Mogućnost primjene domaće zgure kao agregata u betonu

Netinger, Ivanka; Jelčić Rukavina, Marija; Bjegović, Dubravka

Source / Izvornik: **Građevinar, 2010, 62, 35 - 43**

Journal article, Published version
Rad u časopisu, Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:133:643548

Rights / Prava: Attribution 4.0 International/Imenovanje 4.0 međunarodna

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

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

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

UDK 666.972+666.88.001.7 *Primljeno 23. 6. 2009.*

Mogućnost primjene domaće zgure kao agregat u betonu

Ivanka Netinger, Marija Jelčić Rukavina, Dubravka Bjegović

Ključne riječi

*beton,
agregat,
agregat iz prirode,
domaća zgura,
primjena,
hrvatski propisi,
zbrinjavanje otpada*

I. Netinger, M. Jelčić Rukavina, D. Bjegović *Prethodno priopćenje*

Mogućnost primjene domaće zgure kao agregata u betonu

Opisana su ispitivanja, provedena u skladu s hrvatskim normama, da bi se ustanovila mogućnost uporabe domaće zgure kao agregata u betonu. Agregat je specificiran prema razredbi danoj u HRN EN 12620/AC:2006 a dobiveni razredi po pojedinom svojstvu agregata uspoređeni su sa zahtjevima hrvatskih propisa. Rezultati pokazuju da se može domaća zgura rabiti kao agregat u betonu, što bi pridonijelo zbrinjavanju te vrste otpada i očuvanju uobičajeno rabljenih agregata iz prirode.

Key words

*concrete,
aggregate,
aggregate from nature,
domestic slag,
application,
Croatian regulations,
waste management*

I. Netinger, M. Jelčić Rukavina, D. Bjegović *Preliminary note*

Possibility of using domestic slag as concrete aggregate

Tests conducted in accordance with Croatian standards in order to define possibility of using domestic slag as concrete aggregate, are described. The aggregate is specified according to classification given in HRN EN 12620/AC:2006, and categories obtained for individual aggregate properties are compared with requirements contained in Croatian regulations. The results show that domestic slag can in fact be used as concrete aggregate. Such use would contribute to proper management of this type of waste and to preservation of aggregate normally taken from nature.

Mots clés

*béton,
agrégat,
agrégat de la nature,
scorie domestique,
application,
règlements croates,
gestion des déchets*

I. Netinger, M. Jelčić Rukavina, D. Bjegović *Note préliminarie*

Possibilité d'emploi de scorie domestique comme agrégat de béton

Les essais faits en conformité avec les normes croates afin de définir la possibilité d'emploi de la scorie domestique comme agrégat de béton, sont décrits. L'agrégat est spécifié selon la classification présentée dans HR EN 12620/AC:2006, et les catégories obtenues pour propriétés individuelles des agrégats sont comparées avec les exigences contenues dans les règlements croates. Les résultats montrent que la scorie domestique peut en fait être utilisée comme agrégat de béton. Cet emploi contribuerait à la gestion appropriée de ce type de déchets et à la préservation des agrégats normalement pris de la nature.

Ключевые слова

*бетон,
агрегат,
природный агрегат,
домашний шлак,
применение,
хорватские правила,
утилизация отходов*

И. Нетингер, М. Йелчич Рукавина, Д. Бегович *Предварительное сообщение*

Возможность применения домашнего шлака в качестве агрегата для бетона

Приводится описание испытаний, проведенных в соответствии с хорватскими нормами, в целях установления возможности применения домашнего шлака в качестве агрегата для бетона. Агрегат специфицирован в соответствии с классификацией, предусмотренной HRN EN 12620/AC:2006. Проведено сравнение классов, полученных по отдельным свойствам агрегата, с требованиями, предусматриваемыми хорватскими правилами. Результаты показывают, что домашний шлак может использоваться в качестве агрегата в бетоне, что будет способствовать утилизации этого вида отходов и сохранению обычно используемых природных агрегатов.

Schlüsselworte

*Beton,
Zuschlagstoff,
Zuschlagstoff aus der Natur,
einheimische Schlacke,
Anwendung,
kroatische Normen,
Abfallversorgung*

I. Netinger, M. Jelčić Rukavina, D. Bjegović *Vorherige Mitteilung*

Möglichkeit der Anwendung der einheimischen Schlacke als Betonzuschlagstoff

Man beschreibt die Untersuchungen, durchgeführt im Einklang mit kroatischen Normen, mit dem Ziel die Möglichkeit der Anwendung der einheimischen Schlacke als Betonzuschlagstoff festzustellen. Der Zuschlagstoff ist spezifiziert nach der Klassifizierung in HRN EN 12620/AC:2006 und die Klassen, erhalten nach einzelnen Eigenschaften, sind mit den Forderungen der kroatischen Vorschriften verglichen. Die Ergebnisse zeigen dass die einheimische Schlacke als Betonzuschlagstoff genutzt werden kann, was der Versorgung dieser Art Abfall und Bewahrung der üblich genutzten Zuschlagstoffe aus der Natur beitragen.

Autori: Mr. sc. **Ivanka Netinger**, dipl. ing. građ., Sveučilište J. J. Strossmayera Građevinski fakultet Osijek; **Marija Jelčić Rukavina**, dipl. ing. građ.; prof. dr. sc. **Dubravka Bjegović**, dipl. ing. građ., Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Zagreb

1 Uvod

Vrsta nastale zgure ovisi o vrsti rudače koja se prerađuje te načinu hlađenja zgure (kristalasta, granulirana i ekspandirana ili pjenušava). Zgure s područja Republike Hrvatske podrijetlom su iz obojene i crne metalurgije te legiranja željeza. Zgure iz obojene metalurgije (iz proizvodnje aluminija, ferokroma i feromangana) prodane su u izvoz ili ugrađene u okolne nasipe te na taj način odložene. Neriješeno je još ostalo pitanje odlaganja zgura crne metalurgije iz domaćih željezara – Željezare Sisak i Željezare Split.

Zgura odložena blizu Siska rasprostranjena je na ukupno 25 ha i mješovitog je sastava – kombinacija visokopećne zgure i zgure iz elektrolučnih peći. Količina odlaganog materijala na tom području procjenjuje se na 1,5 milijuna tona. Trenutačnu primjenu ova zgura nalazi u cestogradnji (kao stabilizacijski sloj) i u poljoprivredi (sitnije se frakcije rabe kao poboljšivač tla). Navedenoj količini zgure s odlagališta u Sisku treba pribrojiti i novonastalu količinu od 300.000 tona iz trenutačne proizvodnje bešavnih cijevi u Željezari Sisak koja se nalazi u krugu pogona. Zgura s odlagališta u Splitu podrijetlom je iz elektrolučnih peći i do sada nije pronašla područje primjene. Trenutačna količina te zgure procjenjuje se na 30.000 tona. Visoka cijena odlaganja ovog otpadnog materijala nameće potrebu za iznalaženjem uvijek novih područja primjene. U ovom je radu obavljena procjena pogodnosti domaćih zgura za uporabu kao agregata u betonu. Prikazani su rezultati ispitivanja zgure s područja Republike Hrvatske sukladno normi HRN EN 12620/AC:2006 *Agregati za beton*, a dobiveni razredi prema pojedinom svojstvu agregata uspoređeni su sa zahtjevima hrvatskog zakonodavstva postavljenim na agregat za beton. Osim svojstava zgure kao agregata obuhvaćenih normom HRN EN 12620/AC:2006, prikazana su i neka svojstva zgure koja su autori ovog rada smatrali zanimljivim zbog usporedbe s istim svojstvima uobičajenog dolomitnog.agregata

2 Pregled dosadašnjih područja primjene zgure u svijetu

Područja primjene zgure kroz povijest bila su raznolika. 350. godine prije Krista Aristotel je u svojim spisima zabilježio primjenu zgure kao lijeka [1]. Uporabu zgure iz proizvodnje željeza kao topničkih kugli Nijemci su zabilježili 1589. godine [2]. Lijevanjem zgure u prošlosti su se proizvodili i blokovi za popločavanje ulica na području Europe i Amerike[2].

Nova era upotrebe zgure počinje 1862. kada je Emil Langen otkrio latentna hidraulička svojstva granulirane visokopećne zgure, čime je počelo razdoblje njezine masovne primjene kao dodatka cementu [3]. Pola stoljeća kasnije, 1909., izdavanjem prve njemačke norme za cement s dodatkom visokopećne zgure i zakonski je potvrđena primjena ovog tipa zgure u cementu [4]. Danas se, pak, prema vrijedećoj hrvatskoj normi za cement visokopećna zgura nalazi u čak 9 cemenata općeg tipa [5]. Osim kao zamjena dijela veziva u betonu, zgura se u posljednje vrijeme sve češće u literaturi proučava kao samostalno vezivo [6 do 10], pri čemu se njezino svojstvo vezivanja potiče primjenom alkalnih aktivatora iz čega i proizlazi naziv „alkalno aktivirana zgura“. Jedno od novijih područja primjena zgure jest i njezina uporaba kao agregata u betonu. Prema podacima dostupnim u raspoloživoj literaturi [12 do 15], uporaba zgure u tu svrhu pokazala se opravdanom. Pojedine su zemlje, kao što je npr. Japan, u tome toliko daleko otišle da imaju i normu za primjenu zgure kao agregata u betonu [16].

Visoka gustoća visokopećne zgure karakterizira je kao konstrukcijski materijal za hidroinženjerske građevine. Naime, u Njemačkoj i Nizozemskoj oko 400 000 tona visokopećne zgure godišnje bude upotrijebljeno kao materijal za oblaganje pokosa [3]. Osim za oblaganje pokosa, ovaj se materijal u području hidrotehnike rabi i za regulaciju vodotoka te nasipavanje erodiranih korita, kako bi u sušnom razdoblju voda bila usmjerena u plovna korita [17].

U gradnji prometnica zgura se često rabi kao materijal za stabilizaciju tla [18]. Osim u površinskim slojevima tla, granulirana visokopećna zgura uspješno je primijenjena i kao vezivo pri stabilizaciji dubljih slojeva tla, u slučaju slabe nosivosti tla na kojem je planirana gradnja inženjerskih građevina [19]. Prema statističkim podacima jedna od najučestalijih primjena jest zgura u nevezanim mješavinama za donji ustroj prometnica ili kao agregat u asfaltnim mješavinama [3, 20, 21].

Osim ove inženjerske primjene, zgura se danas često u literaturi spominje i kao poboljšivač tla [3, 22]. Osobito se to odnosi na visokopećnu zguru koja je zbog velikog udjela kalcijeva i magnezijeva oksida dobra zamjena za agrikulturno vapno.

Uz ovdje navedenu učestalu primjenu zgure, postoje i radovi o primjeni zgure u nekim drugim područjima. Tako npr. zgura učinkovito uklanja fosfor iz vode [23], služi za izradu abrazivnog alata [24], kao sirovina za punjenje peći i ponovno izdvajanje metala [24 do 26], a zabilježena je i uporaba zgure kao zamjene dijela punjenja peći pri proizvodnji cementnog klinkera [27, 28].

3 Procjena mogućnosti primjene zgure s područja Republike Hrvatske kao agregata u betonu

Velika tvrdoća zgura s područja Republike Hrvatske uzrokuje velike troškove mljevenja ovog materijala, što poskupljuje troškove proizvodnje cementa. Iz navedenog

razloga ove zgure nisu pronašle svoje područje primjene u betonu kao zamjena dijela veziva, pa bi ih stoga bilo ekonomičnije primijeniti kao agregat u betonu. Dodatno, kako upravo agregat zauzima najveći udio u volumenu betona, primjenom zgure kao agregata znatno bi se više pridonijelo odlaganju toga otpadnog materijala, nego pri primjeni zgure kao zamjene dijela veziva. No, kako se ne radi o konvencionalnom agregatu, zguru iz svakog izvora potrebno je zasebno ispitati prije donošenja konačne odluke o uporabi zgure kao agregata u betonu. U nastavku su opisane radnje koje je bilo potrebno poduzeti u nastojanju da se dokaže mogućnost primjene zgure kao zamjene za uobičajeni agregat u betonu.

3.1 Priprema zgure kao agregata

S obzirom da u stanju u kojem je raspoloživa na odlagalištima zgura nije bila prikladna za agregat, bio je potreban niz pomoćnih radnji kojima se od veće količine otpadnog materijala dobila manja količina iskoristivog materijala za ispitivanje. Pomoćne su radnje ovdje uključivale: ručno izdvajanje velikih komada zgure i otpada te metala, ručno prosijavanje preostalog materijala i razdvajanje u frakcije (0-4, 4-8, 8-16 i 16-…mm), pranje frakcija agregata namijenjenih za ispitivanje (4-8 i 8-16 mm) te ručno izdvajanje zrna agregata koja u sebi sadrže velik udio metala. U nastavku su predočena provedena ispitivanja svojstava tako pripremljenog agregata.

3.2 Ispitivanja zgure kao agregata

Na frakcijama 4-8 i 8-16 mm zgura podrijetlom iz Splita i Siska ispitana su ona svojstva zgure kao agregata predviđena normom HRN EN 12620/AC:2006 (tablica 1.) koja su smatrana bitnim za agregat u konstrukcijskom betonu. Uz ispitivanja iz tablice 1., obavljena su i neka ispitivanja čiji su se rezultati smatrali zanimljivima za usporedbu zgure kao agregata s konvencionalnim agregatom (tablica 2.). To uključuje ispitivanje volumenske postojanosti, određivanje pH vrijednosti eluata agregata te ispitivanje radioaktivnosti zgure. S obzirom da volumenski nepostojan materijal ugrađen u konstrukciju uzrokuje pukotine i razaranja konstrukcije, zguri kao agregatu određena je volumenska postojanost. No, dok u slučaju primjene zgure kao agregata u asfaltu [29, 30] postoje neke granične vrijednosti njezine volumenske nepostojanosti, kod primjene zgure kao agregata u betonu te granice ne postoje. Iz tog je razloga u nastavku ispitana volumenska postojanost zgura i referentnog dolomitnog agregata. Kako se ispitivanje volumenske postojanosti agregata provodi na uzorku sastavljenom iz sitne i krupne frakcije, a postojala je sumnja u izraženiju volumensku nepostojanost sitnih frakcija zgure, dodatno je priručnom metodom ispitana volumenska postojanost sitne i krupne frakcije svih agregata. Radi se o nenormiranom postupku koji je podrazumijevao praćenje pomaka agregata (sitnog i krupnog odvojeno) u posudama visine 25 cm i promjera 15 cm (slika 1.). Na materijal u posudama slobodno su postavljeni perforirani poklopci. Uzorak materijala povremeno je zalijevan vodom (u 0-tom, 47-mom i 95-om satu) koja je imala mogućnost slobodnog procjeđivanja kroz uzorak i perforirano dno posude. Mikrouricama koje su bile u kontaktu s poklopcima (smještenim na uzorcima) praćeni su pomaci materijala zbog promjene njegove vlažnosti.



Slika 1. Postupak ispitivanja

Nadalje, primjena zgure kao agregata u betonu s portlandskim cementom nije uobičajena zbog sumnje u njezino korozivno djelovanje na metalne dijelove unutar armiranobetonskih elemenata. Naime, zabrinjavajućom se smatra mala količina sumpora koju zgura posjeduje [31]. No, istraživanja provedena u posljednjih nekoliko desetljeća objasnila su uvjete korozivnog djelovanja sumpora - sumpor je aktivan isključivo u kiselom okruženju što će potaknuti koroziju [31]. U sastavu zgure su pak najviše zastupljeni kalcijev i magnezijev oksid, što bi trebalo stvarati lužnato okruženje u betonu i spriječiti koroziju metalnih dijelova ugrađenih u beton. Razlog zbog kojeg se zgura još uvijek smatra korozivnom uglavnom je ekonomski - lakše je proglasiti je neuporabivom nego ispitivati njezino potencijalno korozivno djelovanje [31]. Radi dokazivanja da ovdje istraživane zgure stvaraju lužnato okruženje u betonu, svaka od zgura je potopljena na 24 h pod vodu te je tako dobivenom eluatu ispitana pH vrijednost i uspoređena sa pH vrijednošću eluata dobivenog potapanjem dolomitnog agregata. Također, ispitana je radioaktivnost zgure kako bi ju se izuzelo iz konteksta radioaktivnog otpada. Rezultati provedenih ispitivanja prikazani su u nastavku, redoslijedom kako je to navedeno u tablicama 1. i 2.

Tablica 1. Provedena ispitivanja agregata prema specifikaciji norme HRN EN 12620/AC:2006

Svojstvo	Referentna norma ili metoda	Napomena
Granulometrijski sastav	HRN EN 933-1:2003 Određivanje granulometrijskog sastava - Metoda sijanja	-
Udio sitnih čestica		
Oblik zrna agregata - Indeks oblika (kljunasto mjerilo 1:3)	HRN EN 933-4:2004 Određivanje oblika zrna – Indeks oblika	-
Stvarna gustoća čestica	HRN EN 1097-6:2002/AC:2004/A1:2005 Određivanje gustoće i upijanja vode	piknometrijska metoda
Gustoća čestica u suhom stanju		
Gustoća čestica u zasićenom suhom stanju		
Upijanje vode		
Petrografski opis	HRN EN 932-3:2003 Ispitivanje općih svojstava agregata - 3. dio: Postupak i nazivlje za pojednostavnjeni petrografski opis	-
Volumenska postojanost – Skupljanje uslijed sušenja	HRN EN 1367-4:2004 Ispitivanja toplinskog i vremenskog utjecaja na svojstva agregata - 4. dio: Određivanje skupljanja pri sušenju	-
Sadržaj klorida	HRN EN 1744-1:2004 Ispitivanja kemijskih svojstava agregata - 1. dio: Kemijska analiza	nije potrebno ako postoji kompletna kemijska analiza
Sadržaj ukupnog sumpora		
Sadržaj sulfata topljivog u kiselini		
Raspadanje dikalcijeva silikata		-
Raspadanje željeza		-
Otpornost na predrobljavanje Los Angeles	HRN EN 1097-2:2004 Ispitivanja mehaničkih i fizikalnih svojstava agregata - 2. dio: Metode za određivanje otpornosti na drobljenje	-
Otpornost na zamrzavanje /odmrzavanje	HRN EN 1367-2:2004 Ispitivanja toplinskog i vremenskog utjecaja na svojstava agregata - 2. dio: Ispitivanje magnezijevim sulfatom	-

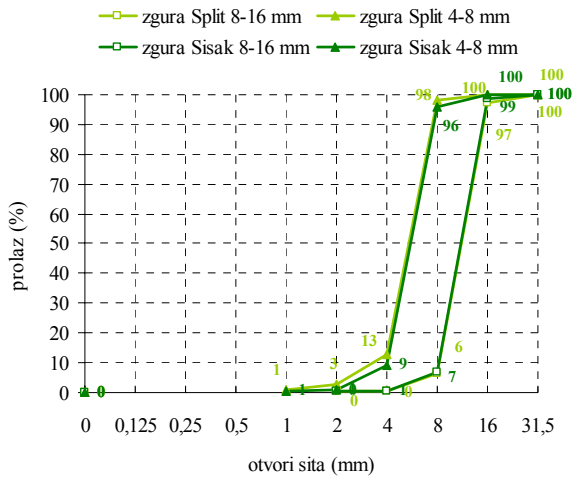
Tablica 2. Dodatno provedena ispitivanja agregata

Svojstvo	Referentna norma ili metoda	Napomena
Volumenska postojanost	HRN EN 1744-1:2004 Ispitivanja kemijskih svojstava agregata - 1. dio: Kemijska analiza i Priručna metoda (nenormirana)	zanimljiv podatak zbog sumnje u ekspanzivnu prirodu zgure
Određivanje pH vrijednosti eluata zgure	Pomoću digitalnog pH-metra, prema internoj uputi vanjskog suradnika	zanimljiv podatak zbog sumnje u korozivno djelovanje zgure
Radioaktivnost	Gamaspektometrijska analiza	-

3.3 Rezultati ispitivanja i zahtjevi hrvatskog zakonodavstva

Granulometrijski sastav agregata, određen sukladno normi HRN EN 933-1:2003, prikazan je na slici 2.

U tablici 3. prikazana je razredba takvog agregata s obzirom na granulometrijski sastav prema specifikacijama norme HRN EN 12620/AC:2006 te zahtjevi propisani u Tehničkom propisu za betonske konstrukcije (TPBK).



Slika 2. Krivulje prosijavanja zgure iz Splita, frakcije 4-8 i 8-16 mm

Tablica 3. Granulometrijski sastav

Podrijetlo zgure	Frakcija (mm)	Razred po HRN EN 12620	Zahtjev po TPBK
Split	4-8	$G_C85/20$	$G_C85/20$
	8-16	$G_C90/15$	$G_C90/15$
Sisak	4-8	$G_C85/20$	$G_C85/20$
	8-16	$G_C90/15$	$G_C90/15$

Udio sitnih čestica u agregatu, određen sukladno normi HRN EN 933-1:2003, prikazan je u tablici 4. Indeks oblika zrna agregata, određen sukladno normi HRN EN 933-4:2004, prikazan je u tablici 5.

Tablica 4. Udio sitnih čestica

Podrijetlo zgure	Frakcija (mm)	Prolaz kroz sito 0,063 mm (%)	Razred po HRN EN 12620	Zahtjev po TPBK
Split	4-8	1,4	$f_{1,5}$	$f_{1,5}$
	8-16	1,3	$f_{1,5}$	$f_{1,5}$
Sisak	4-8	1,3	$f_{1,5}$	$f_{1,5}$
	8-16	1,1	$f_{1,5}$	$f_{1,5}$

Tablica 5. Indeks oblika zrna

Podrijetlo zgure	Frakcija (mm)	Indeks oblika zrna SI	Razred po HRN EN 12620	Zahtjev po TPBK
Split	4-8	4	SI_{15}	najviše SI_{20}
	8-16	7	SI_{15}	najviše SI_{20}
Sisak	4-8	5	SI_{15}	najviše SI_{20}
	8-16	9	SI_{15}	najviše SI_{20}

Podaci o stvarnoj gustoći, gustoći u suhom stanju, gustoći na zasićenoj, površinski u suhom zasićenom stanju i upijanju agregata, određeni sukladno s normom HRN EN 1097-6:2002/AC:2004/A1:2005, dani su u tablici 6. Usporedbe radi, ista su svojstva ispitana i pri uobičajeno drobljenom dolomitnom agregatu u betonu.

Pojednostavnjeni petrografski opis, određen u skladu s normom HRN EN 932-3:2003, prikazan je u tablici 7., a volumenska postojanost skupljanjem zbog sušenja,

Tablica 6. Stvarna gustoća, gustoća u suhom stanju, gustoća u zasićenom suhom stanju i upijanje agregata

Podrijetlo zgure/agregata	Frakcija (mm)	Stvarna gustoća čestica agregata, ρ_a (Mg/m^3)	Gustoća čestica u suhom stanju, ρ_{rd} (Mg/m^3)	Gustoća čestica u zasićenom suhom stanju, ρ_{ssd} (Mg/m^3)	Upijanje vode, WA_{24} (%)	Zahtjev po TPBK
Split	4-16	3,41	2,93	3,07	4,9	mora zadovoljiti projektne zahtjeve ili zahtjeve naručitelja i kupca
Sisak	4-16	3,49	3,09	3,21	3,7	
dolomitni agregat	4-16	2,79	2,72	2,75	0,8	

Tablica 7. Pojednostavnjeni petrografski opis

Podrijetlo zgure/agregata	Frakcija (mm)	Oblik zrna	Izgled površine zrna	Zaobljenost zrna	Trošnost, skrama	Zahtjev po TPBK
zgura Split	4-8	izometričan do izdužen	hrapava, šupljikava	uglata do blago zaobljena	-	mora zadovoljiti projektne zahtjeve ili zahtjeve naručitelja i kupca
	8-16	izometričan do izdužen	hrapava, šupljikava	uglata do blago zaobljena	-	
zgura Sisak	4-8	izometričan do izdužen	hrapava, šupljikava	uglata	-	
	8-16	izometričan do izdužen	hrapava, šupljikava	uglata	-	
dolomitni agregat	4-8	izometričan do izdužen	blago hrapava	uglata	na 5-10 % zrna smeđa skrama	
	8-16	izometričan do izdužen	blago hrapava	uglata	na 5-10 % zrna smeđa skrama	

određena sukladno normi HRN EN 1367-4:2004, u tablici 8. Tablica 9. daje uvid u kemijsku analizu zgura prema normi HRN EN 196-2:2005.

Tablica 8. Volumenska postojanost – skupljanje zbog sušenja

Podrijetlo zgure/agregata	Volumenska postojanost, Ssr (%)	Zahtjev po TPBK
Split	uzorak nije očvrsnuo	0,075 %
Sisak	0,026	0,075 %
dolomitni agregat	0,008	0,075 %

Tablica 9. Rezultati kemijske analize zgura, frakcije 4-16 mm

Analizirano svojstvo	Vrijednosti svojstava (% mase)	
	Split	Sisak
gubitak žarenjem	4,71	4,99
sadržaj kalcijeva oksida, CaO	31,52	24,98
sadržaj željeznog (II) oksida, Fe_2O_3	25,74	25,45
sadržaj ukupnog silicijeva (II) oksida, SiO_2	14,24	17,08
sadržaj aluminijeva (III) oksida, Al_2O_3	7,60	5,40
sadržaj magnezijeva oksida, MgO	7,42	10,58
sadržaj manganova oksida, MnO	3,80	8,91
netopljivi ostatak u HCl i Na_2CO_3	7,58	7,62
netopljivi ostatak u HCl i KOH	5,82	5,80
sadržaj sulfata, SO_3^2	0,44	0,25
sadržaj sulfida, S^{2-}	0,04	0,05
sadržaj klorida, Cl^-	0,000	0,000
sadržaj natrijeva oksida Na_2O	0,13	0,12
sadržaj kalijeva oksida K_2O	0,08	0,13
alkalije kao Na_2O	0,183	0,206

Ukupan sadržaj sumpora, sadržaj sulfata topljivih u kiselini i sadržaj klorida u zgurama prikazani su u tablici 10. Ukupni sadržaj sumpora dobiven je kao zbroj sadržaja sulfata i sulfida iz tablice 9.

Tablica 11. prikazuje rezultate ispitivanja raspadanja dikalcijeva silikata i raspadanja željeza u zgurama. Ispitivanje je provedeno u skladu sa HRN EN 1744-1:2004.

Tablica 11. Raspadanje dikalcijeva silikata i raspadanje željeza

Podrijetlo zgure/agregata	Raspadanje dikalcijeva silikata	Raspadanje željeza	Zahtjev po TPBK
zgura Split	ne	ne	ne smije biti raspadanja dikalcijeva silikata i željeza
zgura Sisak	ne	ne	

U tablici 12. dani su rezultati ispitivanja agregata metodom Los Angeles u skladu s normom HRN EN 1097-2:2004, a u tablici 13. rezultati ispitivanja otpornosti na cikluse zamrzavanja/odmrzavanja s pomoću magnezijeva sulfata u skladu s normom HRN EN 1367-2:2004.

Tablica 12. Koeficijent Los Angeles

Podrijetlo zgure/agregata	Koeficijent Los Angeles	Razred po HRN EN 12620	Zahtjev po TPBK
zgura Split	24,8	LA_{25}	najviše LA_{35} za betone opće namjene ili najviše LA_{30} za betone razreda izloženosti XF1 do XF4 (prema HRN EN 206-1)
zgura Sisak	21,7	LA_{25}	
dolomitni agregat	23,4	LA_{25}	

Tablica 13. Postotak gubitka mase pri ispitivanju magnezijevim sulfatom

Podrijetlo zgure/agregata	Postotak gubitka mase MS	Razred po HRN EN 12620	Zahtjev po TPBK
zgura Split	8,3	MS_{18}	najviše MS_{25} za betone razreda izloženosti XF1 i XF3 (prema HRN EN 206-1) ili najviše MS_{18} za betone razreda izloženosti XF2 i
zgura Sisak	5,7	MS_{18}	
dolomitni agregat	10,7	MS_{18}	

Tablica 10. Ukupan sadržaj sumpora, sadržaj sulfata topljivih u kiselini, sadržaj klorida

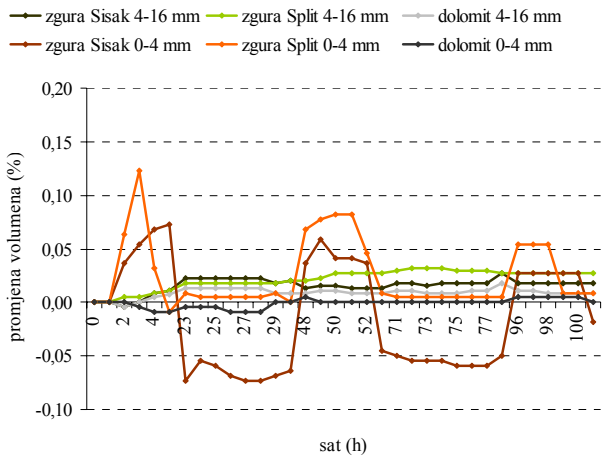
Svojstvo/podrijetlo zgure	Zahtjev po TPBK	zgura Split		zgura Sisak	
		sadržaj	Razred po normi HRN EN 12620	sadržaj	Razred po normi HRN EN 12620
sadržaj klorida	najviše 0,15 % za nearmirani beton najviše 0,06 % za armirani beton i najviše 0,03 % za prednapeti beton	0	ne sadrži kloride	0	ne sadrži kloride
sadržaj sulfata topljivih u kiselini	najviše $AS_{1,0}$	0,44	$AS_{1,0}$	0,25	$AS_{1,0}$
ukupni sadržaj sumpora	najviše 2 % za zrakom hlađenu zguru	0,48	< 2%	0,3	< 2%

Dobivene vrijednosti volumenske postojanosti za sva tri agregata prikazane su u tablici 14. Ispitivanje je provedeno sukladno s normom HRN EN 1744-1:2004.

Tablica 14. Volumenska postojanost agregata

Vrsta agregata	Vrijednost ekspanzije (%)
zgura Split	1,6
zgura Sisak	2,2
dolomitni agregat	-0,4

Na slici 3. prikazana je promjena volumena sitnog i krupnog agregata u posudi zbog njegova vlaženja i sušenja, dobivena mjerenjem pomaka agregata u posudama. Naime, zbog čvrstih bočnih stijenki posuda sa slike 1. pomak agregata u tom smjeru smatrao se spriječenim te se pri proračunu promjene volumena agregata u posudi u obzir uzela isključivo promjena u visini agregata u posudi u odnosu na početno zabilježenu visinu.



Slika 3. Volumenska promjene agregata

Rezultati ispitivanja pH vrijednosti eluata za sva tri agregata prikazani su u tablici 15. Ispitivanje pH vrijednosti obavljeno je pH-metrom, sukladno internoj uputi vanjskog suradnika. Tablica 16. prikazuje rezultate ispitivanja radioaktivnosti zgura.

Tablica 15. pH vrijednost eluata agregata

Vrsta agregata	pH vrijednost eluata
zgura Split	11,60
zgura Sisak	10,14
dolomitni agregat	9,26

Tablica 16. Rezultati ispitivanja radioaktivnosti

Vrsta agregata	Izmjerena vrijednost radioaktivnosti	Dopuštena vrijednost radioaktivnosti	Mišljenje
zgura Split	0,123	1	nije radioaktivan otpad
zgura Sisak	0,169	1	nije radioaktivan otpad

3.4 Rasprava

Uvidom u rezultate ispitivanja zgura iz Siska i Splita kao agregata prikazanih u tablicama 3. do 13., vidljivo je kako obje zgure zadovoljavaju zahtjeve postavljene u Tehničkom propisu za betonske konstrukcije te se prema hrvatskom zakonodavstvu mogu smatrati prikladnom zamjenom za uobičajeni agregat iz prirodnih izvora. Tablica 6. upućuje na znatno veće vrijednosti gustoća kod zgura u odnosu na dolomitni agregat, pa stoga autori rada preporučuju djelomičnu zamjenu uobičajeno uporabljenog agregata u betonu zgurom želi li se ostati u području betona obične težine. Prema rezultatima iz tablice 7., vidi se prisutnost skrame na dolomitnom agregatu i nepostojanje kod zgura, što upućuje na zaključak o mogućoj boljoj kvaliteti veze agregat-cementna pasta u betonu u slučaju uporabe zgure. Zgura iz Siska zadovoljila je zahtjeve koji se na nju postavljaju s obzirom na volumensku postojanost - skupljanje zbog sušenja (tablica 8.). Sukladno očekivanju, vrijednost skupljanja zbog sušenja kod uzorka sa zgurom iz Siska veća je od iste vrijednosti kod uzorka s dolomitnim agregatom. Nasuprot tome, uzorak sa zgurom iz Splita nije očvrsnuo te je ovo svojstvo bilo nemoguće izmjeriti. Prema mišljenju autora, takve za vezanje štetne tvari nalaze se u sitnoj frakciji zgure koja nije ni planirana za uporabu u betonu zbog sumnje u njezinu kvalitetu. Smatra se da bi uporabom isključivo krupnijeg agregata u betonu i njegovim prethodnim pranjem takav problem nevezivanja betona bio izbjegnut. Unatoč očekivanju autora o znatno većoj prednosti zgure u odnosu na dolomitni agregat, kada je riječ o otpornosti agregata na habanje i udar, obje zgure svrstane su u isti razred prema koeficijentu Los Angeles kao i dolomitni agregat (tablica 12.).

Nasuprot tome, kada je riječ o otpornosti na zamrzavanje (tablica 13.), zgure pokazuju superiornost pred dolomitnim agregatom. U tablici 14. prikazani su rezultati ispitivanja volumenske postojanosti agregata. Negativne vrijednosti u tablici pokazuju skupljanje, a pozitivne vrijednosti širenje agregata. Vidi se da pri izloženosti svih agregata istom tretmanu zgure znatno drugačije reagiraju od dolomitnog agregata, tj. zgure se šire, dok se dolomitni agregat skuplja. Na slici 3. prikazani su

rezultati ispitivanja sitne (0-4 mm) i krupne (4-16 mm) frakcije agregata odvojeno, ispitano priručnom metodom. Manje vrijednosti na krivulji znače skupljanje agregata, dok veće vrijednosti znače njegovo širenje. Ovdje se vidi da su sitne frakcije zgura iz Siska i Splita znatno podložnije promjenama volumena od krupnih frakcija. Promjene volumena kod sitnih frakcija zgura višestruko su veće od promjena volumena kod krupnih frakcija.

Tako je npr. sitna frakcija zgure iz Siska i do 27 puta podložnija promjenama volumena nego krupna frakcija iste zgure. Usporedbe radi, treba napomenuti da se sitna i krupna frakcija dolomitnog agregata u istim uvjetima vlažnosti vrlo slično ponašaju, što opravdava pretpostavku autora da je sitna frakcija zgura nositelj njihove izražene volumenske ekspanzije te da bi se izuzimanjem sitne frakcije zgure iz sastava agregata vrijednosti iz tablice 14. znatno smanjile. Prema mišljenju autora, uporaba isključivo krupne frakcije ovih zgura kao agregata u betonu jest moguća – eventualno izražena ekspanzija lako je rješiv problem nekom od dokazanih metoda ubrzanog starenja zgure [32] te to ne treba biti prepreka za masovniju primjenu ove vrste agregata.

U tablici 15. prikazani su rezultati ispitivanja pH vrijednosti eluata agregata iz kojih je vidljivo da obje zgure stvaraju znatno lužnatiji medij u usporedbi s dolomitnim agregatom te sukladno [31] ne bi trebale djelovati korozivno na metalne dijelove ugrađene u konstrukciju.

Tablica 16. prikazuje rezultate ispitivanja radioaktivnosti, iz kojih se vidi da obje zgure imaju manju vrijednost aktivnosti prirodnih radionuklida od dopuštene te ih se u tom smislu ne treba smatrati radioaktivnim otpadom.

4 Zaključak

U nastojanju da daju svoj doprinos odlaganju otpada na području Republike Hrvatske, autori su dali pregled poznatih načina odlaganja zgure u svijetu. Kada su u pitanju zgure raspoložive u Hrvatskoj, naglasak je stavljen na mogućnost njihove uporabe kao agregata u betonu. Rezultati provedenih ispitivanja krupne frakcije zgura iz Siska i Splita sukladni su sa zahtjevima postavljenim na agregat prema hrvatskom zakonodavstvu, što govori u prilog mogućnosti uporabe ovog industrijskog nusproduka kao agregata u betonu, a time bi se pridonijelo očuvanju okoliša i smanjenju upotrebe agregata iz prirodnih izvora.

Zahvala

Istraživanja prikazana u ovom radu provedena su u sklopu znanstvenog projekta Ministarstva obrazovanja, znanosti i sporta „Razvoj novih materijala i sustava zaštite betonskih konstrukcija“ (082-0822161-2159) i međunarodnog projekta „E!4166 – EUREKABUILD FIRECON“.

Autorice se zahvaljuju na novčanoj potpori iz navedenih projekata.

LITERATURA

[1] Geiseler, J.; Vaittinen, I.: *The status of processed slags from iron and steel making*, 3rd European Slag Conference – Proceedings “Manufacturing and Processing of Iron and Steel Slags”, Euroslag Publication , Keyworth, UK, 2002., pp. 37-42.

[2] Slag in History, www.nationalslag.org/slaghistory.htm

[3] Motz, H.: *Production and use of air-cooled blastfurnace and steel slags*, 3rd European Slag Conference – Proceedings “Manufacturing and Processing of Iron and Steel Slags”, Euroslag Publication , Keyworth, UK, 2002., pp. 7-20.

[4] Padovani, D.; Corcoran, B.: *Improved performance of granulated blastfurnace slag (GBS) cements with cement additives*, Cemtech Conference, Istanbul, 2004., www.mapei.it/dam/Pdf/ConferencesImproved.pdf

[5] HRN EN 197-1:2005 Cement – 1. dio: Sastav, specifikacije i mjerila sukladnosti cemenata za opće namjene

[6] Collins, F. G.; Sanjayan, J. G.: *Workability and mechanical properties of alkali activated slag concrete*, Cement and Concrete Research, Volume 29, Issue 3, March 1999, pp. 455-458

[7] Collins, F. G.; Sanjayan, J. G.: *Early age and workability of slag pastes activated by NaOH and Na_2CO_3,* Cement and Concrete Research, Volume 28, No. 5, 1998., pp. 655-664

[8] Toman, J.; Černy, R.: *Alkali activated slag as cement replacement in high temperature applications*, https://workshop.cvut.cz/2007/download.php?id=MTI009

[9] Melo Neto Antonio, A.; Alba Cincotto, M.; Repette, W.: *Drying and autogenous shrinkage of pastes and mortars with activated slag cement*, Cement and Concrete Research, Volume 38, Issue 4, April 2008, pp. 565-574

[10] Bakharev, T.; Sanjayan, J. G.; Cheng, Y. B.: *Sulfate attack on alkali-activated slag concrete,* Cement and Concrete Research, Volume 32, Issue 2, February 2002, pp. 211-216

[11] Rovnanik, P.; Frybotova, I.: *Effect of chamotte aggregate on the properties of alkali activated slag composite after high temperature treatment*, 3rd International Symposium “Non-Traditional Cement & Concrete“, Brno University of Technology, Brno, Czech, 2008., pp. 668-674

[12] Qasrawi, H.; Shalabi, F.; Asi I.: *Use of low CaO unprocessed steel slag in concrete as fine aggregate*, Construction and Building Materials, Volume 23, Issue 2, February 2009, pp 1118-1125

[13] Maslehuddin, M.; Sharif, A. M.; Shameem, M.; Ibrahim, M.; Barry, M. S.: *Comparison of properties of steel slag and crushed limestone aggregate concretes*, Construction and Building Materials, Volume 17, Issue 2, March 2003, pp 105-112

[14] Zelić, J.: *Properties of concrete pavements prepared with ferrochromium slag as concrete aggregate*, Cement and Concrete Research, Volume 35, Issue 12, December 2005, pp 2340-2349

[15] *Fire resistance and heat transmission properties of concrete and masonry made with blast furnace slag aggregate*, National Slag Association Report, www.nationalslag.org/archive/legacy/nsa_172-1_fire_properties_of_slag.pdf

[16] *New Standards on Recycled Aggregates and Molten-Slag in Japan*, www.jsce.or.jp/committee/concrete/e/newsletter/newsletter08/Recycled%20Aggregates%20and%20Molten-Slag.pdf

[17] Joost, M.: *The utilisation of steel slag in waterway construction*, 3rd European Slag Conference – Proceedings "Manufacturing and Processing of Iron and Steel Slags", Euroslag Publication , Keyworth, UK, 2002., pp. 107-117.

[18] Higgins, D. D.: *Soil stabilisation with ground granulated blastfurnace slag,* 3rd European Slag Conference – Proceedings "Manufacturing and Processing of Iron and Steel Slags", Euroslag Publication, Keyworth, UK, 2002., pp. 53-62.

[19] Jones, N.: *The use of steel slag aggregate for stone column ground stabilisation*, 4th European Slag Conference – Proceedings "Slags-Providing Solutions for Global Construction and other Markets", Euroslag Publication, Oulu, Finland, 2005., pp. 109-118.

[20] Dunster, A. M.: *Blast furnace slag and steel slag as aggregates: A review of their uses and applications in UK construction*, 3rd European Slag Conference – Proceedings "Manufacturing and Processing of Iron and Steel Slags", Euroslag Publication , Keyworth, UK, 2002., pp. 21-29.

[21] Emery, J.: *Steel slag utilization in asphalt mixes*, National Slag Association Report MF 186-1, www.nationalslag.org/archive/legacy/nsa_186-1_steel_slag_utilization_in_asphalt_mixes.pdf

[22] *Blast-furnace slag as an agricultural liming material and source of minor plant nutritients*, National Slag Association Report MF 185-5, www.nationalslag.org/archive/legacy/nsa_185-5_bf_slag_as_agricultural_liming_material.pdf

[23] Bowden, L. I.; Younger, P. L.; Robinson, H.; Ghazireh, N.; Johnson, K. L.: *The suistinable use of basic oxygen steel slag (BOS) to treat contaminated waters,* 4th European Slag Conference – Proceedings "Slags-Providing Solutions for Global Construction and other Markets", Euroslag Publication, Oulu, Finland, 2005., pp. 267-280.

[24] Gorai, B.; Jana, R. K.; *Premchand: Characteristics and utilisation of copper slag—a review*, Resources, Conservation and Recycling, Volume 39, November 2003, pp. 299-313

[25] Iron and steel slag, www.minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/iron_&_steel_slag/mcs-2008-fesla.pdf

[26] Shen, H.; Forssberg E.: *An overview of recovery of metals from slags*, Waste Management, Volume 23, Issue 10, 2003, pp 933-949

[27] Bernardo, G.; Marroccoli, M.; Nobili, M.; Telesca, A.; Valenti, G. L.: *The use of oil well-derived drilling waste and electric arc furnace slag as alternative raw materials in clinker production*, Resources, Conservation and Recycling, Volume 52, Issue 1, November 2007, pp 95-102

[28] Tsakiridis, P. E.; Papadimitriou, G. D.; Tsivilis, S.; Koroneos, C.: *Utilization of steel slag for Portland cement clinker production*, Journal of Hazardous Materials, Volume 152, Issue 2, 1 April 2008, pp 805-811

www.nationalslag.org/archive/legacy/nsa_172-1_fire_properties_of_slag.pdf

[29] *User Guidelines for Waste and By-Product Materials Use in Pavement*, http://www.tfhrc.gov/hnr20/recycle/waste/ssa2.htm

[30] *Steel slag utilization in asphalt mixes, National Slag Association Report*, http://www.nationalslag.org/archive/legacy/nsa_186-1_steel_slag_utilization_in_asphalt_mixes.pdf

[31] *Slag and its relation to the corrosion characteristics of ferrous metals*, National Slag Association Report NSA 172-13, www.nationalslag.org/archive/legacy/nsa_172-13_slag_and_corrosion.pdf

[32] Da Silveira, N. O.; E Silva, M. V. A. M., Agrizzi E. J., De Lana, M. F., De Mendonca, R. L.; *ACERITA – Steel slag with reduced expansion potential*, 4th European Slag Conference – Proceedings "Slags-Providing Solutions for Global Construction and other Markets", Euroslag Publication, Oulu, Finland, 2005., pp. 145-157.