sastavom obiju sirovina. Usporedbom distribucija pora različito oblikovanie, sirove opeke te pečene opeke kao gotovog proizvoda, utvrđen je utjecaj adekvatne vršne temperature, odnosno duljine zadržavanja pri pečenju na vršnoj temperaturi u smislu razvoja različitih intervala pora. Otpornost gotovog proizvoda dokazana je ispitivanjem direktnom metodom te omjerom tlačnih čvrstoća nakon i prije smrzavanja.

Na uzorcima kontrolirane proizvodnje te dodatno na uzorcima nekontrolirane strojno proizvedene opeke dostupne na tržištu te uzorcima ručno proizvedene opeke koja je svojedobno već bila ugrađena u određene grrađevine, izvršeno je ispitivanje fizičkih i mehaničkih svojstava te analiza distribucije pora u cilju iznalaženja nove i jednostavnije metode ispitivanja radi dokazivanja njihove otpornosti na cikluse smrzavanja i odmrzavanja.

5.1. Utjecaj načina izrade i režima pečenja opeka na otpornost pune opeke na cikluse smrzavanja/odmrzavanja

Za izradu opeka korištene su sirovine s gliništa Kukljaš na prostoru Istočne Slavonije. Sirovine za izradu opeka, gline, analizirane su u pogledu kemijskoga sastava, mineraloškoga sastava i granulometrijskoga sastava a napravljene su i diferencijalno-termička analiza i dilatometrija.

5.1.1. Analiza sirovine

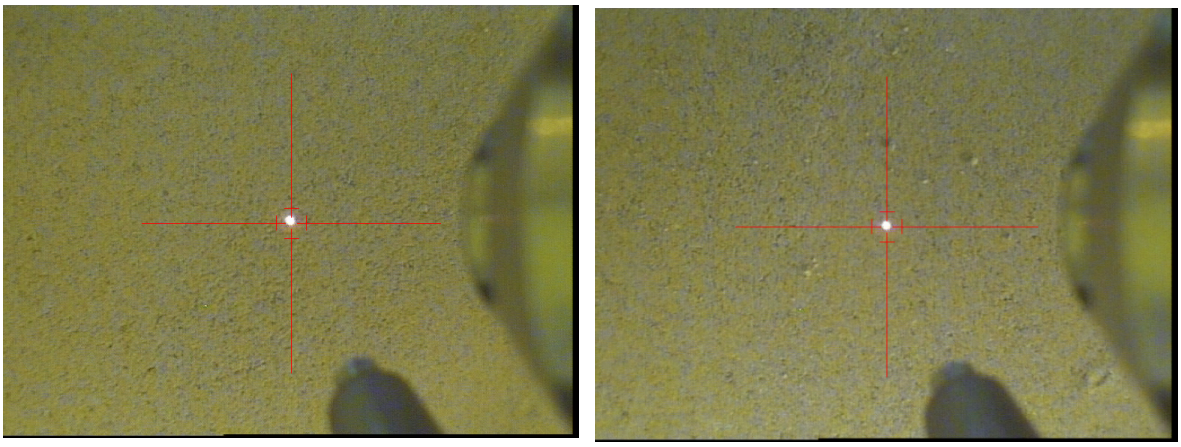
5.1.1.1. Kemijski sastav

Određivanje prisutnih elemenata (kvantitativno) izvršeno je primjenom Rentgenske fluorescentne spektrometrije – XRF analize. XRF analiza (eng. X-Ray Fluorescence Spectroscopy) rađena je pomoću mobilnog ARTAX 200 μ-XRF spectrometer (BRUKER

Nano, Nemačka) uređaja opremljenog Rh katodnom cijevi i integriranom kamerom. Spektri su dobiveni pri slijedećim eksperimentalnim uvjetima: napon od 25 kV, jakost struje 1500 µA, vrijeme snimanja u trajanju od 100 s u uvjetima helijske atmosfere. Izgled uzorka prilikom snimanja prikazan je Slikom 5.1. Dobiveni spektri su analizirani pomoću integriranog ARTAX SPECTRA 7 softvera razvijenog od strane BRUKER-a. Opisani portabl uređaj radi u beskontaktnom modu na udaljenosti od 2 cm pri čemu nagib emitiranih X-zraka iznosi 45° u odnosu na ispitnu površinu. Mjerenja elementne analize rađena su na 10 različitih područja veličine 625x500 µm uz energiju elektronske zrake od 15 keV (povećanje 200 puta) a prosječne vrijednosti udjela sastavnih elemenata dane su u Tablici 5.1. Oznakom net su u Tablici 5.1. označeni pikovi, a oznakom Conc koncentracija elementa.

Tablica 5.1. Prosječne vrijednosti udjela sastavnih elemenata u uzorcima glina

Kemijski element	Oznaka uzorka			
	S1		S2	
	Net	Conc. (%)	Net	Conc. (%)
Mg	67	1,696	139	3,530
Al	2410	9,118	2512	9,506
Si	14490	32,030	14968	33,086
P	-	-	52	0,047
K	4898	1,966	4385	1,760
Ca	2331	0,604	9404	2,438
Ti	3995	0,505	3886	0,491
Cr	194	0,011	195	0,011
Mn	1219	0,024	1613	0,032
Fe	109117	5,569	105983	5,409
Ni	-	-	195	0,005
Zn	656	0,016	647	0,015
Rb	557	-	739	-
Sr	514	0,015	693	0,021
Zr	1094	-	986	-



Slika 5.1. Izgled uzoraka S1 I S2 tijekom XRF analize

Pretražnom elektronskom mikroskopijom (FE_SEM) i spektroskopijom rentgenskog zračenja (EDS) određen je kemijski sastav uzoraka gline izražen u obliku oksida, a prikazan je Tablicom 5.2.

Tablica 5.2. Kemijski sastav glina izražen u obliku oksida

Kemijski spoj	Oznaka uzorka	
	S1 Težinski udio (%)	S2 Težinski udio (%)
SiO2	58,72	48,46
CO2	5,39	18,90
Al2O3	21,00	17,59
FeO	6,38	5,52
CaO	1,56	3,24
K2O	3,08	2,50
MgO	2,56	2,47
TiO2	0,75	0,72
Na2O	0,55	0,60

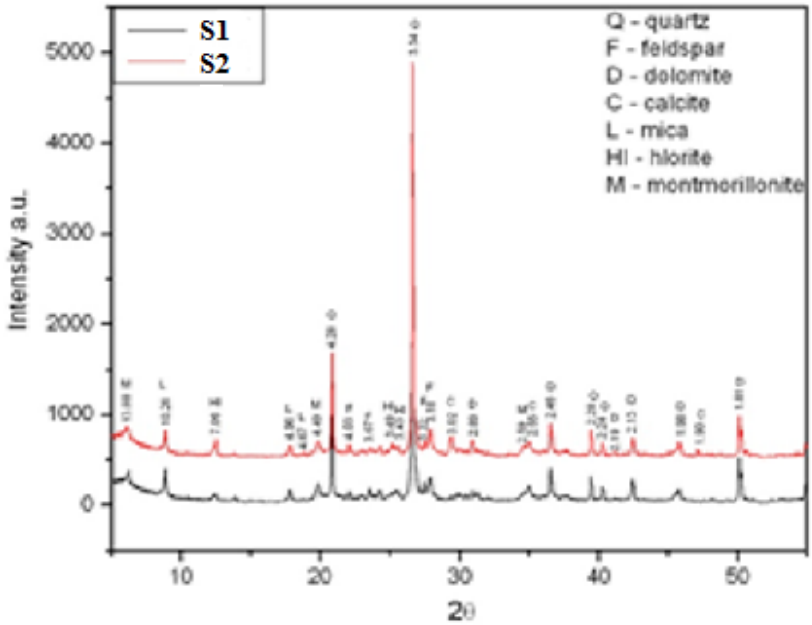
5.1.2. Mineološki sastav

Mineološki sastav sirovine određen je rentgenostrukturnom analizom (XRD), metodom koja se koristi za određivanje mineološkog, odnosno faznog sastava materijala primjenom X zračenja te prikazan Slikom 5.2, dok je sadržaj sagorljivih, organskih tvari u sirovinama

ispitan prema normi HRN U.B1.024 [192], a sadržaj karbonata sukladno HRN U.B1.026 [193] te ovdje prikazani Tablicom 5.3.

Tablica 5.3. Rezultati ispitivanja sadržaja sagorljivih, organskih tvari i sadržaja karbonata u sirovini

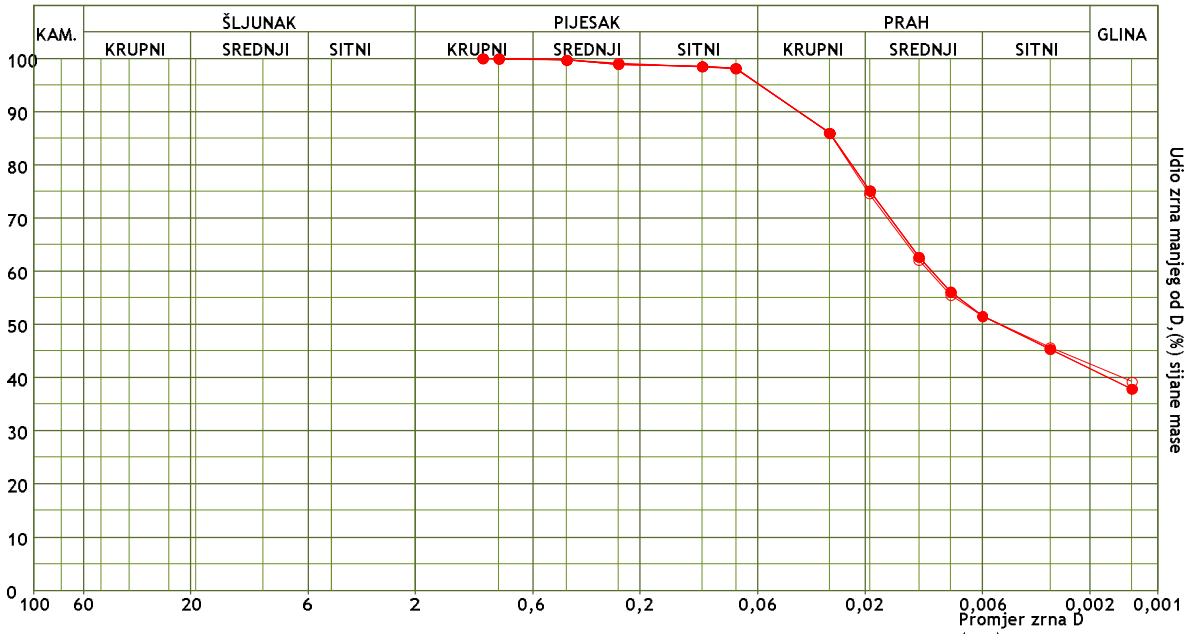
Oznaka uzorka	Sagorljive tvari (%)	Organske tvari (%)	Karbonati (%)
S1	4,3	2,2	1,3
S2	6,8	2,4	5,8



Slika 5.2. Usporedni prikaz rentgenograma gline

5.1.1.1. Granulometrijski sastav

Granulometrijski sastav agregata određen je sukladno normi ASTM D 422-63 [194], a rezultati ispitivanja prikazani su Slikom 5.3. Disperzija uzorka za areometriranje rađena je u električnoj mješalici, trajanje miješanja 1 minuta.



Oznaka uzorka	Bušotina	Dubina (m)	Datum primitka	Datum ispitivanja	Opis čestica (oblik,tvrd.)	Zrno (mm)	C_u	C_c	G(%)	S(%)	M(%)	C(%)
● - 2	-		18.9.2015	18.3.2015	zaobljen, tvrd i trajan	1	-	-	0,00	4,66	53,67	41,67
○ - 1	-		18.9.2015	18.3.2015	zaobljen, tvrd i trajan	1	-	-	0,00	4,77	52,74	42,49

Cu koeficijent jednoličnosti, Cc koeficijent zakrivljenosti, G šljunak (%), S pijesak (%), M prah (%), C glina (%).

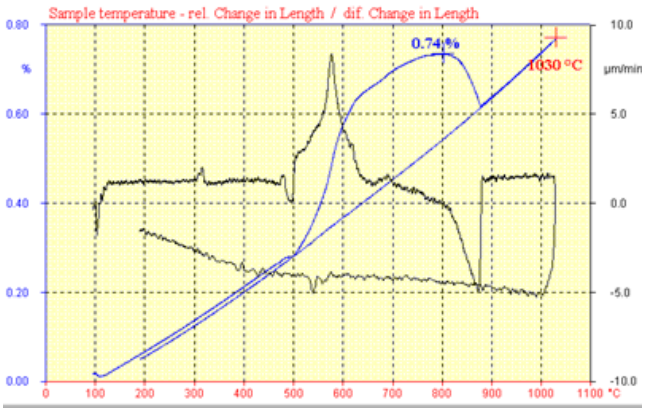
Slika 5.3 Granulometrijski sastav glina

Sadržaj organske tvari (Tablica 5.3) za sirovinu S1 iznosi 2,2 %, a za sirovinu S2 2,4% dok je udio sagorljivih tvari u sirovini S1 4,3 % a u sirovini S2 6,8 %. Rezultati mineološke analize prikazani Slikom 5.2. ukazuju na prisustvo minerala kvarca (Q), feldspata (F), dolomita (D), kalcita (C), liskuna (L), klorita (Cl) i montmorilonita (M) kod obje sirovine. Rezultati kemijske i mineološke analize ukazuju kako se radi o sirovinama vrlo sličnog sastava, s neznatnom razlikom u količini CaO tj. CaCO3 (1,3 % kod sirovine S1 i 5,8% kod sirovine S2). Gline s udjelom CaO ispod 6% [93] u kemijskom sastavu te gline s udjelom CaCO3 ispod 15% u mineološkom sastavu [92] smatraju se niskokarbonatnima. Stoga, obje se sirovine mogu karakterizirati kao niskokarbonatne, tek s neznatnom razlikom u količini ovoga

oksida/minerala. Granulometrijska krivulja obje sirovine vrlo je slična, s vrlo malim razlikama u količini sitnih čestica, odnosno gline. Rezultati ispitivanja mineološke strukture sirovine zajedno s granulometrijskim sastavom ukazuju kako se radi o pjeskovitim sirovinama bogatim glinenim mineralima.

5.1.1.1.2. Diferencijalno-termička analiza i dilatometrija

Uzorci, pripremljeni prema ASTM C824-91 [102] su zagrijavani brzinom od 3°C/min, te hlađeni brzinom od 10 °C/min. Rezultati ispitivanja prikazani su Slikom 5.4 a i b. Crna krivulja prikazuje razliku u širenju uzoraka sirovine i referentnog uzorka (sintetičkog safira) s promjenom temperature, izraženo u µm/min, i rezultat je DTA analize a plava krivulja promjenu duljine uzoraka s promjenom temperature tj linearno toplinsko širenje, izraženo u %, što je rezultat dilatometrije.



a) sirovina S1

b) sirovina S2

Slika 5.4. Rezultati diferencijalno-termičke analize i dilatometrije sirovine S1 i S2

Rezultati diferencijalno-termičke analize i dilatometrije, uz prethodno poznavanje mineološkog sastava sirovine, ukazuju na nekoliko karakterističnih efekata kod obje sirovine, a koje su rezultat dehidroksilacije adsorpcijske vlage i kristalne vlage, sagorijevanja organskih tvari, dekristalizacije karbonata, te procesa sinteriranja/vitrifikacije. Prvi endotermni efekt DTA-grafa kod oba uzorka javlja se pri temperaturi od 100°C, što je posljedica gubitka adsorpcijske vlage u sirovinama [199]. Istovremeno, rezultati dilatometrije prikazuju skupljanje kod oba uzorka. Sagorijevanje (oksidacija) organskih tvari vidljiva je kao egzoterman proces na temperaturi od oko 300°C kod obje sirovine, što je popraćeno linearnim širenjem oba uzorka. Daljnjim povećanjem temperature kod oba uzorka, može se primjetiti linearno širenje sve do temperaturnog intervala od 550-600 °C gdje kod oba uzorka dilatometrijska krivulja pokazuje još jedan karakterističan efekt. Ovaj efekt nastaje zbog transformacije α u β kvarca što je na krivulji prikazano kao karakterističan egzotermni maksimum. Proces transformacije kvarca popraćen je intenzivnim širenjem uzoraka, s najvećim intenzitetom širenja na temperaturi 550 °C.

Osim pri transformiranju kvarca iz α u β fazu, na temperaturama između 500-600°C, širenje uzoraka se događa i u temperaturnom intervalu između 700 i 800°C. Pri temperaturama oko 700°C započinje proces dekarbonatizacije najprije kalcita, a zatim dolomita pri kojoj nastaje određena količina CO_2 koja doprinosi širenju uzoraka [88] a koji se nastavlja do temperature iznad 800°C. Na temperaturi od 800 °C možemo vidjeti maksimalno širenje od 0,74% za sirovinu S1, a za sirovinu S2 nešto veće maksimalno širenje od 0,80%, obzirom na nešto izraženiji sadržaj karbonata. Iznad 800°C primjećujemo naglo skupljanje uzoraka uslijed dekompozicije montmorilonita. Proces skupljanja pri 850°C usporavaju filosilikati čije formiranje sprječava daljnje razlaganje amorfnih faza (ili dekompoziciju montmorilonita). Dekompozicija karbonata također doprinosi skupljanju uzoraka i to na temperaturama oko 900°C, na kojoj ujedno i započinje process vitrifikacije [9, 10]. Prema autorima (Elert i dr.) [97], značajnija vitrifikacija za sirovine manjeg sadržaja karbonata započinje pri temperaturama ≥1000 ° s dokazanim kontinuiranim vitrificiranim slojem na temperaturama od 1020-1120°C.

5.1.2. Izrada opeka

Iz svake od dvije sirovine napravljena je po jedna **serija** opeke ručno i strojno. Opeke izmjera 250/120/65 cm su proizvedene strojnim putem na liniji za proizvodnju pune opeke "OPEKA" d.d. Osijek, proizvodni pogon Vladislavci (Slika 5.5). Osim strojne, izrađeni su uzorci ručno proizvedene opeke na proizvodnom pogonu u Josipovcu tvrtke "Old art décor" d.o.o. (Slika 5.6) Izrađeno je ukupno 100 uzoraka svake serije (serija 1 proizvedena iz sirovine 1 i serija 2 proizvedena iz sirovine 2) za svaki od načina proizvodnje opeke (Slike 5.7a i 5.7b). Slikama 5.8a I 5.8b prikazane su razlike u boji sirovine i opeka – svijetlija sirovina je sirovina S1 a tamnija sirovina je sirovina S2. Izrađeni uzorci bili su izloženi prirodnom procesu sušenja tijekom kojega su bili zaštićeni od direktnog utjecaja sunca i vjetra, strujanja zraka, nagloga gubitka vlage pokrivačem od jute (Slika 5.9) Proces sušenja je trajao 45 dana, a uzorci su smješteni na ravnoj podlozi oblagani pijeskom radi sprječavanja naglog gubitka vlage. Nakon sušenja, uslijedio je proces pečenja u tvornici "DILJ" d.o.o., proizvodni pogon Vinkovci (Slika 5.10). Uzorci su pečeni u peći Hans Lingl Anlagenbau und Verfahrenstechnik GmbH & Co. KG iz 2003. godine kapaciteta pečenja 4,8 t/h, dimenzija 119,94x4,00x1,98 m te režimom pečenja prikazanim na Slikama 5.11. i 5.12.

Slika 5.5. Strojna izrada opeka

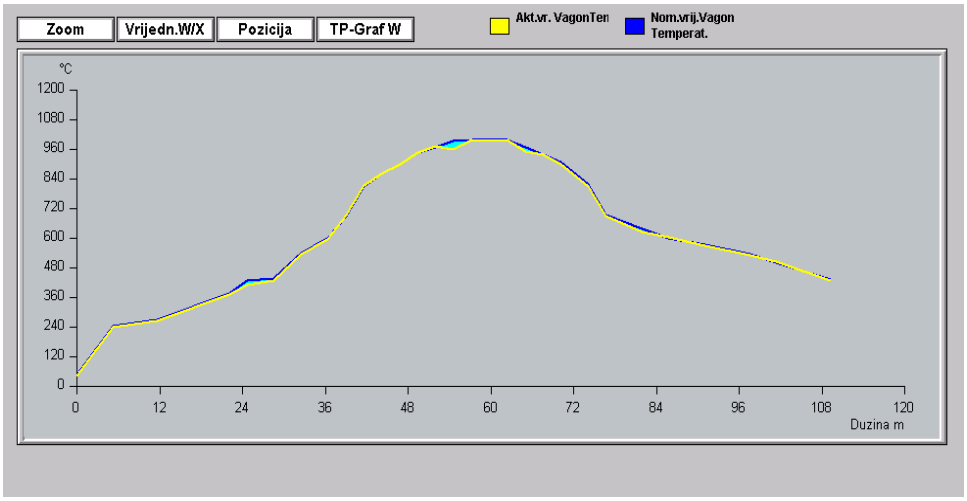
Slika 5.6. Ručna izrada opeka

Slika 5.7. Uzorci kontrolirane proizvodnje: a) serija opeka proizvedenih strojno; b) serija opeka proizvedenih ručno

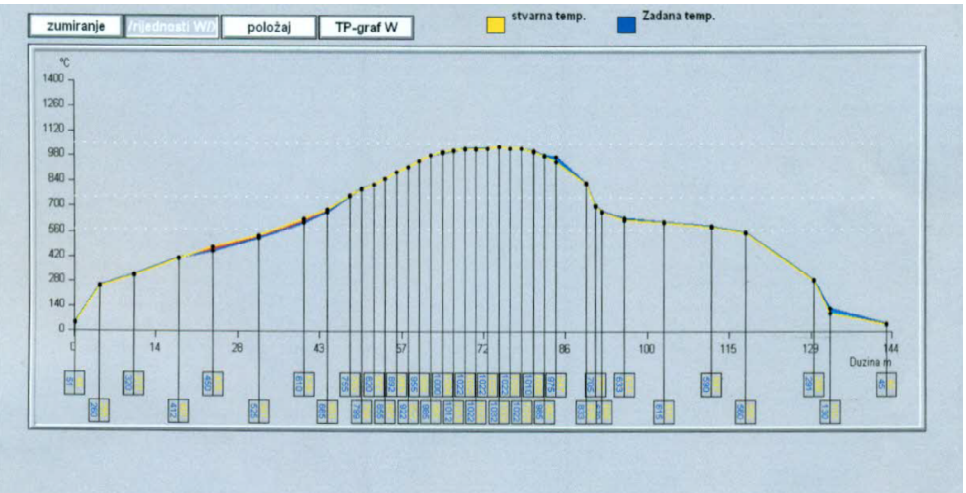
Slika 5.8. Sirovine za kontroliranu proizvodnju: a) boja sirovine kao rezultat sadržaja karbonata; b) boja nepečene opeke kao rezultat sirovine

Slika 5.9. Sušenje opeke na podu

Slika 5.10. Opeke na vagonu priređene za uvođenje u peć



Slika 5.11. Režim pečenja uzoraka na 1030°C



Slika 5.12. Režim pečenja uzoraka na 1060°C

Temperatura je pečenja određena ovisno o sirovini. Za gline s nižeg sadržaja karbonata (S1) temperatura pečenja od 1030 °C ocijenjena je kao dovoljno visoka za razvoj teksture pora >3µm praćeno smanjenjem poroznosti te smanjenjem količine srednjih pora nastalih procesom karbonatizacije (otpuštanjem CO2). Za sirovinu nešto višeg sadržaja karbonata (S2) potrebno je povećati temperaturu pečenja radi smanjenja količine pukotina odnosno srednjih pora koja nastaju u procesu karbonatizacije, a koje bi nestale produljenom vitrifikacijom te je u tu svrhu odabrana temteratura od 1060 ° C.

Unutar svake od **četiri serije** nepečenih opeka (2 vrste glina x 2 načina izrade; strojna i ručna izrada) na manjem broju uzoraka varirano je vrijeme zadržavanja opeke na najvećoj postignutoj temperaturi u peći pri pečenju; 90 min i 30 min. Cilj je ovdje bio utvrditi utjecaj vremena zadržavanja opeke u peći na konačnoj postignutoj temperaturi, na razvoj sustava pora u opeci.

Ovakvim pristupom dobiveno je osam serija različitih uzoraka (2 vrste glina x 2 načina izrade opeka x 2 vremena zadržavanja opeke u peći na konačnoj temperaturi). S ciljem utvrđivanja utjecaja načina izrade opeke te temperature njezina pečenja i vremena zadržavanja opeke u peći po konačno dostignutoj temperaturi u peći na sustav pora u opeci, određen je udio pora pojedine veličine na osušenim i nepečenim uzorcima opeka a potom i na pečenim uzorcima opeka svake serije.

5.1.3. Struktura pora nepečenih opeka

Metodom Hg porozimetrije određen je udio pora pojedine veličine na uzorcima četiri serije opeka (2 sirovine x 2 načina izrade opeka) te ukupan udio pora u opeci. Hg porozimetrija je provedena pomoću aparata *AutoPore IV* 9500 (Slika 5.13), modela 9500 s mogućnošću postizanja pritiska do 33 000 psia (228 MPa) koji radi analizu pora polumjera od 360 do 0,001 µm.

Slika 5.13. AutoPore IV 9500 Hg porozimetar

Raspodjela pora pojedine veličine u nepečenim opekama prikazana je Tablicom 4. Pore manje od 0,1 µm se u literaturi smatraju sitnim porama [203]. Prema [203], krupnim porama se smatraju one veće od 1 µm dok Maage [204] u svojoj jednadžbi krupnim porama smatra one veće od 3 µm. U ovoj Tablici, krupnim porama promatrane su one veće od 3µm. Sukladno tome, srednjim porama se u Tablici smatraju one u rasponu 0,1-3µm.

Tablica 5.4. Distribucija pora u nepečenim opekama

Uzorak/udio pora određene veličine (%)	Promjer pora (μm)																Udio krupnih, srednjih i sitnih pora; ukupna poroznost (%)
	Krupne					Srednje					Sitne						
	100-32	32-16	16--8	8--4	4--3	3--2	2--1	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,12	0,12-0,064	0,064-0,032	0,032-0,016	0,016-0,008	0,008-0,004	0,004-0,002	
Opeka sirovine S1, ručno rađena (S1R)	0	0	4,3	6,4	4,3	4,3	3,1	20,7	15,1	8,2	5,2	6,1	8,1	14,2	0	0	15+51,4+33,6 20,85
Opeka sirovine S2, ručno rađena (S2R)	0	0	0	0	6,7	3,3	0	0	16,9	21,6	9,5	8,8	11,3	11,9	8,4	1,6	6,7+41,8+51,5 13,27
Opeka sirovine S1, strojno rađena (S1S)	0	0	9,9	32,4	8,8	6,7	7,3	5,1	5,7	18,7	0,7	4,7	0	0	0	0	51,1+43,5+5,4 29,27
Opeka sirovine S2, strojno rađena (S2S)	0	3,3	3,4	6,5	6,6	6,7	0	0	0	21,7	8,2	8,6	12,5	11,6	8,6	2,3	19,8+28,4+51,8 10,99

5.1.4. Struktura pora pečenih opeka

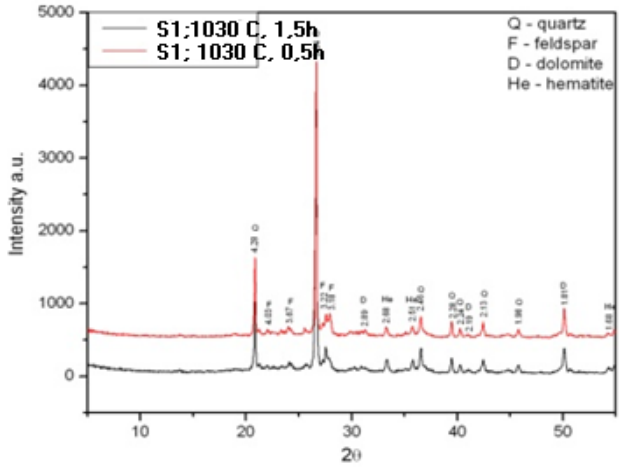
Raspodjela pora pojedine veličine u opekama određena pomoću Hg porozimetrije prikazana je Tablicom 5.5.

Tablica 5.5. Distribucija pora u pečenim opekama

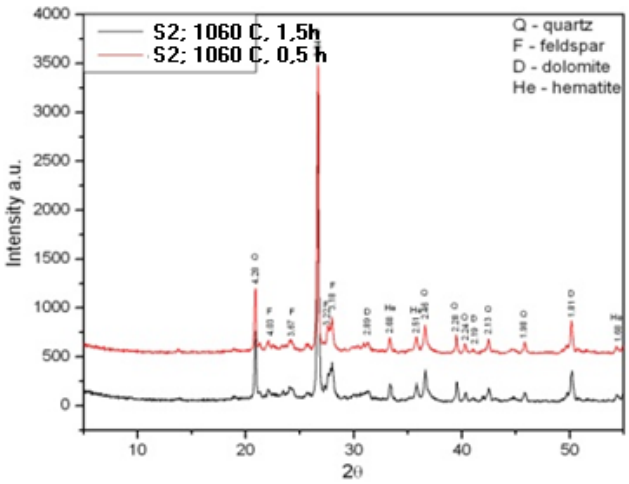
Uzorak/udio pora određene veličine (%)	Promjer pora (μm)																Udio krupnih, srednjih i sitnih pora; ukupna poroznost (%)
	Krupne					Srednje					Sitne						
	100-32	32-16	16--8	8--4	4--3	3--2	2--1	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,12	0,12-0,064	0,064-0,032	0,032-0,016	0,016-0,008	0,008-0,004	0,004-0,002	
Opeka sirovine S1, ručno rađena, pečena na 1030 C, vrijeme zadržavanja 1,5 h (S1R1030-1,5h)	0	0	0	5,2	15,4	45,8	19,4	6,4	2,2	2,4	1,4	1,3	0,6	0	0	0	20,6+76,2+3,2 19,36
Opeka sirovine S1, ručno rađena, pečena na 1030 C, vrijeme zadržavanja 0,5 h (S1R1030-0,5h)	0	0	1,1	5,6	4,5	13,7	37,4	19,1	9,2	5,4	1,8	1,5	0,5	0,2	0	0	11,2+84,8+4,0 20,36
Opeka sirovine S2, ručno rađena, pečena na 1060 C, vrijeme zadržavanja 1,5 h (S2R1060-1,5h)	0	0	10, 7	8,1	10,6	12,1	27,2	13,8	7,7	5,1	2,2	1,2	1,1	0,2	0	0	29,4+65,9+4,7 17,16/
Opeka sirovine S2, ručno rađena, pečena na 1060 C, vrijeme zadržavanja 0,5 h (S2R1060-,5h)	0	0	3,6	5,3	7,0	11,4	35,6	17,7	9,1	4,9	2	0,8	2,6	0	0	0	15,9+78,7+5,4 17,76/
Opeka sirovine S1, strojno rađena, pečena na 1030 C, vrijeme zadržavanja 1,5 h (S1S1030-1,5h)	0	4,7	4,7	4,7	3,2	11,4	27,9	12,5	6,6	7,6	6,5	5,6	3,0	0,8	0,3	0,5	17,3+66,0+16,7 16,23/
Opeka sirovine S1, strojno rađena, pečena na 1030 C, vrijeme zadržavanja 0,5 h (S1S1030-0,5h)	-	5,2	2,6	2,6	5,4	11,7	34	15,4	7,2	4,5	2,1	0,6	0,0	0	7,3	1,4	15,8+72,8+11,4 19,14
Opeka sirovine S2, strojno rađena, pečena na 1060 C, vrijeme zadržavanja 1,5 h (S2S1060-1,5h)	0	0	0	8,9	4,5	4,4	0	0	67,6	6,7	3,6	1,7	1,7	0,5	0,4	0	17,8+74,3+7,9 22,24
Opeka sirovine S2, strojno rađena, pečena na 1060 C, vrijeme zadržavanja 0,5 h (S2S1060-1,5h)	0,9	0,6	0,3	0,2	0,2	0,1	1,9	46	27,1	11,3	6,8	3,1	1,4	0,1	0	0	2,2+86,4+11,4 28,26

5.1.5. Mineološke karakteristike pečenih opeka

Mineološki sastav pečene opeke određen je rentgenostrukturnom analizom a dobiveni rezultati prikazani su Slikama 5.14 a i b. Rentgenogrami na Slikama 5.14 a i b prikazuju promjenu mineološkoga sastava pečenih uzoraka koja se nije značajnije izražena tijekom širokog temperaturnog raspona.



a) opeka sirovine S1



b) opeka sirovine S2

Slika 5.14. Usporedni prikaz rentgenograma uzoraka s različitim periodom zadržavanja na najvišoj temperaturi

Na osnovu mineološke analize uzoraka pečenih na temperaturi od 1030°C identificirano je prisustvo minerala: kvarca (Q), feldspata (F), dolomita (D) i hematita (He). Na osnovu

mineološke analize uzoraka pečenih na 1060°C također je identificirano prisustvo minerala: kvarca (Q), feldspata (F), dolomita (D) i hematita (He). Kvarc, feldspat i dolomit su mineralne faze koje potiču od sirovine korištene pri pripremi uzoraka. Hematit je mineralna faza koja opeci daje karakterističnu crvenu boju, a izraženija u niskokarbonatnim uzorcima pečenim na 1030 °C zbog njenog difakcijskog maksimuma na temperaturama bližim 1000 °C [201]. Identični mineološki sastav uzoraka pečenih na temperaturama od 1060°C i uzoraka pečenih na temperaturi od 1030 °C ukazuje na to kako temperaturna razlika od 1030°C do 1060°C nije izazvala veće fazne promjene unutar samih uzoraka, a odnosi se na stvaranje Ca i Mg silikata. Povećanjem temperature očekujemo samo smanjenje količine pukotina nastalih procesom karbonatizacije.

5.1.6. Ispitivanja otpornosti pečenih opeka na cikluse smrzavanja/odmrzavanja

Otpornost opeke na cikluse smrzavanja/odmrzavanja određena je prema normi HRN B.D8.011 [82]. Ova je norma odabrana za ispitivanje otpornosti opeka na cikluse smrzavanja/odmrzavanja jer zahtijeva manji broj uzoraka za ispitivanje u odnosu na normu HRS CEN/TS 772-22 [79]. Uzorci zasićeni vodom stavljeni su u hladnjak i izloženi djelovanju temperature od -20±2 C tijekom četiri sata, te nakon toga uronjeni u vodu temperature +15 do 20 °C također tijekom četiri sata. Ovakav ciklus ponavlja se 25 puta, a uzorci se pregledavaju nakon svakoga ciklusa. Opeka se smatra postojanom na cikluse smrzavanja/odmrzavanja ako se poslije 25 ciklusa smrzavanja i ponovnog odmrzavanja u vodi ni na jednom uzorku ne pojave znakovi oštećenja. Na Slici 5.15 prikazani su uzorci opeka nakon izlaganja ciklusima smrzavanja/odmrzavanja.

a) S1R1030-1,5h

b) S1R1030-0,5H

c) S2R1060-1,5H

d) S1R1060-0,5H

e) S1S1030-1,5h

f) S1S1030-0,5H

g) S2S1060-1,5H

h) S1S1060-0,5H

Slika 5.15. Izgled opeka nakon ciklusa smrzavanja/odmrzavanja

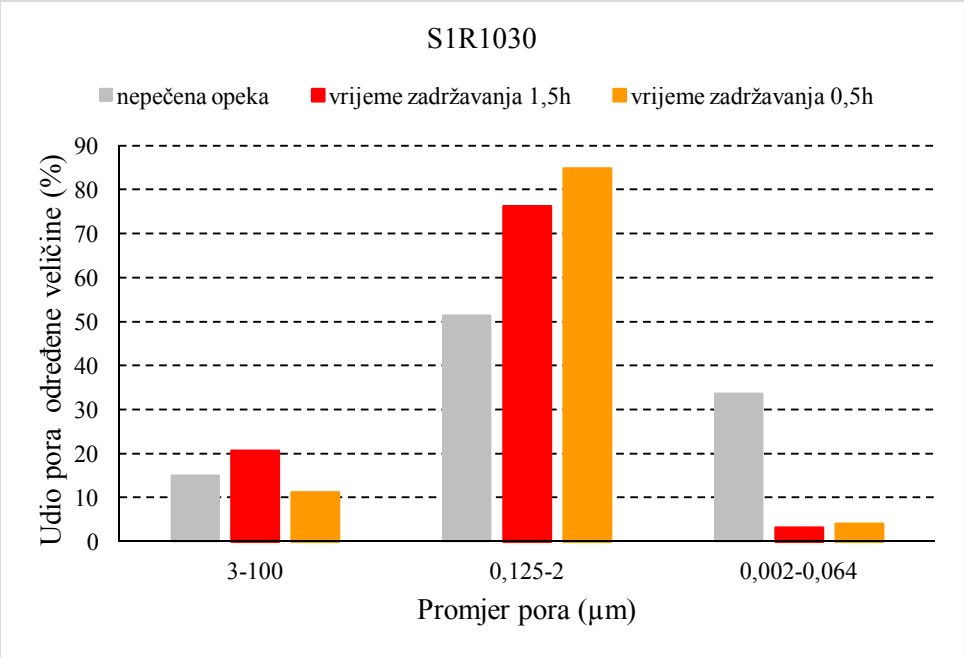
Sukladno ovoj normi, sve su opeke ocijenjene kao otporne na cikluse smrzavanja/odmrzavanja. Međutim, kako ova metoda daje kvalitativnu a ne kvantitativnu ocjenu, za dodatnu ocjenu otpornosti opeke na cikluse smrzavanja/dmrzavanja korišteni su i omjeri tlačnih čvrstoća opeke nakon i prije smrzavanja. Tlačne čvrstoće opeka, određene sukladno HRN EN 772-1 [78], kao i omjeri tlačnih čvrstoća opeka prije i nakon smrzavanja dani su u Tablici 5.6. Iz tablice 5.6 da se primijetiti kako su opeke sirovine S2 pečene na višoj temperaturi ostvarile veću tlačnu čvrstoću nego opeke sirovine S1 što je u skladu s opažanjima iz [107] a što može biti uzrokovano vitrifikacijom [88,107]. Također, dulje vrijeme zadržavanja opeka u peći rezultiralo je većim tlačnim čvrstoćama kod opeke.

Tablica 5.6. Omjeri tlačnih čvrstoća opeka nakon i prije ciklusa smrzavanja/odmrzavanja

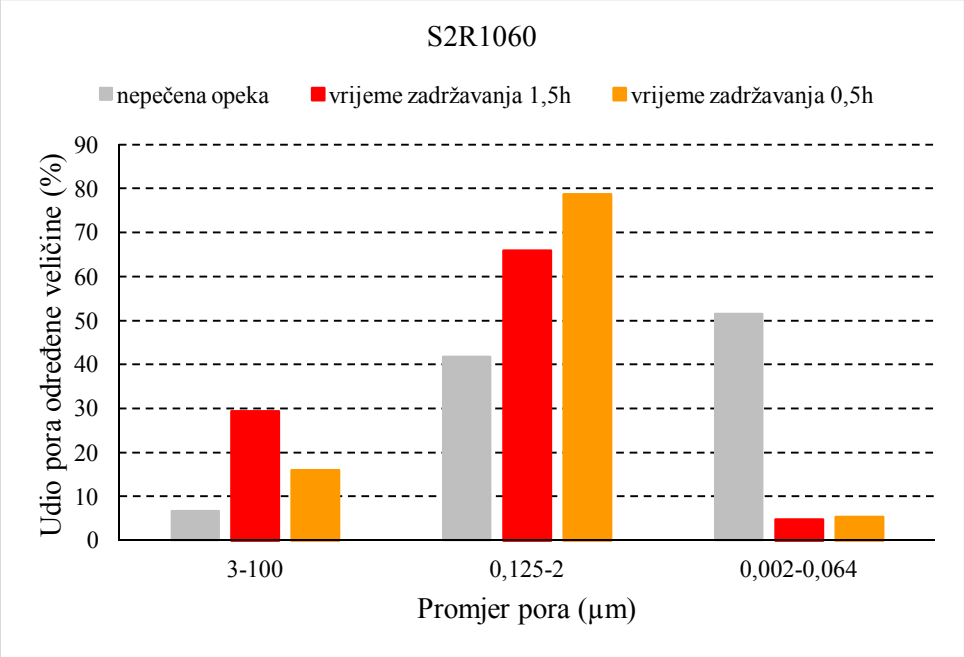
Oznaka uzorka/Ispitano svojstvo	S1R1030-1,5h	S1R1030-0,5h	S2R1060-1,5h	S2R1060-0,5h	S1S1030-1,5h	S1S1030-0,5h	S2S1060-1,5h	S2S1060-0,5h
Tlačna čvrstoća (N/mm^2)	30	27	35	33	36	33	56	47
Tlak nakon smrzavanja (N/mm^2)	22	19,5	30	28	29	26	43	35
Omjer tlačnih čvrstoća nakon i prije ciklusa smrzavanja/odmrzavanja/ (%)	0,73	0,72	0,86	0,85	0,81	0,79	0,77	0,75

5.1.7. Diskusija

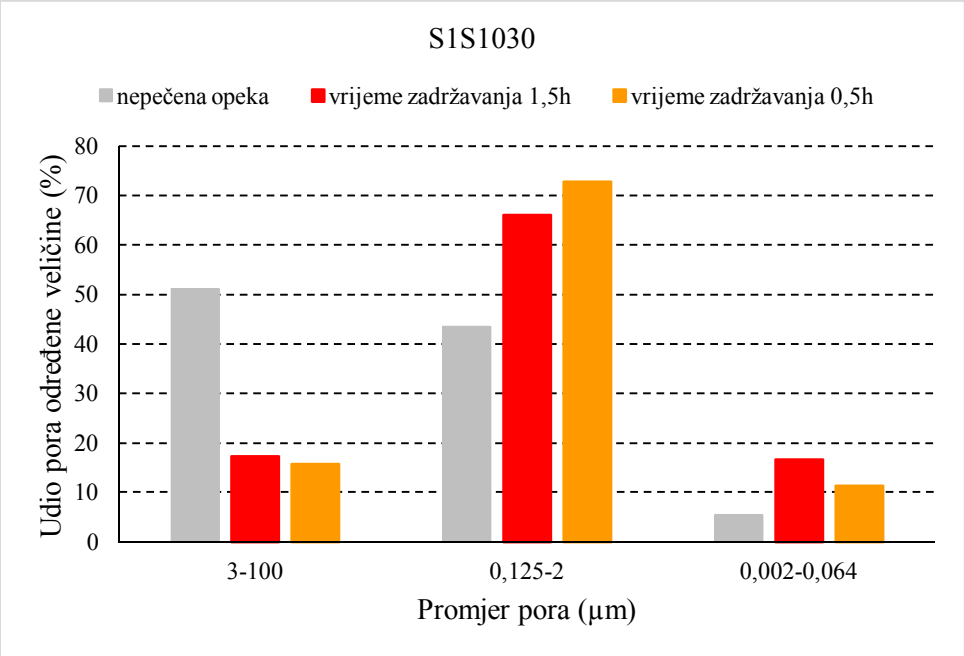
Utjecaj režima pečenja na sustav pora u opekama i ukupnu poroznost opeka prikazan je Slikama 5.16 do 5.20.



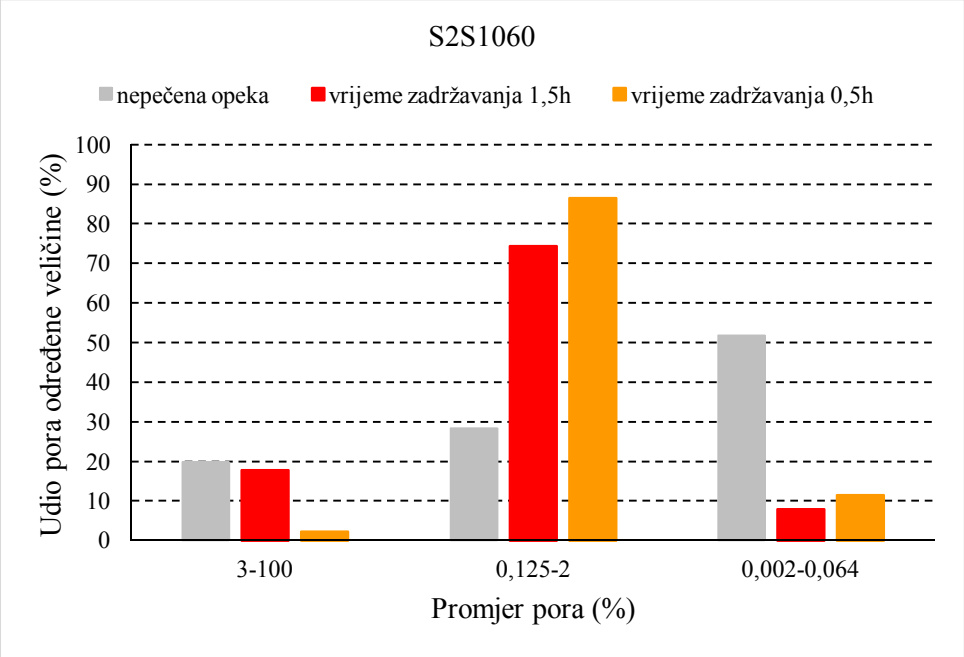
Slika 5.16. Utjecaj režima pečenja na ručno rađenu opeku sirovine S1



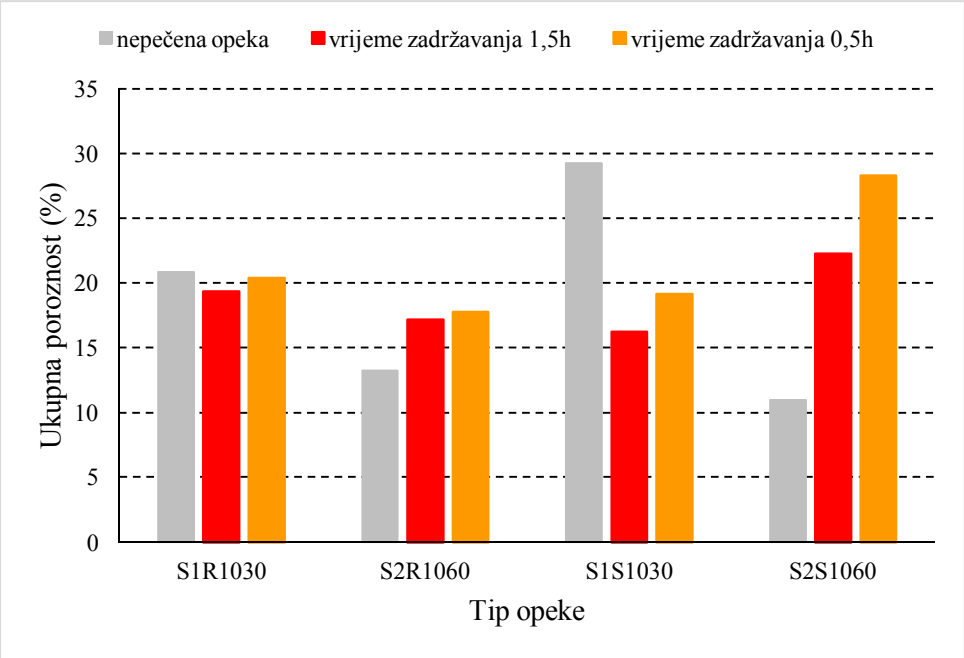
Slika 5.17. Utjecaj režima pečenja na ručno rađenu opeku sirovine S2



Slika 5.18. Utjecaj režima pečenja na strojno rađenu opeku sirovine S1



Slika 5.19. Utjecaj režima pečenja na strojno rađenu opeku sirovine S2



Slika 5.20. Utjecaj režima pečenja na pomjenu ukupne poroznosti opeke

Uvidom u Slike 5.16 i 5.17 vidljivo je kako je s pečenjem ručno rađenih opeka došlo do porasta udjela krupnih i srednjih pora, te smanjenja udjela sitnih pora. Također, vidljivo je i da ručno rađene opeke tijekom pečenja s kraćim zadržavanjem u peći razviju veći udio srednjih pora nego one s duljim zadržavanjem u peći. Ujedno, ručno rađene opeke s kraćim zadržavanjem u peći imaju i manji omjer tlačnih čvrstoća prije i nakon smrzavanja (Tablica

5.6) od onih s duljim zadržavanjem u peći. Uvidom u Slike 5.18 i 5.19 vidljivo je kako je s pečenjem strojno rađenih opeka došlo do smanjenja udjela krupnih pora te povećanja udjela srednjih pora. Također, vidljivo je, kao i kod ručno rađenih opeka, kako strojno rađene opeke tijekom pečenja s kraćim zadržavanjem u peći razviju veći udio srednjih pora nego one s duljim zadržavanjem u peći. Opet, strojno rađene opeke s kraćim zadržavanjem u peći imaju i manji omjer tlačnih čvrstoća prije i nakon smrzavanja (veću otpornost na cikluse smrzavanja/odmrzavanja) od onih s duljim zadržavanjem u peći. ***Navedeno potvrđuje kako način izrade opeke i režim njezina pečenja utječu na sustav pora koji će se razviti u opeci a time i na otpornost opeke na cikluse smrzavanja/odmrzavanja.*** I dok se uvidom u navedene slike da primijetiti ***sličan razvoj sustava pora kod opeka koje su isto rađene***, iz Slike 5.20 je vidljivo kako na ***ukupan udio pora više utječe sirovina***. Naime, kod opeka izrađenih od sirovine S1 ukupna poroznost pri pečenju pada dok kod opeka izrađenih iz sirovine S2 ukupna poroznost raste pri pečenju. Ovo zadnje je dokaz da kod sirovine S2, unatoč boljim ostvarenim tlačnim čvrstoćama u odnosu na sirovinu S1 nije došlo do vitrifikacije koja bi prouzročila smanjenu poroznost.

5.2. Svojstva opeka

Opekama čija je izrada detaljno opisana u poglavlju 5.1. (u nastavku nazvanim opekama iz kontrolirane proizvodnje) kao i strojno izrađenim opekama dostupnim na tržištu, te ručno izrađenim opekama uzorkovanim iz postojećih građevina (u nastavku zajednički nazvanim opekama iz nekontrolirane proizvodnje) u ovoj točki su ispitana svojstva. Strojno proizvedene opeke dostupne na tržištu uzorkovane su na stovarištima građevinskoga materijala u Osijeku, te dijelom na stovarištima građevinskoga materijala u Bosni i Hrecegovini te u Srbiji. Uzorkovanje ručno proizvedenih opeka izvodilo se na prostorima Baranje. Uzorkovane su stare opeke koje su izdvojene iz ruševnih objekata. Te stare opeke potječu iz nekadašnjih ciglana na prostoru Baranje, kojih je u to vrijeme bilo u većem broju nego danas. Radi utvrđivanja pojedinačnih svojstava i njihove međusobne usporedbe, svi uzorci opeke ispitani su prema normiranim metodama.

Iako europski propisi predviđaju provjeru otpornosti opeke na cikluse smrzavanja/odmrzavanja prema HRS CEN/TS 772-22 [79], zbog nedostatnoga broja opeka za izradu ispitnog zida prema navedenoj normi, kod opeka kontrolirane proizvodnje neposredna je otpornost na cikluse smrzavanja/odmrzavanja ovdje ispitana sukladno normi HRN B.D8.011 [182] na po pet uzoraka svake serije opeka.

Tlačne čvrstoće opeka određene su sukladno HRN EN 772-1 [78] (Slika 5.21) na seriji od po deset opeka prije i nakon smrzavanja, te su srednje vrijednosti tlačnih čvrstoća nakon i prije smrzavanja stavljene u omjer kako bi se dobio koeficijent kao kvantitativan pokazatelj otpornosti opeke na cikluse smrzavanja/odmrzavanja. Normna tlačna čvrstoća izračunata je sukladno Tablici A.1 norme HRN EN 772-1 [78].

Slika 5.21. Određivanje tlačne čvrstoće zidnih elemenata

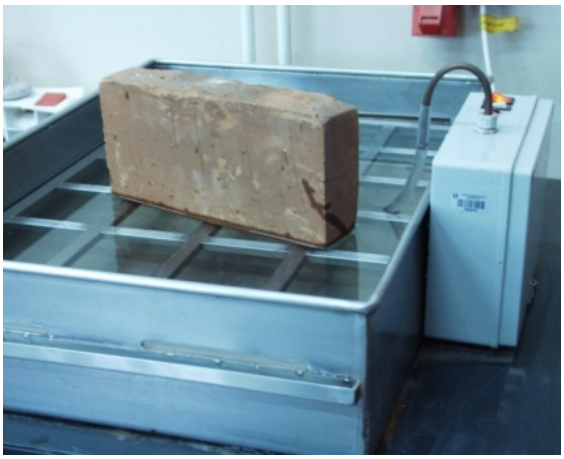
Vodoupojnost je ispitana u skladu s normom HRN EN 772-21 [20] a upijanje vode kuhanjem tijekom 5 sati sukladno normi HRN EN 772-7 [21]. Slika 5.22 a) prikazuje opeke za vrijeme izloženosti upijanju vode a Slika 5.22 b) vaganje opeka nakon što je film vode uklonjen s površine opeka. Slika 5.23 prikazuje kupelj u kojoj su se opeke kuhale za vrijeme ispitivanja upijanja kuhanjem 5h. Koeficijent zasićenja određen je kao omjer vodoupojnosti i upijanja pri kuhanju 5 h.

a) b)

Slika 5.22. Određivanje vodoupojnosti zidnih elemenata: a) potapanje opeka pod vodu na 24h; b) vaganje opeke na zraku

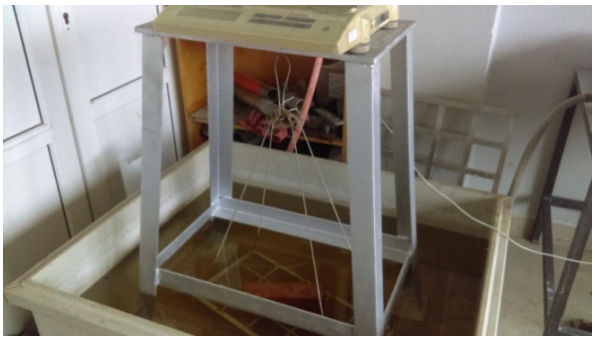
Slika 5.23. Ispitivanje vodoupojnosti kuhanjem zidnih elemenata

Početno upijanje vode određeno sukladno normi HRN EN 772-11 [77] a kako je to prikazano Slikom 5.24.



Slika 5.24. Određivanje kapilarne vodoupojnosti zidnih elemenata

Udio pora hidrostatskim vaganjem u opekama određen je na sljedeći način: $p=100*(\rho-\rho_{z(d)})/\rho$; $\rho=(m_d*\rho_w)/(m_d-m_{zw})$, $\rho_{z(d)}= (m_d*\rho_w)/(m_z-m_{zw})$, ρ_w= gustoća vode, m_d=masa potpuno suhe opeke, m_{zw}=masa opeke zasićene vodom i vagane pod vodom, m_z=masa opeke zasićene vodom i vagane na zraku. Postupak hidrostatskog vaganja opisan je u HRN EN 772-3 [74] a ovdje prikazano Slikom 5.25.



Slika 5.25. Određivanje postotka pora opečnih zidnih elemenata hidrostatskim vaganjem

Struktura pora i ukupna poroznost određeni su živinim porozimetrom što je opisano u poglavlju 5.1. a detaljan prikaz udjela pora pojedinih veličina za strojno rađene opeke nekontrolirane proizvodnje prikazan Tablicom 5.7 a za ručno rađene opeke nekontrolirane proizvodnje Tablicom 5.8.

Tablica 5.7. Distribucija pora u strojno rađenim opekama nekontrolirane proizvodnje

Uzorak/udio pora određene veličine (%)	Promjer pora (μm)																Udio krupnih, srednjih i sitnih pora; ukupna poroznost (%)
	Krupne					Srednje					Sitne						
	100-32	32-16	16--8	8--4	4--3	3--2	2--1	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,12	0,12-0,064	0,064-0,032	0,032-0,016	0,016-0,008	0,008-0,004	0,004-0,002	
OPEKA	0,7	0,4	0,7	0,7	1,7	25,3	29,0	14,3	9,7	7,6	3,6	4,4	1,2	0,7	0	0	4,2+85,9+9,9 37,7
NAPREDAK	0,8	0,6	1,1	2,5	10,4	36,4	22,9	16,1	6,2	2,3	0,5	0,2	0	0	0	0	15,4+83,9+0,7 46,11
MARIĆ BAU	2,1	0,4	0,5	0,2	0,6	0,2	1,6	31,4	21,9	16,9	5,9	5,8	5,8	5,9	0,7	0	3,8+71,9+24,3 30,07
IGM	1,1	0,5	0,6	0,3	0,3	0,4	1,8	35,3	14,5	18,4	6,9	7,2	11,4	1,3	0	0	2,8+70,4+26,8 30,77
DERVENTA	2,0	2,9	2,9	2,2	3,1	11,8	35,8	19,4	9,1	6,3	2,5	1,7	0,3	0	0	0	13,1+82,4+4,5 28,86
NOVA BOSNA	1,1	0,6	0,9	0,7	0,6	0,5	6,0	34,4	14,8	11,9	7,7	12,9	5,8	1,9	0,2	0	3,9+67,6+28,5 32,99
RUSTIK	1,4	0,7	2,5	16,6	34,9	15,3	15,4	7,4	3,2	1,9	0,4	0,3	0	0	0	0	56,1+43,2+0,7 34,42
VASA KUZMIN	0,7	0,5	0,6	0,3	0,3	0,3	5,4	36,5	14,8	11,1	3,9	8,3	15,2	2,1	0	0	2,4+68,1+29,5 32,34

Tablica 5.8. Distribucija pora u ručno rađenim opekama nekontrolirane proizvodnje

Uzorak/udio pora određene veličine (%)	Promjer pora (µm)																Udio krupnih, srednjih i sitnih pora; ukupna poroznost (%)
	Krupne					Srednje					Sitne						
	100-32	32-16	16--8	8--4	4--3	3--2	2--1	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,12	0,12-0,064	0,064-0,032	0,032-0,016	0,016-0,008	0,008-0,004	0,004-0,002	
AB	0,7	0,6	0,7	0,8	4,0	32,4	29,3	13,2	2,9	3,1	2,2	3,4	2,4	2,7	1,6	0,2	6,8+80,9+12,3 41,83
ĆIRILICA	0,6	0,5	1,4	5,0	45,9	23,5	12,3	5,2	3,3	1,1	1,1	0,1	0	0	0	0	53,4+45,4+1,2 39,43
KARANAC	0	0	0	0,5	0,1	30,1	31,9	6,9	12,9	1,9	8,9	5,1	1,7	0	0	0	0,6+83,7+15,7 18,99
JB	1,1	0,7	1,2	1,9	2,8	13,5	36,9	18,9	9,6	7,4	3,5	2,1	0,4	0	0	0	7,7+86,3+6,0 35,18
K	1,8	1,4	33	23,7	15,2	19,3	3,5	1,2	0,5	0,2	0,2	0	0	0	0	0	75,1+24,7+0,2 39,94
BF	1,3	1,0	2,1	29,6	28,4	17,6	16,2	2,9	0,6	0,3	0	0	0	0	0	0	62,4+37,6+0 39,94
OP1	0,9	0,6	1,3	15,3	40,5	16,8	13,5	7,0	2,5	1,1	0,3	0,2	0	0	0	0	58,6+40,9+0,5 41,91
OP2	0,7	0,5	0,7	2,0	8,5	29,0	32,1	17,9	6,0	1,8	0,5	0,3	0	0	0	0	12,4+86,8+0,8 41,46
OP3	1,4	1,1	1,4	9,3	32,8	17,7	17,9	9,4	4,9	1,9	1,1	0,8	0,3	0	0	0	46,0+51,8+2,2 38,19
OP4	1,8	1,2	19,3	40,5	23,0	6,8	3,8	2,1	1,2	0,3	0	0	0	0	0	0	85,8+14,2+0 45,25

Porozimetrom je određen i srednji radijus pora te ukupni volumen pora iz kojega je izračunat faktor trajnosti prema Maage-u kako je to opisano u poglavlju 5.1.

Specifične površine pora određene su niskotemperaturnom adsorpcijom BET metodom prema HRN ISO 9277 [118] na dijelu uzoraka iz kontrolirane proizvodnje na uređaju prikazanom Slikom 5.26. a) na Tehnološkom fakultetu u Novom Sadu a na svim uzorcima na uređaju prikazanom Slikom 5.27 na Građevinskom fakultetu u Osijeku. Ovdje treba naglasiti kako je priprema uzorka za ovo ispitivanje bila različita u ove dvije institucije i uvjetovana karakteristikama uređaja. Za potrebe ovoga ispitivanja uzorci ispitivani u Novom Sadu bili su oblika grumenčića kako je to prikazano Sliko 5.26 b). Priprema uzoraka u Novom Sadu, rađena je po sljedećem režimu: prije postupka "degasiranja" uzorci su sušeni u laboratorijskom sušioniku na 105°C u trajanju od najmanje 3 h; "degasiranje" je rađeno u dvije faze na eksternom uređaju za degasiranje – 1. faza: brzina zagrijevanja 5°C/min, maks. temperatura 105°C, vrijeme zadržavanja na maks. temperaturi 30 min; 2. faza: brzina zagrijavanja 5°C/min, maks. temperatura 250°C, vrijeme zadržavanja na maks. temperaturi 30 min. Analiza je rađena na uređaju Surfer Thermo Scientific, sa „LOW SURFACE" predefiniranim režimom snimanja adsorpcijske izoterme. U Osijeku su uzorci dobiveni usitnjavanjem opeke, te njezinim prosijavanjem na sitima veličine otvora 2 i 4 mm pri čemu su uzorak činili samo djelići opeke veličine 2-4 mm kako je to prikazano Slikom 5.28. Tako pripremljen uzorak podvrgnut je postupku "degasiranja" zagrijavanjem do 350 °C te je nakon dostignute temperature ostao na istoj 1h. Nakon postupka "degasiranja" uzorak je ostavljen da se postupno ohladi do sobne temperature pri kojoj mu je ispitana specifična površina ispitivanjem u pet točaka.

a)

b)

Slika 5.26. Ispitivanje specifične površine uzoraka na Tehnološkom fakultetu u Novom Sadu: a) izgled uređaja za BET analizu, b) izgled prosječnog ispitnog uzorka

a)

Slika 5.27. Prikaz BET uređaja sa Građevinskom i arhitektonskom fakultetu u Osijeku: a) izgled BET uređaja, b) uzorci opeke u epruvetama BET uređaj

a) b)

Slika 5.28 Izgled uzorka pripremljenog za BET uređaj Građevinskog i arhitektonskog fakultetu Osijeku: a) priprema uzorka prosijavanjem na sitima, b) konačan izgled sipitnog uzorka

Pojedinačni rezultati svih navedenih ispitivanja prikazani su Tablicom 5.9 dok su srednje vrijednosti rezultata ispitivanja za opeke kontrolirane proizvodnje prikazane Tablicom 5.10 a za opeke nekontrolirane proizvodnje strojnog načina izrade Tablicom 5.11 a za opeke nekontrolirane proizvodnje ručnog načina izrade Tablicom 5.12.

Tablica 5.9: Rezultati ispitivanja kontrolirane proizvodnje – srednje vrijednosti

Opeka	Proizvodnja (kontrolirana /nekontrolirana)	Način proizvodnje (ručna/strojna)	Otpornost prema HRN B.D8.011	Normna tlačna čvrstoća (N/mm2)	Vodoupojnost (%)	Koeficijent zasićenja	Omjer čvrstoća nakon i prije smrzavanja	Udio krupnih pora (%)	Udio pora srednje veličine (%)	Udio sitnih pora (%)	Ukupni udio pora (%)	Ukupni udio pora hidrostatskim vaganjem (%)	Specifična površina BET (m2/g)	Srednji radijus pora (µm)	Ukupni volumen pora (mm3/g)	Maage faktor	Koeficijent početnog upijanja (kg/m2 x min)	Upijanje u 0-10 min (%)	Upijanje u 10-20 min (%)	Upijanje u 20-30 min (%)	Koef. upijanja u 0-10 min (%/min)	Koef. upijanja 10-20 min (%/min)	Koef. upijanja 20-30 (%/min)	Upijena voda u 0-180 min (%)	Upijena voda u 180-360 min (%)	Upijena voda u 360-540 min (%)	Koef. otpuštanja u 0-180 min (%/min)	Koef. otpuštanja 180-360 min (%/min)	Koef. otpuštanja 360-540 min (%/min)
S1R1030-1,5h srednja vrijednost	kontrolirana	ručna	otporna	22,5	11,9	0,69	0,73	20,6	76,2	3,2	19,4	8,7	3,1	1,33	96,1	57,0	1,1	10,6	11,5	11,6	1,1	0,1	0,0	4,9	2,7	1,2	0,04	0,01	0,01
S1R1030-0,5h srednja vrijednost			otporna	20,3	12,3	0,75	0,72	11,2	84,8	4	20,4	9,2	3,65	1,31	113,1	56	2,0	11,5	12,1	12,1	1,2	0,1	0,0	6,0	3,7	1,7	0,03	0,01	0,01
S2R1060-1,5h srednja vrijednost			otporna	26,3	11,2	0,73	0,86	29,4	65,9	4,7	17,16	8,1	3,12	1,67	105,1	90	1,0	6,4	9,1	9,9	0,6	0,3	0,1	3,8	1,9	0,8	0,04	0,01	0,01
S2R1060-0,5h srednja vrijednost			otporna	24,8	11,4	0,75	0,85	15,9	78,7	5,4	17,8	8,5	3,65	1,66	109,3	61,0	1,8	8,1	10,4	10,8	0,8	0,2	0,0	4,7	2,1	0,5	0,04	0,01	0,01
S1S1030-1,5h srednja vrijednost		strojna	otporna	27,0	11,2	0,74	0,81	17,3	66,0	16,7	16,2	7,9	3,01	1,56	89,1	70,0	2,5	10,3	10,7	10,8	1,0	0,0	0,0	4,2	1,3	0,7	0,04	0,02	0,00
S1S1030-0,5h srednja vrijednost			otporna	24,8	11,8	0,75	0,79	15,8	72,8	11,4	19,1	8,6	3,29	1,47	107,5	63,0	2,8	10,8	11,1	11,4	1,1	0,0	0,0	4,4	1,7	0,5	0,04	0,02	0,01
S2S1060-1,5h srednja vrijednost			otporna	42,0	10,0	0,83	0,77	17,8	74,3	7,9	22,2	5,3	2,79	1,43	96,4	60,0	2,5	8,7	9,1	9,2	0,9	0,0	0,0	3,5	1,4	0,5	0,04	0,01	0,00
S2S1060-0,5h srednja vrijednost			otporna	35,4	10,4	0,84	0,75	2,2	86,4	11,4	28,3	5,5	3,40	1,40	147,0	56,0	2,5	8,4	9,3	9,4	0,8	0,1	0,0	3,6	1,4	0,8	0,04	0,01	0,00

Tablica 5.9: Rezultati ispitivanja opeke – srednje vrijednosti

Opeka	Proizvodnja (kontrolirana/nekontrolirana)	Način proizvodnje (ručna/strojna)	Otpornost prema HRN B.D8.011	Normna tlačna čvrstoća (N/mm2)	Vodoupojnost (%)	Koeficijent zasićenja	Omjer čvrstoća nakon i prije smrzavanja	Udio krupnih pora (%)	Udio pora srednje veličine (%)	Udio sitnih pora (%)	Ukupni udio pora (%)	Ukupni udio pora hidrostatskim vaganjem (%)	Specifična površina BET (m2/g)	Srednji radijus pora (µm)	Ukupni volumen pora (mm3/g)	Maage faktor	Koeficijent početnog upijanja (kg/m2 x min)	Upijanje u 0-10 min (%)	Upijanje u 10-20 min (%)	Upijanje u 20-30 min (%)	Koef. upijanja u 0-10 min (%/min)	Koef. upijanja 10-20 min (%/min)	Koef. upijanja 20-30 (%/min)	Upijena voda u 0-180 min (%)	Upijena voda u 180-360 min (%)	Upijena voda u 360-540 min (%)	Koef. otpuštanja u 0-180 min (%/min)	Koef. otpuštanja 180-360 min (%/min)	Koef. otpuštanja 360-540 min (%/min)
Rustik srednja vrijednost	nekontrolirana	strojna	otporna	27,7	12,6	0,93	0,89	56,1	43,2	0,7	34,4	6,0	2,90	1,45	207,5	139,0	2,7	11,3	11,7	11,9	1,1	0,0	0,0	5,8	2,8	0,3	0,04	0,02	0,01
Derventa srednja vrijednost			neotporna	15,2	13,4	0,75	0,72	13,1	82,4	4,5	28,9	9,0	2,81	0,51	153,4	53,0	1,3	7,0	9,4	10,4	0,7	0,2	0,1	5,6	1,8	0,5	0,04	0,02	0,01
Marić Bau srednja vrijednost			neotporna	28,7	14,0	0,75	0,71	3,8	71,9	24,3	30,1	8,0	2,40	0,26	168,5	42,0	1,4	7,6	11,1	12,6	0,8	0,4	0,2	6,2	1,6	0,3	0,04	0,03	0,01
Napredak srednja vrijednost			neotporna	8,0	24,2	0,77	0,70	15,4	83,9	0,7	46,1	10,0	3,13	1,01	370,5	41,0	6,3	23,6	23,8	23,8	2,4	0,0	0,0	11,8	7,7	3,4	0,07	0,02	0,02
Vasa Kuzmin srednja vrijednost			neotporna	27,8	14,1	0,74	0,69	2,4	68,1	29,5	32,3	8,0	4,00	0,05	813,3	24,0	1,6	6,6	9,4	10,4	0,7	0,3	0,1	7,7	2,5	1,4	0,04	0,03	0,01
IGM srednja vrijednost			neotporna	28,4	14,7	0,75	0,69	2,8	70,4	26,8	30,8	13,0	3,63	0,08	171,2	28,0	1,5	7,8	10,6	11,8	0,8	0,3	0,1	6,8	2,8	0,9	0,04	0,02	0,01
Nova Bosna srednja vrijednost			neotporna	27,9	13,6	0,76	0,68	3,9	67,6	28,5	33,0	11,0	2,95	0,09	183,2	19,0	1,5	8,2	11,1	12,3	0,8	0,3	0,1	7,7	2,6	2,0	0,03	0,03	0,00
Opeka srednja vrijednost			neotporna	17,7	18,2	0,77	0,68	4,2	85,9	9,9	37,7	13,0	2,36	0,25	232,5	24,0	2,6	13,4	16,3	16,9	1,3	0,3	0,1	8,0	4,0	2,1	0,06	0,02	0,01

Tablica 5.9: Rezultati ispitivanja opeke – srednje vrijednosti

Opeka	Proizvodnja (kontrolirana /nekontrolirana)	Način proizvodnje (ručna/strojna)	Otpornost prema HRN B.D8.011	Normna tlačna čvrstoća (N/mm2)	Vodoupojnost (%)	Koeficijent zasićenja	Omjer čvrstoća nakon i prije smrzavanja	Udio krupnih pora (%)	Udio pora srednje veličine (%)	Udio sitnih pora (%)	Ukupni udio pora (%)	Ukupni udio pora hidrostatskim vaganjem (%)	Specifična površina BET (m2/g)	Srednji radijus pora (µm)	Ukupni volumen pora (mm3/g)	Maage faktor	Koeficijent početnog upijanja (kg/m2 x min)	Upijanje u 0-10 min (%)	Upijanje u 10-20 min (%)	Upijanje u 20-30 min (%)	Koef. upijanja u 0-10 min (%/min)	Koef. upijanja 10-20 min (%/min)	Koef. upijanja 20-30 (%/min)	Upijena voda u 0-180 min (%)	Upijena voda u 180-360 min (%)	Upijena voda u 360-540 min (%)	Koef. otpuštanja u 0-180 min (%/min)	Koef. otpuštanja 180-360 min (%/min)	Koef. otpuštanja 360-540 min (%/min)
AB srednja vrijednost	nekontrolirana	ručna	-	-	-	-	-	6,8	80,9	12,3	41,8	-	4,13	0,10	-	27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ćirilica srednja vrijednost			-	-	-	-	-	53,4	45,4	1,2	39,4	-	2,85	0,77	-	59	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
OP 1 srednja vrijednost			-	-	-	-	-	58,6	40,9	0,5	41,9	-	4,94	1,67	-	136	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
OP2 srednja vrijednost			-	-	-	-	-	12,4	86,8	0,8	41,5	-	3,12	1,09	-	36	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
OP3 srednja vrijednost			-	-	-	-	-	46	51,8	2,2	38,2	-	3,18	1,01	-	99	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
OP4 srednja vrijednost			-	-	-	-	-	85,8	14,2	0	45,3	-	3,22	2,27	-	192	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Karanac srednja vrijednost			-	-	-	-	-	0,6	83,7	15,7	19	-	2,72	0,85	-	210	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
JB srednja vrijednost			-	-	-	-	-	7,7	86,3	6	35,18	-	2,90	0,4145	-	35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tablica 5.9: Rezultati ispitivanja opeke – srednje vrijednosti

Opeka	Proizvodnja (kontrolirana/ nekontrolirana)	Način proizvodnje (ručna/strojna)	Otpornost prema HRN B.D8.011	Normna tlačna čvrstoća (N/mm2)	Vodoupojnost (%)	Koeficijent zasićenja	Omjer čvrstoća nakon i prije smrzavanja	Udio krupnih pora (%)	Udio pora srednje veličine (%)	Udio sitnih pora (%)	Ukupni udio pora (%)	Ukupni udio pora hidrostatskim vaganjem (%)	Specifična površina BET (m2/g)	Srednji radijus pora (µm)	Ukupni volumen pora (mm3/g)	Maage faktor	Koeficijent početnog upijanja (kg/m2 x min)	Upijanje u 0-10 min (%)	Upijanje u 10-20 min (%)	Upijanje u 20-30 min (%)	Koef. upijanja u 0-10 min (%/min)	Koef. upijanja 10-20 min (%/min)	Koef. upijanja 20-30 (%/min)	Upijena voda u 0-180 min (%)	Upijena voda u 180-360 min (%)	Upijena voda u 360-540 min (%)	Koef. otpuštanja u 0-180 min (%/min)	Koef. otpuštanja 180-360 min (%/min)	Koef. otpuštanja 360-540 min (%/min)
BF srednja vrijednost	nekontrolirana	ručna	-	-	-	-	-	62,4	37,6	0	39,94	-	2,97	2,41		150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
K srednja vrijednost			-	-	-	-	-	75,1	24,7		39,94	-	9,06	2,80		187	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tablica 5.10. Svojstva strojno i ručno rađene opeke kontrolirane proizvodnje

Oznaka uzorka/Ispitano svojstvo	S1R1030 -1,5h	S1R1030 -0,5h	S2R1060 -1,5h	S2R1060 -0,5h	S1S1030-1,5h	S1S1030-0,5h	S2S1060-1,5h	S2S1060-0,5h
Neposredna otpornost na cikluse smrzavanja i odmrzavanja	otporna	otporna	otporna	otporna	otporna	otporna	otporna	otporna
Normna tlačna čvrstoća (N/mm2)	22,5	20,3	26,3	24,8	27	24,8	42	35,4
Tlačna čvrstoća (N/mm2)	30	27	35	33	36	33	56	47
Tlačna čvrstoća nakon smrzavanja (N/mm2)	22	19,5	30	28	29	26	43	35
Omjer tlačnih čvrstoća nakon i prije ciklusa smrzavanja/ odmrzavanja (%)	0,73	0,72	0,86	0,85	0,81	0,79	0,77	0,75
Vodoupojnost (%)	11,9	12,3	11,2	11,4	11,2	11,8	10,0	10,4
Upijanje kuhanjem 5h (%)	16,3	16,9	13,0	13,4	13,7	14,7	12,9	13,6
Koeficijent zasićenja	0,69	0,76	0,73	0,75	0,74	0,75	0,83	0,84
Koeficijent početnog upijanja [kg/(m^2 x min)]	1,1	2,0	1,0	1,8	2,5	2,8	2,5	2,5
Udio pora (hidrostatskim vaganjem) (%)	8,7	9,2	8,1	8,5	7,9	8,6	5,3	5,5
Udio krupnih, srednjih i sitnih pora; ukupni udio pora (%)	20,6+76, 2+3,2; 19,4	11,2+84, 8+4,0; 20,4	29,4+65, 9+4,7; 17,2	15,9+78, 7+5,4; 17,8	17,3+66,0 +16,7; 16,23	15,8+72,8 +11,4; 19,1	17,8+74, 3+7,9; 22,2	2,2+86,4 +11,4; 28,3
Srednji radijus pora (μm)	1,33	1,31	1,67	1,66	1,56	1,47	1,43	1,40
Ukupni volumen pora (mm^3/g)	96,1	113,1	105,1	109,3	89,1	107,5	96,4	147
Faktor trajnosti prema Maage	57	56	90	61	70	63	60	56
Specifične površine (m^2/g)*	0,046	0,344	0,067	0,209	0,87	0,145	1,24	1,43
Specifične površine (m^2/g)**	3,1	3,65	3,12	3,65	3,01	3,29	2,79	3,40

*određeno na Tehnološkom fakultetu u Novom Sadu **određeno na Građevinskom fakultetu u Osijeku

Tablica 5.11. Svojstva strojno rađene opeke nekontrolirane proizvodnje

Oznaka uzorka/Ispitano svojstvo	OPEKA	NAPREDAK	MARIĆ BAU	IGM	DERVENTA	NOVA BOSNA	RUSTIK	VASA KUZMIN
Neposredna otpornost na cikluse smrzavanja i odmrzavanja	neotporna	neotporna	neotporna	neotporna	neotporna	neotporna	otporna	neotporna
Normna tlačna čvrstoća (N/mm2)	17,7	8,0	28,7	28,4	15,2	27,9	27,7	27,8
Tlačna čvrstoća (N/mm2)	23,6	10,7	38,2	37,9	20,3	37,2	36,9	37,1
Tlačna čvrstoća nakon smrzavanja (N/mm2)	16,1	7,5	27,2	26,2	14,6	25,2	32,8	25,5
Omjer tlačnih čvrstoća nakon i prije ciklusa smrzavanja/ odmrzavanja /(%)	0,68	0,70	0,71	0,69	0,72	0,68	0,89	0,69
Vodoupojnost (%)	18,2	24,2	14,0	14,7	13,4	13,6	12,6	14,1
Upijanje kuhanjem 5h (%)	23,6	31,49	18,6	19,6	17,8	17,9	13,6	20
Koeficijent zasićenja	0,77	0,77	0,75	0,75	0,75	0,76	0,93	0,74
Koeficijent početnog upijanja [kg/(m^2 x min)]	2,6	6,3	1,4	1,5	1,3	1,5	2,7	1,6
Udio pora (hidrostatskim vaganjem) (%)	13,0	10,0	8,0	13,0	9,0	11,0	6,0	8,0
Udio krupnih, srednjih i sitnih pora; ukupni udio pora (%)	4,2+85,9+ 9,9; 37,7	15,4+83,9+ 0,7; 46,1	3,8+71,9+ 24,3; 30,1	2,8+70,4+ 26,8; 30,8	13,1+82,4 +4,5; 28,9	3,9+67,6+ 28,5; 33,0	56,1+43,2 +0,7; 34,42	2,4+68,1+ 29,5; 32,34
Srednji radijus pora (µm)	0,25	1,01	0,26	0,08	0,51	0,09	1,45	0,05
Ukupni volumen pora (mm^3/g)	232,5	370,5	168,5	171,2	153,4	183,2	207,5	813,3
Faktor trajnosti prema Maage	24	41	42	28	53	19	139	24
Specifične površine** (m^2/g)	2,36	3,13	2,40	3,63	2,81	2,95	2,90	4,00

**određeno na Građevinskom fakultetu u Osijeku

Tablica 5.12. Svojstva ručno rađene opeke nekontrolirane proizvodnje

Oznaka uzorka/ Ispitano svojstvo	AB	ĆIRILICA	KARANAC	JB	K	BF	OP1	OP2	OP3	OP4
Udio krupnih, srednjih i sitnih pora; ukupni udio pora (%)	6,8+80,9+ 12,3; 41,8	53,4+45,4 +1,2; 39,4	0,6+83,7 +15,7; 19,0	7,7+86,3 +6,0; 35,2	75,1+24,7 +0,2; 39,9	62,4+37, 6+0; 39,9	58,6+40,9 +0,5; 41,9	12,4+86,8 +0,8; 41,5	46,0+51,8 +2,2; 38,2	85,8+14, 2+0; 45,3
Srednji radijus pora (μm)	0,10	0,77	0,85	0,41	2,8	2,41	1,67	1,09	1,01	2,27
Ukupni volumen pora (mm^3/g)	279	246,3	92,6	205,3	269,9	251,8	272,5	264,4	238,9	312,1
Faktor trajnosti prema Maage	27	59	210	35	187	150	136	36	99	192
Specifične površine (m^2/g)**	4,13	2,85	2,72	2,90	9,06	2,97	4,94	3,12	3,18	3,22

**određeno na Građevinskom fakultetu u Osijeku

Obzirom kako u Tablici 5.12. polovica opeka ima vrijednosti Maage koeficijenta značajno iznad onih prikazanih Tablicom 5.10 i Tablicom 5.11., sumnja se kako je kod ovih opeka koje su prethodno bile izložene ciklusima smrzavanja/odmrzavanja došlo do promjena u sustavu pora te kod njih u nastavku nisu ispitani svi oni parametri koji su ispitani kod opeka kontrolirane proizvodnje i kod strojno izrađenih opeka nekontrolirane proizvodnje.

Nadalje, na svakoj seriji opeka mjereno je upijanje i otpuštanje vode u vremenu. Za mjerenje upijanja vode opeke su prethodno osušene do potpuno suhoga stanja a nakon toga potopljene u vodu na period od 10, 20, 30, 40, 50, 100, 150 i 1440 minuta. Nakon svakoga vađenja iz vode i prije samoga vaganja, površinska vlažnost u obliku filma vode koji obavija opeku uklonjena je brisanjem krpom. Količina upijene vode u datom trenutku izražena je u postotku za svaku opeku a krivulje upijanja vode prikazane Slikama 5.29 i 5.30 prikazuju srednje vrijednosti upijanja svih opeka u seriji. Za mjerenje otpuštanja vode, opeke su potopljene pod vodu na 24 sata. Nakon 24 sata opeke su izvađene iz vode, površina im je obrisana suhom krpom, te su izvagane i stavljene u sušionik na 105°C. U periodima od 0, 180, 360, 540, 720,

900, 1260 i 1440 minuta opeke su izvađene iz sušionika i izvagane te im je izračunat postotak preostale vlage. Srednje vrijednosti preostalih vlažnosti, izražene u postotku, svih opeka u datom trenutku su prikazane Slikama 5.29 i 5.30 kao krivulje otpuštanja vode. Tablicom 5.13. prikazane su pojedinačne vrijednosti upijanja vode u cijelome vremenskome intervalu, a vrijednosti upijanja za 10, 20 i 30 minuta te otpuštanja za 180, 360 i 540 minuta su obuhvaćene dodatno Tablicom 5.9.

Tablica 5.13. Pojedinačne vrijednosti upijanja opeka

S1R1030-1,5h									
T(min)	**0**	**10**	**20**	**30**	**40**	**50**	**100**	**150**	**1440**
1	0,0	10,8	11,4	11,5	11,6	11,6	11,6	11,6	11,9
2	0,0	10,4	11,5	11,6	11,6	11,7	11,7	11,7	11,9
3	0,0	10,8	11,5	11,6	11,7	11,7	11,7	11,7	11,9
4	0,0	10,7	11,5	11,6	11,7	11,7	11,7	11,7	11,9
5	0,0	10,7	11,5	11,6	11,6	11,6	11,6	11,7	11,9
6	0,0	10,5	11,5	11,5	11,5	11,6	11,6	11,7	11,8
7	0,0	10,6	11,4	11,5	11,6	11,6	11,6	11,6	11,9
8	0,0	10,4	11,4	11,5	11,6	11,7	11,7	11,7	11,9
9	0,0	10,3	11,4	11,5	11,7	11,7	11,7	11,7	11,8
10	0,0	10,5	11,4	11,6	11,7	11,7	11,7	11,7	11,9
Srednje upijanje (%)	**0,0**	**10,6**	**11,5**	**11,6**	**11,6**	**11,6**	**11,6**	**11,7**	**11,9**
S1R1030-0,5h									
T(min)	**0**	**10**	**20**	**30**	**40**	**50**	**100**	**150**	**1440**
1	0,0	12,2	12,7	12,8	12,8	12,8	12,9	12,9	12,9
2	0,0	12,2	12,6	12,6	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7
3	0,0	11,2	12,0	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1
4	0,0	12,1	12,6	12,7	12,7	12,8	12,8	12,8	12,8
5	0,0	12,0	12,3	12,4	12,4	12,4	12,4	12,4	12,4
6	0,0	12,8	13,0	13,0	13,0	13,0	13,1	13,1	13,1
7	0,0	12,1	12,5	12,5	12,6	12,6	12,6	12,6	12,6
8	0,0	10,9	11,8	11,8	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9
9	0,0	9,5	10,5	10,7	10,9	10,9	10,9	10,9	10,9
10	0,0	10,8	11,4	11,6	11,6	11,6	11,7	11,7	11,7
11	0,0	12,7	12,9	12,9	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0
12	0,0	10,8	11,3	11,4	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5
13	0,0	11,3	12,3	12,3	12,3	12,4	12,4	12,4	12,4
14	0,0	11,4	11,9	12,0	12,1	12,1	12,1	12,1	12,2
15	0,0	12,5	12,7	12,7	12,8	12,8	12,8	12,8	12,8
16	0,0	9,9	10,6	10,8	10,9	10,9	11,0	11,0	11,0
Srednje upijanje (%)	**0,0**	**11,5**	**12,1**	**12,1**	**12,2**	**12,2**	**12,2**	**12,2**	**12,2**
S2R1060-1,5h									
T(min)	**0**	**10**	**20**	**30**	**40**	**50**	**100**	**150**	**1440**
1	0,0	6,6	9,8	10,4	10,5	10,7	10,7	10,8	11,2
2	0,0	8,5	9,7	10,6	10,7	10,9	10,9	10,9	11,3
3	0,0	5,4	9,6	10,3	10,5	10,7	10,7	10,7	11,2
4	0,0	5,4	5,8	6,5	10,2	10,6	10,7	10,7	11,2
5	0,0	5,7	9,6	10,3	10,4	10,6	10,7	10,7	11,2
6	0,0	7,3	9,5	10,6	10,8	10,9	10,9	10,9	11,4
7	0,0	5,6	9,4	10,4	10,5	10,6	10,6	10,6	11,2
8	0,0	6,3	9,3	10,1	10,4	10,7	10,7	10,7	11,0
9	0,0	6,3	9,2	10,1	10,3	10,5	10,6	10,6	11,3
10	0,0	6,4	9,3	10,1	10,2	10,5	10,6	10,6	11,4
Srednje upijanje (%)	**0,0**	**6,4**	**9,1**	**9,9**	**10,5**	**10,7**	**10,7**	**10,7**	**11,2**

Tablica 5.13. Pojedinačne vrijednosti upijanja opeka

S2R1060-0,5h									
T(min)	**0**	**10**	**20**	**30**	**40**	**50**	**100**	**150**	**1440**
1	0,0	8,1	10,2	10,5	10,7	10,7	10,7	10,8	11,0
2	0,0	8,2	10,7	10,9	10,9	11,2	11,3	11,6	11,2
3	0,0	7,9	10,3	10,8	10,9	11,0	11,0	11,1	11,3
4	0,0	8,2	10,6	10,9	10,9	11,1	11,1	11,1	11,4
5	0,0	8,1	10,6	10,9	11,0	11,1	11,2	11,2	11,5
6	0,0	8,7	10,5	10,7	10,8	10,8	10,9	11,1	11,7
7	0,0	8,3	10,5	10,8	10,9	10,9	11,0	11,0	11,2
8	0,0	7,0	9,6	10,6	10,7	10,7	10,9	11,0	11,5
9	0,0	8,3	10,4	10,7	10,7	10,8	10,9	11,0	11,5
10	0,0	8,4	10,6	10,9	11,0	11,3	11,3	11,3	11,6
11	0,0	8,1	9,4	10,0	10,3	10,7	10,7	10,7	11,0
12	0,0	7,8	10,2	10,5	10,5	10,6	10,7	10,7	11,5
13	0,0	7,9	9,2	10,0	10,3	10,7	10,8	10,8	11,4
Srednje upijanje (%)									
S2R1060-0,5h									
14	0,0	8,5	10,9	11,0	11,0	11,0	11,1	11,1	11,3
15	0,0	7,8	10,9	11,1	11,1	11,2	11,4	11,4	11,4
16	0,0	7,8	10,0	11,2	10,4	10,5	10,5	10,5	11,5
17	0,0	8,0	10,0	11	10,6	10,9	10,9	11,0	11,3
18	0,0	8,0	10,0	11,1	10,7	10,7	10,8	10,8	11,5
19	0,0	8,0	10,5	11	11,2	11,3	11,3	11,3	11,6
20	0,0	7,9	10,0	11	10,5	10,7	10,8	10,8	11,7
Srednje upijanje (%)	**0,0**	**8,1**	**10,4**	**10,8**	**10,8**	**10,9**	**11,0**	**11,0**	**11,4**
S1S1030-1,5h									
T(min)	**0**	**10**	**20**	**30**	**40**	**50**	**100**	**150**	**1440**
1	0,0	10,3	10,4	10,5	10,5	10,5	10,6	10,6	10,7
2	0,0	9,6	9,9	10,0	10,0	10,1	10,1	10,1	10,4
3	0,0	9,8	9,9	10,0	10,0	10,0	10,1	10,1	10,4
4	0,0	10,6	11,9	11,9	11,9	11,9	12,0	12,0	12,4
5	0,0	10,0	10,2	10,2	10,2	10,3	10,3	10,4	10,7
6	0,0	10,4	10,6	10,7	10,7	10,7	10,8	10,8	11,3
7	0,0	11,1	11,2	11,2	11,3	11,3	11,3	11,4	11,6
8	0,0	9,6	10,1	10,1	10,1	10,1	10,2	10,2	11,7
9	0,0	11,2	11,5	11,5	11,5	11,6	11,6	11,7	11,8
10	0,0	10,6	11,5	11,5	11,5	11,6	11,6	11,7	11,8
11,0	0,0	10,5	11,0	11,0	11,1	11,1	11,1	11,2	10,2
Srednje upijanje (%)	**0,0**	**10,3**	**10,7**	**10,8**	**10,8**	**10,8**	**10,9**	**10,9**	**11,2**
S1S1030-0,5h									
T(min)	**0**	**10**	**20**	**30**	**40**	**50**	**100**	**150**	**1440**
1	0,0	11,1	11,5	12,7	12,8	12,8	12,8	12,8	13,1
2	0,0	10,3	10,4	10,5	10,5	10,5	10,6	10,6	10,7
3	0,0	9,6	9,7	10,0	10,0	10,1	10,1	10,1	10,4
4	0,0	11,5	11,7	12,1	12,2	12,2	12,2	12,3	12,7
5	0,0	9,8	9,9	10,0	10,0	10,0	10,1	10,1	10,4
6	0,0	10,9	11,9	11,9	11,9	11,9	12,0	12,0	12,4

Tablica 5.13. Pojedinačne vrijednosti upijanja opeka

S1S1030-0,5h									
7	0,0	12,9	13,0	13,1	13,1	13,1	13,2	13,4	13,5
8	0,0	10,0	10,2	10,2	10,2	10,3	10,3	10,4	10,7
9	0,0	10,4	10,6	10,7	10,7	10,7	10,8	10,8	11,3
10	0,0	11,1	11,2	11,2	11,3	11,3	11,3	11,4	11,6
11	0,0	11,3	11,6	12,3	12,4	12,4	12,4	12,5	12,6
12	0,0	10,9	10,1	10,1	10,1	10,1	10,2	10,2	10,4
13	0,0	11,2	11,5	11,5	11,5	11,6	11,6	11,7	12,0
14	0,0	10,6	11,5	11,5	11,5	11,6	11,6	11,7	12,0
15	0,0	11,5	11,1	12,8	12,8	12,9	12,9	13,0	13,0
16	0,0	10,5	11,0	11,0	11,1	11,1	11,1	11,2	11,3
Srednje upijanje (%)	**0,0**	**10,8**	**11,1**	**11,4**	**11,4**	**11,4**	**11,5**	**11,5**	**11,8**
S2S1060-1,5h									
T(min)	**0**	**10**	**20**	**30**	**40**	**50**	**100**	**150**	**1440**
1	0,0	9,0	9,8	9,9	9,9	9,9	10,0	10,0	10,3
2	0,0	8,0	8,5	8,6	8,7	8,8	9,0	9,3	9,8
3	0,0	7,9	8,2	8,2	8,2	8,9	9,3	9,4	10,0
4	0,0	8,9	9,2	9,3	9,3	9,3	9,4	9,4	9,7
5	0,0	9,0	9,8	9,9	9,9	10,0	10,0	10,0	10,3
6	0,0	7,8	8,1	8,3	8,5	8,7	8,8	8,9	8,9
7	0,0	8,8	9,2	9,2	9,3	9,3	9,4	9,5	9,8
8	0,0	9,3	9,7	9,8	9,9	9,9	10,0	10,1	10,4
9	0,0	8,9	9,0	9,1	9,2	9,3	9,3	9,6	10,5
10	0,0	9,2	9,7	9,7	9,8	9,8	9,9	9,9	10,4
Srednje upijanje (%)	**0,0**	**8,7**	**9,1**	**9,2**	**9,3**	**9,4**	**9,5**	**9,6**	**10,0**
S2S1060-0,5h									
T(min)	**0**	**10**	**20**	**30**	**40**	**50**	**100**	**150**	**1440**
1	0,0	8,4	9,6	9,6	9,7	9,7	9,9	9,9	10,3
2	0,0	8,0	9,0	9,1	9,1	9,1	9,3	9,4	9,8
Srednje upijanje (%)	**0,0**	**8,2**	**9,3**	**9,4**	**9,4**	**9,4**	**9,6**	**9,7**	**10,1**
S2S1060-0,5h									
3	0,0	8,2	9,4	9,5	9,5	9,5	9,7	9,7	10,2
4	0,0	8,0	9,0	9,1	9,1	9,1	9,2	9,4	9,7
5	0,0	8,1	9,0	9,0	9,0	9,1	9,2	9,3	10,3
6	0,0	8,1	9,7	9,9	9,9	9,9	10,0	10,1	10,9
7	0,0	8,6	10,2	10,3	10,3	10,4	10,5	10,7	11,3
8	0,0	7,9	8,6	8,9	8,9	9,1	9,3	9,3	9,6
9	0,0	8,3	9,5	9,5	9,6	9,7	9,9	9,9	10,4
10	0,0	9,0	9,8	9,9	9,9	10,0	10,1	10,5	10,8
11	0,0	8,0	9,1	9,1	9,1	9,1	10,4	10,4	10,6
12	0,0	8,1	9,4	9,4	9,4	9,4	9,7	9,7	10,3
13	0,0	8,2	8,9	9,0	9,0	9,1	9,2	9,3	9,7
14	0,0	8,2	9,2	9,2	9,2	9,3	9,7	9,7	10,1
15	0,0	9,1	9,4	9,5	9,6	9,6	10,0	11,0	11,4
16	0,0	8,5	8,8	8,8	8,8	8,9	9,1	9,1	9,4
17	0,0	7,9	9,3	9,4	9,4	9,4	9,6	9,6	9,8
18	0,0	8,5	8,8	8,9	9,1	9,7	10,0	10,5	10,6
19	0,0	9,9	10,5	10,6	10,6	10,6	10,8	10,9	11,2
20	0,0	8,8	9,7	9,7	9,8	9,9	10,1	10,1	10,7
Srednje upijanje (%)	**0,00**	**8,4**	**9,3**	**9,4**	**9,5**	**9,6**	**9,8**	**9,9**	**10,4**

Tablica 5.13. Pojedinačne vrijednosti upijanja opeka

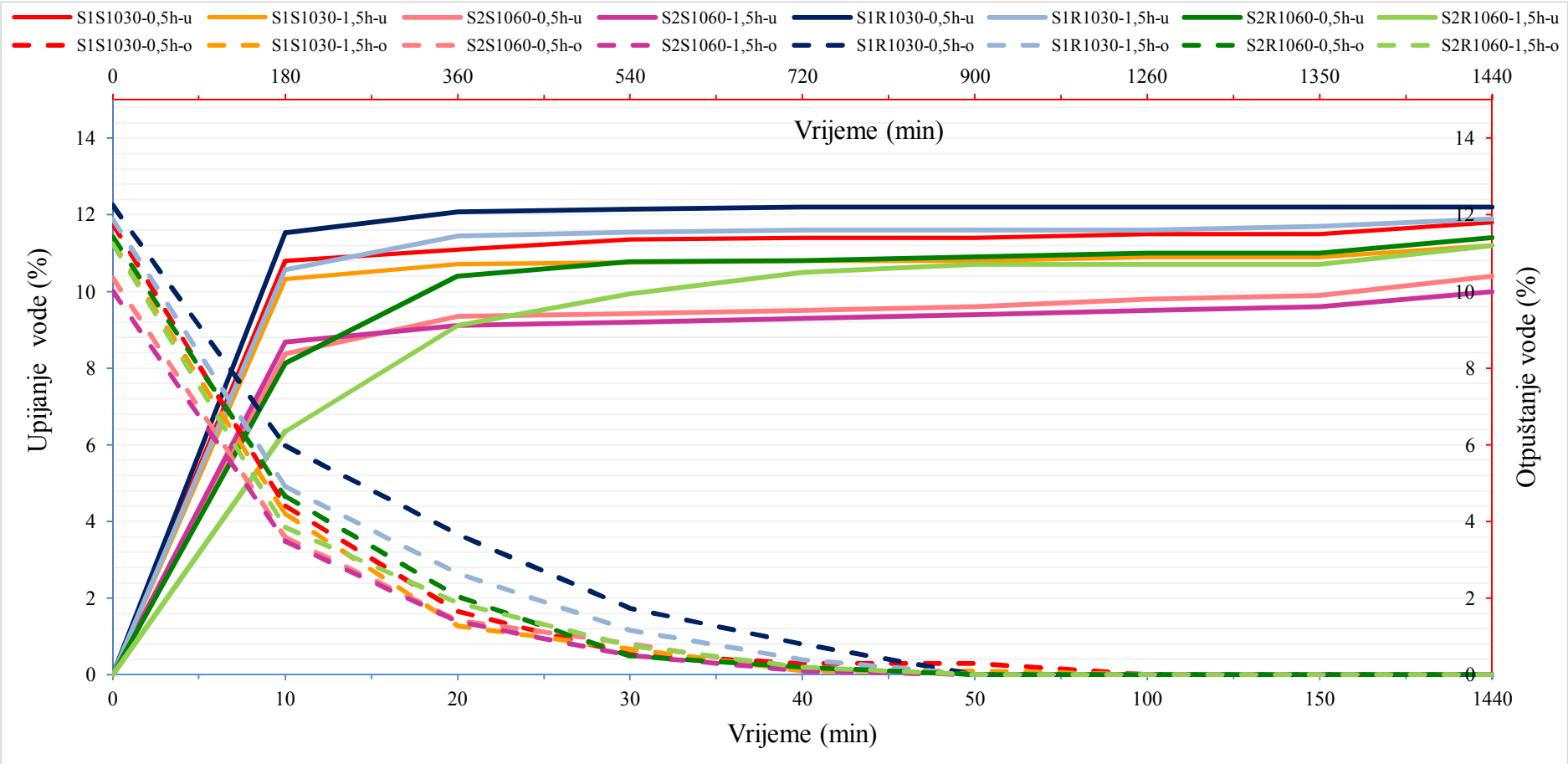
Rustik									
T(min)	**0**	**10**	**20**	**30**	**40**	**50**	**100**	**150**	**1440**
1	0,0	7,4	7,6	7,7	7,7	7,8	7,9	8,0	8,6
2	0,0	9,8	10,1	10,2	10,3	10,3	10,4	10,5	11,1
3	0,0	10,8	11,1	11,3	11,3	11,4	11,5	11,6	12,0
4	0,0	9,0	9,3	9,4	9,4	9,5	9,7	9,8	10,3
5	0,0	14,4	14,6	14,7	14,8	14,8	14,9	15,0	15,1
6	0,0	16,8	17,4	17,4	17,5	17,5	17,6	17,7	17,9
7	0,0	13,6	14,4	14,6	14,6	14,8	14,9	15,1	15,4
8	0,0	6,8	6,8	7,0	7,0	7,1	7,2	7,3	7,7
9	0,0	14,0	15,7	16,0	16,2	16,2	16,3	16,5	16,9
10	0,0	10,1	10,3	10,4	10,5	10,6	10,7	10,8	11,1
Srednje upijanje (%)	**0,0**	**11,3**	**11,7**	**11,9**	**11,9**	**12,0**	**12,1**	**12,2**	**12,6**
Derventa									
T(min)	**0**	**10**	**20**	**30**	**40**	**50**	**100**	**150**	**1440**
1	0,0	9,8	12,4	13,0	13,3	13,4	13,6	13,7	13,8
2	0,0	7,4	10,0	11,3	12,0	12,5	13,5	14,0	14,0
3	0,0	7,3	9,6	10,5	11,0	11,2	11,5	11,5	11,8
4	0,0	6,3	8,7	10,0	10,9	11,6	12,9	13,6	13,7
5	0,0	10,3	11,6	11,6	11,8	11,8	11,9	12,1	12,3
6	0,0	5,6	9,5	9,6	11,0	11,9	13,7	14,0	14,1
7	0,0	5,0	7,5	8,8	10,1	11,3	13,4	14,4	14,4
8	0,0	5,8	8,6	10,1	11,7	12,8	14,3	14,4	14,6
9	0,0	5,4	6,4	8,9	10,3	11,3	13,3	14,3	14,3
10	0,0	6,9	9,5	10,5	10,7	10,8	11,0	11,1	11,1
Srednje upijanje (%)	**0,0**	**7,0**	**9,4**	**10,4**	**11,3**	**11,9**	**12,9**	**13,3**	**13,4**
Marić Bau									
T(min)	**0**	**10**	**20**	**30**	**40**	**50**	**100**	**150**	**1440**
1,0	0,0	7,6	11,3	12,8	13,0	13,0	13,0	13,2	13,9
2,0	0,0	7,4	10,7	12,2	13,2	13,5	13,5	13,7	14,2
3,0	0,0	7,1	11,0	12,9	13,3	13,4	13,4	13,6	14,1
4,0	0,0	6,1	9,5	11,3	11,9	12,0	12,0	12,2	12,6
5,0	0,0	7,3	11,2	12,9	13,2	13,2	13,2	14,0	14,0
6,0	0,0	7,4	10,8	12,6	13,3	13,5	13,5	14,2	14,2
7,0	0,0	6,7	9,7	11,0	11,3	11,4	11,5	11,7	12,1
8,0	0,0	8,0	11,2	12,9	13,5	13,5	13,5	13,7	14,3
9,0	0,0	8,0	11,2	12,4	12,6	12,6	12,6	12,8	13,4
10,0	0,0	8,9	12,6	14,0	14,2	14,2	14,2	15,5	15,0
11,0	0,0	7,4	11,0	12,7	13,6	14,1	14,1	14,3	15,1
12,0	0,0	7,8	11,0	12,6	13,4	13,5	13,5	13,5	15,6
13,0	0,0	8,6	12,4	13,8	14,0	14,1	14,1	11,0	15,0
14,0	0,0	7,4	10,5	12,0	12,2	12,3	12,3	16,3	13,0
Srednje upijanje (%)									
Marić Bau									
15,0	0,0	5,9	8,8	10,6	11,9	12,8	12,8	11,0	14,2
16,0	0,0	7,5	11,2	12,8	13,1	13,1	13,2	13,4	13,9
17,0	0,0	7,4	10,7	12,2	12,8	12,9	12,9	13,1	13,7
18,0	0,0	8,7	11,9	12,6	12,7	12,7	12,7	12,9	13,7
Srednje upijanje (%)	**0,0**	**7,5**	**10,9**	**12,5**	**13,0**	**13,1**	**13,1**	**13,3**	**14,0**

Tablica 5.13. Pojedinačne vrijednosti upijanja opeka

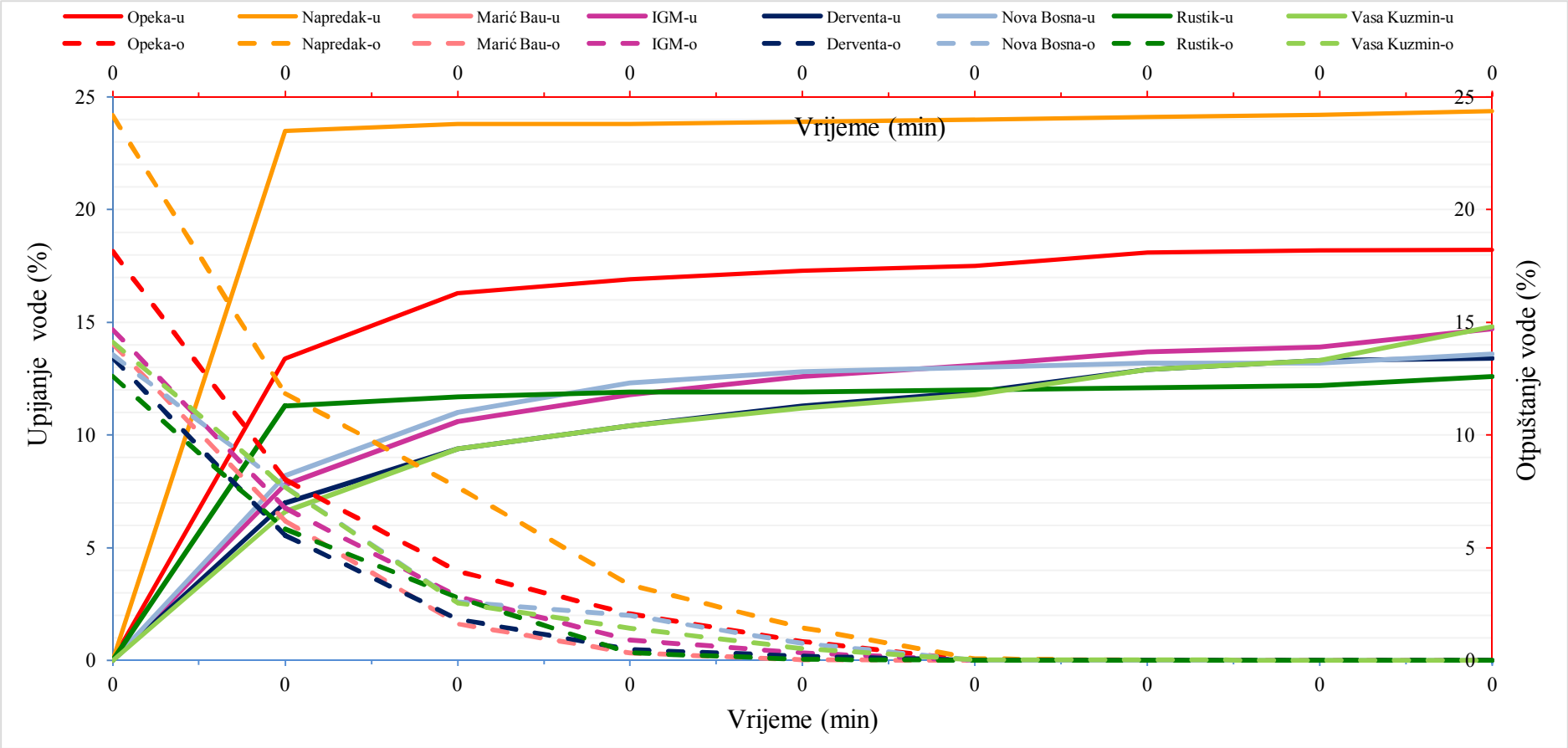
S2S1060-0,5h									
19,0	0,0	7,3	11,2	12,7	12,8	12,8	12,8	13,0	13,6
20,0	0,0	7,9	11,9	13,3	13,4	13,5	13,5	13,7	14,3
21,0	0,0	8,2	12,1	13,1	13,2	13,3	13,3	13,1	14,1
22,0	0,0	7,2	10,8	12,6	13,4	13,6	13,7	13,5	14,4
23,0	0,0	7,7	11,1	12,3	12,5	12,6	12,6	12,8	13,3
24,0	0,0	7,5	11,3	12,8	12,9	12,9	12,9	13,0	13,8
25,0	0,0	8,1	11,7	13,2	13,8	14,0	14,0	14,2	14,5
26,0	0,0	8,6	12,4	13,7	13,8	13,9	13,9	14,1	14,1
27,0	0,0	6,6	9,7	11,5	12,6	13,2	13,2	13,4	15,1
Srednje upijanje (%)	**0,0**	**7,6**	**11,1**	**12,6**	**13,0**	**13,2**	**13,2**	**13,4**	**14,0**
Napredak									
T(min)	**0**	**10**	**20**	**30**	**40**	**50**	**100**	**150**	**1440**
1	0,0	23,8	24,0	24,1	24,1	24,3	24,3	24,3	24,4
2	0,0	24,6	24,7	24,7	24,7	24,7	24,7	24,9	24,9
3	0,0	22,9	23,1	23,1	23,1	23,1	23,1	23,3	23,3
4	0,0	23,2	23,3	23,2	23,3	23,3	23,4	23,4	23,5
5	0,0	22,6	24,4	24,4	24,4	24,4	24,5	24,6	24,6
6	0,0	22,5	22,7	22,7	23,0	23,2	23,2	23,3	23,3
7	0,0	23,0	23,4	23,5	23,9	24,1	24,2	24,3	24,4
8	0,0	24,1	24,3	24,3	24,3	24,3	24,4	24,5	24,5
9	0,0	24,2	24,3	24,4	24,6	25,0	25,1	25,1	25,1
10	0,0	24,5	24,6	24,6	24,7	24,8	24,9	25,0	25,0
11	0,0	23,4	23,7	23,8	24,0	24,1	24,1	24,2	24,2
12	0,0	23,1	23,2	23,3	23,5	23,8	23,9	24,0	24,0
13	0,0	24,0	24,0	24,1	24,1	24,1	24,1	24,2	24,2
14	0,0	22,8	22,9	23,0	23,0	23,1	23,2	23,2	23,5
15	0,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,1	25,1	25,1	25,3
16	0,0	22,5	22,7	22,7	22,7	22,9	22,8	22,8	23,0
17	0,0	24,6	24,6	24,6	24,6	24,6	24,6	24,7	25,0
18	0,0	23,1	23,2	23,3	23,4	23,0	23,1	23,2	23,2
Srednje upijanje (%)	**0,0**	**23,5**	**23,8**	**23,8**	**23,9**	**24,0**	**24,0**	**24,1**	**24,2**
Vasa Kuzmin									
T(min)	**0**	**10**	**20**	**30**	**40**	**50**	**100**	**150**	**1440**
1	0,0	10,0	12,5	13,1	13,3	13,4	13,8	13,7	14,4
2	0,0	7,3	9,9	11,2	11,9	12,4	13,4	13,9	14,8
3	0,0	7,2	9,5	10,4	10,9	11,2	11,4	11,4	12
4	0,0	6,3	8,7	10,0	10,9	11,6	12,9	13,6	14,7
5	0,0	6,6	11,6	11,6	11,8	11,8	11,9	12,1	14
6	0,0	5,6	9,5	9,6	11,0	11,9	13,7	14,0	14,4
7	0,0	5,0	7,5	8,8	10,1	11,3	13,4	14,4	14,5
8	0,0	5,8	8,6	10,1	11,7	12,8	14,3	14,4	15
9	0,0	5,4	6,4	8,9	10,3	11,3	13,3	14,3	14,2
10	0,0	6,8	9,4	10,5	10,7	10,7	10,9	11,0	13
Srednje upijanje (%)	**0,0**	**6,6**	**9,4**	**10,4**	**11,2**	**11,8**	**12,9**	**13,3**	**14,1**
IGM									
T(min)	**0**	**10**	**20**	**30**	**40**	**50**	**100**	**150**	**1440**
1	0,0	6,1	8,9	10,4	11,5	12,1	12,9	13,3	14,0
2	0,0	10,4	13,3	13,6	13,7	13,8	13,9	14,0	14,5
3	0,0	7,5	11,0	12,4	13,0	13,4	13,8	13,9	14,8

Tablica 5.13. Pojedinačne vrijednosti upijanja opeka

IGM									
4	0,0	6,5	9,0	10,4	11,5	12,3	13,4	13,8	14,6
5	0,0	12,2	14,0	14,1	14,1	14,1	14,2	14,2	14,7
6	0,0	6,4	9,3	10,9	11,9	12,5	13,4	13,7	14,7
7	0,0	6,1	8,6	9,8	10,7	11,3	12,3	12,6	14,2
IGM									
8	0,0	9,7	12,9	13,7	14,1	14,4	14,7	14,7	15,2
9	0,0	6,2	9,2	11,1	12,5	13,4	14,4	14,6	15,1
10	0,0	6,4	9,8	11,8	13,1	13,8	14,3	14,4	14,9
Srednje upijanje (%)	**0,0**	**7,8**	**10,6**	**11,8**	**12,6**	**13,1**	**13,7**	**13,9**	**14,7**
Nova Bosna									
T(min)	**0**	**10**	**20**	**30**	**40**	**50**	**100**	**150**	**1440**
1	0,0	9,0	11,5	12,4	12,6	12,7	12,8	12,8	13,3
2	0,0	8,6	11,4	12,7	13,5	13,9	14,0	14,1	14,5
3	0,0	8,8	11,7	12,6	12,7	12,8	12,9	12,9	13,2
4	0,0	7,3	10,4	12,4	13,7	14,5	14,9	14,9	15,3
5	0,0	7,6	10,7	12,1	12,4	12,4	12,5	12,5	12,8
6	0,0	8,7	12,1	13,7	14,0	14,0	14,1	14,1	14,4
7	0,0	7,9	11,2	12,9	13,7	14,2	14,6	14,7	15,1
8	0,0	7,4	9,4	10,1	10,4	10,5	10,6	10,7	11,1
9	0,0	7,9	10,0	10,8	11,2	11,3	11,5	11,5	11,9
10	0,0	8,7	12,1	13,4	13,5	13,5	13,6	13,6	13,9
Srednje upijanje (%)	**0,0**	**8,2**	**11,0**	**12,3**	**12,8**	**13,0**	**13,2**	**13,2**	**13,6**
Opeka									
T(min)	**0**	**10**	**20**	**30**	**40**	**50**	**100**	**150**	**1440**
1	0,0	11,4	14,7	16,0	16,5	16,8	17,4	17,4	17,5
2	0,0	13,1	17,1	17,7	17,9	18,0	18,6	18,7	18,8
3	0,0	11,3	14,0	15,4	16,4	16,9	17,8	17,8	17,9
4	0,0	12,9	16,9	17,4	17,7	17,8	18,6	18,6	18,7
5	0,0	14,1	16,9	16,9	17,0	17,0	17,3	17,4	17,5
6	0,0	15,4	18,3	18,4	18,4	18,4	18,9	18,9	19,1
7	0,0	16,1	17,1	17,1	17,1	17,2	17,5	17,5	17,6
8	0,0	13,0	16,8	17,6	17,9	18,0	18,5	18,5	18,7
9	0,0	11,3	14,5	15,5	16,2	16,7	17,9	17,9	18,0
10	0,0	15,5	16,9	17,0	17,1	17,1	17,5	17,6	17,7
11	0,0	15,3	17,2	17,3	17,3	17,2	17,7	17,8	17,8
12	0,0	13,3	17,1	17,8	18,0	18,2	18,9	18,9	19,0
13	0,0	11,8	15,8	17,8	18,3	18,5	19,0	19,0	19,1
14	0,0	11,1	13,8	15,3	16,2	16,6	17,5	17,6	17,8
15	0,0	14,7	17,4	17,6	17,7	17,8	16,3	18,4	18,5
16	0,0	15,9	17,2	17,2	17,3	17,3	17,7	17,7	17,7
17	0,0	16,5	17,3	17,4	17,4	17,4	17,9	17,9	18,0
18	0,0	15,4	17,6	17,8	17,8	17,9	18,3	18,4	18,4
19	0,0	16,2	17,0	17,0	17,1	17,1	17,4	17,4	17,5
20	0,0	14,0	17,5	17,8	17,9	18,0	18,5	18,5	18,6
21	0,0	12,6	15,3	16,8	17,4	17,6	18,4	18,5	18,6
22	0,0	15,9	18,1	18,2	18,3	18,3	18,8	18,8	18,9
23	0,0	14,6	17,7	17,7	17,8	17,8	18,3	18,3	18,4
24	0,0	11,6	13,6	14,3	15,0	15,5	17,6	17,7	17,7
Srednje upijanje (%)	**0,0**	**13,4**	**16,3**	**16,9**	**17,3**	**17,5**	**18,0**	**18,1**	**18,2**



Slika 5.29. Krivulje upijanja i otpuštanja vode iz opeka kontrolirane proizvodnje



Slika 5.30. Krivulje upijanja i otpuštanja vode iz strojno izrađenih opeka nekontrolirane proizvodnje

Uočeno je iz Slika 5.29 i 5.30. kako svaka opeka ima svoj trend upijanja i otpuštanja vode u vremenu, a da najveće razlike u krivuljama upijanja postoje do 30 minuta, a u krivuljama otpuštanja vode do 540 minuta. Stoga se u nastavku posebna pažnja obratila na brzine upijanja vode u 10, 20 i 30 minuta kao i brzine otpuštanja u 180, 360 i 540 minuta te su se izdefinirali koeficijenti upijanja i otpuštanja kako slijedi:

$K_{u,t0-t1}$=(upijanje vode u trenutku t_1-upijanje vode u trentku t_0)/10 – koeficijent upijanja vode

$K_{o,t0-t1}$=(upijena voda u trenutku t_0-upijena voda u trenutku t_0)/180 – koeficijent otpuštanja vode

Ovi su koeficijenti također istraženi kao parametri koji opisuju otpornost opeke na cikluse smrzavanja/odmrzavanja.

5.3. Iznalaženje novih metoda za klasifikaciju otpornosti opeke na cikluse smrzavanja/odmrzavanja

U ovoj točki su se točki pokušale iznaći nove metode temeljem kojih bi se opeke mogle klasificirati na otporne i neotporne kao i matematički model za prognoziranje otpornosti opeke na cikluse smrzavanja/odmrzavanja. U Tablici 5.14. dana je deskriptivna statistika za sve ispitane parametre u točki 5.2. i njihove vrijednosti navedene u Tablici 5.9.

Tablica 5.14. Deskriptivna statistika razultata ispitivanja kontroliranih i nekonstroliranih uzoraka– 1.dio

Statistički parametar	Otpornost prema HRN B.D8.011	**Normna tlačna čvrstoća (N/mm^2)**	**Koeficijent zasićenja**	**Omjer tlačnih čvrstoća nakon i prije smrzavanja**	**Udio krupnih pora (%)**	**Udio pora srednje veličine (%)**	**Udio malih pora (%)**	**Ukupni udio pora (%)**	**Ukupni udio pora hidrostatskim vaganjem (%)**	**Srednji radijus pora (µm)**	**Ukupni volume pora (mm^3/g)**	**Maage koeficijent**	**Specifična površina (m^2/g)**
N	neotporna		7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
	otporna		9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
Mean	neotporna	22.0	0.754	0.696	6.51	75.7	17.7	34.1	10.3	0.321	299	33.0	3.04
	otporna	27.8	0.777	0.797	20.7	72.0	7.27	21.7	7.53	1.48	119	72.4	3.22
Median	neotporna	27.8	0.754	0.690	3.90	71.9	24.3	32.3	9.95	0.253	183	28.0	2.95
	otporna	26.3	0.748	0.790	17.3	74.3	5.40	19.4	8.09	1.45	108	61.0	3.14
Standard deviation	neotporna		0.00988	0.0151	5.36	7.98	12.3	6.00	2.15	0.342	239	12.4	0.607
	otporna		0.0743	0.0602	15.1	13.0	5.05	5.97	1.47	0.130	37.1	27.2	0.320
Minimum	neotporna	7.99	0.741	0.680	2.40	67.6	0.700	28.9	7.97	0.0520	153	19.0	2.36
	otporna	20.3	0.689	0.720	2.20	43.2	0.700	16.2	5.34	1.31	89.1	56.0	2.79
Maximum	neotporna	28.7	0.767	0.720	15.4	85.9	29.5	46.1	13.0	1.01	813	53.0	4.00
	otporna	42.0	0.928	0.890	56.1	86.4	16.7	34.4	9.15	1.67	208	139	3.71

Tablica 5.14. Deskriptivna statistika – 2.dio

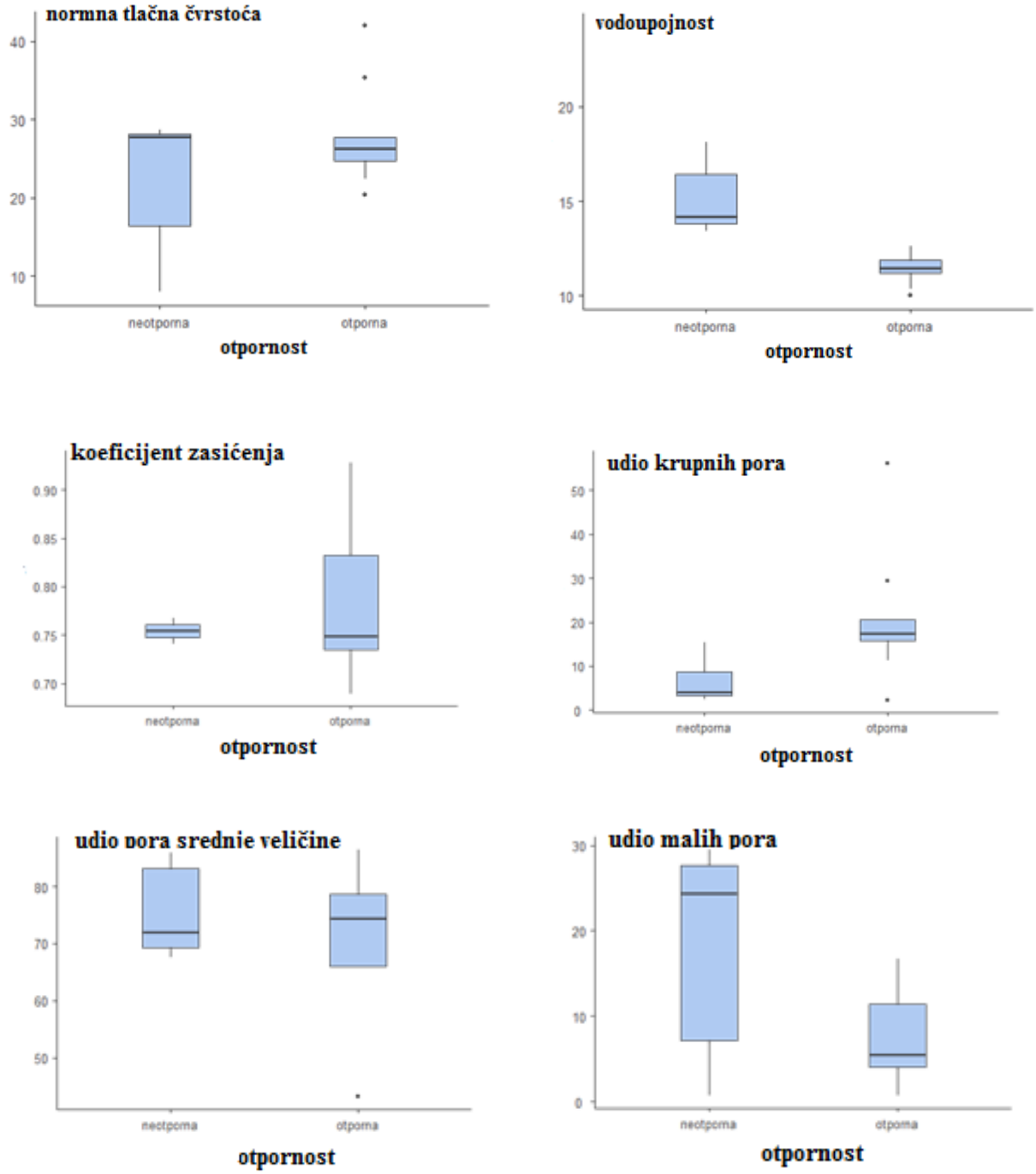
Statistički parametar	**Otpornost prema HRN B.D8.011**	**Vodoupojnost (%)**	**Početni koeficijent upijanja (kg/m^2 x min)**	**Koeficijent upijanja u 0-10 (%/min)**	**Koeficijent upijanja u 10-20 (%/min)**	**Koeficijent upijanja u 20-30 (%/min)**	**Koeficijent otpuštanja u 0-180 (%/min)**	**Koeficijent otpuštanja u 180-360 (%/min)**	**Koeficijent otpuštanja u 360-540 (%/min)**
N	neotporna	7	7	7	7	7	7	7	7
	otporna	9	9	9	9	9	9	9	9
Missing	neotporna	0	0	0	0	0	0	0	0
	otporna	0	0	0	0	0	0	0	0
Mean	neotporna	16.0	2.28	1.06	0.251	0.0959	0.0466	0.0244	0.00986
	otporna	11.4	2.10	0.954	0.100	0.0233	0.0386	0.0136	0.00722
Median	neotporna	14.1	1.45	0.775	0.285	0.106	0.0440	0.0230	0.00800
	otporna	11.4	2.47	1.03	0.0540	0.0100	0.0390	0.0130	0.00600
Standard deviation	neotporna	3.95	1.81	0.617	0.105	0.0493	0.0123	0.00305	0.00677
	otporna	0.840	0.651	0.177	0.0889	0.0262	0.00207	0.00188	0.00349
Range	neotporna	10.8	5.00	1.70	0.327	0.146	0.0360	0.00800	0.0210
	otporna	2.60	1.74	0.518	0.248	0.0780	0.00600	0.00600	0.0110
Minimum	neotporna	13.4	1.25	0.657	0.0230	0.00400	0.0330	0.0210	0.00300
	otporna	10.0	1.03	0.635	0.0290	0.00400	0.0350	0.0110	0.00300
Maximum	neotporna	24.2	6.25	2.35	0.350	0.150	0.0690	0.0290	0.0240
	otporna	12.6	2.77	1.15	0.277	0.0820	0.0410	0.0170	0.0140

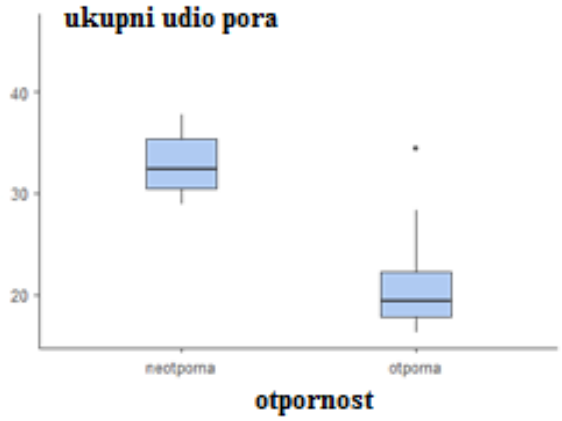
U nastavku je napravljen Mann-Whitney test kojim se uspoređuju distribucije navedenih varijabli za otporne i neotporne opeke tj. po varijabli *otpornost*. Potencijal za klasifikaciju otpornih od neotpornih opeka imaju one varijable koje imaju p-vrijednost u Tablici 5.15. manju od 0.05. Iz tablice 5.15 se da uočiti kako varijable: *vodoupojnost, udio krupnih pora, ukupni udio pora, ukupni udio pora hidrostatskim vaganjem, srednji radijus pora, ukupni volumen pora, Maage koeficijent, koeficijent upijanja vode u 10-20 i 20-30 minuta, te koeficijent otpuštanja vode u vremenu 180-360 minuta* imaju samostalno potencijala za klasifikaciju otpornih od neotpornih opeka.

Tablica 5.15. Rezultati Mann-Whitney-evog testa za pojedina svojstva opeke

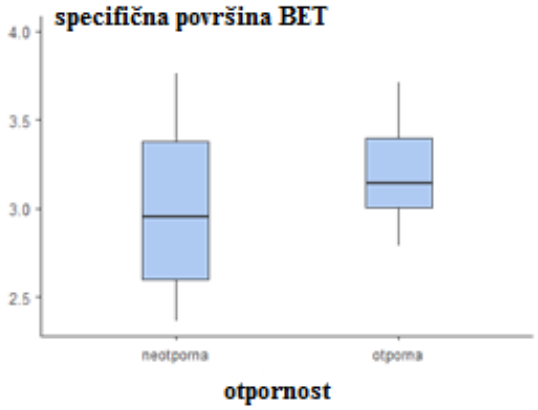
Svojstvo	Test	statistic	p-vrijednosti
Normna tlačna čvrstoća	Mann-Whitney U	28.00	0.758
Vodoupojnost	Mann-Whitney U	0.00	< .001
Koeficijent zasićenja	Mann-Whitney U	28.50	0.791
Udio krupnih pora	Mann-Whitney U	9.00	0.016
Udio pora srednje veličine	Mann-Whitney U	25.00	0.779
Udio malih pora	Mann-Whitney U	17.50	0.152
Ukupni udio pora	Mann-Whitney U	5.00	0.003
Ukupni udio pora hidrostatskim vaganjem	Mann-Whitney U	11.00	0.031
Specifična površina BET	Mann-Whitney U	23.00	0.408
Srednji radijus pora	Mann-Whitney U	0.00	< .001
Ukupni volumen pora	Mann-Whitney U	4.00	0.002
Maage koeficijent	Mann-Whitney U	0.00	0.001
Početni koeficijent upijanja	Mann-Whitney U	26.00	0.596
Koeficijent upijanja vode u 0-10	Mann-Whitney U	24.00	0.470
Koeficijent upijanja vode u 10-20	Mann-Whitney U	10.00	0.023
Koeficijent upijanja vode u 20-30	Mann-Whitney U	9.50	0.022
Koeficijent otpuštanja vode u 0-180	Mann-Whitney U	16.50	0.123
Koeficijent otpuštanja vode u 180-360	Mann-Whitney U	0.00	< .001
Koeficijent otpuštanja vode u 360-540	Mann-Whitney U	24.00	0.455

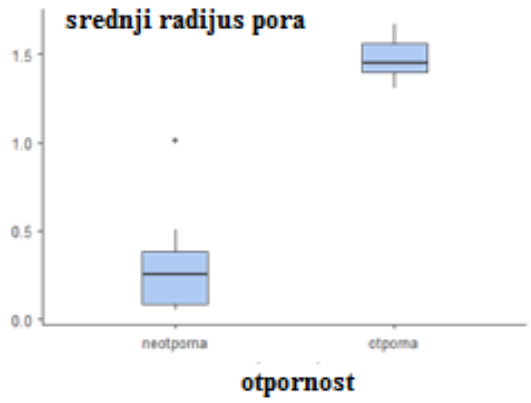
Grafički prikaz rezultata iz Tablice 5.15 prikazan je Slikom 5.31.

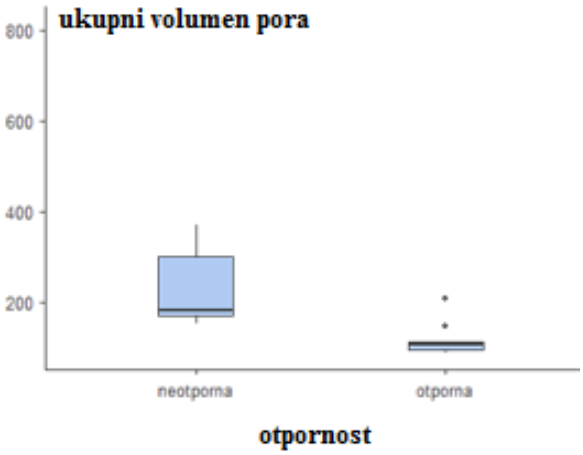


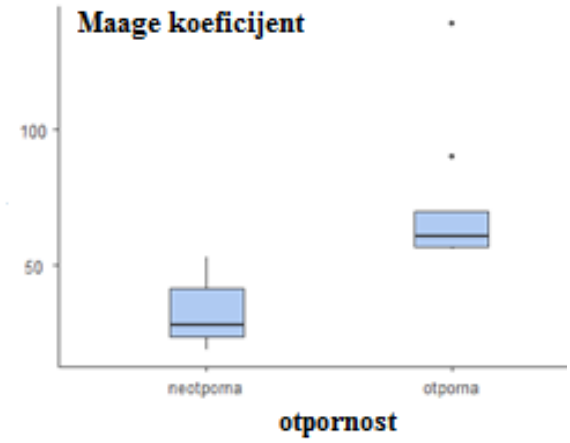

ukupni udio pora
40
30
20
neotporna
otporna
otpornost

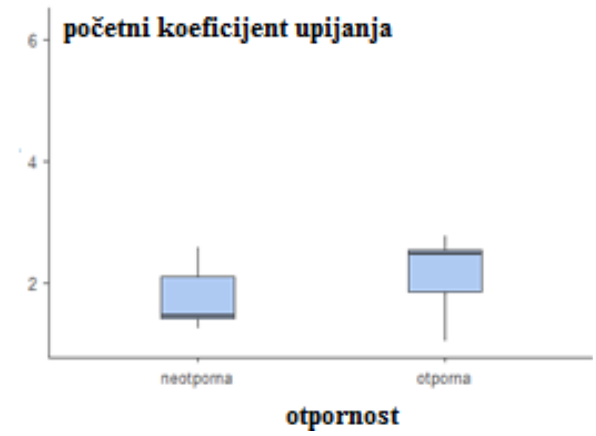
ukupni udio pora hidrostatskim vaganjem
13
11
9
7
5
neotporna
otporna
otpornost

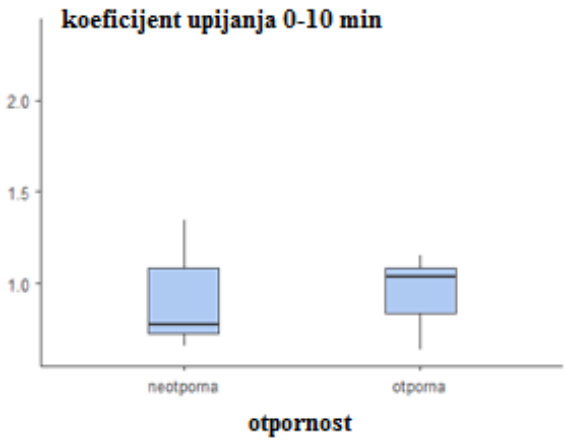

specifična površina BET
4.0
3.5
3.0
2.5
neotporna
otporna
otpornost

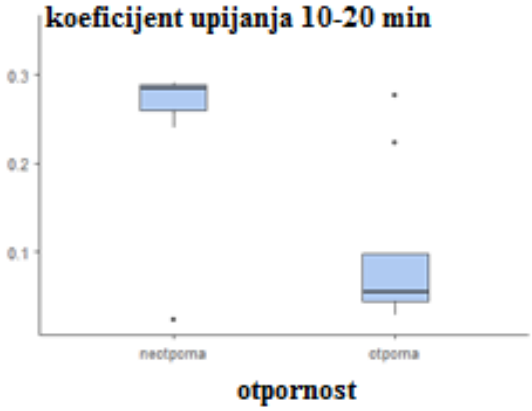

srednji radijus pora
1.5
1.0
0.5
0.0
neotporna
otporna
otpornost

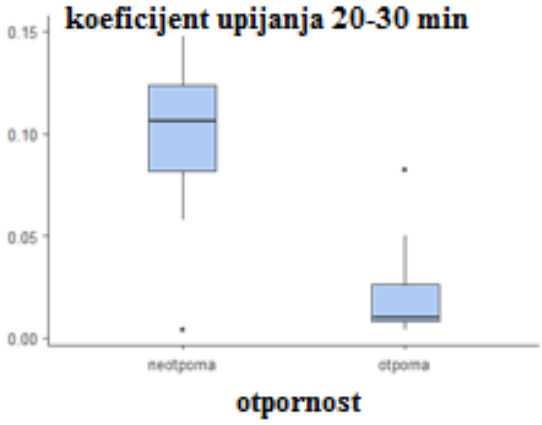

ukupni volumen pora
800
600
400
200
neotporna
otporna
otpornost

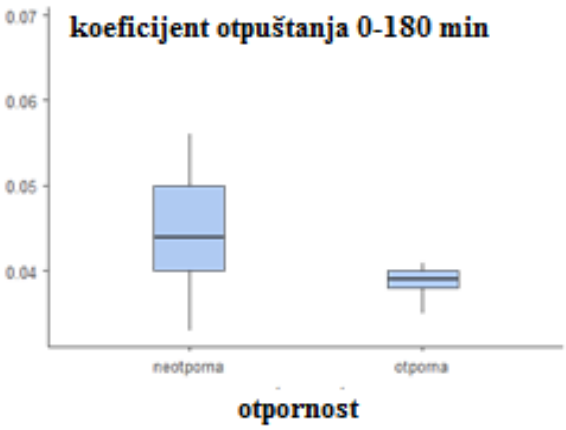

Maage koeficijent
100
50
neotporna
otporna
otpornost

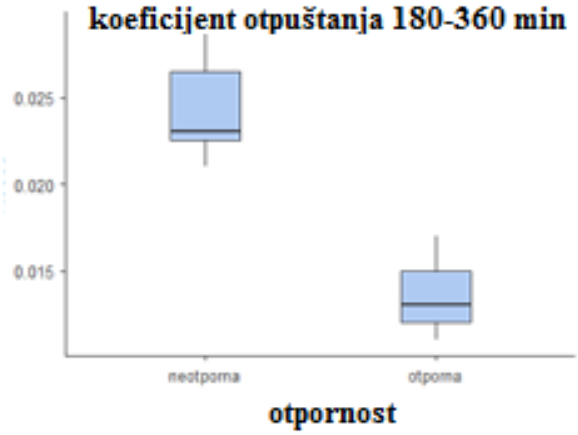

početni koeficijent upijanja
6
4
2
neotporna
otporna
otpornost

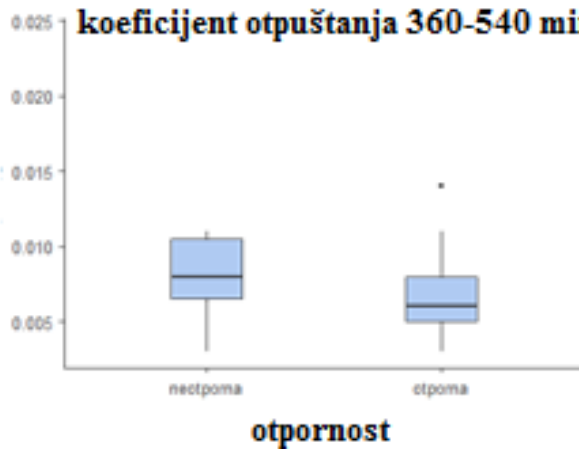

koeficijent upijanja 0-10 min
2.0
1.5
1.0
neotporna
otporna
otpornost


koeficijent upijanja 10-20 min
0.3
0.2
0.1
neotporna
otporna
otpornost


koeficijent upijanja 20-30 min
0.15
0.10
0.05
0.00
neotporna
otporna
otpornost


koeficijent otpuštanja 0-180 min
0.07
0.06
0.05
0.04
neotporna
otporna
otpornost


koeficijent otpuštanja 180-360 min
0.025
0.020
0.015
neotporna
otporna
otpornost



Slika 5.31. Grafički prikaz rezultata Mann-Whitney-evog testa za distribuciju svojstava uzoraka opeke

Uočeno je sljedeće:

- **<u>sve otporne opeke imaju vrijednosti vodoupojnosti između 10 i 12.6, a sve neotporne veće od toga, tj. između 13.4 i 24.3.;</u>**

Neotporne opeke imaju u prosjeku manje udjele krupnih pora od otpornih opeka, veće ukupne udjele pora od otpornih, te veće ukupne udjele pora hidrostatskim vaganjem otpornih opeka.

- <u>srednji radijus pora izvrsno odvaja otporne od neotpornih opeka na način da sve neotporne opeke imaju radijus između 0.052 i 1.01, dok otporne opeke imaju veći radijus i to između 1.31 i 1.67 što je u skladu s istraživanjima prikazanim u poglavlju 3;</u>
- <u>sve otporne opeke imaju vrijednosti Magge koeficijenta između 56 i 139 dok neotporne imaju manje vrijednosti i to između 19 i 53 što je i u skladu sa istraživanjima iznesenim u poglavlju 3 prema kojem su opeke većeg Maage koeficijenta otporne na cikluse smrzavanja i odmrzavanja;</u>
- koeficijenti upijanja u vremenu 0-10 i 10-20 minuta su veći kod neotpornih opeka.
- **<u>koeficijent otpuštanja vode u vremenu 180-360 min pokazao se kao izvrstan klasifikator obzirom da su sve vrijednosti te varijable kod neotpornih opeka veće nego kod otpornih opeka - kod neotpornih opeka vrijednosti su između 0,021 i 0,029, dok su kod otpornih opeka između 0,011 i 0,017.</u>**

Ovo je u suprotnosti s očekivanjem jer je hipoteza bila da opeke veće otpornosti brže otpuštaju vodu u vremenu od opeka manje otpornosti na cikluse smrzavanja/odmrzavanja zbog većega udjela krupnih pora u otpornijim opekama. Obzirom kako otpornije opeke

zaista sadrže veći udio krupnih pora, očigledno u brzini otpuštanja vode iz opeke ulogu imaju i neki drugi faktori osim same veličine pora.

- ostale varijable ne pokazuju značajnu vezu s klasifikacijom opeke na otporne i neotporne kada su u pitanju ciklusi smrzavanja/odmrzavanja.

5.4. Iznalaženje matematičkoga modela za prognoziranje otpornosti opeke na cikluse smrzavanja/odmrzavanja

Kako bismo prediktirali varijablu *omjer tlačnih čvrstoća* nakon i prije smrzavanja, postojanje veze između varijable omjer tlačnih čvrstoća nakon i prije smrzavanja i pojedinačnih varijabli potvrđeno je Spermanovim korelacijskim koeficijentom. Vrijednosti toga koeficijenta i pripadne p-vrijednosti po pojedinom parametru prikazane su u Tablici 5.16. Ukoliko postoji veza, tj. p-vrijednost je manja od 0.05, onda je ta varijabla potencijalno samostalno prediktivna za varijablu *omjer tlačnih čvrstoća*.

Tablica 5.16. Rezultati Spearman-ovog testa za pojedina svojstva opeke

Svojstvo	Test	kor. ranga	p-vrijednosti
Normna tlačna čvrstoća	Spearman	0,066322933	0,807200089
Vodoupojnost	Spearman	-0,756081435	0,000702277
Koeficijent zasićenja	Spearman	-0,127769572	0,637239769
Udio krupnih pora	Spearman	0,735447634	0,001167393
Udio pora srednje veličine	Spearman	-0,303611648	0,252964788
Udio malih pora	Spearman	-0,436900488	0,090623648
Ukupni udio pora	Spearman	-0,654386271	0,005952482
Ukupni udio pora hidrostatskim vaganjem	Spearman	-0,647017056	0,006746805
Specifična površina BET	Spearman	0,051584503	0,849524281
Srednji radijus pora	Spearman	0,934416432	1,18E-07
Ukupni volumen pora	Spearman	-0,623435569	0,009870007
Maage koeficijent	Spearman	0,980812075	2,44E-11
Početni koeficijent upijanja	Spearman	0,087020744	0,748622922
Koeficijent upijanja vode u 0-10	Spearman	-0,023581487	0,930921374
Koeficijent upijanja vode u 10-20	Spearman	-0,539426521	0,031046999
Koeficijent upijanja vode u 20-30	Spearman	-0,426035969	0,099881818
Koeficijent otpuštanja vode u 0-180	Spearman	-0,146035102	0,58942891
Koeficijent otpuštanja vode u 180-360	Spearman	-0,713969153	0,001892544
Koeficijent otpuštanja vode u 360-540	Spearman	-0,098739269	0,715999898

Temeljem Spearmanove korelacije ranga vidi se kako postoji statistički značajna veza između sljedećih varijabli s varijablom *omjer tlačnih čvrstoća:* vodoupojnosti, udjela krupnih pora,

ukupnoga udjela pora, ukupnoga udjela pora hidrostatskim vaganjem srednjega radijusa pora, ukupnoga volumena pora, Maage koeficijenta, koeficijenata upijanja u 10-20 i 20-30 minuta, te koeficijenta otpuštanja vode u 180-360 minuta.

Obzirom kako hipoteza disertacije kaže da se otpornost opeke na cikluse smrzavanja i odmrzavanja može opisati pomoću parametara upijanja vode i pomoću sustava pora, u nastavku je, prilikom iznalaženja jednadžbi koje opisuju omjer tlačnih čvrstoća nakon i prije smrzavanja, fokus stavljen upravo na te parametre. Iznesene su jednadžbe samo za one parametre koji povezani dobro opisuju varijablu *omjer tlačnih čvrstoća nakon i prije smrzavanja*.

Najbolji model koji se postiže u smislu maksimizacije prilagođenog R kvadrata dobije se korištenjem varijabli udio krupnih pora i srednji radijus pora. Pri tome srednji radijus pora ne ulazi linearno u model, nego se koristi funkcija koja je po dijelovima linearna. Tablica 5.17 prikazuje koeficijente modela.

Tablica 5.17 Koeficijenti modela za opis varijable omjer pomoću udjela krupnih pora i srednjeg radijusa pora

koeficijent	procjena	std. greška	p-vrijednost t-testa
slobodni član	0.2970001	0.0604426	0.000461
udio krupnih pora	0.0024181	0.0003549	2.90e-05
srednji radijus pora	0.3046612	0.0414089	1.43e-05
I (srednji radijus ≤ 1.2) TRUE	0.3878672	0.0610214	5.40e-05
srednji radijus pora*I (srednji radijus ≤ 1.2) TRUE	-0.3199488	0.0445659	1.80e-05

To znači kako se veza ovih varijabli sa varijablom omjer opisuje na sljedeći način:

omjer tlačnih čvrstoća=0,2970+0,0024*udio krupnih pora+0,3047*srednji radijus pora+0,3879*I (srednji radijus pora)-0,320*srednji radijus pora* I (srednji radijus pora)

pri čemu je indicator, I (srednji radijus pora) = 0 ako je srednji radijus >1.2 te 1 ako je srednji radijus≤1.2 što u nastavku daje sljedeći zaključak:

za područje srednji radijus pora≤1.2 koristimo pravac izgleda:

omjer tlačnih čvrstoća=0,6849+0,0024*udio krupnih pora-0,0153*srednji radijus pora

za područje srednji radijus pora>1.2 koristimo pravac izgleda:

omjer tlačnih čvrstoća=0,297+0,0024*udio krupnih pora+0,3047*srednji radijus pora

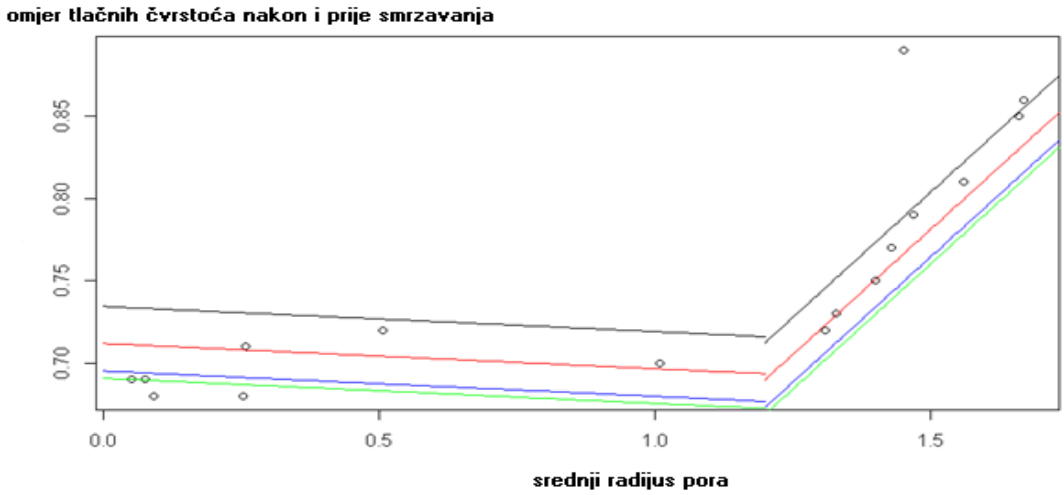
Iako je pretpostavka normalnosti reziduala u postignutom modelu podržana (Shapiro-Wilks test daje p vrijednost 0.83), zbog relativno malog broja podataka, za modeliranje napravljena

je bootstrap analiza dobivenoga modela koja potvrđuje kako su ključni zaključci stabilni. U Tablici 5.18 navedeni su bootstrap pouzdani intervali za prilagođeni R^2 modela i za koeficijente modela.

Tablica 5.18. Bootstrap pouzdani intervali za prilagođeni R^2 modela omjer tlačnih čvrstoća-udio krupnih pora+srednji radijus pora i za koeficijente modela

koeficijent	procjena	Percentilni bootstrap pouzdani interval
prilagođeni R^2	0.9519899	0.9305, 0.9957
slobodni član	0.2970001	0.1374, 0.4485
udio krupnih pora	0.0024181	0.0001, 0.0030
srednji radijus pora	0.3046612	0.2084, 0.4174
I (srednji radijus pora <= 1.2) TRUE	0.3878672	0.2279, 0.5472
srednji radijus pora*I (srednji radijus pora <=1.2) TRUE	-0.3199488	-0.4453, -0.1843

Temeljem dobivenoga modela može se uočiti kako velike vrijednosti srednjega radijusa pora (veće od 1.2) puno više doprinose u opisivanju varijable omjer nego što je to slučaj za vrijednosti manje od 1.2. Spearmanov koeficijent korelacije ranga varijabli omjer i srednji radijus pora, na dijelu podataka srednji radijus pora ≤ 1.2, ne upućuje na postojanje monotone veze (p-vrijednost je 0.17) u tome dijelu. Ovdje rečeno prikazano je i Slikom 5.32 pri čemu crna linija pripada pretpostavljenom udjelu krupnih pora od 20,6, crvena linija udjelu krupnih pora od 11,2, plava linija udjelu krupnih pora od 4,2 a zelena linija udjelu krupnih pora od 2,4.

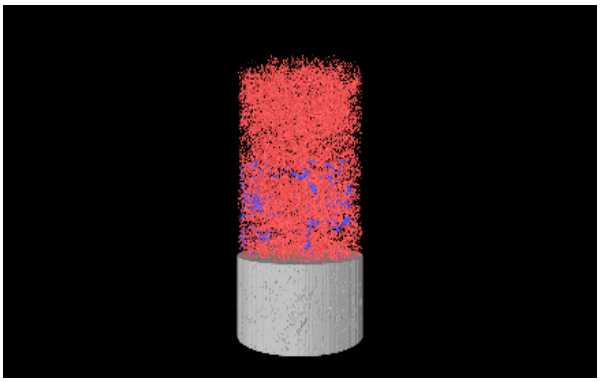


Slika 5.32. Ovisnost omjera tlačnih čvrstoća nakon i prije smrzavanja opeke i srednjeg radijusa pora za pretpostavljene udjele krupnih pora

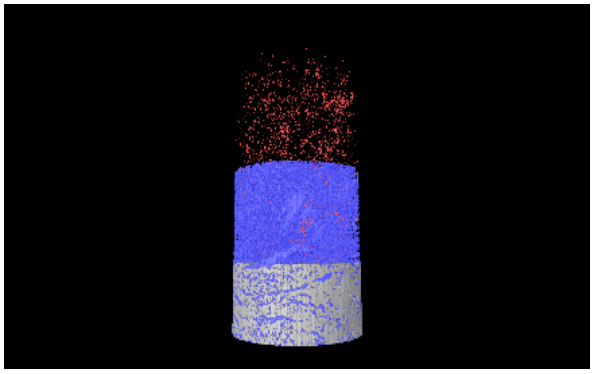
Daljnjim istraživanjem ustanovljeno je kako je jedini statistički značajan parametar iz skupine parametara vezanih za upijanje vode koeficijent otpuštanja vode u 180-360 minuta (Tablica 5.16). Međutim, bootstrapiranjem je utvrđena nestabilnost takvoga modela te on ovdje neće biti prikazan.

5.5. Utjecaj vrste pora na otpornost opeke na cikluse smrzavanja i odmrzavanja

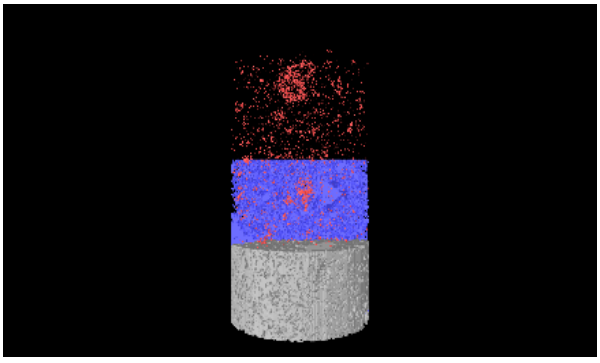
Kako bi se istražio utjecaj otvorenih i zatvorenih pora na otpornost opeke na cikluse smrzavanja i odmrzavanja, napravljeni su nanotomografski snimci za četiri serije opeka. SkyScan 2211 Multiscale X-ray Nanotomograph (Nano-CT System) uređajem se zabilježilo podatke o udjelu pora većih od 2 µm. Rezultati nanotomografije prikazani su vizualno Slikom 5.33 a brojčano Tablicom 5.19. Crvenom bojom su na Slici 5.33 označene zatvorene pore, plavom otvorene pore a sivom bojom čvrsta tvar u uzorcima opeka.



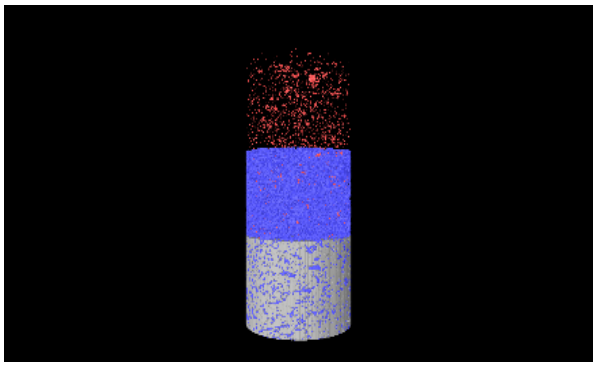
Nova Bosna



Derventa



Rustik



Opeka

Slika 5.33. Nanotomografski snimci uzoraka opeka

Tablica 5.19. Usporedba rezultata nanotomografije i živinog porozimetra

Naziv opeke	Udio otvorenih pora (%)	Udio zatvorenih pora (%)	Ukupna poroznost (%)	Udio pora iznad 2 μm živinom porozimetrijom (%)	Omjer tlačnih čvrstoća opeka nakon i prije smrzavanja
Nova Bosna	0,91	3,25	4,13	4,4	0,68
Derventa	16,90	0,86	17,63	24,9	0,72
Rustik	31,18	0,30	31,38	71,4	0,89
Opeka	20,81	0,43	21,16	29,5	0,68

Uvidom u tablicu 5.19 vidljivo je kako opeke većih omjera tlačnih čvrstoća nakon i prije smrzavanja (Rustik i Derventa) imaju visoke udjele otvorenih pora u ukupnom udjelu pora u uzorcima. Kod opeke Nova Bosna vidljiv je nizak udio otvorenih pora u ukupnom udjelu pora u uzorku a i nizak omjer tlačnih čvrstoća nakon i prije smrzavanja. Ipak, kako uzorak Opeka ima visok udio otvorenih pora a ujedno i nizak omjer tlačnih čvrstoća nakon i prije smrzavanja, temeljem rezultata iz Tablice 5.19 nije moguće jednoznačno zaključiti da niži udio otvorenih pora negativno utječe na otpornost opeke na cikluse smrzavanja i odmrzavanja iako za to postoje indicije. Usporedbom rezultata nanotomografije i živine porozimetrije u Tablici 5.19 vidljivo je da se rezultati o udjelu pora većih o 2 μm dobro prate s izuzetkom rezultata kod opeke Rustik.

5.6. Sadržaj aktivnih topivih soli

Sadržaj aktivnih topivih soli prema normi HRN EN 772-5 [80] ispitan je na uzorcima za obje korištene sirovine, S1S1030-1,5h i S2S1060-1,5h. Način oblikovanja opeke ne vrši utjecaj na rezultate ispitivanja. (Ivanin komentar je bio da joj je nejasno zašto samo ova dva uzorka) Rezultati ispitivanja prikazani su u Tablici 5.20.

Tablica 5.20. Rezultati ispitivanja sadržaja aktivnih topivih soli opeke

Sadržaj zbroja sadržaja natrija i kalija i sadržaja magnezija	Rezultati ispitivanja (%)	
	S1S1030-1,5h	S2S1060-1,5h
Sadržaj Mg^{2+}	0,01	0,00
Suma Na^{+} i K^{+}	0,02	0,02

Obzirom na propisani ukupni postotak u masi Na^+, K^+ i Mg^{2+}, uzorci zadovoljavaju razred S2 te zadovoljavaju razrede MX1 do MX3 u pogledu sadržaja aktivnih topivih soli (Tablica 3.11).

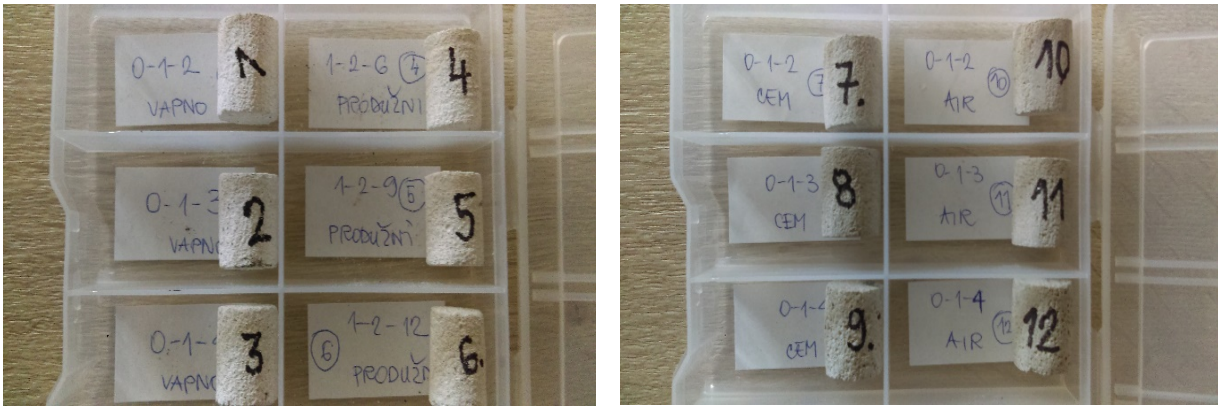
5.7. Otpornost mortova na cikluse smrzavanja/odmrzavanja

U ovoj je točki disertacije istražen utjecaj ciklusa smrzavanja/odmrzavanja na mortove različitih sastava. U tu je svrhu napravljeno 12 mješavina mortova u kojima su volumno varirani omjeri komponenata unutar pojedine skupine. Napravljene su tri mješavine produžnoga morta u kojima su cement, vapno i pijesak varirani u omjerima 1:2:12, 1:2:9 i 1:2:6, tri mješavine vapnenoga morta u kojima su vapno i pijesak varirani u omjerima 1:4, 1:3 i 1:2, tri mješavine cementnoga morta u kojima su cement i pijesak varirani u omjerima 1:4, 1:3 i 1:2 te tri mješavine cementnoga morta s dodatkom aeranta u iznosu 0,3% mase cementa i pri istim omjerima cementa i pijeska.

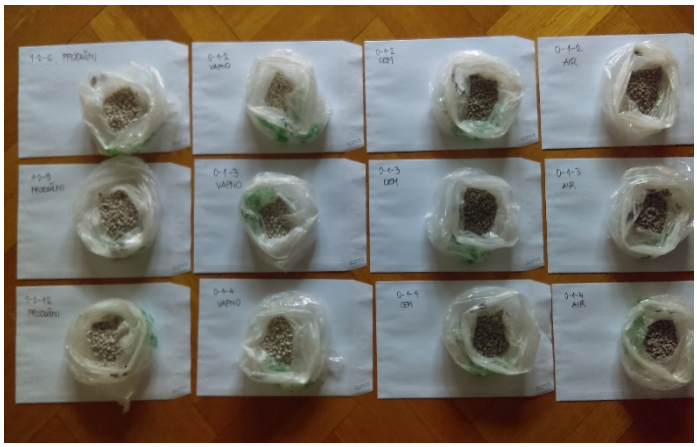
Agregat je bio prirodni agregat frakcije 0-1 mm, gustoće 2650 kg/m^3. Korišten je cement CEM II/B-M (P-S) 32,5R gustoće 3050 kg/m3 te hidratizirano vapno CL 80 S gustoće 2710 kg/m3. Upotrijebljen je aerant Energyair LP K 200 u količini 0,3% na masu cementa. Maseni sastavi svih mortova prikazani su Tablicom 5.21. Na svježem mortu ispitani su konzistencija prema normi HRN EN 1015-3 [146] gustoća prema HRN EN 1015-6 [148] i sadržaj pora prema HRN EN 1015-7 [149]. Vapneni su mortovi njegovani u polietilenskoj vrećici u kalupu 5 dana, dodatno 2 dana izvan kalupa, nakon čega je njega uzoraka do 28 dana izvršena u komori u kontroliranim uvjetima sa 65±5% vlage. Produžni mortovi su njegovani također u polietilenskoj vrećici u kalupu 5 dana, dodatno 2 dana izvan kalupa, nakon čega je njega uzoraka do 28 dana izvršena u komori u kontroliranim uvjetima sa 65±5%, te cementni i aerirani cementni mortovi njegovani su u u polietilenskoj vrećici u kalupu 2 dana, dodatno 5 dana izvan kalupa, nakon čega je njega uzoraka izvršena u komori u kontroliranim uvjetima sa 65±5% vlage do 28 dana starosti uzoraka.

U starosti od 28. i 90. dana uzorcima mortova su ispitane tlačne i vlačne čvrstoće sukladno normi HRN EN 1015-11 [152]. Dio je uzoraka mortova izložen ciklusima smrzavanja/odmrzavanja prije nego li su im određene tlačne i vlačne čvrstoće. Uzorci su ispitani prema metodi opisanoj u točki 5.1.7. norme HRN B.D1.011[182]. Uzorci vapnenoga i produžnoga morta su se u potpunosti raspali prilikom ovakvog tretmana te im nije bilo moguće odrediti tlačne i vlačne čvrstoće nakon smrzavanja.

Rezultati ispitivanja mortova u svježem i očvrslom stanju prikazani su Tablicom 5.22. Osim navedenoga, na mortovima su određeni i udjeli pora pojedinih veličina, ukupan udio pora te srednji radijus pora pomoću živinog porozimetra te specifična površina BET metodom. Uzorci za ispitavanje na živinom porozimetru bili su oblika valjka, duljine 25 mm i 15 mm širine te izgleda prema Slici 5.34. Uzorci za ispitivanje specifične površine BET metodom bili su izgleda prema Slici 5.35.



Slika 5.34. Izgled uzoraka morta za ispitivanje na živinom porozimetru



Slika 5.35. Izgled uzoraka za ispitivanje specifične površine mortova BET metodom

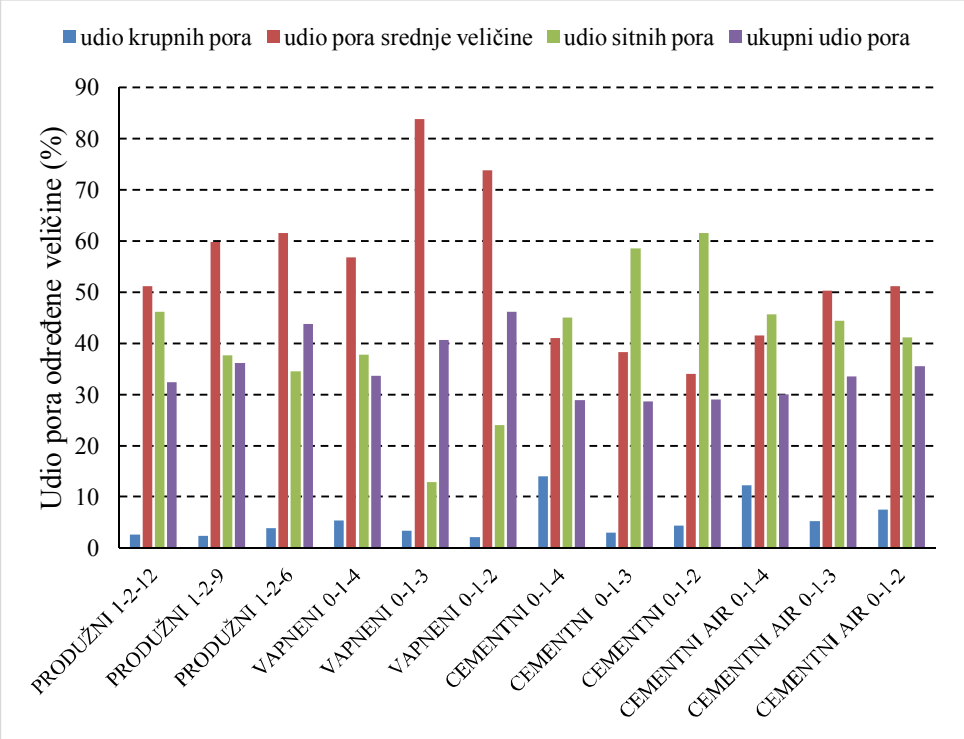
Tablica 5.21. Sastav mješavina morta

Vrsta morta/ komponenta	PRODUŽNI 1-2-12	PRODUŽNI 1-2-9	PRODUŽNI 1-2-6	VAPNENI 0-1-4	VAPNENI 0-1-3	VAPNENI 0-1-2	CEMENTNI 0-1-4	CEMENTNI 0-1-3	CEMENTNI 0-1-2	CEMENTNI AIR 0-1-4	CEMENTNI AIR 0-1-3	CEMENTNI AIR 0-1-2
Cement (kg)	129,5	148,3	173,6	-	-	-	417	481,3	572,2	420	482,9	573,5
Vapno (kg)	229,2	262,5	307,1	333,6	379,4	441,4	-	-	-	-	-	-
Voda (kg)	365,4	418,5	489,7	386,6	439,9	511,5	318,6	367,6	437,1	319,8	367,5	436,5
Voda/vezivo	1,019	1,019	1,019	1,159	1,159	1,159	0,764	0,764	0,764	0,764	0,764	0,764
Aerant (kg)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,3	1,4	1,7
Pijesak (kg)	1345,2	1155,4	901,1	1299,3	1113,4	862,8	1443,4	1257,6	994,5	1434,3	1252,8	990,4

Tablica 5.22. Svojstva morta

Vrsta morta/svojstva	PRODUŽN I 1-2-12	PRODUŽN I 1-2-9	PRODUŽN I 1-2-6	VAPNENI 0-1-4	VAPNENI 0-1-3	VAPNENI 0-1-2	CEMENTN I 0-1-4	CEMENTN I 0-1-3	CEMENTN I 0-1-2	CEMENTN I AIR 0-1-4	CEMENTN I AIR 0-1-3	CEMENTN I AIR 0-1-2
Svojstva u svježem stanju												
Konzistencija (mm)	210	160	130	210	170	135	210	140	105	210	170	110
Gustoća (g/cm^3)	1,55	1,67	1,74	1,42	1,50	1,66	1,86	1,87	1,92	1,79	1,83	1,85
Sadržaj zraka (%)	0,6	1,7	4,8	2	1,5	4,5	1,3	3,3	6,9	4,3	9,6	12
Svojstva u očvrslom stanju												
Vlačna čvrstoća u 28. dana (N/mm2)	1,0	1,1	1,3	0,8	0,9	1,0	5,1	5,2	5,4	4,0	4,1	4,9
Tlačna čvrstoća u 28. dana (N/mm2)	3,4	3,8	4,1	1,5	1,9	2,1	25,1	24,9	21,1	19,8	20,6	23,6
Vlačna čvrstoća u 90. dana (N/mm2)	1,2	1,3	1,6	1,0	1,1	1,3	6,1	6,3	6,4	4,7	4,9	5,6
Tlačna čvrstoća u 90. dana (N/mm2)	4,0	4,7	5,2	1,8	2,3	2,6	30,3	30,9	31,3	26,8	27,2	28,3
Vlačna čvrstoća u 90. dana, nakon smrz. (N/mm2)	-	-	-	-	-	-	4,7	5,0	5,3	4,1	4,2	5,1
Tlačna čvrstoća u 90. dana , nakon smrz. (N/mm2)	-	-	-	-	-	-	23,1	23,8	26,8	22,5	23,4	26,3
Omjer vlačnih čvrstoća u 90. dana nakon i prije smrzavanja	-	-	-	-	-	-	0,77	0,79	0,83	0,87	0,86	0,91
Omjer tlačnih čvrstoća u 90. dana nakon i prije smrzavanja	-	-	-	-	-	-	0,76	0,77	0,86	0,84	0,86	0,93
Specifična površina BET metodom (m2/g)	5,031 5,15 4,932 5,532	5,233 5,53 5,209 5,994	6,313 6,553 6,371 6,673	4,271	4,488 4,519 5,09	5,293 4,968 5,823	5,651 5,782 5,483 6,085	6,029 6,122 5,743 6,348	5,926 5,652 5,769 6,055	5,673 5,653 5,925 5,999	6,613 6,424 7,82 6,843	7,088 7,269 6,738 6,055
Udio krupnih, srednjih i sitnih pora; ukupna poroznost (%)	2,7 51,1 46,2 32,4	2,5 59,8 37,7 36,2	3,9 61,5 34,6 43,8	5,4 56,8 37,8 33,7	3,4 83,7 12,9 40,6	2,2 73,7 24,1 46,1	14 41 45 28,9	3,1 38,3 58,5 28,7	4,4 34,1 61,5 29,0	12,3 41,5 45,7 30,1	5,3 50,3 44,4 33,6	7,6 51,2 41,2 35,6
Srednji radijus pora (μm)	0,1584	0,2015	0,2194	0,2563	0,2907	0,2645	0,1072	0,0846	0,0666	0,1116	0,0851	0,0914

Zastupljenost pora pojedine veličine u mortovima je prikazana Slikom 5.36. Iz ove Slike se može zaključiti kako ukupan udio pora u svim skupinama mortova raste sa smanjenjem udjela pijeska u miješavini.

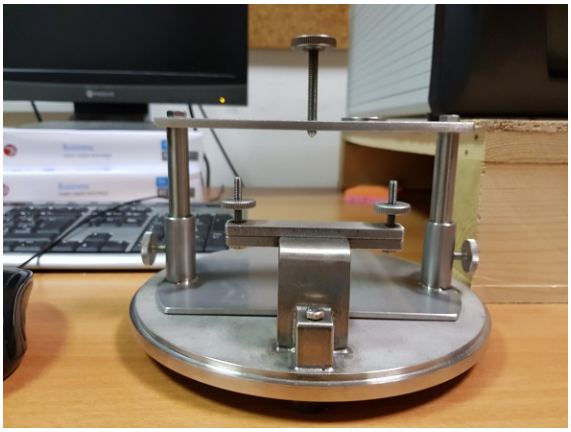


Slika 5.36. Zastupljenost pora pojedine veličine u mortovima

Uvidom u tablicu 5.22 vidljivo je kako omjer tlačnih i vlačnih čvrstoća nakon i prije smrzavanja kod cementnoga morta i cementnoga morta sa dodatkom aeranta raste sa smanjenjem udjela pijeska u mortu. Istodobno, nije uočen trend kod pora pojedine veličine u ovim mortovima te je zaključeno kako otpornost morta na cikluse smrzavanja/odmrzavanja nije funkcija isključivo pojedine veličine pora. Ipak, iznalaženje matematičkoga modela koji opisuje otpornost morta na cikluse smrzavanja/odmrzavanja nije bio fokus ovoga istraživanja.

5.7. Toplinska svojstva opeka i mortova nakon ciklusa smrzavanja i odmrzavanja

Na opekama serije S1R10301,5h i S1S10301,5h te mortu CEMENTNI 0-1-3 ispitani su toplinska provodljivost, toplinska difuzivnost i svolumni toplinski kapacitet prije i nakon izlaganja uzoraka ciklusima smrzavanja/odmrzavanja pomoću HOT DISK TPS 2500 S ispitnog sustava (Slika 5.37). Svako svojstvo je ispitano na dva uzorka a Tablicom 5.23 su prikazane prosječne vrijednosti i standardne devijacije istih. Tablicom 5.24 iskazani su omjeri toplinskih svojstava nakon smrzavanja u odnosu na toplinska svojstva prije smrzavanja.



Slika 5.37. Izgled HOT DISK TPS 2500 S ispitnog sustava

Volumni toplinski kapacitet izračunat je prema jednadžbi:

$\alpha=\lambda/\rho*c_p$

pri čemu je

α – toplinska difuzivnost (m2/s)

λ – toplinska provodljivost (W/(mK))

ρ – gustoća (kg/m3)

c_p – volumni toplinski kapacitet (J/(m^3K))

Tablica 5.23 Rezultati ispitivanja toplinskih svojstava opeka i morta

Uzorak	Prije smrzavanja		Nakon smrzavanja		Prije smrzavanja		Nakon smrzavanja		Prije smrzavanja		Nakon smrzavanja	
	Toplinska provodljivost (W/mK)				Toplinska difuzivnost (mm2/s)				Volumni toplinski kapacitet (MJ/m3K)			
	Prosjek	Standardna devijacija	Prosjek	Standardna devijacija	Prosjek	Standardna devijacija	Prosjek	Standardna devijacija	Prosjek	Standardna devijacija	Prosjek	Standardna devijacija
S1S10301,5h	0,818	0,002	0,954	0,004	0,511	0,003	0,607	0,004	1,599	0,005	1,572	0,008
S1R10301,5h	0,745	0,003	0,793	0,002	0,640	0,010	0,603	0,006	1,164	0,014	1,316	0,009
CEMENTNI 0-1-3	1,233	0,001	1,465	0,003	0,694	0,005	0,716	0,007	1,776	0,012	2,047	0,017

Tablica 5.24 Omjeri toplinskih svojstava opeke i morta nakon smrzavanja u odnosu na toplinska svojstva prije smrzavanja

Uzorak	Omjer svojstava nakon i prije smrzavanja (%) (%)		
	Toplinska provodljivost (W/mK)	Toplinska difuzivnost (mm2/s)	Volumni toplinski kapacitet (MJ/m3K)
S1S10301,5h	1,17	1,19	0,98
S1R10301,5h	1,06	0,94	1,13
CEMENTNI 0-1-3	1,19	1,03	1,15

Iz Tablica 5.23 i 5.24 vidljivo je kako toplinske provodljivosti kod obje opeke i morta nakon ciklusa smrzavanja/odmrzavanja rastu u odnosu na toplinske provodljivosti prije ciklusa smrzavanja/odmrzavanja, što znači da uslijed ciklusa smrzavanja i odmrzavanja i opeke i mort poprimaju lošiju sposobnost toplinske izolacije. Toplinska difuzivnost kod opeke S1S10301,5h i morta rastu nakon ciklusa smrzavanja/odmrzavanja dok isto svojstvo kod opeke S1R10301,5h pada. Volumni toplinski kapacitet kod morta i opeke S1R10301,5h rastu a kod opeke S1S10301,5h isto svojstvo opada.

6.UTJECAJ CIKLUSA SMRZAVANJA I ODMRZAVANJA NA MEHANIČKA I TOPLINSKA SVOJSTVA ZIĐA – EKSPERIMENTALNI DIO

U sklopu ovog poglavlja istražen je utjecaj ciklusa smrzavanja/odmrzavanja na mehanička i toplinska svojstva ziđa. Utjecaj ciklusa smrzavanja i odmrzavanja proučavan je kroz početnu posmičnu čvrstoću realnih uzoraka ziđa, dok je utjecaj ciklusa smrzavanja i odmrzavanja na toplinska svojstva ziđa proučavan računskim putem.

Početna posmična čvrstoća ziđa izvodi se iz čvrstoće malih zidanih ispitnih uzoraka koji se ispituju do sloma. Ispitni uzorak (zidić) za određivanje početne posmične čvrstoće sačinjen je od tri opeke četiri serije opeka međusobno spojenih mortom kako to nalaže HRN EN 1052-3, točka 7. norme koja definira pripremu uzoraka [195] pri čemu je usvojena debljina sljubnica od 10 mm. Uzorci su bili debljine 25 cm, izrađena su po tri uzorka za svaku sirovinu i njezinu temperaturu pečenja te period zadržavanja u peći od 1,5 h, kojima je početna posmična čvrstoća određena pri sobnoj temperaturi tj. prije izlaganja ciklusima smrzavanja i odmrzavanja te isti broj uzoraka na kojima je taj parametar određen nakon izlaganja cikusima smrzavanja i odmrzavanja. Uzorci su njegovani 28 dana radi postizanja dostatne čvrstoće morta. Opremu potrebnu za ispitivanje početne posmične čvrstoće činili su preša kapaciteta većeg od 100 kN s mogućnošću dodavanja prirasta sile između 0,1 N/mm^2 i 0,4 N/mm^2 u minuti, te sitniji pribor potreban za izradu uzorka. Uzorci su prilikom ispitivanja oslonjeni na rubne elemente, odnosno rubnim su elementima bili oslonjeni na oslonce debljine 12 mm. Prilikom ispitivanja zabilježeni su sljedeći podaci:

- površina poprečnoga presjeka A_i ispitnog uzorka usporedno s posmičnom silom s točnošću od 1%
- najveća silu $F_{i,max}$, pri čemu se za svaki ispitni uzorak proračunava posmična čvrstoća i do najbližih 0,01 N/mm^2 primjenom sljedećeg izraza:

$$f_{voi} = F_{i,max} / (2A_i) \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

Ispitani su po jedan uzorak (zidić) za svaku seriju opeke i morta prije i nakon smrzavanja. Uzorci koji su izloženi ciklusima smrzavanja i odmrzavanja izloženi su ukupno 25 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja u trajanju od 4 sata, kao što je to bio slučaj i kod opeke. Prije izlaganja cikslusima smrzavanja i odmrzavanja, uzorci su bili potopljeni u bazen s vodom

u trajanju od 24 h. Starost je uzoraka pri ispitivanju bila 28. dana te je uvjetovana zahtjevanom starošću morta od 28 dana. Slikom 6.1. prikazani su ispitani uzorci nakon smrzavanja a Slikom 6.2 ispitivanje početne posmične čvrstoće.

Slika 6.1. Ispitni uzorci nakon izlaganja ciklusima smrzavanja i odmrzavanja

Slika 6.2. Ispitivanje početne posmične čvrstoće

Rezultati početnih posmičnih čvrstoća prije i nakon smrzavanja te omjer početnih posmičnih čvrstoća nakon i prije smrzavanja su prikazani Tablicom 6.1.

Tablica 6.1. Početne posmične čvrstoće uzoraka zida prije i nakon smrzavanja

Oznaka uzorka	Početna posmična čvrstoća, f_{voi} (N/mm^2)		Omjer početnih posmičnih čvrstoća nakon i prije smrzavanja
	Prije smrzavanja	Nakon smrzavanja	
Uzorak S1S10301,5h+CEM 0-1-3	0,344	0,307	0,89
Uzorak S1R10301,5h+ CEM 0-1-3	0,376	0,345	0,92
Uzorak S2S1060-1,5h+ CEM 0-1-3	0,338	0,300	0,89
Uzorak S2R1060-1,5h+ CEM 0-1-3	0,386	0,361	0,94

Iz tablice je vidljivo kako su vrijednosti početnih posmičnih čvrstoća ziđa kod svih uzoraka opale. Također, primjećuje se kako su omjeri preostalih čvrstoća veći kod uzoraka s ručno rađenim opekama u odnosu na uzorke strojno izrađene opeke. Obzirom da su svi uzorci načinjeni s istom vrstom morta, ovo je direktna posljedica otpornosti opeke na cikluse smrzavanja i osmrzavanja.

Nadalje, temeljem rezultata ispitivanja toplinskih svojstava na razini materijala (Tablica 5.21) izračunat je koeficijent prolaska topline za zid debljine 25 cm prema formuli:

$$U=1/(R_u+(d/\lambda)+R_v)\ (W/m^2K)$$

gdje je:

R_u – unutrašnji otpor prijelazu topline (m2K/W)

R_v – vanjski otpor prijelazu topline (m2K/W)

d – debljina sloja materijala u građevnom dijelu, debljina opeke (m)

λ – toplinska provodljivost (W/(mK).

Otpor prijelazu topline korišten za simulaciju odgovara tipičnim vrijednostima prema normi ISO 6946 [196] tj. 0,13 m^2K/W za R_u i 0,04 m^2K/W za R_v. Koeficijenti prolaska topline ziđa prije i nakon ciklusa smrzavanja/odmrzavanja su prikazani Tablicom 6.2.

Tablica 6.2. Koeficijenti prolaska topline ziđa prije i nakon smrzavanja

Oznaka uzorka	Koeficijent prolaska topline, U (m^2K/W)		Omjer početnih posmičnih čvrstoća nakon i prije smrzavanja
	Prije smrzavanja	Nakon smrzavanja	
Zid S1S10301,5h+CEM 0-1-3	2,10	2,31	1,1
Zid S1R10301,5h+ CEM 0-1-3	1,98	2,06	1,0

Temeljem rezultata prikazanih u Tablici 6.2. vidljivo je kako koeficijent prolaska topline nakon izlaganja opeke ciklusima smrzavanja i odmrzavanja raste i do 10% a poznato je da niži koeficijent prolaska topline znači bolja toplinska svojstva zgrade. U nastavku je napravljena procjena utjecaja ciklusa smrzavanja i odmrzavanja na potrošnju energije na primjeru obiteljske kuće koja je locirana na području Osječko-baranjske županije. Tablicom 6.3 prikazane su karakteristike ovdje promatrane kuće.

Tablica 6.3. Karakteristike promatrane obiteljske kuće

Karakteristika	Vrijednost karakteristike
Korisna površina, A_k (m^2)	80,33
Volumen, V (m^3)	172,27
Faktor oblika, f_0	1,23
Godina izgradnje	1970
Orijentacija	JI-SZ
Površina zida (m^2) – zidovi između grijanih prostora različitih korisnika debljine 25 cm	12,64
Površina zida (m^2) – zidovi između grijanih prostora različitih korisnika debljine 30 cm	11,02
Površina zida (m^2) – vanjski zidovi debljine 25 cm	32,48
Površina zida (m^2) – vanjski zidovi debljine 30 cm	18,67
Površina zida (m^2) – zidovi negrijanog prostora debljine 25 cm	9,27

Za zadane je karakteristike zida napravljen proračun godišnje potrošnje energije, troškova grijanja, godišnje emisije CO_2, specifične godišnje potrebe za energijom za grijanje prema referentnim klimatskim podacima za oba tipa opeke i to prije i nakon njihovih izlaganja ciklusima smrzavanja i odmrzavanja u programu KI expert, a rezultati proračuna su ovdje prikazani Tablicom 6.4.

Tablica 6.4. Karakteristike godišnje potrebe za energijom

Karakteristika	Zid S1S10301,5h+CEM 0-1-3		Razlika karakteristika nakon i prije smrzavanja (%)	Zid S1R10301,5h+CEM 0-1-3		Razlika karakteristika nakon i prije smrzavanja (%)
	Prije smrzavanja	Nakon smrzavanja		Prije smrzavanja	Nakon smrzavanja	
Godišnja potrošnja energenata (m^3)	2115,46	2180,93	3,1	2076,57	2102,46	1,23
Troškovi grijanja (kn)	7016,97	7234,15	3,1	6887,98	6973,85	1,23
Godišnja emisija CO_2 (kg)	4397,38	4533,48	3,1	4316,54	4370,35	1,23
Specifična godišnja potrebna toplinska energija za grijanje za referentne klimatske podatke ($kW/(m^2a)$)	234	242	3,4	230	233	1,29

Iz tablice 6.4. vidljiva je godišnja potrošnja energenata, troškovi grijanja, godišnja emisija CO2 te specifična godišnja potrebna toplinska energija za grijanje za referentne klimatske podatke koje rastu nakon izlaganja zida ciklusima smrzavanja i odmrzavanja kao posljedica rasta toplinske provodljivosti opeke. Porast po svim svojstvima iznosi od 1 do 3 % za ovdje promatranih 80m^2 korisne površine. Uzimajući u obzir kako su u stvarnosti korisne površine kod objekata veće, veće bi bile i promjene parametara promatranih u Tablici 6.4. Ovo u nastavku znači kako je nepobitno kako ciklusi smrzavanja i odmrzavanja značajno utječu na mehanička a i toplinska svojstva zida povećavajući tako troškove održavanja zidanih objekata.

6. ZAKLJUČAK

U prvome je dijelu rada istražen utjecaj režima pečenja opeka na njihovu otpornost na cikluse smrzavanja i odmrzavanja. Opeke kontrolirane proizvodnje, izrađene ručno i strojno iz dvije različite sirovine, pečene su na dvije različite temperature određene temeljem kemijskog sastava sirovina (temperature 1030 i 1060 °C) te po postizanju najveće temperature u peći zadržane u peći na istoj 0,5 ili pak 1,5 h. Na istim su opekama (ukupno 8 serija opeka) određene tlačne čvrstoće prije i nakon njihova izlaganja ciklusima smrzavanja i odmrzavanja te stavljene u omjer kako bi se dobio kvantitativan podatak o otpornosti opeka na cikluse smrzavanja i odmrzavanja. Istovremeno, na opekama svih serija određeni su udjeli pora pojedinih veličina kao i ukupni udio pora pomoću živinog porozimetra. *Analizom podataka na ovoj razini istraživanja zaključeno je kako duži period zadržavanja opeka u peći na najvišoj postignutoj temperaturi rezultira boljom otpornošću opeka na cikluse smrzavanja i odmrzavanja te kako način izrade opeke i režim njezina pečenja utječu na sustav pora koji će se razviti u opeci tako da sličan sustav pora razvijaju opeke izrađene na isti način.*

U drugome dijelu rada, na 8 serija opeka kontrolirane proizvodnje te 8 serija strojno izrađenih opeka nekontrolirane proizvodnje određeni su sljedeći parametri: tlačne čvrstoće opeka prije i nakon izlaganja ciklusima smrzavanja i odmrzavanja te njihovi omjeri, koeficijent zasićenja, specifična površina BET metodom, udio pora pojedine veličine te ukupni udio pora, ukupni volumen pora i srednji radijus pora pomoću živinog porozimetra, ukupni udio pora hidrostatskim vaganjem, Maage koeficijent, koeficijent početnog upijanja, vodoupojnost te je praćeno upijanje i otpuštanje vode kod opeka u vremenu od 24 h. Dodatno, udio pora pojedine veličine te ukupni udio pora, ukupni volumen pora i srednji radijus pora pomoću živinog porozimetra kao i Maage koeficijent određeni su i kod 10 serija ručno izrađenih opeka nekontrolirane proizvodnje izvađenih iz konstrukcija. Obzirom kako su ručno izrađene opeke pokazale vrijednosti Maage koeficijenta značajno iznad vrijednosti Maage koeficijenata kod ostalih opeka, zbog sumnje da je kod ovih opeka došlo do promjene u sustavu pora uslijed ciklusa smrzavanja i odmrzavanja u konstrukciji, ove opeke su isključene iz daljnjeg istraživanja. Temeljem niza pobrojanih parametara kod 16 serija opeka (8 iz kontrolirane proizvodnje i 8 iz nekontrolirane proizvodnje) matematičkim je putem provjerena mogućnost ovih parametara da klasificiraju opeku na otpornu i neotpornu na cikluse smrzavanja i odmrzavanja te potražen matematički model koji opisuje omjer tlačnih čvrstoća opeka nakon i prije izlaganja ciklusima smrzavanja i

odmrzavanja. *Na ovoj je razini zaključeno kako su vodoupojnost i koeficijent otpuštanja vode iz opeke u vremenu 180-360 minuta izvrsni klasifikatori za klasifikaciju opeke na otporne i neotporne. Naime, uočeno je da sve otporne opeke imaju vrijednosti vodoupojnosti između 10 i 12.6, a sve neotporne veće od toga, tj. između 13.4 i 24.3 dok su kod neotpornih opeka vrijednosti koeficijenta otpuštanja vode u vremenu 180-360 minuta između 0,021 i 0,029 a kod otpornih opeka između 0,011 i 0,017. Ostali parametri ne pokazuju značajnu vezu s klasifikacijom opeke na otporne i neotporne kada su u pitanju ciklusi smrzavanja/odmrzavanja.*

Statistički pouzdan model za predviđanje omjera tlačnih čvrstoća opeka nakon i prije smrzavanja pronađen je u slijedećem obliku:

*omjer tlačnih čvrstoća=0,2970+0,0024*udio krupnih pora+0,3047*srednji radijus pora+0,3879*I (srednji radijus pora)-0,320*srednji radijus pora* I (srednji radijus pora)*

pri čemu je indikator, I (srednji radijus pora) = 0 ako je srednji radijus >1.2 te 1 ako je srednji radijus ≤ 1.2 što u nastavku daje sljedeći zaključak:

za područje srednji radijus pora ≤ 1.2 koristimo pravac izgleda:

*omjer tlačnih čvrstoća=0,6849+0,0024*udio krupnih pora-0,0153*srednji radijus pora*

za područje srednji radijus pora>1.2 koristimo pravac izgleda:

*omjer tlačnih čvrstoća=0,297+0,0024*udio krupnih pora+0,3047*srednji radijus pora*

Za četiri odabrane opeke provedena je i nanotomografija kojom se dobio uvid u udio otvorenih i zatvorenih pora u opeci te je uočeno kako *opeke s većim udjelom otvorenih pora u ukupnom udjelu pora imaju veći omjer tlačnih čvrstoća nakon i prije smrzavanja a time i bolju otpornost na cikluse smrzavanja i odmrzavanja.* Ovo u nastavku znači da osim distribucije pora bitnu ulogu kod otpornosti opeke na cikluse smrzavanja i odmrzavanja ima i vrsta pora.

U nastavku je istražen utjecaj ciklusa smrzavanja i odmrzavanja na mortove različitih sastava. U tu svrhu napravljeno je 12 mješavina mortova u kojima su volumno varirani omjeri komponenata unutar pojedine skupine. Napravljene su tri mješavine produžnog morta, tri mješavine vapnenog morta, tri mješavine cementnog morta te tri mješavine cementnog morta sa dodatkom aeranta. Uzorci mortova su izloženi ciklusima smrzavanja i odmrzavanja te im je određen omjer tlačnih i vlačnih čvrstoća nakon i prije ciklusa smrzavanja i odmrzavanja. Na svim su mortovima ispitani i udjeli pora pojedine veličine, ukupan udio pora te srednji radijusi pora pomoću živinog porozimetra kao i specifične površine BET metodom. Ipak, cilj ovoga dijela istraživanja nije bio iznalaženje matematičkoga modela koji opisuje omjer tlačnih i vlačnih čvrstoća nakon i prije smrzavanja kod mortova već stjecanje uvida u samu otpornost mortova pojedine vrste.

Uzorci vapnenog i produžnog morta su se u potpunosti raspali prilikom izlaganja ciklusima smrzavanja i odmrzavanja te im nije bilo moguće odrediti tlačne i vlačne čvrstoće nakon smrzavanja dok su najbolju otpornost u kontekstu omjera čvrstoća nakon i prije ciklusa smrzavanja i odmrzavanja pokazali cementni mortovi s aerantom. Ipak, kako takav mort nije uobičajen u primjeni kod zidanih konstrukcija, za nastavak istraživanja na razini konstrukcije usvojen je cementni mort omjera cementa i pijeska 1:3.

Odabranom mortu te dvjema serijama opeka iz kontrolirane proizvodnje određena su toplinska svojstva prije i nakon izlaganja ciklusima smrzavanja i odmrzavanja. *Uočeno je kako ciklusi smrzavanja i odmrzavanja negativno utječu na toplinsku provodljivost te da ona raste nakon izlaganja uzoraka tom djelovanju što znači da materijali nakon ciklusa smrzavanja i odmrzavanja osim na mehaničkim svojstvima gube i na svojstvu toplinske izolacije.*

U posljednjem je dijelu rada napravljeno zide od odabranih opeka i odabranoga morta kojem je ispitivanjem određena početna posmična čvrstoća prije i nakon smrzavanja te računski određen koeficijent prolaska topline prije i nakon smrzavanja. *Zaključeno je kako ciklusi smrzavanja i odmrzavanja slabe kako mehanička tako i toplinska svojstva zida što u nastavku znači veću* potrošnju energije i veće troškove grijanja u objektima te veću godišnju emisiju CO_2. Navedeno je posljedica opadanja mehaničkih i toplinskih svojstava materijala zida uslijed ciklusa smrzavanja i odmrzavanja. Kako bi se spriječila masovnija proizvodnja opeke lošije otpornosti na cikluse smrzavanja i osmrzavanja, autorica kao pouzdanu i cijenom pristupačnu metodu za ocjenu otpornosti opeke predlaže gore navedenu vodoupojnost.

Tablica 6.5: Rezultati ispitivanja svojstava opeke – pojedinačne vrijednosti

Opeka	Proizvodnja (kontrolirana/nekontrolirana)	Način proizvodnje (ručna/strojna)	Otpornost prema HRN B.D8.011	Normna tlačna čvrstoća (N/mm2)	Vodoupojnost (%)	Koeficijent zasićenja	Omjer čvrstoća nakon i prije smrzavanja	Udio krupnih pora (%)	Udio pora srednje veličine (%)	Udio sitnih pora (%)	Ukupni udio pora (%)	Ukupni udio pora hidrostatskim vaganjem (%)	Specifična površina BET (m^2/g)	Srednji radijus pora (µm)	Ukupni volumen pora (mm^3/g)	Maage faktor	Koeficijent početnog upijanja (kg/m2 x min)	Upijanje u 0-10 min (%)	Upijanje u 10-20 min (%)	Upijanje u 20-30 min (%)	Koef. upijanja u 0-10 min (%/min)	Koef. upijanja 10-20 min (%/min)	Koef. upijanja 20-30 min (%/min)	Upijena voda u 0-180 min (%)	Upijena voda u 180-360 min (%)	Upijena voda u 360-540 min (%)	Koef. otpuštanja u 0-180 min (%/min)	Koef. otpuštanja 180-360 min (%/min)	Koef. otpuštanja 360-540 min (%/min)
S1R1030-1,5h	kontrolirana	ručna	otporna	23,0	11,9	0,69	0,73	20,6	76,2	3,2	19,4	8,9	3,36	1,33	96,1	57	1,3	10,8	11,4	11,5	1,1	0,1	0,0	4,7	2,1	0,6	0,04	0,01	0,01
				22,6	11,9	0,69						8,8	2,81				0,9	10,4	11,5	11,6	1,0	0,1	0,0	4,7	2,3	0,7	0,04	0,01	0,01
				22,5	11,9	0,69						8,6	2,96				1,1	10,8	11,5	11,6	1,1	0,1	0,0	11,4	8,6	6,8	0,00	0,02	0,01
				22,6	11,9	0,69						8,5	3,44				1,5	10,7	11,5	11,6	1,1	0,1	0,0	4,5	1,9	0,6	0,04	0,01	0,01
				22,7	11,9	0,69						8,6	-				1,3	10,7	11,5	11,6	1,1	0,1	0,0	4,0	1,8	0,4	0,04	0,01	0,01
				21,7	11,8	0,69						8,4	-				0,9	10,5	11,5	11,5	1,1	0,1	0,0	4,7	2,3	0,7	0,04	0,01	0,01
				21,9	11,9	0,69						8,4	-				1,0	10,6	11,4	11,5	1,1	0,1	0,0	4,1	1,9	0,4	0,04	0,01	0,01
				22,0	11,9	0,68						8,9	-				0,9	10,4	11,4	11,5	1,0	0,1	0,0	4,0	1,7	0,3	0,04	0,01	0,01
				23,0	11,8	0,69						8,7	-				1,2	10,3	11,4	11,5	1,0	0,1	0,0	4,7	2,2	0,7	0,04	0,01	0,01
				22,5	11,9	0,69						8,7	-				1,3	10,5	11,4	11,6	1,1	0,1	0,0	2,3	1,7	0,4	0,05	0,00	0,01
srednja vrijednost				**22,5**	**11,9**	**0,69**	**0,73**	**20,6**	**76,2**	**3,2**	**19,4**	**8,7**	**3,1**	**1,33**	**96,1**	**57,0**	**1,1**	**10,6**	**11,5**	**11,6**	**1,1**	**0,1**	**0,0**	**4,9**	**2,7**	**1,2**	**0,04**	**0,01**	**0,01**
S1R1030-0,5h	kontrolirana	ručna	otporna	20,3	12,9	0,76	0,72	11,2	84,8	4	20,4	9,5	3,90	1,31	113,1	56	1,8	12,2	12,7	12,8	1,2	0,1	0,0	5,4	3,1	1,6	0,04	0,01	0,01
				19,6	12,7	0,75						9,7	3,57				1,9	12,2	12,6	12,6	1,2	0,0	0,0	6,6	3,9	1,7	0,03	0,02	0,01
				20,4	12,1	0,76						9,3	3,68				1,6	11,2	12	12,1	1,1	0,1	0,0	5,8	3,9	2,0	0,04	0,01	0,01
				20,4	12,8	0,75						9,0	3,46				1,6	12,1	12,6	12,7	1,2	0,1	0,0	6,5	3,6	1,7	0,04	0,02	0,01
				20,3	12,4	0,76						8,9					2,4	12	12,3	12,4	1,2	0,0	0,0	5,8	3,9	2,0	0,04	0,01	0,01
				20,3	13,1	0,74						8,8					2,1	12,8	13	13	1,3	0,0	0,0	6,4	3,7	1,7	0,04	0,02	0,01
				19,8	12,6	0,76						9,0					1,9	12,1	12,5	12,5	1,2	0,0	0,0	6,5	3,6	1,7	0,03	0,02	0,01
				20,4	11,9	0,75						9,9					2,1	10,9	11,8	11,8	1,1	0,1	0,0	5,6	3,6	1,7	0,04	0,01	0,01
				21,1	10,9	0,75						8,9					2,2	9,5	10,5	10,7	1,0	0,1	0,0	6,3	3,9	1,9	0,03	0,01	0,01
				21,0	11,7	0,76						8,7					2,3	10,8	11,4	11,6	1,1	0,1	0,0	5,5	3,3	1,2	0,03	0,01	0,01
				20,1	13,0	0,75						9,0					2,0	12,7	12,9	12,9	1,3	0,0	0,0	5,6	3,6	1,7	0,04	0,01	0,01
				-	11,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10,8	11,3	11,4	1,1	0,1	0,0	5,8	3,6	1,6	0,03	0,01	0,01
				-	12,4	-						-	-				-	11,3	12,3	12,3	1,1	0,1	0,0	5,6	3,6	1,7	0,04	0,01	0,01
				-	12,2	-						-	-				-	11,4	11,9	12	1,1	0,1	0,0	6,3	3,9	1,9	0,03	0,01	0,01
				-	12,8	-						-	-				-	12,5	12,7	12,7	1,3	0,0	0,0	5,6	3,6	1,7	0,04	0,01	0,01
				-	11,0	-						-	-				-	9,9	10,6	10,8	1,0	0,1	0,0	6,3	3,9	1,9	0,03	0,01	0,01
srednja vrijednost				**20,3**	**12,3**	**0,75**	**0,72**	**11,2**	**84,8**	**4**	**20,4**	**9,2**	**3,65**	**1,31**	**113,1**	**56**	**2,0**	**11,5**	**12,1**	**12,1**	**1,2**	**0,1**	**0,0**	**6,0**	**3,7**	**1,7**	**0,03**	**0,01**	**0,01**

Tablica 6.5: Rezultati ispitivanja svojstava opeke – pšojedinačne vrijednosti

Opeka	Proizvodnja (kontrolirana/ nekontrolirana)	Način proizvodnje (ručna/strojna)	Otpornost prema HRN B.D8.011	Normna tlačna čvrstoća (N/mm^2)	Vodoupojnost (%)	Koeficijent zasićenja	Omjer čvrstoća nakon i prije smrzavanja	Udio krupnih pora (%)	Udio pora srednje veličine (%)	Udio sitnih pora (%)	Ukupni udio pora (%)	Ukupni udio pora hidrostatskim vaganjem (%)	Specifična površina BET (m^2/g)	Srednji radijus pora (µm)	Ukupni volumen pora (mm^3/g)	Maage faktor	Koeficijent početnog upijanja (kg/m^2 x min)	Upijanje u 0-10 min (%)	Upijanje u 10-20 min (%)	Upijanje u 20-30 min (%)	Koef. upijanja u 0-10 min (%/min)	Koef. upijanja 10-20 min (%/min)	Koef. upijanja 20-30 min (%/min)	Upijena voda u 0-180 min (%)	Upijena voda u 180-360 min (%)	Upijena voda u 360-540 min (%)	Koef. otpuštanja u 0-180 min (%/min)	Koef. otpuštanja 180-360 min (%/min)	Koef. otpuštanja 360-540 min (%/min)
S2R1060-1,5h	kontrolirana	ručna	otporna	25,7	11,2	0,73	0,86	29,4	65,9	4,7	17,2	8,3	3,39	1,67	105,1	90	1,1	6,6	9,8	10,4	0,7	0,3	0,1	3,5	2,1	0,9	0,04	0,01	0,01
				26,7	11,3	0,72						8,2	3,14				1,2	8,5	9,7	10,6	0,9	0,1	0,1	3,8	2,1	0,9	0,04	0,01	0,01
				25,9	11,2	0,73						8,0	3,12				1,1	5,4	9,6	10,3	0,5	0,4	0,1	3,6	1,4	0,9	0,04	0,01	0,00
				26,0	11,2	0,72						7,9	2,83				1,0	5,4	5,8	6,5	0,5	0,0	0,1	3,2	2,1	0,7	0,04	0,01	0,01
				26,6	11,2	0,73						8,1	-				0,9	5,7	9,6	10,3	0,6	0,4	0,1	4,6	1,9	0,6	0,04	0,02	0,01
				26,5	11,4	0,73						8,0	-				0,9	7,3	9,5	10,6	0,7	0,2	0,1	3,7	1,8	0,4	0,04	0,01	0,01
				26,8	11,2	0,72						7,9	-				1,1	5,6	9,4	10,4	0,6	0,4	0,1	4,9	2,4	0,3	0,04	0,01	0,01
				25,7	11,0	0,73						8,2	-				1,3	6,3	9,3	10,1	0,6	0,3	0,1	3,9	1,5	0,5	0,04	0,01	0,01
				26,3	11,3	0,73						8,3	-				0,9	6,3	9,2	10,1	0,6	0,3	0,1	3,9	2,1	1,0	0,04	0,01	0,01
				26,3	11,4	0,71						8,0	-				0,8	6,4	9,3	10,1	0,6	0,3	0,1	3,3	1,4	1,1	0,05	0,01	0,00
srednja vrijednost				**26,3**	**11,2**	**0,73**	**0,86**	**29,4**	**65,9**	**4,7**	**17,16**	**8,1**	**3,12**	**1,67**	**105,1**	**90**	**1,0**	**6,4**	**9,1**	**9,9**	**0,6**	**0,3**	**0,1**	**3,8**	**1,9**	**0,8**	**0,04**	**0,01**	**0,01**
S2R1060-0,5h	kontrolirana	ručna	otporna	24,5	11,0	0,75	0,85	15,9	78,7	5,4	17,8	8,6	3,57	1,66	109,3	61	1,7	8,1	10,2	10,5	0,8	0,2	0,0	4,6	2,2	1,0	0,04	0,01	0,01
				24,5	11,6	0,74						8,4	3,57				1,6	8,2	10,7	10,9	0,8	0,3	0,0	4,9	2,3	0,7	0,04	0,01	0,01
				23,9	11,3	0,74						8,3	3,90				1,9	7,9	10,3	10,8	0,8	0,2	0,1	4,6	2,2	0,6	0,04	0,01	0,01
				24,9	11,4	0,75						8,0	3,57				2,1	8,2	10,6	10,9	0,8	0,2	0,0	4,9	2,2	0,7	0,04	0,02	0,01
				25,0	11,5	0,74						8,8	-				1,9	8,1	10,6	10,9	0,8	0,3	0,0	4,3	2,1	0,4	0,04	0,01	0,01
				25,2	11,7	0,76						9,0	-				1,7	8,7	10,5	10,7	0,9	0,2	0,0	5,1	1,9	0,1	0,04	0,02	0,01
				24,8	11,2	0,76	-	-	-	-	-	8,9	-	-	-	-	1,6	8,3	10,5	10,8	0,8	0,2	0,0	5,7	2,8	0,9	0,03	0,02	0,01
				25,0	11,5	0,74						8,0					1,9	7	9,6	10,6	0,7	0,3	0,1	4,4	1,7	0,3	0,04	0,02	0,01
				25,1	11,5	0,75						8,9					1,9	8,3	10,4	10,7	0,8	0,2	0,0	4,2	1,5	0,2	0,04	0,02	0,01
				25,1	11,6	0,75						8,2					2,1	8,4	10,6	10,9	0,8	0,2	0,0	3,8	1,6	0,1	0,04	0,01	0,01
				-	11,0	-						-						8,1	9,4	10	0,8	0,1	0,1	4,5	2,1	0,5	0,04	0,01	0,01
				-	11,5	-						-						7,8	10,2	10,5	0,8	0,2	0,0	4,1	1,4	0,1	0,04	0,02	0,01
				-	11,4	-						-						7,9	9,2	10	0,8	0,1	0,1	4,3	2,0	0,5	0,04	0,01	0,01
				-	11,3	-						-						8,5	10,5	11	0,9	0,2	0,1	4,0	1,7	0,6	0,04	0,01	0,01
				-	11,4	-						-						7,7	10,9	11,1	0,8	0,3	0,0	4,1	2,0	0,6	0,04	0,01	0,01
				-	11,5	-						-						7,1	9,4	10,3	0,7	0,2	0,1	4,2	1,7	0,4	0,04	0,01	0,01
				-	11,3	-						-						7,6	9,4	10,5	0,8	0,2	0,1	4,5	2,3	0,8	0,04	0,01	0,01
				-	11,5	-						-						7,3	9,7	10,5	0,7	0,2	0,1	3,7	1,8	0,5	0,04	0,01	0,01
				-	11,6	-						-						7,8	10,5	10,9	0,8	0,3	0,0	3,9	1,8	0,5	0,04	0,01	0,01
				-	11,7	-						-						7,3	9,7	10,4	0,7	0,2	0,1	4,1	1,9	0,6	0,04	0,01	0,01
srednja vrijednost				**24,8**	**11,4**	**0,75**	**0,85**	**15,9**	**78,7**	**5,4**	**17,8**	**8,5**	**3,65**	**1,66**	**109,3**	**61,0**	**1,8**	**8,1**	**10,4**	**10,8**	**0,8**	**0,2**	**0,0**	**4,7**	**2,1**	**0,5**	**0,04**	**0,01**	**0,01**

Tablica 6.5: Rezultati ispitivanja svojstava opeke - pojedinačne vrijednosti

Opeka	Proizvodnja (kontrolirana/ nekontrolirana)	Način proizvodnje (ručna/strojna)	Otpornost prema HRN B.D8.011	Normna tlačna čvrstoća (N/mm^2)	Vodoupojnost (%)	Koeficijent zasićenja	Omjer čvrstoća nakon i prije smrzavanja	Udio krupnih pora (%)	Udio pora srednje veličine (%)	Udio sitnih pora (%)	Ukupni udio pora (%)	Ukupni udio pora hidrostatskim vaganjem (%)	Specifična površina BET (m^2/g)	Srednji radijus pora (µm)	Ukupni volumen pora (mm^3/g)	Maage faktor	Koeficijent početnog upijanja (kg/m^2 x min)	Upijanje u 0-10 min (%)	Upijanje u 10-20 min (%)	Upijanje u 20-30 min (%)	Koef. upijanja u 0-10 min (%/min)	Koef. upijanja 10-20 min (%/min)	Koef. upijanja 20-30 min (%/min)	Upijena voda u 0-180 min (%)	Upijena voda u 180-360 min (%)	Upijena voda u 360-540 min (%)	Koef. otpuštanja u 0-180 min (%/min)	Koef. otpuštanja 180-360 min (%/min)	Koef. otpuštanja 360-540 min (%/min)
S1S1030-1,5h	kontrolirana	strojna	otporna	26,8	10,7	0,74	0,81	17,3	66	16,7	16,2	7,9	2,89	1,56	89,1	70	2,2	10,3	10,4	10,5	1,0	0,0	0,0	5,1	1,0	1,2	0,03	0,02	0,00
				27,0	10,4	0,73						7,9	3,11				2,3	9,6	9,9	10	1,0	0,0	0,0	3,3	0,6	0,3	0,04	0,02	0,00
				27,4	10,4	0,73						7,7	3,12				2,4	9,8	9,9	10	1,0	0,0	0,0	3,8	0,5	0,6	0,04	0,02	0,00
				26,5	12,4	0,74						8,1	2,90				2,6	10,6	11,9	11,9	1,1	0,1	0,0	3,2	1,8	0,4	0,05	0,01	0,01
				26,6	10,7	0,74						7,7	-				2,5	10	10,2	10,2	1,0	0,0	0,0	2,3	1,5	0,4	0,05	0,00	0,01
				27,0	11,3	0,73						8,2	-				2,1	10,4	10,6	10,7	1,0	0,0	0,0	4,5	1,7	1,6	0,04	0,02	0,00
				26,9	11,6	0,74						7,7	-				2,9	11,1	11,2	11,2	1,1	0,0	0,0	4,8	0,7	0,8	0,04	0,02	0,00
				26,9	11,7	0,74						7,8	-				2,4	9,6	10,1	10,1	1,0	0,1	0,0	5,3	2,9	0,2	0,04	0,01	0,02
				27,3	11,8	0,74						8,0	-				2,5	11,2	11,5	11,5	1,1	0,0	0,0	3,4	1,0	0,3	0,05	0,01	0,00
				27,3	11,8	0,72	-	-	-	-	-	8,1	-				2,6	10,6	11,5	11,5	1,1	0,1	0,0	6,3	1,0	1,0	0,03	0,03	0,00
				-	10,2	-						8,2	-				2,7	10,5	11	11	1,1	0,1	0,0	2,7	1,8	0,4	0,04	0,01	0,01
srednja vrijednost				**27,0**	**11,2**	**0,74**	**0,81**	**17,3**	**66,0**	**16,7**	**16,2**	**7,9**	**3,01**	**1,56**	**89,1**	**70,0**	**2,5**	**10,3**	**10,7**	**10,8**	**1,0**	**0,0**	**0,0**	**4,2**	**1,3**	**0,7**	**0,04**	**0,02**	**0,00**
S1S1030-0,5h	kontrolirana	strojna	otporna	24,8	13,1	0,75	0,79	15,8	72,8	11,4	19,1	8,6	3,46	1,47	107,5	63	2,6	11,1	11,5	12,7	1,1	0,0	0,1	5,6	1,9	0,6	0,04	0,02	0,01
				24,2	10,7	0,74						8,4	3,57				2,8	10,3	10,4	10,5	1,0	0,0	0,0	3,6	1,2	0,3	0,04	0,01	0,01
				23,9	10,4	0,75						8,3	2,90				2,9	9,6	9,7	10	1,0	0,0	0,0	4,1	1,3	0,3	0,04	0,02	0,01
				24,2	12,7	0,74						8,5	3,24				2,8	11,5	11,7	12,1	1,2	0,0	0,0	3,5	0,9	0,3	0,05	0,01	0,00
				25,0	10,4	0,74						8,7	-				3,2	9,8	9,9	10	1,0	0,0	0,0	2,5	0,8	0,4	0,04	0,01	0,00
				25,3	12,4	0,75						8,6	-				2,6	10,9	11,9	11,9	1,1	0,1	0,0	4,9	2,3	1,3	0,04	0,01	0,01
				25,1	13,5	0,75						8,9	-				2,8	12,9	13	13,1	1,3	0,0	0,0	5,3	1,9	0,6	0,05	0,02	0,01
				25,4	10,7	0,75						9,0	-				2,9	10	10,2	10,2	1,0	0,0	0,0	5,7	2,2	0,6	0,03	0,02	0,01
				24,9	11,3	0,74						8,2	-				2,6	10,4	10,6	10,7	1,0	0,0	0,0	3,8	1,1	0,4	0,04	0,02	0,00
				25,0	11,6	0,75						8,3	-				2,5	11,1	11,2	11,2	1,1	0,0	0,0	6,8	3,4	1,1	0,03	0,02	0,01
				-	12,6	-						-	-					11,3	11,6	12,3	1,1	0,0	0,1	3,1	1,3	0,3	0,05	0,01	0,01
				-	10,4	-						-	-					10,1	10,1	10,1	1,0	0,0	0,0	4,3	1,2	0,3	0,03	0,02	0,01
				-	12,0	-						-	-					11,2	11,5	11,5	1,1	0,0	0,0	5,2	2,1	0,5	0,04	0,02	0,01
				-	12,0	-						-	-					10,6	11,5	11,5	1,1	0,1	0,0	2,9	1,0	0,3	0,05	0,01	0,00
				-	13,0	-						-	-					11,5	11,6	12,8	1,2	0,0	0,1	2,9	1,4	0,3	0,06	0,01	0,01
				-	11,3	-						-	-					10,5	11	11	1,1	0,1	0,0	6,2	2,5	1,0	0,03	0,02	0,01
srednja vrijednost				**24,8**	**11,8**	**0,75**	**0,79**	**15,8**	**72,8**	**11,4**	**19,1**	**8,6**	**3,29**	**1,47**	**107,5**	**63,0**	**2,8**	**10,8**	**11,1**	**11,4**	**1,1**	**0,0**	**0,0**	**4,4**	**1,7**	**0,5**	**0,04**	**0,02**	**0,01**

Tablica 6.5: Rezultati ispitivanja svojstava opeke – pojedinačne vrijednosti

Opeka	Proizvodnja (kontrolirana/ nekontrolirana)	Način proizvodnje (ručna/strojna)	Otpornost prema HRN B.D8.011	Normna tlačna čvrstoća (N/mm2)	Vodoupojnost (%)	Koeficijent zasićenja	Omjer čvrstoća nakon i prije smrzavanja	Udio krupnih pora (%)	Udio pora srednje veličine (%)	Udio sitnih pora (%)	Ukupni udio pora (%)	Ukupni udio pora hidrostatskim vaganjem (%)	Specifična površina BET (m^2/g)	Srednji radijus pora (μm)	Ukupni volumen pora (mm^3/g)	Maage faktor	Koeficijent početnog upijanja (kg/m^2 x min)	Upijanje u 0-10 min (%)	Upijanje u 10-20 min (%)	Upijanje u 20-30 min (%)	Koef. upijanja u 0-10 min (%/min)	Koef. upijanja 10-20 min (%/min)	Koef. upijanja 20-30 min (%/min)	Upijena voda u 0-180 min (%)	Upijena voda u 180-360 min (%)	Upijena voda u 360-540 min (%)	Koef. otpuštanja u 0-180 min (%/min)	Koef. otpuštanja 180-360 min (%/min)	Koef. otpuštanja 360-540 min (%/min)
S2S1060-1,5h	kontrolirana	strojna	otporna	41,9	10,3	0,83	0,77	17,8	74,3	7,9	22,2	5,3	2,39	1,43	96,4	60	2,4	9	9,8	9,9	0,9	0,1	0,0	3,5	0,8	0,3	0,04	0,02	0,00
				42,3	9,8	0,84						5,5	2,83				2,2	8	8,5	8,6	0,8	0,1	0,0	3,0	1,5	0,4	0,04	0,01	0,01
				42,5	10,0	0,83						5,6	2,83				2,6	7,9	8,2	8,2	0,8	0,0	0,0	3,5	0,7	0,4	0,04	0,02	0,00
				43,0	9,7	0,83	-	-	-	-	-	5,7	3,10	-	-	-	2,7	8,9	9,2	9,3	0,9	0,0	0,0	3,5	1,5	0,4	0,03	0,01	0,01
				41,9	10,3	0,83						5,9	-				2,8	9	9,8	9,9	0,9	0,1	0,0	3,0	1,8	1,0	0,04	0,01	0,00
				42,0	8,9	0,84						5,5	-				2,8	7,8	8,1	8,3	0,8	0,0	0,0	3,0	1,6	0,4	0,03	0,01	0,01
				42,5	9,8	0,83						4,9	-				2,1	8,8	9,2	9,2	0,9	0,0	0,0	3,5	1,4	0,5	0,04	0,01	0,01
				42,6	10,4	0,83						5,1	-				2,2	9,3	9,7	9,8	0,9	0,0	0,0	4,9	1,5	0,8	0,03	0,02	0,00
				41,3	10,5	0,83						4,9	-				2,5	8,9	9	9,1	0,9	0,0	0,0	3,5	1,3	0,5	0,04	0,01	0,00
				40,0	10,4	0,83						5,0	-				2,6	9,2	9,7	9,7	0,9	0,1	0,0	3,5	1,8	0,4	0,04	0,01	0,01
srednja vrijednost				**42,0**	**10,0**	**0,83**	**0,77**	**17,8**	**74,3**	**7,9**	**22,2**	**5,3**	**2,79**	**1,43**	**96,4**	**60,0**	**2,5**	**8,7**	**9,1**	**9,2**	**0,9**	**0,0**	**0,0**	**3,5**	**1,4**	**0,5**	**0,04**	**0,01**	**0,00**
S2S1060-0,5h	kontrolirana	strojna	otporna	35,4	10,3	0,84	0,75	2,2	86,4	11,4	28,3	5,7	3,46	1,40	147,0	56	2,4	8,4	9,6	9,6	0,8	0,1	0,0	4,7	1,7	0,6	0,03	0,02	0,01
				35,0	9,8	0,85						5,1	3,78				2,2	8	9	9,1	0,8	0,1	0,0	5,0	1,6	1,3	0,03	0,02	0,00
				34,9	10,2	0,84						5,2	3,45				2,8	8,2	9,4	9,5	0,8	0,1	0,0	4,7	2,2	1,4	0,03	0,01	0,00
				35,6	9,7	0,84						5,3	2,89				2,8	8	9	9,1	0,8	0,1	0,0	4,7	3,9	3,3	0,03	0,00	0,00
				35,4	10,3	0,84						5,7					2,6	8,1	9	9	0,8	0,1	0,0	4,8	2,2	1,6	0,03	0,01	0,00
				35,0	10,9	0,83						5,7					2,4	8,1	9,7	9,9	0,8	0,2	0,0	3,1	1,9	0,8	0,04	0,01	0,01
				35,9	11,3	0,84						5,6					2,5	8,6	10,2	10,3	0,9	0,2	0,0	4,0	1,0	0,3	0,04	0,02	0,00
				35,8	9,6	0,84						5,7					2,3	7,9	8,6	8,9	0,8	0,1	0,0	3,4	1,1	0,4	0,03	0,01	0,00
				35,6	10,4	0,83						5,7					2,7	8,3	9,5	9,5	0,8	0,1	0,0	2,9	0,5	0,2	0,04	0,01	0,00
				35,3	10,8	0,84						5,6					2,7	9	9,8	9,9	0,9	0,1	0,0	4,2	1,1	0,8	0,04	0,02	0,00
					10,6													8	9,1	9,1	0,8	0,1	0,0	3,2	1,2	0,7	0,04	0,01	0,00
					10,3													8,1	9,4	9,4	0,8	0,1	0,0	4,1	1,5	0,5	0,03	0,01	0,01
				-	9,7	-						-	-					8,2	8,9	9	0,8	0,1	0,0	2,8	2,4	2,2	0,04	0,00	0,00
				-	10,1	-						-	-					8,2	9,2	9,2	0,8	0,1	0,0	2,2	0,6	0,5	0,04	0,01	0,00
				-	11,4	-						-	-					9,1	9,4	9,5	0,9	0,0	0,0	3,6	1,2	0,3	0,04	0,01	0,01
				-	9,4	-						-	-					8,5	8,8	8,8	0,9	0,0	0,0	2,8	0,5	0,6	0,04	0,01	0,00
				-	9,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		7,9	9,3	9,4	0,8	0,1	0,0	3,3	1,5	0,2	0,04	0,01	0,01
				-	10,6	-						-	-					8,5	8,8	8,9	0,9	0,0	0,0	2,6	0,9	0,3	0,04	0,01	0,00
				-	11,2	-						-	-					9,5	10,5	10,6	1,0	0,1	0,0	2,1	0,2	0,3	0,05	0,01	0,00
				-	10,7	-						-	-					8,8	9,7	9,7	0,9	0,1	0,0	3,5	1,0	0,0	0,04	0,01	0,01
srednja vrijednost				**35,4**	**10,4**	**0,84**	**0,75**	**2,2**	**86,4**	**11,4**	**28,3**	**5,5**	**3,40**	**1,40**	**147,0**	**56,0**	**2,5**	**8,4**	**9,3**	**9,4**	**0,8**	**0,1**	**0,0**	**3,6**	**1,4**	**0,8**	**0,04**	**0,01**	**0,00**

Tablica 6.5: Rezultati ispitivanja pojedinačnih svojstava opeke – pojedinačne vrijednosti

Opeka	Proizvodnja (kontrolirana/ nekontrolirana)	Način proizvodnje (ručna/strojna)	Otpornost prema HRN B.D8.011	Normna tlačna čvrstoća (N/mm^2)	Vodoupojnost (%)	Koeficijent zasićenja	Omjer čvrstoća nakon i prije smrzavanja	Udio krupnih pora (%)	Udio pora srednje veličine (%)	Udio sitnih pora (%)	Ukupni udio pora (%)	hidrostatskim vaganjem (%)	Specifična površina BET (m^2/g)	Srednji radijus pora (µm)	Ukupni volumen pora (mm3/g)	Maage faktor	Koeficijent početnog upijanja (kg/m^2 x min)	Upijanje u 0-10 min (%)	Upijanje u 10-20 min (%)	Upijanje u 20-30 min (%)	Koef. upijanja u 0-10 min (%/min)	Koef. upijanja 10-20 min (%/min)	Koef. upijanja 20-30 min (%/min)	Upijena voda u 0-180 min (%)	Upijena voda u 180-360 min (%)	Upijena voda u 360-540 min (%)	Koef. otpuštanja u 0-180 min (%/min)	Koef. otpuštanja 180-360 min (%/min)	Koef. otpuštanja 360-540 min (%/min)
Rustik	nekontrolirana	strojna	otporna	26,9	8,6	0,93	0,89	56,1	43,2	0,7	34,4	5,8	2,65	1,45	207,5	139	2,6	7,4	7,6	7,7	0,7	0,0	0,0	6,8	2,2	0,1	0,01	0,03	0,01
				28,0	11,1	0,92						5,9	3,06				2,5	9,8	10,1	10,2	1,0	0,0	0,0	5,9	2,9	0,3	0,03	0,02	0,01
				27,6	12,0	0,93						6,1	2,25				2,6	10,8	11,1	11,3	1,1	0,0	0,0	6,1	2,6	0,2	0,03	0,02	0,01
				27,5	10,3	0,93						6,4	3,63				2,9	9	9,3	9,4	0,9	0,0	0,0	4,0	2,4	0,0	0,04	0,01	0,01
				27,8	15,1	0,94						6,2					2,8	14,4	14,6	14,7	1,4	0,0	0,0	7,7	2,3	0,7	0,04	0,03	0,01
				28,0	17,9	0,91						6,0					2,9	16,8	17,4	17,4	1,7	0,1	0,0	4,5	0,8	0,8	0,07	0,02	0,00
				27,9	15,4	0,93						5,7					2,7	13,6	14,4	14,6	1,4	0,1	0,0	4,5	3,9	0,5	0,06	0,00	0,02
				27,8	7,7	0,93						5,9					2,8	6,8	6,8	7	0,7	0,0	0,0	6,1	3,0	0,2	0,01	0,02	0,02
				27,8	16,9	0,93						6,3					2,5	14	15,7	16	1,4	0,2	0,0	7,7	4,3	0,4	0,05	0,02	0,02
				27,3	11,1	0,93						6,1					2,3	10,1	10,3	10,4	1,0	0,0	0,0	4,9	3,4	0,2	0,03	0,01	0,02
srednja vrijednost				**27,7**	**12,6**	**0,93**	**0,89**	**56,1**	**43,2**	**0,7**	**34,4**	**6,0**	**2,90**	**1,45**	**207,5**	**139,0**	**2,7**	**11,3**	**11,7**	**11,9**	**1,1**	**0,0**	**0,0**	**5,8**	**2,8**	**0,3**	**0,04**	**0,02**	**0,01**
Derventa	nekontrolirana	strojna	neotporna	15,0	13,8	0,75	0,72	13,1	82,4	4,5	28,9	8,9	2,71	-0-,-5-1	153,4	53	1,1	9,8	12,4	13	1,0	0,3	0,1	4,0	0,9	0,2	0,05	0,02	0,00
				14,9	14,0	0,75						9,1	2,73				1,0	7,4	10	11,3	0,7	0,3	0,1	4,9	1,5	0,3	0,05	0,02	0,01
				15,3	11,8	0,74						9,1	2,66				1,4	7,3	9,6	10,5	0,7	0,2	0,1	5,1	2,8	1,6	0,04	0,01	0,01
				15,5	13,7	0,75						9,0	3,13				1,3	6,3	8,7	10	0,6	0,2	0,1	7,1	2,7	0,6	0,04	0,02	0,01
				14,9	12,3	0,73						9,3	-				1,3	10,3	11,6	11,6	1,0	0,1	0,0	6,3	1,5	0,6	0,03	0,03	0,01
				15,2	14,1	0,75						8,9	-				1,2	5,6	9,5	9,6	0,6	0,4	0,0	5,9	2,0	0,2	0,05	0,02	0,01
				15,3	14,4	0,75						9,1	-				1,3	5	7,5	8,8	0,5	0,3	0,1	4,3	1,3	0,3	0,06	0,02	0,01
				15,5	14,6	0,74	-	-	-	-	-	9,0	-	-	-	-	1,0	5,8	8,6	10,1	0,6	0,3	0,2	6,5	1,9	0,2	0,05	0,03	0,01
				15,4	14,3	0,75						8,9	-				1,5	5,4	6,4	8,9	0,5	0,1	0,3	5,5	1,8	0,5	0,05	0,02	0,01
				15,4	11,1	0,77						8,8	-				1,4	6,9	9,5	10,5	0,7	0,3	0,1	5,9	2,0	0,2	0,03	0,02	0,01
srednja vrijednost				**15,2**	**13,4**	**0,75**	**0,72**	**13,1**	**82,4**	**4,5**	**28,9**	**9,0**	**2,81**	**0,51**	**153,4**	**53,0**	**1,3**	**7,0**	**9,4**	**10,4**	**0,7**	**0,2**	**0,1**	**5,6**	**1,8**	**0,5**	**0,04**	**0,02**	**0,01**

Tablica 6.5.: Rezultati ispitivanja opeke - pojedinačne vrijednosti

Opeka	Proizvodnja (kontrolirana/ nekontrolirana)	Način proizvodnje (ručna/strojna)	Otpornost prema HRN B.D8.011	Normna tlačna čvrstoća (N/mm2)	Vodoupojnost (%)	Koeficijent zasićenja	Omjer čvrstoća nakon i prije smrzavanja	Udio krupnih pora (%)	Udio pora srednje veličine (%)	Udio sitnih pora (%)	Ukupni udio pora (%)	Ukupni udio pora hidrostatskim vaganjem (%)	Specifična površina BET (m^2/g)	Srednji radijus pora (µm)	Ukupni volumen pora (mm^3/g)	Maage faktor	Koeficijent početnog upijanja (kg/m^2 x min)	Upijanje u 0-10 min (%)	Upijanje u 10-20 min (%)	Upijanje u 20-30 min (%)	Koef. upijanja u 0-10 min (%/min)	Koef. upijanja 10-20 min (%/min)	Koef. upijanja 20-30 min (%/min)	Upijena voda u 0-180 min (%)	Upijena voda u 180-360 min (%)	Upijena voda u 360-540 min (%)	Koef. otpuštanja u 0-180 min (%/min)	Koef. otpuštanja 180-360 min (%/min)	Koef. otpuštanja 360-540 min (%/min)
Marić Bau	nekontrolirana	strojna	neotporna	27,3	13,9	0,75	0,71	3,8	71,9	24,3	30,1	8,0	2,80	0,26	168,5	42	1,2	7,6	11,3	12,8	0,8	0,4	0,2	4,5	1,4	0,0	0,05	0,02	0,01
				28,7	14,2	0,74						8,1	2,35				1,5	7,4	10,7	12,2	0,7	0,3	0,2	5,4	2,0	0,2	0,05	0,02	0,01
				29,3	14,1	0,75						8,1	1,66				1,4	7,1	11	12,9	0,7	0,4	0,2	5,7	1,2	0,7	0,05	0,03	0,00
				29,3	12,6	0,73						7,9	2,76				1,3	6,1	9,5	11,3	0,6	0,3	0,2	7,6	0,4	0,2	0,03	0,04	0,00
				29,5	14,0	0,75						7,8	-				1,4	7,3	11,2	12,9	0,7	0,4	0,2	6,8	2,0	0,1	0,04	0,03	0,01
				28,7	14,2	0,75						7,8	-				1,4	7,4	10,8	12,6	0,7	0,3	0,2	6,4	2,5	0,4	0,04	0,02	0,01
				28,4	12,1	0,75						8,3	-				1,6	6,7	9,7	11	0,7	0,3	0,1	4,8	1,8	0,3	0,04	0,02	0,01
				28,5	14,3	0,75						8,2	-				1,1	8	11,2	12,9	0,8	0,3	0,2	7,0	2,4	0,7	0,04	0,03	0,01
				28,8	13,4	0,74						8,1	-				1,4	8	11,2	12,4	0,8	0,3	0,1	5,7	1,2	0,7	0,04	0,03	0,00
				28,7	15,0	0,75						8,1	-				1,4	8,9	12,6	14	0,9	0,4	0,1	7,6	0,4	0,2	0,04	0,04	0,00
				-	15,1	-						-	-				-	7,4	11	12,7	0,7	0,4	0,2	6,8	2,0	0,1	0,05	0,03	0,01
				-	15,6	-						-	-				-	7,8	11	12,6	0,8	0,3	0,2	6,4	2,5	0,4	0,05	0,02	0,01
				-	15,0	-						-	-				-	8,6	12,4	13,8	0,9	0,4	0,1	4,8	1,8	0,3	0,06	0,02	0,01
				-	13,0	-						-	-				-	7,4	10,5	12	0,7	0,3	0,2	7,0	2,6	0,7	0,03	0,02	0,01
				-	14,2	-						-	-				-	5,9	8,8	10,6	0,6	0,3	0,2	4,5	1,4	0,0	0,05	0,02	0,01
				-	13,9	-						-	-				-	7,5	11,2	12,8	0,8	0,4	0,2	5,4	2,0	0,2	0,05	0,02	0,01
				-	13,7	-						-	-				-	7,4	10,7	12,2	0,7	0,3	0,2	5,7	1,2	0,7	0,04	0,03	0,00
				-	13,7	-						-	-				-	8,7	11,9	12,6	0,9	0,3	0,1	7,6	0,4	0,2	0,03	0,04	0,00
				-	13,6	-						-	-				-	7,3	11,2	12,7	0,7	0,4	0,2	4,8	1,8	0,3	0,05	0,02	0,01
				-	14,3	-						-	-				-	7,9	11,9	13,3	0,8	0,4	0,1	7,0	2,4	0,7	0,04	0,03	0,01
				-	14,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8,2	12,1	13,1	0,8	0,4	0,1	5,7	1,2	0,7	0,05	0,03	0,00
				-	14,4	-						-	-				-	7,2	10,8	12,6	0,7	0,4	0,2	7,6	0,4	0,2	0,04	0,04	0,00
				-	13,3	-						-	-				-	7,7	11,1	12,3	0,8	0,3	0,1	6,8	2,0	0,1	0,04	0,03	0,01
				-	13,8	-						-	-				-	7,5	11,3	12,8	0,8	0,4	0,2	7,6	0,4	0,2	0,03	0,04	0,00
				-	14,5	-						-	-				-	8,1	11,7	13,2	0,8	0,4	0,2	6,8	2,0	0,1	0,04	0,03	0,01
				-	14,1	-						-	-				-	8,6	12,4	13,7	0,9	0,4	0,1	6,4	2,5	0,4	0,04	0,02	0,01
				-	15,1	-						-	-				-	6,6	9,7	11,5	0,7	0,3	0,2	4,8	1,8	0,3	0,06	0,02	0,01
srednja vrijednost				**28,7**	**14,0**	**0,75**	**0,71**	**3,8**	**71,9**	**24,3**	**30,1**	**8,0**	**2,40**	**0,26**	**168,5**	**42,0**	**1,4**	**7,6**	**11,1**	**12,6**	**0,8**	**0,4**	**0,2**	**6,2**	**1,6**	**0,3**	**0,04**	**0,03**	**0,01**

Tablica6.5: Rezultati ispitivanja opeke – pojedinačne vrijednosti

Opeka	Proizvodnja (kontrolirana/ nekontrolirana)	Način proizvodnje (ručna/strojna)	Otpornost prema HRN B.D8.011	Normna tlačna čvrstoća (N/mm^2)	Vodoupojnost (%)	Koeficijent zasićenja	Omjer čvrstoća nakon i prije smrzavanja	Udio krupnih pora (%)	Udio pora srednje veličine (%)	Udio sitnih pora (%)	Ukupni udio pora (%)	Ukupni udio pora hidrostatskim vaganjem (%)	Specifična površina BET (m^2/g)	Srednji radijus pora (µm)	Ukupni volumen pora (mm^3/g)	Maage faktor	Koeficijent početnog upijanja (kg/m2 x min)	Upijanje u 0-10 min (%)	Upijanje u 10-20 min (%)	Upijanje u 20-30 min (%)	Koef. upijanja u 0-10 min (%/min)	Koef. upijanja 10-20 min (%/min)	Koef. upijanja 20-30 (%/min)	Upijena voda u 0-180 min (%)	Upijena voda u 180-360 min (%)	Upijena voda u 360-540 min (%)	Koef. otpuštanja u 0-180 min (%/min)	Koef. otpuštanja 180-360 min (%/min)	Koef. otpuštanja 360-540 min (%/min)
Napredak	nekontrolirana	strojna	neotporna	7,9	24,4	0,77	0,70	15,4	83,9	0,7	46,1	10,0	3,60	1,01	370,5	41	6,3	23,8	24	24,1	2,4	0,0	0,0	14,4	9,5	3,1	0,06	0,03	0,04
				8,0	24,9	0,76						9,9	3,36				6,5	24,6	24,7	24,7	2,5	0,0	0,0	12,8	7,1	2,5	0,07	0,03	0,03
				7,9	23,3	0,77						10,0	2,21				6,2	22,9	23,1	23,1	2,3	0,0	0,0	12,0	9,8	2,4	0,06	0,01	0,04
				8,3	23,5	0,77						9,8	3,36				6,0	23,2	23,3	23,2	2,3	0,0	0,0	9,0	8,0	2,7	0,08	0,01	0,03
				7,9	24,6	0,75						9,9	-				6,5	22,6	24,4	24,4	2,3	0,2	0,0	11,5	8,6	3,2	0,07	0,02	0,03
				7,7	23,3	0,77						10,0	-				6,6	22,5	22,7	22,7	2,3	0,0	0,0	11,8	6,5	3,7	0,06	0,03	0,02
				8,4	24,4	0,77						10,5	-				5,9	23	23,4	23,5	2,3	0,0	0,0	14,2	6,6	4,2	0,06	0,04	0,01
				8,1	24,5	0,77						9,7	-				6,5	24,1	24,3	24,3	2,4	0,0	0,0	12,0	6,5	4,1	0,07	0,03	0,01
				7,7	25,1	0,76						9,7	-				5,9	24,2	24,3	24,4	2,4	0,0	0,0	10,6	7,2	3,3	0,08	0,02	0,02
				8,0	25,0	0,77						10,0	-				6,1	24,5	24,6	24,6	2,5	0,0	0,0	13,3	8,9	5,7	0,07	0,02	0,02
				-	24,2	-						-	-					23,4	23,7	23,8	2,3	0,0	0,0	12,8	7,1	2,5	0,06	0,03	0,03
				-	24,0	-						-	-					23,1	23,2	23,3	2,3	0,0	0,0	12,0	9,8	2,4	0,07	0,01	0,04
				-	24,2	-						-	-					24	24	24,1	2,4	0,0	0,0	9,0	8,0	2,7	0,08	0,01	0,03
				-	23,5	-						-	-					22,8	22,9	23	2,3	0,0	0,0	11,8	6,5	3,7	0,07	0,03	0,02
				-	25,3	-						-	-					25	25	25	2,5	0,0	0,0	14,2	6,6	4,2	0,06	0,04	0,01
				-	23,0	-						-	-					22,5	22,7	22,7	2,3	0,0	0,0	12,0	6,5	4,1	0,06	0,03	0,01
				-	25,0	-						-	-					24,6	24,6	24,6	2,5	0,0	0,0	10,6	7,2	3,3	0,08	0,02	0,02
				-	23,2	-						-	-					23,1	23,2	23,3	2,3	0,0	0,0	9,0	8,0	2,7	0,08	0,01	0,03
srednja vrijednost				**8,0**	**24,2**	**0,77**	**0,70**	**15,4**	**83,9**	**0,7**	**46,1**	**10,0**	**3,13**	**1,01**	**370,5**	**41,0**	**6,3**	**23,6**	**23,8**	**23,8**	**2,4**	**0,0**	**0,0**	**11,8**	**7,7**	**3,4**	**0,07**	**0,02**	**0,02**
Vasa Kuzmin	nekontrolirana	strojna	neotporna	27,6	14,4	0,74	0,69	2,4	68,1	29,5	32,3	8,0	4,36	0,05	813,3	24	1,5	10	12,5	13,1	1,0	0,3	0,1	7,6	2,6	0,9	0,04	0,03	0,01
				27,9	14,8	0,75						8,1	4,20				1,8	7,3	9,9	11,2	0,7	0,3	0,1	7,5	2,0	0,8	0,04	0,03	0,01
				28,0	11,9	0,73						8,1	3,28				1,8	7,2	9,5	10,4	0,7	0,2	0,1	8,1	2,4	1,2	0,02	0,03	0,01
				27,5	14,7	0,74						7,8	4,15				1,3	6,3	8,7	10	0,6	0,2	0,1	7,6	1,7	1,2	0,04	0,03	0,00
				28,0	13,6	0,74						7,8	-				1,6	6,3	11,6	11,6	0,6	0,5	0,0	8,6	3,3	1,1	0,03	0,03	0,01
				27,3	14,4	0,75						7,7	-				1,6	5,6	9,5	9,6	0,6	0,4	0,0	8,2	2,1	1,1	0,03	0,03	0,01
				27,9	15,4	0,74						8,0	-				1,9	5	7,5	8,8	0,5	0,3	0,1	6,4	1,4	1,4	0,05	0,03	0,00
				27,6	15,0	0,74						7,9	-				1,7	5,8	8,6	10,1	0,6	0,3	0,2	7,6	4,3	2,0	0,04	0,02	0,01
				28,2	15,4	0,74						8,3	-				1,7	5,4	6,4	8,9	0,5	0,1	0,3	9,1	4,0	3,2	0,04	0,03	0,00
				27,5	11,7	0,74						8,0	-				1,3	6,8	9,4	10,5	0,7	0,3	0,1	6,0	1,6	1,5	0,03	0,02	0,00
srednja vrijednost				**27,8**	**14,1**	**0,74**	**0,69**	**2,4**	**68,1**	**29,5**	**32,3**	**8,0**	**4,00**	**0,05**	**813,3**	**24,0**	**1,6**	**6,6**	**9,4**	**10,4**	**0,7**	**0,3**	**0,1**	**7,7**	**2,5**	**1,4**	**0,04**	**0,03**	**0,01**

Tablica 6.5: Rezultati ispitivanja opeke – pojedinačne vrijednosti

Opeka	Proizvodnja (kontrolirana/ nekontrolirana)	Način proizvodnje (ručna/strojna)	Otpornost prema HRN B.D8.011	Normna tlačna čvrstoća (N/mm2)	Vodoupojnost (%)	Koeficijent zasićenja	Omjer čvrstoća nakon i prije smrzavanja	Udio krupnih pora (%)	Udio pora srednje veličine (%)	Udio sitnih pora (%)	Ukupni udio pora (%)	Ukupni udio pora hidrostatskim vaganjem (%)	Specifična površina BET (m^2/g)	Srednji radijus pora (µm)	Ukupni volumen pora (mm^3/g)	Maage faktor	Koeficijent početnog upijanja (kg/m2 x min)	Upijanje u 0-10 min (%)	Upijanje u 10-20 min (%)	Upijanje u 20-30 min (%)	Koef. upijanja u 0-10 min (%/min)	Koef. upijanja 10-20 min (%/min)	Koef. upijanja 20-30 min(%/min)	Upijena voda u 0-180 min (%)	Upijena voda u 180-360 min (%)	Upijena voda u 360-540 min (%)	Koef. otpuštanja u 0-180 min (%/min)	Koef. otpuštanja 180-360 min (%/min)	Koef. otpuštanja 360-540 min (%/min)
IGM	nekontrolirana	strojna	neotporna	28,5	14,0	0,76	0,69	2,8	70,4	26,8	30,8	13,0	3,37	0,08	171,2	28	1,5	6,1	8,9	10,4	0,6	0,3	0,2	5,9	2,5	0,7	0,05	0,02	0,01
				28,3	14,5	0,75						13,2	3,58				1,5	10,4	13,3	13,6	1,0	0,3	0,0	5,7	2,4	0,6	0,05	0,02	0,01
				28,4	14,8	0,75						13,3	3,53				1,5	7,5	11	12,4	0,8	0,4	0,1	6,7	2,7	0,8	0,05	0,02	0,01
				28,5	14,6	0,75						12,7	4,03				1,2	6,5	9	10,4	0,7	0,3	0,1	7,6	3,7	1,6	0,04	0,02	0,01
				28,3	14,7	0,76						12,8	-				1,5	12,2	14	14,1	1,2	0,2	0,0	6,4	2,8	0,7	0,05	0,02	0,01
				27,9	14,7	0,76						12,7	-				1,3	6,4	9,3	10,9	0,6	0,3	0,2	6,5	3,3	1,4	0,05	0,02	0,01
				28,9	14,2	0,74						13,2	-				1,7	6,1	8,6	9,8	0,6	0,3	0,1	7,2	3,2	0,7	0,04	0,02	0,01
				27,5	15,2	0,76						13,3	-				1,3	9,7	12,9	13,7	1,0	0,3	0,1	7,2	2,5	0,8	0,04	0,03	0,01
				28,9	15,1	0,74						13,0	-				1,5	6,2	9,2	11,1	0,6	0,3	0,2	7,6	2,5	0,8	0,04	0,03	0,01
				29,0	14,9	0,77						13,1	-				1,5	6,4	9,8	11,8	0,6	0,3	0,2	6,8	2,8	0,9	0,05	0,02	0,01
srednja vrijednost				**28,4**	**14,7**	**0,75**	**0,69**	**2,8**	**70,4**	**26,8**	**30,8**	**13,0**	**3,63**	**0,08**	**171,2**	**28,0**	**1,5**	**7,8**	**10,6**	**11,8**	**0,8**	**0,3**	**0,1**	**6,8**	**2,8**	**0,9**	**0,04**	**0,02**	**0,01**
Nova Bosna	nekontrolirana	strojna	neotporna	27,9	13,3	0,76	0,68	3,9	67,6	28,5	33,0	11,2	3,08	0,09	183,2	19	1,5	9	11,5	12,4	0,9	0,3	0,1	7,6	2,7	1,5	0,03	0,03	0,01
				27,8	14,5	0,76						10,5	2,65				1,2	8,6	11,4	12,7	0,9	0,3	0,1	7,5	2,0	1,8	0,04	0,03	0,00
				27,3	13,2	0,76						11,3	2,43				1,5	8,8	11,7	12,6	0,9	0,3	0,1	8,1	2,4	1,5	0,03	0,03	0,01
				28,5	15,3	0,75						11,0	3,65				1,5	7,3	10,4	12,4	0,7	0,3	0,2	7,7	1,8	1,6	0,04	0,03	0,00
				27,9	12,8	0,76						11,4	-				1,5	7,6	10,7	12,1	0,8	0,3	0,1	8,7	3,4	2,1	0,02	0,03	0,01
				28,1	14,4	0,76						11,1	-				1,3	8,7	12,1	13,7	0,9	0,3	0,2	8,2	2,2	1,7	0,03	0,03	0,00
				27,9	15,1	0,74						10,7	-				1,7	7,9	11,2	12,9	0,8	0,3	0,2	6,4	1,4	1,4	0,05	0,03	0,00
				28,0	11,1	0,76						11,0	-				1,3	7,4	9,4	10,1	0,7	0,2	0,1	7,7	4,4	3,8	0,02	0,02	0,00
				28,1	11,9	0,74						11,2	-				1,5	7,9	10	10,8	0,8	0,2	0,1	9,1	4,1	3,2	0,02	0,03	0,01
				27,6	13,9	0,77						11,0	-				1,5	8,7	12,1	13,4	0,9	0,3	0,1	6,0	1,6	1,5	0,04	0,02	0,00
srednja vrijednost				**27,9**	**13,6**	**0,76**	**0,68**	**3,9**	**67,6**	**28,5**	**33,0**	**11,0**	**2,95**	**0,09**	**183,2**	**19,0**	**1,5**	**8,2**	**11,1**	**12,3**	**0,8**	**0,3**	**0,1**	**7,7**	**2,6**	**2,0**	**0,03**	**0,03**	**0,00**
Opeka	nekontrolirana	strojna	neotporna	17,5	17,5	0,76	0,68	4,2	85,9	9,9	37,7	13,2	2,31	0,25	232,5	24	2,6	11,4	14,7	16	1,1	0,3	0,1	10,3	6,4	4,3	0,04	0,02	0,01
				17,8	18,8	0,77						13,0	1,88				2,4	13,1	17,1	17,7	1,3	0,4	0,1	9,3	5,1	2,9	0,05	0,02	0,01
				16,7	17,9	0,77						13,3	2,90				2,6	11,3	14	15,4	1,1	0,3	0,1	6,5	3,5	1,8	0,06	0,02	0,01
				17,8	18,7	0,76						12,7	-				2,5	12,9	16,9	17,4	1,3	0,4	0,1	6,7	2,5	0,9	0,07	0,02	0,01
				17,9	17,5	0,75						12,8	-				2,7	14,1	16,9	16,9	1,4	0,3	0,0	8,8	3,7	1,8	0,05	0,03	0,01
				17,5	19,1	0,78						12,7	-				2,7	15,4	18,3	18,4	1,5	0,3	0,0	8,6	4,3	2,2	0,06	0,02	0,01
				18,0	17,6	0,77						13,2	-				2,6	16,1	17,1	17,1	1,6	0,1	0,0	8,8	3,1	1,2	0,05	0,03	0,01
				17,9	18,7	0,77						13,3	-				2,6	13	16,8	17,6	1,3	0,4	0,1	7,5	3,9	1,9	0,06	0,02	0,01
				17,9	18,0	0,77						13,0	-				2,6	11,3	14,5	15,5	1,1	0,3	0,1	7,5	4,7	2,8	0,06	0,02	0,01
				18,0	17,7	0,77						13,0	-				2,5	15,5	16,9	17	1,6	0,1	0,0	6,2	2,3	0,9	0,06	0,02	0,01
srednja vrijednost				**17,7**	**18,2**	**0,77**	**0,68**	**4,2**	**85,9**	**9,9**	**37,7**	**13,0**	**2,36**	**0,25**	**232,5**	**24,0**	**2,6**	**13,4**	**16,3**	**16,9**	**1,3**	**0,3**	**0,1**	**8,0**	**4,0**	**2,1**	**0,06**	**0,02**	**0,01**

Tablica 6.5: Rezultati ispitivanja opeke – pojedinačne vrijednosti

Opeka	Proizvodnja (kontrolirana/ nekontrolirana)	Način proizvodnje (ručna/strojna)	Otpornost prema HRN B.D8.011	Normna tlačna čvrstoća (N/mm^2)	Vodoupojnost (%)	Koeficijent zasićenja	Omjer čvrstoća nakon i prije smrzavanja	Udio krupnih pora (%)	Udio pora srednje veličine (%)	Udio sitnih pora (%)	Ukupni udio pora (%)	Ukupni udio pora hidrostatskim vaganjem (%)	Specifična površina BET (m^2/g)	Srednji radijus pora (µm)	Ukupni volumen pora (mm^3/g)	Maage faktor	Koeficijent početnog upijanja (kg/m^2 x min)	Upijanje u 0-10 min (%)	Upijanje u 10-20 min (%)	Upijanje u 20-30 min (%)	Koef. upijanja u 0-10 min (%/min)	Koef. upijanja 10-20 min (%/min)	Koef. upijanja 20-30 min(%/min)	Upijena voda u 0-180 min (%)	Upijena voda u 180-360 min (%)	Upijena voda u 360-540 min (%)	Koef. otpuštanja u 0-180 min (%/min)	Koef. otpuštanja 180-360 min (%/min)	Koef. otpuštanja 360-540 min (%/min)
AB	nekontrolirana	ručna	-	-	-	-	-	6,8	80,9	12,3	41,8	-	4,31	0,10	-	27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
													3,71				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
													3,38				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
													5,10				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
srednja vrijednost								**6,8**	**80,9**	**12,3**	**41,8**		**4,13**	**0,10**	**-**	**27**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**
Ćirilica	nekontrolirana	ručna	-	-	-	-	-	53,4	45,4	1,2	39,4	-	3,27	0,77	-	59	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
													2,13				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
													2,22				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
													3,80				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
srednja vrijednost								**53,4**	**45,4**	**1,2**	**39,4**		**2,85**	**0,77**		**59**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**
OP 1	nekontrolirana	ručna	-	-	-	-	-	58,6	40,9	0,5	41,9	-	5,45	1,67	-	136	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
													4,56				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
													4,18				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
													5,58				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
srednja vrijednost								**58,6**	**40,9**	**0,5**	**41,9**		**4,94**	**1,67**		**136**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**

Tablica 6.5: Rezultati ispitivanja opeke – pojedinačne vrijednosti

Opeka	Proizvodnja (kontrolirana/ nekontrolirana)	Način proizvodnje (ručna/strojna)	Otpornost prema HRN B.D8.011	Normna tlačna čvrstoća (N/mm^2)	Vodoupojnost (%)	Koeficijent zasićenja	Omjer čvrstoća nakon i prije smrzavanja	Udio krupnih pora (%)	Udio pora srednje veličine (%)	Udio sitnih pora (%)	Ukupni udio pora (%)	Ukupni udio pora hidrostatskim vaganjem (%)	Specifična površina BET (m^2/g)	Srednji radijus pora (µm)	Ukupni volumen pora (mm^3/g)	Maage faktor	Koeficijent početnog upijanja (kg/m2 x min)	Upijanje u 0-10 min (%)	Upijanje u 10-20 min (%)	Upijanje u 20-30 min (%)	Koef. upijanja u 0-10 min (%/min)	Koef. upijanja 10-20 min (%/min)	Koef. upijanja 20-30 min(%/min)	Upijena voda u 0-180 min (%)	Upijena voda u 180-360 min (%)	Upijena voda u 360-540 min (%)	Koef. otpuštanja u 0-180 min (%/min)	Koef. otpuštanja 180-360 min (%/min)	Koef. otpuštanja 360-540 min (%/min)
OP2	nekontrolirana	ručna	-	-	-	-	-	12,4	86,8	0,8	41,5	-	3,37	1,09	-	36	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
													2,53				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
													2,29				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
													4,29				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
srednja vrijednost								**12,4**	**86,8**	**0,8**	**41,5**		**3,12**	**1,09**		**36**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**
OP3	nekontrolirana	ručna	-	-	-	-	-	46	51,8	2,2	38,2	-	2,48	1,01	-	99	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
													3,36				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
													2,94				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
													3,93				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
srednja vrijednost								**46**	**51,8**	**2,2**	**38,2**		**3,18**	**1,01**		**99**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**
OP4	nekontrolirana	ručna	-	-	-	-	-	85,8	14,2	0	45,3	-	3,31	2,27	-	192	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
													3,07				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
													2,40				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
													4,11				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
srednja vrijednost								**85,8**	**14,2**	**0**	**45,3**		**3,22**	**2,27**		**192**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**

Tablica 6.5: Rezultati ispitivanja opeke – pojedinačne vrijednosti

Opeka	Proizvodnja (kontrolirana/ nekontrolirana)	Način proizvodnje (ručna/strojna)	Otpornost prema HRN B.D8.011	Normna tlačna čvrstoća (N/mm2)	Vodoupojnost (%)	Koeficijent zasićenja	Omjer čvrstoća nakon i prije smrzavanja	Udio krupnih pora (%)	Udio pora srednje veličine (%)	Udio sitnih pora (%)	Ukupni udio pora (%)	hidrostatskim vaganjem (%)	Specifična površina BET (m2/g)	Srednji radijus pora (µm)	Ukupni volumen pora (mm^3/g)	Maage faktor	Koeficijent početnog upijanja (kg/m2 x min)	Upijanje u 0-10 min (%)	Upijanje u 10-20 min (%)	Upijanje u 20-30 min (%)	Koef. upijanja u 0-10 min (%/min)	Koef. upijanja 10-20 min (%/min)	Koef. upijanja 20-30 min(%/min)	Upijena voda u 0-180 min (%)	Upijena voda u 180-360 min (%)	Upijena voda u 360-540 min (%)	Koef. otpuštanja u 0-180 min (%/min)	Koef. otpuštanja 180-360 min (%/min)	Koef. otpuštanja 360-540 min (%/min)
Karanac	nekontrolirana	ručna	-	-	-	-	-	0,6	83,7	15,7	19	-	2,71	0,85	-	210	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
													2,87				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
													2,35				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
													2,96				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
srednja vrijednost								**0,6**	**83,7**	**15,7**	**19**		**2,72**	**0,85**		**210**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**
JB	nekontrolirana	ručna	-	-	-	-	-	7,7	86,3	6	35,18	-	2,96	0,41	-	35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
													3,08				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
													2,10				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
													3,45				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
srednja vrijednost								**7,7**	**86,3**	**6**	**35,18**		**2,90**	**0,4145**		**35**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**
BF	nekontrolirana	ručna	-	-	-	-	-	62,4	37,6	0	39,94	-	2,87	2,41	-	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
													2,47				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
													2,82				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
													3,72				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
srednja vrijednost								**62,4**	**37,6**	**0**	**39,94**		**2,97**	**2,41**		**150**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**
K	nekontrolirana	ručna	-	-	-	-	-	75,1	24,7	0,2	39,94	-	9,62	2,80	-	187	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
													9,11				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
													8,44				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
													9,09				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
srednja vrijednost								**75,1**	**24,7**		**39,94**	**-**	**9,06**	**2,80**		**187**													

Bibliografija

[1] D. Saba: Investigating the Durability of Structures, Master of Engineering in Civil and Environmental Engineering at the Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts Institute of Technology, June 2013.

[2] J. Radić, Trajnost konstrukcija 1, Zagreb, 2010.

[3] F. L. Flager: The Design of Building Structures for Improved Life-Cycle Performance, Master of Design Studies Harvard University, Massachusetts Institute of Technology, 2002., str. 19.

[4] W. Celadyn: Durability of buildings and sustainable architecture, Technical transactions architecture , 7-A/2014, str. 20.

[5] BS 8000-0:2014 Workmanship on construction sites. Introduction and general principles

[6] BS 7543:2015 Guide to durability of buildings and building elements, products and components

[7] G. C. Foliente, R. H. Leiceser, C. Wang, C. Mackenzie, I. Cole: Durability design for wood construction, CSIRO Manufacturing and Infastructure technology, Highett 3190, Australia

[8] HRN ISO 15686-1 Zgrade i druge građevine - Planiranje vijeka uporabe - 1. dio: Opća načela i okvir (ISO 15686-1:2011)

[9] HRN ISO 15686-2 Zgrade i druge građevine - Planiranje vijeka uporabe - 2. dio: Postupci predviđanja vijeka uporabe (ISO 15686-2:2012)

[10] HRN ISO 15686-3 Zgrade i druge građevine - Planiranje vijeka uporabe - 3. dio: Neovisne ocjene (auditi) i pregledi svojstava (ISO 15686-3:2002)

[11]HRN ISO 15686-4:2014 Zahtjevi za kvalitetu zavarivanja taljenjem metalnih materijala -- 4. dio: Osnovni zahtjevi za kvalitetu (ISO 3834-4:2005; EN ISO 3834-4:2005)

[12] HRN ISO 15686-5 Građevine - Planiranje uporabnog vijeka - 5. dio: Trošak životnog ciklusa (ISO 15686-5:2008)

[13] ISO 15686-6:2004 Buildings and constructed assets - Service life planning - Part 6: Procedures for considering environmental impacts

[14] ISO 15686-7:2017 Buildings and constructed assets - Service life planning - Part 7: Performance evaluation for feedback of service life data from practice

[15] HRN ISO 15686-8 Građevine -- Planiranje uporabnog vijeka - 8. dio: Referentni uporabni vijek i njegova procjena (ISO 15686-8:2008)

[16] ISO 15686-9:2008 Buildings and constructed assets - Service-life planning - Part 9: Guidance on assessment of service-life data

[17] ISO 15686-10:2010 Buildings and constructed assets - Service life planning - Part 10: When to assess functional performance

[18] D. J. Kelly: Design life of buildings A scoping study, sbsa Scottish building standards agency, January 2007, pristupljeno: prosinac 2018, https://www2.gov.scot/resource/doc/217736/0091011.pdf

[19] H. Davies, D Wyatt1: Appropriate use of the ISO 15686-1 factor method for durability and service life prediction, 10DBMC International Conference On Durability of Building Materials and Components, Lyon, France, 17-20 April 2005

[20] L. O. Madrigal, J. M. Fran Bretones, B. Serrano Lanzarote: Proposed method of estimating the service life of building envelopes, Journal of Construction, 2015, 14(1) 60-68

[21] A. Silva, J. Brito, P. L.Gaspar: Methodologies for Service Life Prediction of Buildings,https://books.google.hr/books?id=IlAWDAAAQBAJ&pg=PA7&lpg=PA7&dq=Methodologies+for+Service+Life+Prediction+of+Buildings,+silva&source=bl&ots=iSsjMgABz&sig=Oq9ceavYhXA7LC9NWlLUTLo5ZYQ&hl=hr&sa=X&ved=2ahUKEwj0yKyFs53fAhXRqIsKHXCOCnAQ6AEwBHoECBAQAQ#v=onepage&q=Methodologies%20for%20Service%20Life%20Prediction%20of%20Buildings%2C%20silva&f=false, pristupljeno online: prosinac, 2018.

[22] P. Jernberg, C. Sjöström, M.A. Lacasse, E. Brandt, T. Siemes: Guide and Bibliography to Service Life and Durability Research for Buildings and Components, PART I – Service Life and Durability Research, Joint CIB W080 / RILEM TC 140 – Prediction of Service Life of Building Materials and Components, 2003, http://site.cibworld.nl/dl/publications/Pub295/Part03.pdf, pristupljeno: prosinac 2018.

[23] European Commission Services, Enterprice and industry directorate- general: Guidance paper F, Durability and construction products directive, Commission européenne, B-1049 Bruxelles / Europese Commissie, B-1049 Brussel – Belgium, 2004, https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/doc/gpf.pdf, pristupljeno: prosinac 2018.

[24]HRN EN 1990 Eurokod: Osnove projektiranja konstrukcija (EN 1990:2002+A1:2005+A1:2005/AC:2010)

[25] Z. Li: Advanteced Cocrete Technology, Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2011

[26] G.E.B.G.E.B. CONSULTANTS: Was Roman concrete really that good? PUBLICATION #C870792, The Aberdeen Group, 1987, https://www.concreteconstruction.net/how-to/materials/was-roman-concrete-really-that-good_o, pristupljeno online: prosinac 2018.

[27] W. Malisch: Romans concrete is not better than todays concete!, The Voice Newsletter, august 2017., https://www.ascconline.org/Portals/0/Technical-Article-Aug-2017_WebSC.pdf?ver=2017-08-16-144954-857, pristupljeno online: prosinac 2018.

[28] HRN EN 1992-1-1 Eurokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcija -- Dio 1-1: Opća pravila i pravila za zgrade (EN 1992-1-1:2004+AC:2010)

[29]HRN EN 206 Beton -- Specifikacija, svojstva, proizvodnja i sukladnost (EN 206:2013+A1:2016)

[30] HRN 1128 Beton - Smjernice za primjenu norme HRN EN 206-1

[31] HRN EN 1991 (1-4) Eurokod 1: Djelovanja na konstrukcije – Dio: 1-4

[32] HRN EN 1992 (1-2) Eurokod 2: Projketiranje betonskih konstrukcija (1-2)

[33] HRN EN 1997 (1-2) Eurokod 7: Geotehničko projektiranje (1-2)

[34] HRN EN 1998 (1,2,4) Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija (1,2,4)

[35] HRN EN 13670:2010 Izvedba betonskih konstrukcija (EN 13670:2009)

[36] HRN EN 13670/NA Izvedba betonskih konstrukcija, Nacionalni dodatak

[37]M. Cullen:Introduction to EC 0, 1, 2, 3 & 5, https://www.researchgate.net/publication/301358370_Steel_Building_Design_Worked_examples_for_students_In_accordance_with_Eurocodes_and_the_UK_National_Annexes, pristupljeno online: prosinac, 2018.

[38] S.K.Malhotra: Ein Dienst Factors which influence durability of wooden structures, der ETH-BibliothekvETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, 1989

[39] T. Shupe; S. Lebow; D. Ring: Causes and Control of Wood Decay, Degradation & Stain Pub. (Louisiana Cooperative Extension Service)-2703. [Baton Rouge, La.] : Louisiana State University Agricultural Center, 2008

[40] J. Y. Wang, R. Stirling, Paul I. Morris, A. Taylor, J. Lloyd, G. Kirker, S. Lebow, M. E. Mankowski: Durability of mass timber structures: A review of the biological risks, Wood and Fiber Science, 50 (Special Issue), pp. 110-127, 2018

[41] J. Bien: Durability of engineering structures, Design, repair and maintenance, Woodhead Publishing Limited, Abington Hall, Abington Cambridge CB1 6AH, England, 2003

[42] HRN EN 1995-1-1:2013 Eurokod 5: Projektiranje drvenih konstrukcija -- Dio 1-1: Općenito -- Opća pravila i pravila za zgrade (EN 1995-1-1:2004+AC:2006+A1:2008)
[43] HRN EN 1995-2:2010 Eurokod 5: Projektiranje drvenih konstrukcija – 2. dio: Mostovi (EN 1995-2:2004)
[44] HRN EN 460:2005 Trajnost drva i proizvoda na osnovi drva -- Prirodna trajnost masivnog drva -- Upute za određivanje zahtjeva za trajnost drva u odnosu na razrede opasnosti (EN 460:1994)
[45] HRS CEN/TS 1099:2011 Uslojeno drvo — Biološka trajnost — Smjernice za ocjenu upotrebljivosti uslojenoga drva u različitim uporabnim razredima (CEN/TS 1099:2007)
[46] HRI CEN/TR 12872:2015 Ploče na osnovi drva – Smjernice za uporabu nosivih ploča za podove, zidove i krovove (CEN/TR 12872:2014)…JE, HRI..
[47] HRN EN 1995-1-2 Eurokod 5: Projektiranje drvenih konstrukcija -- Dio 1-2: Općenito -- Proračun konstrukcija na djelovanje požara (EN 1995-1-2:2004+AC:2009)
[48] HRN EN 599-2:2016 Trajnost drva i proizvoda na osnovi drva -- Učinkovitost preventivnih sredstava za zaštitu drva određena biološkim ispitivanjima -- 2. dio: Označivanje (EN 599-2:2016)
[49] A. C. G. Hayward: The Construction of Railway Bridges Then and Now, The International Journal for History of engeneering and technology, https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1179/1758120613Z.00000000037, pristupljeno online: prosinac 2018.
[50] M. Bellis: Henry Bessemer - The Steel Man Henry Bessemer and the Production of Steel, Tought.Co, https://www.thoughtco.com/henry-bessemer-the-steel-man-4075538, pristupljeno online: prosinac 2018.
[51] The case for steel, https://www.steelconstruction.info/The_case_for_steel, pristupljeno online: prosinac 2018.
[52] HRN EN 1993 (1-8) Eurokod 3: Projektiranje čeličnih konstrukcija -- Dio 1-8
[53] J. W. P. Campbell: Brick: A World History, The Nation Institute, https://www.amazon.com/Brick-James-W-P-Campbell/dp/0500341958, pristupljeno online: prosinac, 2018.
[54] T. C. Nwofor: Durability of block work: the effect of varying water/cement ratio of mortar joint, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Port Harcourt, Rivers State, Nigeria, Pelagia Research Library Advances in Applied Science Research, 2012, 3 (3):1848-1853

[55] B. Ghiassi, P. Lourenco: Long-term Performance and Durability of Masonry Structures eBook ISBN: 9780081021118, Paperback ISBN: 9780081021101, 2018

[56] HRN EN 1996-1-1:2012 Eurokod 6: Projektiranje zidanih konstrukcija -- Dio 1-1: Opća pravila za armirane i nearmirane zidane konstrukcije (EN 1996-1-1:2005+A1:2012)

[57] HRN EN 1996 (1-2) Eurocod 6: Projektiranje zidanih konstrukcija--Dio 1-2

[58] J.J.Roberts: Introduction to Eurocode 6, Rev2, https://www.brick.org.uk/admin/resources/d-eurocode-6-masonry-introduction.pdf, pristupljeno online: prosinac 2018.

[59] Podaci prikupljeni od proizvođača opečnih zidnih elemenata u RH

[60]HRN EN 771 (1-5) Specifikacije za zidne elemente (opečni, vapnenosilikatni, betonski, zidni elementi od porastog betona, zidni elementi od umjetnog i prirodnog kamena

[61] R. Ranson, H.Housinh: A Practical guide, Taylor & Francis, e-library http://txtgofind.info/martin-helander-a-guide-to-the-ergonomics-of-manufacturing-over-two-million-books.pdf, pristupljeno: prosinac, 2018.

[62] How clay bricks are made-lbstock;Technical information sheet 16, https://www.ibstockbrick.co.uk//wp-content/uploads/2015/08/Ibstock-TIS-A1-HOW-BRICKS-ARE-MADE.pdf, pristupljeno online: prosinac, 2018

[63] Netinger I., Vračević M., Bačkalić, Z. Opeka od sirovine do gotovog proizvoda, 2014

[64] P. V.Košćević: Građevna opeka – cijep i ostali opekarski građevni proizvodi, Tehnička knjiga Zagreb, 1969.

[65] P. Roger, S. Moorey: Ancient Mesopotamian Materials and Industries: The Archaeological Evidence, 1999, https://books.google.hr/books?id=P_Ixuott4doC&pg=PA303&lpg=PA303&dq=clays+in+babylon&source=bl&ots=byCvJ8L1SI&sig=OYKfnpq-6n1117hxltUQlraVe3Q&hl=hr&sa=X&ved=2ahUKEwignria8Z_fAhULsKQKHfN3DtIQ6AEwB3oECAQQAQ#v=onepage&q=clays%20in%20babylon&f=false, pristupljeno online: prosinac, 2018.

[66] S. Bertman: Handbook to Life in Ancient Mesopotamia, 2003, https://books.google.hr/books?id=1C4NKp4zgIQC&pg=PA186&lpg=PA186&dq=clay+brick+in+mesopotamia&source=bl&ots=St7aznMew9&sig=2bHR-_aaPfa9O50jDIrev-H5nfY&hl=hr&sa=X&ved=2ahUKEwiat67qoZ_fAhUIlYsKHfXqBhI4ChDoATAJegQIABAB#v=onepage&q=clay%20brick%20in%20mesopotamia&f=false, pristupljeno: prosinac, 2018.

[67] M. Strickland: Roman Building Materials, Construction Methods, and Architecture: The Identity of an Empire, 2010

[68] Brick- a guide to the repair of historic brickwork, Goverment of Ireland, 2009., http://www.buildingsofireland.ie/FindOutMore/Bricks%20%20A%20Guide%20to%20the%20Repair%20of%20Historic%20Brickwork%20(2009).pdf, pristupljeno: prosinac, 2018.

[69] A. Fišer: Svojstva opečnih elemenata sa arheološkog lokaliteta Mursa, završni rad na preddiplomskom studiju, Građevinski fakultet Osijek, 2013.

[70] Clay brick manufacture; Technical guide, CIDB, https://www.slideshare.net/PamelaRoberts25/clay-brickmanufacturetechnicalguidecidb, pristupljeno: prosinac, 2018.

[71] Službeni podaci Gospodarske Komore RH

[72] HRN EN 772-16:2011 Metode ispitivanja zidnih elemenata-16. dio: Određivanje izmjera

[73]HRN EN 772-20:2003/A1:2005 Metode ispitivanja zidnih elemenata - 20. dio: Određivanje ravnosti površine zidnih elemenata

[74] HRN EN 772-3:2003 Metode ispitivanja zidnih elemenata-3. Dio: Određivanje neto obujma i postotka šupljina opečnih zidnih elemenata hidrostatskim vaganjem

[75] HRN EN 772-13:2003 Metode ispitivanja zidnih elemenata-13. Dio: Određivanje neto i bruto obujamske mase suhih zidnih elemenata

[76] HRN EN 772-21:2011 Metode ispitivanja zidnih elemenata - 21. dio: Određivanje vodoupojnosti opečnih i vapnenosilikatnih zidnih elemenata upijanjem hladne vode

[77] HRN EN 772-11:2011Metode ispitivanja zidnih elemenata-11. Dio: Određivanje kapilarne vodoupojnosti zidnih elemenata od betona, porastog betona, umjetnog i prirodnog kamena i početne vodoupojnosti opečnih zidnih elemenata

[78] HRN EN 772-1:2015 Metode ispitivanja zidnih elemenata-2. Dio: Određivanje tlačne čvrstoće

[79] HRS CEN/TS 772-22:2008 Metode ispitivanja zidnih elemenata - 22. dio: Određivanje otpornosti opečnih zidnih elemenata na zamrzavanje i odmrzavanje

[80] HRN EN 772-5:2016 Metode ispitivanja zidnih elemenata - 5. dio: Određivanje sadržaja aktivnih topivih soli u opečnim zidnim elementima

[81] HRN EN 1745:2012 Zidovi i proizvodi za zidanje -- Metode određivanja toplinskih svojstava

[82] HRN EN 13501-1:2010 Razredba građevnih proizvoda i građevnih elemenata prema ponašanju u požaru — 1. dio: Razredba prema rezultatima ispitivanja reakcije na požar

[83] R. E. Hughes, B. L. Bargh: The Weathering of Brick: Causes, Assessment and Measurement, A Report of the Joint Agreement between the U.S. Geological Survey and the Illinois State Geological Survey, 1982, https://pdfs.semanticscholar.org/c15b/0a216c9df8e9ac8a509d8d97223ed33d2216.pdf, pristupljeno online: prosinac, 2018.

[84] M. Dondi, B. Fabbri, G. Guarini: Grain-Size Distribution of Italian Raw Materials for Building Clay Products, Clay Minerals, 33, 1998, 435-442

[85] D.Težak: Proizvodnja, kvaliteta i ispitivanje opekarske gline, Varaždin, 2011, https://rudar.rgn.hr/~mklanfar/nids_mklanfar/TEHNOLOGIJA%20NEMETALA/OPEKARSKA%20GLINA.pdf, pristupljeno: prosinac, 2018.

[86] R. Delari: Tehnologija proizvodnje opekarskih proizvoda, Sremski Karlovci, 1960

[87] Cultrone, G. et al.: Influence of mineralogy and firing temperature on the porosity of bricks, Journal of the European Ceramic Society, 24 (2004), pp. 547–564 – nije uključen!

[88] M. Arsenović:Optimizacija i predviđanje kvaliteta materijala, procesa i krajnjih osobina opekarskih proizvoda matematičkim modelovanjem karakterističnih parametara, Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Tehnološko metalurški fakultet, http://nardus.mpn.gov.rs/handle/123456789/2946?locale-attribute=en, pristupljeno online:prosinac, 2018.

[89] Kung, J. H.: Frost durability of canadian clay bricks, Proceedings of the 7th International Brick Masonry Conference, Melbourne, Australia, 1985., pp. 245-251

[90] Hansen, W., Kung, J. H.: Pore structure and frost durability of clay bricks, Materials and Structures, 21 (1988), pp. 443-447

[91] J. Constantinescu, D. Constantinescu: Particularity of plasticity characteristics of fine glacial materials, Geo-Eco-Marina, 2011, https://www.geoecomar.ro/website/docs/pre-print/2011/07_constantinescu_BT.pdf, pristupljeno online: prosinac, 2018

[92] Bauluz, B., Mayayo, M. J., Fennandez – Nieto, C., Cultrone, G., Gonzalez Lopez, J.M.: Assessment of technological properties of calcerous and non-calcerous clays used for the brick-making industry of Zaragoza (Spain), Applied Clay Science, 24 (2003), pp 121-126

[93] Maniatis, Y.: The Emergence of Ceramic Technology and its Evolution as Revealed with the use of Scientific Techniques, http://www.ims.demokritos.gr/archae/Publications_pdf/The_Emergence_Maniatis.pdf, pristupljneo online: prosinac, 2018.

[94] Bong, W.S.K., Matsumura, K., Nakai, I.; Firing Technologies and Raw Materials of Typical Early and Middle Bronze age pottery from Kaman- Kalehoyuk; A Statistical and chemical analysis, http://www.jiaa-kaman.org/pdfs/aas_17/AAS_17_Bong_W_pp_295_312.pdf, pristupljeno online: prosinac, 2018

[95] Malaiškiane, J., Mačiulaitis, R.: Frost resistant ceramics produced from local raw materials and wastes, Proceedia Engineering, 57 (2013), pp 739-745

[96] Sanchez de Rojas, M. I., Marin, F. P., Frias, M., Valenzuela, E., Rodriguez, O.: Influence of freezing methods, composition and microstructure on frost durability assessment of clay roofing tiles, Construction and Building Materials, 25 (2011), pp. 2888-2897

[97] Elert, K., Culturone, G., Navarro, C. R., Pardo, E. S.: Durability of bricks used in the conservation of historic buildings – influence of composition and microstructure, Journal of Cultural Heritage, 4 (2003), pp. 91-99

[98] Šveda M.: The effect of firing temperature and dwell time on the frost resistance of a clay roofing tile, Ziegelindustrie International, 5 (2004), pp. 36–40

[99] P. K. Larsen; Moisture physical properties of bricks-Technical report, Holzkirchen: Technical University of Denmark, 1995., http://www.byg.dtu.dk/~/media/Institutter/Byg/publikationer/lbm/lbm_343.ashx

[100] Kung, J. H.: Frost-Durability study on canadian clay bricks - III. Characterization of raw materials and burnt bricks, Durability of building materials, 5 (1987), pp. 125-143

[101] Ducman, V., Sever Skapin, A., Radeka, M., Ranogajec, J.: Frost resistance of clay roofing tiles: Case study, Ceramics International, 37 (2011), pp. 85–91

[102] S.Somsiri , S.Zsembery , and J.A.Ferguson:Study of pore size distributions in fired clay bricks in relation to salt attack resistance, 1983

[103] J.H.Kung: Frost durability study on canadian clay bricks , National Research Council Canada, Reprinetd from Proceedings of the 7th International Brick Masonry Conference, Melbourne, Australia, 1985, pp 245-251

[104] G.Cultrone, F.Madkour: Evaluation of the effectiveness of treatment products in improving the quality of ceramics used in new and historical buildings, Journal of Cultural Hertage 14, 2013, pp 304-310

[105] J. Rani , K.J.Singh , R. Singh, H. Sublania: Effect on Microstructure of Clay Bricks after Firing Temperature, Journal of Emerging Technologies and Innovative Research

(JETIR) www.jetir.org 128, JETIR (ISSN-2349-5162), 2015, http://www.jetir.org/papers/JETIR1510023.pdf, pristupljeno online:prosinac, 2018

[107] S. Karaman: Firing temperature and time influenceon mechanical and physical properties of clay bricks, Journal of Scientific and Industrial Research, pp153-159, 2006, https://www.researchgate.net/publication/267807532_Firing_temperature_and_firing_time_influence_on_mechanical_and_physical_properties_of_clay_bricks, pristupljeno online: prosinac, 2018

[108] Malaiškiane, J., Mačiulaitis, R.: Frost resistant ceramics produced from local raw materials and wastes, Proceedia Engineering, 57 (2013), pp 739-745

[109] H. Yanguatin, J. Tobón, J. Ramírez: Pozzolanic reactivity of kaolin clays, a review , Universidad Nacional de Colombia. COLOMBIA, 2017, https://www.ricuc.cl/index.php/ric/article/view/631/html_1, pristupljeno online: prosinac, 2018[(Fabbri et al., 2013); (Alujas et al., 2015)

[110] J.H.Kung: Firing Optimization of Clay Bricks, Chapter 37, https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/9780470320303.ch37 pristupljeno: prosinac 2018.

[111] B. Ilić: Uticaj termički i mehanohemijski aktivirane kaolinske gline na mehanička svojstva i strukturu cementnih kompozita, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka,2016,http://nardus.mpn.gov.rs/bitstream/handle/123456789/6800/Disertacija4998.pdf?sequence=1, pristupljeno online: prosinac, 2018.

[112] I. Johari, S. Said, B. Hisham, A. Bakar, Z. A. Ahmad: Effect of the Change of Firing Temperature on Microstructure and Physical Properties of Clay Bricks from Beruas (Malaysia), Science of Sintering, 42 ,2010, pp 245-254

[113] I. Netinger, M. Vračević, R. Bušić: BRICK AND MORTAR OF SUFFICIENT DURABILITY – THE INVESTIGATION AND RESULTS

[114] M.Raimondo, M.Dondi, D. Gardini, G. Guarini, F. Mazzanti: Predicting the initial rate of water absorption in clay bricks, Construction and Buliding Materials, 23, 2009, pp2623-2630

[115] P. Nieminen: Porosity and frost resistance of clay bricks, Tempare University Technology, Finland, 1980

[116] M.Radeka, Značaj karakteristika pora za otpornost materijala pri dejstvu mraza, Materijali i konstrukcije 50 ,2007, pp (14-20)

[117] A. Bracka, Z. Rusin: Comparison of pore characteristics and water absorption in ceramics materijals with frost resistance factor Fc, Structure and Enviroment, 2012., http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-cd28cd24-545f-48ec-acfe-e618c50dc89f, pristupljeno: prosinac 2018.

[118] J.I.Davison: Durability studies on bricks used in the Atlantic provinces, Journal of the Canadian Ceramic Society, 1975, pp 23-29

[119] P. Krolo: Tehnologija veziva i kompozitnih materijala, Split, 1999

[120] P. Brzaković: Priručnik za proizvodnju i primjenu građevinskih materijala nemetalskog porijekla, Knjiga 2 – Betoni i betonski prefabrikati, građevinska keramika, mineralna vuna, Orion art, Beograd, 2000

[121] ASTM C824-91:2015 Standard Practice for Specimen Preparation for Determination of Linear Thermal Expansion of Vitreous Glass Enamels and Glass Enamel Frits by the Dilatometer Method

[122] L. Stommel, H.Weiss: Guarantee for maximum product quality, Z1 11, 1997, pp 820-826

[123] Mensinga, P.: Determining the Critical Degree of Saturation of Brick Using Frost Dilatometry –A thesis at University of Waterloo, Waterloo, Canada, 2009.

[124] Straube, J., Schumacher, C., Mensinga, P.: Assessing the freeze-thaw resistance of clay brick for interior insulation retrofit projects – research report 1013, 2010., http://www.buildingscience.com/documents/reports/rr-1013-freeze-thaw-resistance-clay-brick-interior-insulation-retrofits

[125]M. Korenska, Z. Chobola, R. Sokolar: Frequency inspection as an assesment tool for the frost resistance of fired roof tiles, Ceramics, 2006

[126] M. Dondi, M. Marsigli, I. Venturi: Microstructure and mechanical properties of clay bricks: comparison between fast firing and traditional firing, British Ceramic Transactions, 98 1999, https://core.ac.uk/download/pdf/37835983.pdf, pristupljeno online: prosinac, 2018

[127] Koroth, S. R.: Evaluation and Improvement of Frost Durability of Clay Bricks - A Thesis in The Centre for Building Studies, Ottawa, Canada, 1997.

[128] M. Raimondo, M. Dondi, C. Ceroni, G. Guarini: Durability of Clay Roofing Tiles: Assessing the Reliability of Prediction Models, 11DBMC International Conference on Durability of Building Materials and Components ISTANBUL, Turkey , 2008

[129] HRN ISO 9277 Određivanje specifične površine krutine plinskom adsorpcijom - BET metoda

[130] Perrin, B., Vu, N.A., Multon, S., Voland, T., Ducroquetz, C.: Mechanical behaviour of fired clay materials subjected to freeze-thaw cycles, *Construction and Building Materials*, 25 (2011), pp. 1056-1064

[131] C. C. Litvan: Testing the-Frost Susceptibility of Bricks. ASTM STP 589, 123-132, 1975.

[132] Radeka, M., Ranogajec, J., Marinković-Neducin, R., Ducman, V., Sever Skapin, A.: The effect of the firing temperature of clay roofing tiles on the mechanism of frost action, Industrial Ceramics, 30 (2) (2010), pp. 97-104

[133] T. Ritchie: 11-3. Brick Durability Tests and the Method of Freezing, Vth International Brick Masonry Conference, nema godine, http://www.hms.civil.uminho.pt/ibmac/1979/46.pdf, pristupljeno online: prosinac, 2018

[134] G. Cultronea , I. Sidrabab , E. Sebastian: Mineralogical and physical characterization of the bricks used in the construction of the Triangul BastionQ, Riga (Latvia), Clay Science 28,2005, 297 – 308, http://www.ugr.es/~grupo179/pdf/Cultrone%2005c.pdf, pristupljeno online: prosinac, 2018

[135] Netinger I., Vračević M., Ranogajec J., Vučetić S., Evaluation of brick resistance to freeze/thaw cycles according to indirect procedures, Građevinar, 66 (2014), 3, pp. 197-209

[136] V. Tufegdžić: Građevinski materijali, poznavanje i ispitivanje, Univerzitet u Beogradu, 1966

[137] G. Cultrone, E. Sebastian, M.O. Huertas: Durability of masonary systems: A laboratory study, ScienceDirect, Construction and building materijals, 21 (2007), pp 40-51

[138] K. van Dijk, J. van der Zwan, A. Fraaij, Ch.F. Hendriks, E. Mulder: Recycling technology in the clay brick industry, 2014, http://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB4499.pdf, pristupljeno online: prosinac, 2018

[139] R.A.Rowland: Differential thermal analysis of clays and carbonates, Clays and clays Technology, Bull. 169, pp 151-163, http://www.clays.org/journal/archive/volume%201/1-1 151.pdf, pristupljeno online: prosinac, 2018.

[140] Nielsen, Anders: Durability of air lime mortar, International RILEM Conference, 2016

[141] M. Thomson, J.E. Lindgvist, J.Elsen, S.J.W.P.Groot: Porosity of mortairs, Report 28: Characterisation of Old Mortars with Respect to their Repair , 2004, https://books.google.hr/books?id=1B4Z4z9iai0C&pg=PA84&lpg=PA84&dq=(Litvan,+1981,+Maage,+1984,+Robinson,+1984).&source=bl&ots=euO04uyHHC&sig=c1GcSZauapZt1TU4cB3ok4AB4uM&hl=hr&sa=X&ved=2ahUKEwihnvWGsKDfAhVNqIsKHayiC20Q6AEwC

noECAIQAQ#v=onepage&q=(Litvan%2C%201981%2C%20Maage%2C%201984%2C%20Robinson%2C%201984).&f=false, pristupljeno online: prosinac, 2018.

[142]HRN EN 998-2:2016, Specifikacije morta za ziđe-2. Dio: Mort za ziđe (EN 998-2:2016)

[143] HRN CEN/TR 15225:2006, Smjernice za tvorničku kontrolu proizvodnje za označavanje oznakom CE (potvrđivanje sukladnosti 2+) za projektirane mortove (CEN/TR 15225:2005)cerifikacije morta za ziđe-2. Dio: Mort za ziđe (EN 998-2:2016)

[144] Brick and block production – Mortar Industry Association, Learning text part 05, https://www.mortar.org.uk/documents/LT05-Bricks-and-Blocks.pdf, pristupljeno online: prosinac, 2018

[145] HRN EN 1996-1-1:2012/NA, Eurokod 6: Projektiranje zidanih konstrukcija-Dio 1-1:Opća pravila za armirane i nearmirane zidane konstrukcije-Nacionalni dodatak

[146] HRN EN 1015-3:2000, HRN EN 1015-3:2000/A1:2005, HRN EN 1015-3:2000/A2:2008 Metode ispitivanja mortova za ziđe -- 3. dio: Određivanje konzistencije svježeg morta (stolićem za potresanje) (EN 1015-3:1999) Methods of test for mortar for masonry -- Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table) (EN 1015-3:1999)

[147] HRN EN 1015-4:2000Metode ispitivanja mortova za ziđe -- 4. dio: Određivanje konzistencije svježeg morta (penetracijskim uređajem) (EN 1015-4:1998)

[148] HRN EN 1015-6:2000, HRN EN 1015-6/A1:2008Metode ispitivanja mortova za ziđe -- 6. dio: Određivanje gustoće svježega morta (EN 1015-6:1998/A1:2006)

[149] HRN EN 1015-7:2000Metode ispitivanja mortova za ziđe -- 7. dio: Određivanje udjela pora u svježemu mortu (EN 1015-7:1998)

[150] HRN EN 1015-9:2000/A1:2008 Metode ispitivanja mortova za ziđe -- 10. dio: Određivanje gustoće suhog očvrsnulog morta (EN 1015-10:1999/A1:2006)

[151] HRN EN 1015-10:2000, Metode ispitivanja mortova za ziđe -- 2. dio: Uzorkovanje mortova i priprema ispitnih uzoraka mortova (EN 1015-2:1998)

[152] HRN EN 1015-11:2000, Metode ispitivanja mortova za ziđe – 11. dio: Određivanje čvrstoće pri savijanju i tlačne čvrstoće očvrslog morta (EN 1015-11:1999)

[153] HRN EN 1015-17:2000,HRN EN 1015-17:2000/A1:2005
Metode ispitivanja mortova za ziđe -- 17. dio: Određivanje topljivih klorida u svježemu mortu

[154] HRN EN 1015-18:2003 Metode ispitivanja mortova za ziđe -- 18. dio: Određivanje koeficijenta kapilarne vodoupojnosti (EN 1015-18:2002)

[155] HRN EN 13139:2013, Agregati za mort (EN 13139:2013)

[156] HRN EN 1008:2002: Voda za pripremu betona – Specifikacije za uzorkovanje, ispitivanje i potvrđivanje sukladnosti vode.

[157]HRN EN 934-3:2008, Dodaci betonu, mortu i mortu za injektiranje -- 1. dio: Opći zahtjevi (EN 934-1:2008)

[158] T. Matusinović : Inženjerstvo mineralnih veziva, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, 2001

[159] HRN EN 459-1:2004 Građevno vapno – 1. dio: Definicije, specifikacije i kriteriji sukladnosti (EN 459-1:2001 + AC:2002)

[160] E. Kovač: Anorganska i mineralna veziva, https://repozitorij.gfos.hr/islandora/object/gfos:688/preview, pristupljeno online: prosinac, 2018.

[161] M.Thomson, J-E.Lindqvist, J.Elsen, C.J.W.P. Groot:Porosity of historic mortars, 13th International Brick and Block Masonry Conference Amsterdam, 2004

[162] D. Ergenc, R. Fort: Accelerating carbonation in lime-based mortar in high CO2 environments, Construction and Building Materials 188, 2018, pp 314-325

[163] A. Arizzi, G. Cultrone: The difference in behaviour between calcitic and dolomitic lime mortars set under dry conditions: The relationship between textural and physical–mechanical properties, Cement and Concrete Research 42 , 2012, pp 818–826

[164] L. Chever , S. Pavı : Physical properties of magnesian lime mortars, Howard Materials and Structures ,2010, pp 283–296

[165] Mehanički i fizikalni zahtjevi čvrstoće cementa dani kao karakteristične vrijednosti, 2017, http://www.holcim.hr/uploads/HR/Holcim, pristupljeno online: prosinac, 2018.

[166] Portland cement, https://www.alibaba.com/showroom/brands-of-portland-cement.html pristupljeno online: prosinac, 2018.

[167] HRN EN 459-3:2004 Građevno vapno – 3. dio: Vrednovanje sukladnosti (EN 459-3:2001 + AC:2002).

[168] D. Vrkljan, M. Klanfar,: Cement, nastavni materijali, Rudarsko –geološko –naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2010.,

[169] http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=11190, pistupljeno online: prosinac, 2018

[170] Suvremeni postupak proizvodnje cementa, https://www.britannica.com/technology/cement-building-material(02.08.2017.)

[171] Označavanje cementa, https://hr.wikipedia.org/wiki/Ozna%C4%8Davanje_cementa, 2017, pristupljeno online: prosinac, 2018

[172] Mehanički i fizikalni zahtjevi čvrstoće cementa dani kao karakteristične vrijednosti, http://www.holcim.hr/uploads/HR/Holcim_Cement_prema_HRN_EN_197.pdf, 2017., pristupljeno online: prosinac, 2018

[173] Portland cement, https://www.alibaba.com/showroom/brands-of-portland-cement.html (07.08.2017.)

[174] HRN EN 197-1, Cement -- 1. dio: Sastav, specifikacije i kriteriji sukladnosti cementa opće namjene (EN 197-1:2011):

[175] M.Mikoč: Mortovi i žbuke, ,Građevni materijali, Osijek 2006.

[176] Y. Kim, K.M. Lee, J.W. Bang, S.-J.Kwon: , Effect of W/C Ratio on Durability and Porosity in Cement Mortar with Constant Cement Amount, Advances in Materials Science and Engineering, 2014

[177] http://kemoplastika.hr/proizvod/vodeno-staklo/ 2017, pristupljeno online: prosinac, 2018

[178] Pucolan, https://sl.wikipedia.org/wiki/Pucolan , 2017, pristupljeno online: prosinac, 2018

[179] J. Cao, D.D.L. Chung: Damage evolution during freeze–thaw cycling of cement mortar, studied by electrical resistivity measurement, Cement and Concrete Research 32, 2002., pp 1657–1661

[180]M. Radeka: Značaj karakteristika pora za otpornost materijala pri dejstvu mraza, Materijali i konstrukcije 50, 2007, pp (14-20)

[181] G. W. Chase: Characterization of the interface between brick and mortar, Retrospecitve theses and dissertations, Iowa State University, 1983

[182] S.J. Lawrence: An investigation of factors affecting the durability of masonry mortarr, AN INVESTIGATION OF FACTORS AFFECTING THE DURABILITY OF MASONRY MORTAR http://www.hms.civil.uminho.pt/ibmac/2008/14IBMAC_133.pdf, pristupljeno online: prosinac, 2018.

[183] H. W. Reinhardt, K. Gabe: From pore size distribution to an equivalent pore size of cement mortar, Materials and Structures ,1990

[184] Edgell GJ and Wilson N.: The development of a freeze thaw test for mortar, 13th International Brick and Block Masonry Conference, Amsterdam, 2004

[185] M.J.Tate, M. Thomson: Effect of air entrainment on freeze-thaw durability of type S Portland cement-lime masonry mortars, 9 th Canadian masonry symposium

[186] R. Borinaga-Treviño, P. Pascual-Muñoz, Calzada-Pérez, A. Miguel, D. Castro-Fresno: Freeze-thaw durability of cement-based geothermal grouting materials, Construction and building materials, 2014, pp. 390-397.

[187] AS 3700: 2018, Autralian standards: Masonry constructions

[188]S.J.Lawrence: An investignation of factors affecting the durability of masonry moratir

[189] T. Testone, H.O. Sugo, A.W. Page, S.J. Lawrence: A study of moratr durability using the scrach test,

[190] Z. Rusin and P. Świercz : Volumetric strains of cement-based mortars caused by ice formation in terms of frost resistance diagnostics, Bulletin oft he Polish academy of sciences, vol. 63, 2015

[191] HRN EN 1998-1, Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija -- 1. dio: Opća pravila, potresna djelovanja i pravila za zgrade (EN 1998-1:2004+AC:2009)

[192] HRN U.B1.024 Određivanje sadržaja sagorljivih i organskih materija tla.

[193] HRN U.B1.026 Određivanje granica konzistencije tla

[194] ASTM D 422-63 Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils (Withdrawn 2016)

[195] HRN EN 1052-3:2004 Metode ispitivanja zida - 3. dio: Određivanje početne posmične čvrstoće

[196] ISO 6946:2017 Građevni dijelovi i građevni elementi - Toplinski otpor i koeficijent prolaska topline -- Metode proračuna

CURRICULUM VITAE

Rođena sam u Gospiću 5. svibnja 1974. godine od oca Ante Pešut i majke Blage Pešut. Osnovnu školu i srednju školu završila sam u Osijeku. Maturirala sam s odličnim uspjehom 1993. godine u matematičkoj gimnaziji. Iste sam godine upisala sveučilišni dodiplomski studij Građevinskog fakulteta Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, kojeg sam završila 1999. godine, te stekla visoku stručnu spremu i zvanje diplomiranog inženjera građevinarstva.

Od srpnja 2000. godine do kolovoza 2002. godine radila sam u tvrtki «Gradnja» d.d. Osijek kao pomoćnik voditelja gradilišta.

Od kolovoza 2002. godine do ožujka 2003. godine radila sam u projektnom birou «Bipus» d.o.o. Osijek kao projektant suradnik.

Od travnja 2003. do danas zaposlena sam u tvrtki «Institut IGH» d.d., RC Osijek kao voditelj ispitivanja u Laboratoriju za materijale i konstrukcije. Voditelj sam ispitivanja opečnih zidnih elemenata, betonskih prefabrikata, te naknadnih ispitivanja u očvrslom betonu.

Osim navedenog, na radnom mjestu obavljam poslove kontrolnih ispitivanja i tehnološkog nadzora za betonske radove, a ujedno sam i ovlaštena osoba od strane Ministarstva graditeljstva i prostornoga uređenja za provođenje radnji ocjenjivanja i provjere stalnosti svojstava građevinskih proizvoda iz skupine ziđe i srodni proizvodi: zidni elementi 1. kategorije i tvornički izrađene mortove za ziđe, predgotovljene proizvode od običnog, laganog i autoklaviranog porastog betona, beton te odgovorna osoba koja može biti imenovana za donošenje tehničke ocjene građevnih proizvoda i skupine građevnih proizvoda iz gore navedenih područja.

Akademske 2004/2005 godine upisala sam poslijediplomski studij na Građevinskom fakultetu u Osijeku, smjer Organizacija građenja. Isti sam završila 2008. godine obranom magistarskog rada «Tvornička kontrola kvalitete u proizvodnji opečnih zidnih elemenata», pod mentorstvom prof.dr.sc. Dunje Mikulić, dipl.ing.fizike.

Od 2004. godine član sam Hrvatske komore arhitekata i inženjera u građevinarstvu, sa položenim stručnim ispitom pred komisijom Ministarstva zaštite okoliša i prostornog uređenja. Od 2006. godine član sam Tehničkog odbora za ziđe (TO 179).

Dana 10. Prosinca 2013. godine, imenovana sam članom Povjerenstva za praćenje i osiguranje kvalitete visokog obrazovanja na Građevinskom fakultetu Osijek, kao vanjski dionik, a u svrhu suradnje pri organizaciji, koordinaciji i provođenjem postupaka unutarnjeg vrednovanja te razvijanja institucijskih mehanizama osiguravanja, unaprjeđenja i promicanja kvalitete na Fakultetu.

Tijekom 2012. godine aktivno sam sudjelovala na projektu „*Development of investigation and analysis techniques for the assessment and lifetime expectancy of historical structures*“ (IPA II Program) te na poslovima pripreme i izlaganja radova koji su proizašli iz tog projekta. Predmet ovog dijela projekta bio je iznalaženje optimalnog načina izrade i temperature pečenja opeke koji će rezultirati opekom dostatne trajnosti namijenjene za ugradnju u povijesne građevine. S tim ciljem, proizvedene su različite serije opeka, ispitana su trajnosna svojstva proizvoda te doneseni preliminarni zaključci o optimalnom postupku proizvodnje opeke namijenjene za sanaciju povijesnih građevina. Upravo je rad na ovom projektu bio uvod u istraživanje područja trajnosti opečnih zidnih elemenata.

U Osijeku, prosinac 2018. mr. sc. Martina Vračević, dipl.ing.građ.