

Primljen / Received: 23.1.2020.

Ispravljen / Corrected: 10.5.2020.

Prihvaćen / Accepted: 24.6.2020.

Dostupno online / Available online: 10.9.2021.

Primjena betona od recikliranog agregata tijekom izgradnje nove zgrade dnevne bolnice u Zadru

Autori:

Doc.dr.sc. **Ana Baričević**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Zagrebu

Građevinski fakultet

Zavod za materijale

ana.baricevic@grad.unizg.hr

Autor za korespondenciju

Mr.sc. **Dragan Kovač**, dipl.ing.građ.

CAPITAL ING d.o.o., Zagreb, Hrvatska

dragan.kovac@capitaling.hr**Katarina Didulica**, mag.ing.aedif.

Sveučilište u Zagrebu

Građevinski fakultet

Zavod za materijale

katarina.didulica@grad.unizg.hr

Stručni rad

Ana Baričević, Dragan Kovač, Katarina Didulica

Primjena betona od recikliranog agregata tijekom izgradnje nove zgrade dnevne bolnice u Zadru

U radu je prikazan pilot projekt primjene recikliranog agregata tijekom izgradnje nove zgrade dnevne bolnice OB Zadar. Projekt je uključivao rušenje postojeće bolnice i korištenje nastalog građevnog otpada kao recikliranog agregata u izgradnji dijela nove zgrade. Mehaničkom obradom nastalog otpada dobivena je frakcija 16/32 mm agregata te je on ispitivan u skladu s normama HRN EN 206 i HRN EN 12620. Pripremljene su četiri mješavine betona i provedena ispitivanja svojstava u svježem stanju (konzistencija, gustoća, količina pora) i očvrslulom stanju (tlačna čvrstoća, modul elastičnosti, kapilarno upijanje, vodonepropusnost, skupljanje uslijed sušenja). Ostvareni rezultati potvrđuju da se uzimanjem u obzir normi za reciklirani agregat te poznavanjem porijekla, za dane uvjete trajnosti može pripremiti beton svojstava istovrijednih običnom betonu.

Ključne riječi:

građevni otpad, rušenje, reciklirani agregat, beton s recikliranim agregatom

Professional Paper

Ana Baričević, Dragan Kovač, Katarina Didulica

Construction of a new day hospital in Zadar using recycled aggregate concrete

This paper presents the pilot project of application of recycled aggregate during construction of a new day hospital in Zadar. The project included the demolition of an existing hospital building and the use of generated construction waste as recycled aggregate in the construction of a part of the building. The 16/32 mm fraction of aggregate was obtained by mechanical processing of the generated waste which was then tested in accordance with the HRN EN 206 and HRN EN 12620 standards. Four concrete mixes were prepared, and the fresh (slump, density, air content) and hardened properties were tested (compressive strength, modulus of elasticity, capillary absorption, water permeability, drying shrinkage). The obtained results confirm that by complying with the standards for recycled aggregates and knowing their origin it is possible to produce concrete with properties equivalent to those of ordinary concrete for specified durability conditions.

Key words:

construction & demolition waste, demolition, recycled aggregate, recycled aggregate concrete

1. Uvod

Kvalitetno gospodarenje otpadom podrazumijeva smanjenje masovne proizvodnje novog otpada, pronalaženje načina za recikliranje i ponovnu upotrebu postojećeg otpada te na kraju sigurno i ekološki prihvatljivo odlaganje neupotrijebljenog otpada [1]. Prema Okvirnoj direktivi o otpadu, odnosno prema članku 55. Zakona o održivom gospodarenju otpadom [2], cilj je bio do 2020. godine povećati recikliranje, ponovnu uporabu i druge načine materijalne uporabe neopasnog građevnog otpada na minimalno 70 % mase otpada. Prema podacima Ministarstva zaštite okoliša i energetike, procijenjena količina građevnog otpada u Republici Hrvatskoj za 2018. godinu iznosila je 1 243 642 tone [3]. Budući da je 95 % građevnog otpada inertnog karaktera, što znači da ne podliježe fizikalnim, kemijskim ili biološkim promjenama, zabrinjavajuća je činjenica što je samo 58 % toga otpada reciklirano. Za utjehu ostaje činjenica da se bilježi porast od 16 % u odnosu na prethodnu godinu [3].

Građevni otpad smatra se posebnom kategorijom otpada, a prema Zakonu o održivom gospodarenju otpadom NN 94/13 [2], definira se kao otpad nastao prilikom gradnje građevina, rekonstrukcije, uklanjanja i održavanja postojećih građevina te otpad nastao od iskopanog materijala koji se ne može bez prethodne uporabe koristiti za građenje građevine zbog čijeg građenja je nastao. Prema Pravilniku o katalogu otpada (NN 90/15) [4], građevni otpad se označava ključnim brojem iz grupe 17, a podaci o proizvedenim i preuzetim količinama građevnog otpada vode se u Registru onečišćavanja okoliša. U svrhu sprečavanja nastanka otpada te primjene propisa i politike gospodarenja otpadom, primjenjuje se red prvenstva gospodarenja otpadom koji uključuje sljedeće:

- sprečavanje nastanka otpada
- pripremu za ponovnu uporabu
- recikliranje
- druge postupke uporabe, npr. energetska uporaba
- zbrinjavanje otpada.

Radi unapređenja stope recikliranja, Europska unija je 2016. godine izdala Protokol EU-a za gospodarenje građevnim otpadom i otpadom od rušenja [5]. U skladu s protokolom potrebno je provesti audit prije rušenja s ciljem identifikacije materijala koji se mogu uporabiti ili reciklirati i detekcije opasnog otpada. Ovim korakom identificiraju se vrste i količine otpada te se definira način postupanja s otpadom. Dalje je potrebno pripremiti plan gospodarenja otpadom kojim se opisuju postupci rušenja, metode odvajanja, vrste materijala, način skladištenja i prijevoza na odlagalište te metode obrade. Protokol uključuje i pitanja zaštite na radu, ali i utjecaja na okoliš, uključujući eventualna izlučivanja i prašinu. Rušenje treba biti selektivno uz odvajanje otpada, a glavne tokove otpada, uključujući i inertni građevni otpad treba tretirati odvojeno (npr. beton, opeku, zide, crijep i keramiku). Na taj način se omogućuje ponovna upotreba, no prethodno treba razmotriti sve dostupne načine demontaže, uključujući i tehnike kao što su skidanje (prije rušenja) i ispiranje

(nakon rušenja). To se posebno odnosi na: staklo, drvo, sanitarije, kotlove za centralno grijanje, bojlere, radijatore, prozorske okvire, lampe, čelične konstrukcije i obloge. Ostali materijali koji se trebaju uzeti u obzir za ponovnu uporabu ili recikliranje uključuju: gips, pjene za izolaciju, beton, mineralnu i staklenu vunu. Selektivno rušenje i odvajanje otpada omogućava daljnju uporabu i recikliranje samih materijala, ali dodatno ima cilj pročišćavanje glavnog toka otpada (tj. inertnog otpada namijenjenog za proizvodnju recikliranih agregata). Važno je poduzeti potrebne mjere kako bi se osiguralo da se opasni otpad koji može sadržavati azbest, katran, radioaktivni otpad, PCB, olovo, živu i sl., ne miješa s ostalim kategorijama otpada.

Tijekom odvajanja prikupljeni materijal se razdvaja na materijal za ponovnu uporabu, recikliranje, druge postupke uporabe i odlaganje. Ponovna uporaba obuhvaća svaki postupak kojim se omogućava ponovno korištenje proizvoda ili dijelova proizvoda koji nisu otpad, u istu svrhu za koju su izvorno načinjeni [5]. S druge strane, uporaba je svaki postupak čiji je glavni rezultat uporaba otpada u korisne svrhe kada otpad zamjenjuje druge materijale koje bi inače trebalo uporabiti za tu svrhu ili otpad koji se priprema kako bi ispunio tu svrhu u tvornici ili u širem gospodarskom smislu [5]. Razlikujemo materijalnu uporabu, što je zapravo recikliranje i uporaba u energetske svrhe. Prema definiciji, recikliranje je svaki postupak uporabe, uključujući ponovnu preradu organskog materijala, kojim se otpadni materijali prerađuju u proizvode, materijale ili tvari za izvornu ili drugu svrhu osim uporabe otpada u energetske svrhe, odnosno prerade u materijal koji se koristi kao gorivo ili materijal za zatrpavanje [5].

Važno je istaknuti da je kontrola upravljanja kvalitetom ključna u svim fazama; na gradilištu/ rušilištu, tijekom prijevoza otpada i u reciklažnim postrojenjima. Za sve faze važna je kvalitetna dokumentacija i primjena odgovarajućih postupaka koji mogu osigurati sljedivost. Stoga je cilj ovog rada prikazati prednosti i ograničenja upotrebe recikliranog agregata te dati konkretan slijed radnji od rušilišta do gradilišta, a s ciljem jednostavne replikacije provedenih postupaka i šire buduće primjene.

1.1. Razredba krupnog recikliranog agregata

Prirodni agregat se dobiva obradom materijala koji nalazimo u prirodi bez mijenjanja sastava te razlikujemo riječni i drobljeni agregat. Umjetni agregat dobivamo obradom materijala i mijenjanjem njegova sastava, a reciklirani agregat dobivamo drobljenjem materijala već korištenog u konstrukciji [6]. Uporaba otpada i ponovna upotreba kao zamjena dijela agregata za posljedicu ima smanjenje postojećih i novih količina otpada kao i značajno očuvanje okoliša zbog smanjene potrebe za eksploatacijom prirodnih resursa [1]. U Republici Hrvatskoj, reciklirani agregat podliježe primjeni normi HRN EN 206 [7] i HRN EN 12620 [8]. Razredba krupnog recikliranog agregata ključna je za definiranje njegove buduće primjene, a ovisno o porijeklu svrstava se u šest glavnih kategorija kako je prikazano u tablici 1.

Tablica 1. Razredba recikliranog agregata prema HRN EN 12620 [8]

Komponenta	Udio (% mase)	Razred
R_c - beton, betonski proizvodi, mort, betonski zidni blokovi	≥ 90	R_{c90}
	≥ 80	R_{c80}
	≥ 70	R_{c70}
	≥ 60	R_{c60}
	≥ 50	R_{c50}
	< 50	$R_{c,deklarirani}$
	Bez zahtjeva	R_{cuNR}
$R_c + R_u$ - nevezani agregat, prirodni kamen, hidraulički vezani agregat	≥ 95	R_{cu95}
	≥ 90	R_{cu90}
	≥ 70	R_{cu70}
	≥ 50	R_{cu50}
	< 50	$R_{cu,deklarirani}$
	Bez zahtjeva	R_{cuNR}
R_b - opečni elementi za zidanje, vapneno silikatni elementi za zidanje, aerirani beton	≤ 10	R_{b10}
	≤ 30	R_{b30}
	≤ 50	R_{b50}
	> 50	$R_{b,deklarirani}$
	Bez zahtjeva	R_{bNR}
R_a - bitumenski materijali	≤ 1	$R_{a(1-)}$
	≤ 5	$R_{a(5-)}$
	≤ 10	$R_{a(10-)}$
$X + R_g$ - staklo i drugi materijali	$\leq 0,5$	$XR_{g(0,5-)}$
	≤ 1	$XR_{g(1-)}$
	≤ 2	$XR_{g(2-)}$
FL - lebdeći materijal	$\leq 0,2^a$	$FL_{(0,2-)}$
	≤ 2	$FL_{(2-)}$
	≤ 5	$FL_{(5-)}$

Tablica 2. Maksimalan udio recikliranog agregata u sastavu betona ovisno tipu agregata i razredu okoliša [8]

Tip recikliranog agregata	Razred izloženosti			
	X0	XC1, XC2	XC3, XC4, XF1, XA1, XD1	Ostali
Tip A	50 %	30 %	30 %	0 %
Tip B	50 %	20 %	0 %	0 %

Tablica 3 Tablični prikaz ispitivanja recikliranog agregata u skladu s HRN EN 12620 [8]

Svojstvo	Tip	Kategorija
Udio sitnih čestica	A + B	Određeno deklariranjem
Indeks oblika	A + B	$\leq F_{I_{50}}$ ili $S_{I_{55}}$
Otpornost na abraziju	A + B	$\leq LA_{50}$ ili SZ_{32}
Suha gustoća	A	$\geq 2100 \text{ kg/m}^3$
	B	$\geq 2100 \text{ kg/m}^3$
Apsorpcija	A + B	Određeno deklariranjem
Komponente	A	$R_{c90}, R_{cu95}, R_{b(10-)}, R_{a(1-)}, FL_{(2-)}, XR_{g(1-)}$
	B	$R_{c50}, R_{cu70}, R_{b(30-)}, R_{a(5-)}, FL_{(2-)}, XR_{g(2-)}$
Udio u kiselini topivih sulfata	A + B	$AS_{0,2}$
Udio klorida topivih u kiselini	A + B	Određeno deklariranjem
Utjecaj sastavnih komponenti na vezivanje i očvršćivanje betona	A + B	$\leq A_{40}$

U klauzuli E, norma HRN EN 206 [7] daje osnovne smjernice za primjenu recikliranog betona kao krupnog agregata. Agregat se ispituje kao reciklirani ako je udio recikliranog agregata u odnosu na ukupni agregat minimalno 5 %. Nadalje, norma razlikuje tip A recikliranog agregata koji se koristi u maksimalnom udjelu od 50 % i čije je porijeklo poznato, dok se tip B ne smije koristiti za betone tlačne čvrstoće > C30/37. Maksimalni udio recikliranog agregata u sastavu beton određen tipom agregata i razredom okoliša prikazan je u tablici 2.

Preporuke za ispitivanje krupnog recikliranog agregata dane su u HRN EN 12620 [8] i uključuju ispitivanje osnovnih fizikalnih i kemijskih svojstava agregata u svrhu detekcije potencijalno opasnih tvari koje bi dugoročno mogle imati negativni utjecaj na svojstva betona. Svojstva i kriteriji koje reciklirani agregat treba zadovoljiti prikazani su u tablici 3.

1.2. Utjecaj recikliranog agregata na svojstva betona

Kako bi se dobio bolji uvid u ponašanje betona s recikliranim agregatom, napravljen je kratak pregled literature koja obuhvaća provedbu laboratorijskih ispitivanja mješavina s različitim udjelom recikliranog agregata u sastavu te teorijskih istraživanja. Tim pregledom literature utvrđeno je da je moguća zamjena i sitnog i krupnog agregata recikliranim u omjerima od 0 do 100 % [9-21]. Odstupanja u pojedinim rezultatima su moguća zbog različite razine čistoće upotrijebljenog agregata te različitih svojstava izvornog materijala.

Osnovna razlika između prirodnog i recikliranog agregata je izgled zrna. Za razliku od prirodnog zrna agregata, reciklirani se sastoji od različitog udjela izvornog agregata i izvorne cementne matrice te njihove veze, tzv. starog sučeljka. Takav sastav rezultira hrapavom strukturom i ostrim rubovima zrna. Zaostali udio morta razlikuje se od slučaja do slučaja, ali pregledom literature utvrđeno je da je količina zaostalog morta veća kod manjeg zrna recikliranog agregata u odnosu na veće zrno [16, 17]. Tako za frakciju: a) 16/32 mm udio morta iznosi od 25 do 35 %, b) 8/16 mm udio morta iznosi oko 40 %, c) 4/8 mm iznosi oko 60 % [17]. Količina zaostalog morta nadalje utječe na gustoću i apsorpciju recikliranog agregata. Gustoća recikliranog agregata je niža u odnosu na prirodni agregat [9, 10, 12, 14-16], a dobivena apsorpcija je veća [9, 10, 12, 14-16].

Agregat zauzima najveći dio volumena betona, ali je najčešće inertan materijal. Svojstva agregata koja utječu na svojstva betona su granulometrijski sastav, oblik i tekstura zrna, poroznost, gustoća, apsorpcija i vlažnost [6]. Svojstva agregata bitna su za svojstva betona u svježem stanju, ali i za otpornost na razna djelovanja te modul elastičnosti. Kako je vidljivo iz literature [9, 10, 12, 14-16], reciklirani agregat ima nešto lošija svojstva u odnosu na prirodni agregat, ali još uvijek postoji velika mogućnost njegova korištenja. Nedostaci kao što su veće upijanje i manja gustoća mogu se iskoristiti za unutarnje njegovanje [16, 20], ili je moguće korištenje dodatnih otpadnih materijala kojima se poboljšavaju svojstva mješavine kao što su leteći pepeo, zgura, silicijska prašina i leteći pepeo [9, 16]. Pažljivim projektiranjem

sastava i upotrebom kemijskih dodataka moguće je korištenje i u mješavinama samozbijajućeg betona [13].

Gustoća betona izravno je povezana s gustoćom njegovih komponenti te je očekivano gustoća betona s recikliranim agregatom niža u odnosu na obični beton [11, 14, 15, 16, 19, 21]. Kod zamjene 100 % krupnog agregata recikliranim ostvaruju se 5 % manje vrijednosti [14-16], a zamjenom 100 % sitnog agregata 4 % niže vrijednosti [14]; dok je zamjenom 100 % sveukupnog prirodnog agregata recikliranim smanjenje gustoće približno 10 % [15, 16]. Razlog tomu je manja gustoća recikliranog agregata, veća apsorpcija vode te veća poroznost [14, 16]. Ipak, pri zamjeni 50 % prirodnog agregata recikliranim dobivene su neznatne razlike u gustoći svježih mješavina [14, 16].

Pri ispitivanju mehaničkih svojstava mješavina velik utjecaj ima količina vode i vodocementni omjer. Prema [15, 16, 18], za postizanje iste konzistencije kao kod običnog betona potrebno je 5 % više vode kod upotrebe krupnog recikliranog agregata, odnosno 15 % više vode kod upotrebe sitnog recikliranog agregata. Razlog tomu je hrapavija struktura recikliranog agregata i prisutnost poroznog morta te veća apsorpcija recikliranog agregata u odnosu na prirodni agregat. Zahtjev za većim količinama vode moguće je regulirati upotrebom zasićenog površinski suhog recikliranog agregata ili upotrebom kemijskih dodataka [10, 12, 14, 16, 20].

Velik utjecaj svojstava agregata vidljiv je na vrijednostima tlačne, vlačne i čvrstoće na savijanje [14-17, 20]. Iz rada [16] proizlazi da je moguć brži prirast čvrstoće primjenom recikliranog agregata zbog prisutnosti nehidratiziranih čestica cementa na recikliranom agregatu te da je moguće povećanje ili smanjenje 28- dnevne vrijednosti tlačne čvrstoće pri zamjeni prirodnog agregata. Prema rezultatima dobivenim u [14], kod zamjene prirodnog agregata 100 % krupnim ili sitnim recikliranim agregatom smanjenje je prosječno 30 %, a kod zamjene 50 % krupnim ili sitnim agregatom smanjenje je do 20 %. Sitni agregat ima manje negativan utjecaj u odnosu na krupni reciklirani agregat. Kod 30 % zamjene krupnog prirodnog agregata recikliranim, smanjenje tlačne čvrstoće je 15 – 17 %, dok je za isti postotak sitnog agregata vrijednost 10 % manja. Unatoč smanjenim vrijednostima tlačne čvrstoće u odnosu na obični beton s prirodnim agregatom, potrebno je naglasiti da je upotrebom recikliranog agregata moguće postići razred tlačne čvrstoće C25/30 [15], C30/37 [20] te vrijednosti 40 MPa i 60 MPa [10].

Rezultati vlačne i čvrstoće na savijanje prate trend tlačne čvrstoće [9, 10, 15, 16, 20]. Vrijednosti vlačne čvrstoće su niže do 10 % upotrebom samo krupnog recikliranog agregata, dok su vrijednosti niže 10 – 20 % kod sveukupne zamjene prirodnog agregata recikliranim.

Modul elastičnosti betona pod velikim je utjecajem agregata te je očekivano smanjenje vrijednosti proporcionalno s povećanjem zamjene recikliranim agregatom [10, 16-18]. Vrijednosti modula elastičnosti su manje u prosjeku 20 % kod djelomične zamjene, dok su zamjenom 100 % agregata recikliranim vrijednosti manje i 60 % [17].

Svojstva trajnosti također slijede prethodno opisani trend. Podaci dostupni u literaturi upućuju na povećanu poroznost recikliranog

agregata koja umanjuje kvalitetu veze između cementne paste agregata u zoni sučeljka te postojanje starog sučeljka [18]. Dok je u radu [18] dobiveno smanjenje propusnosti za sve vrste recikliranog krupnog agregata, u radovima [15-17] dobivena je povećana propusnost. Najlošiji rezultati pri ispitivanju kapilarnog upijanja dobiveni su potpunom zamjenom agregata recikliranim, dok je zamjenom 25 % krupnim recikliranim agregatom dobivena vrijednost približno jednaka betonu s prirodnim agregatom [15]. Iz svega navedenog, potrebno je očekivati određeno smanjenje svojstava prilikom upotrebe recikliranog agregata od betona u odnosu na beton s prirodnim agregatom, no upotreba je svakako moguća. Ključ postizanja zahtijevanih svojstava je u planiranju i pripremi materijala te osiguranoj kontroli kvalitete.

2. Pilot projekt "Projektiranje i primjena betona od recikliranog agregata"

Pregledom uvjeta natječaja za financiranje projekta izgradnje novog objekta Dnevne bolnice u Zadru, uočeni su kriteriji koji bi investitoru dali veći broj bodova ako bi u provedbi projekta primijenio procese vezane uz ponovnu uporabu (reciklažu) građevinskih materijala. Iz navedenih razloga, u sklopu glavnog projekta predviđen je pilot projekt "Projektiranje i primjena betona od recikliranog agregata". Pilot projekt je omogućio usklađivanje

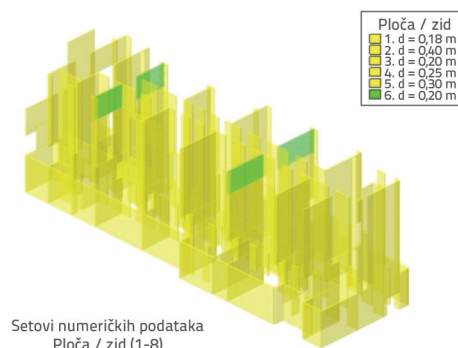
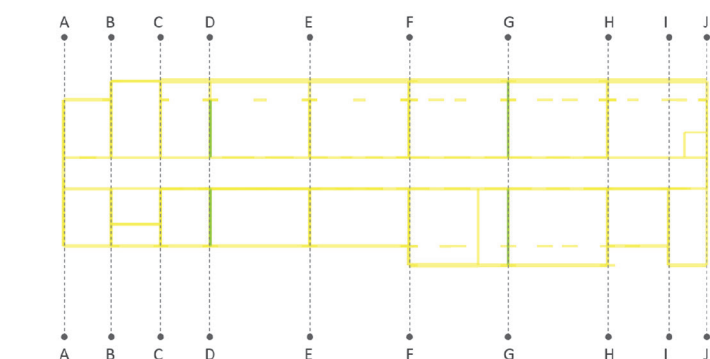
sa Zakonom o gradnji i zajamčio ponovnu uporabu materijala nakon uklanjanja građevine te izgradnju nove, primjenom okolišu prihvatljivih sirovina i sekundarnih materijala, sve u skladu sa 7. temeljnim zahtjevom za građevine [22].

Glavnim projektom predviđeno je da se na mjestu nove građevine uklanja postojeća građevina (slika 1), koja predstavlja izvor sirovine za izradu betona s recikliranim agregatom i da se dio nove armiranobetonske konstrukcije gradi primjenom betona od recikliranog agregata (BRA). Projektom je predviđeno betonom od recikliranog agregata izvesti unutarnje armiranobetonske zidove trećega kata, u osima D i G kako je prikazano na slici 2. Utvrđeno je da se takvi zidovi nalaze u razredu izloženosti XC1 te se za tu namjenu propisuje isključivo zadovoljenje osnovnog svojstva betona – tlačna čvrstoća. Proračunom konstrukcije utvrđen je minimalni razred tlačne čvrstoće betona C20/25, kojim se izvode predmetni zidovi, a čime se zadovoljava uvjet tlačne čvrstoće i zahtjevi HRN EN 1998-1 [23], za klasu duktilnosti DCM.

Glavnim projektom su dani zahtjevi za komponente, posebno za agregat, zahtjevi za sastav betona, definirana su ispitivanja agregata i svojstava betona u svježem i očvrnulom stanju kojima se potvrđuje usklađenost betona s recikliranim agregatom i postavljenih kriterija. Dan je hodogram aktivnosti s rokovima provedbe te su troškovnikom predviđeni svi radovi vezani za provedbu opisanog pilot-projekta, a koje je ugovoreni



Slika 1. Stara zgrada infektologije OB Zadar predviđena za rušenje



Slika 2. Tlocrt trećeg kata i 3D model konstrukcije s oznakama zidova koji se izvode betonom s recikliranim agregatom



Slika 3. Otpad od rušenja postojeće građevine



Slika 4. Separirani reciklirani agregat na privremenom deponiju

izvođač trebao izvesti na rušenju i građenju nove građevine (rušenje, odvajanje otpada, odvoz, odvajanje armature, drobljenje, frakcioniranje, projektiranje sastava, ispitivanje i ugradnja). Sve aktivnosti pilot-projekta: priprema, provedba i praćenje, propisane su glavnim projektom te je na osnovi toga ishodena kontrola projekta i dobivena građevinska dozvola.

3. Materijali i metode

Za pripremu betona korišten je cement CEM II/B-M(S-LL) 42,5 N, proizvođač Cemex d.o.o., drobljeni agregat iz pogona KOSMALJ-Zapužane (0/4 mm, 8/16 mm), krupni reciklirani agregat (16/32 mm), superplastifikator ISOFLOW 8501, proizvođač Cemex d.o.o. i vodovodna voda.

3.1. Reciklirani agregat

Za proizvodnju recikliranog agregata koristio se beton nadvoja greda, horizontalnih serklaža i temelja. Radilo se većim dijelom o nearmiranom betonu niže tlačne čvrstoće ($\leq C20/25$). Projektom rušenja postojeće građevine predviđeno je selektivno rušenje uz odvajanje različitih vrsta otpadnih materijala. To je uključivalo rušenje elemenata građevine u pravilnom redoslijedu, počevši od uklanjanja obrtničkih elemenata (oprema, stolarija, stropovi, obloge itd.), potom građevnih sekundarnih ili nenosivih elemenata (sekundarne konstrukcije, zidane ispune, pregrade, svi slojevi podova i stropova do konstrukcije). Na ovaj način su uklonjeni svi elementi koji nisu dio nosive konstrukcije čime je olakšano

uklanjanje i sortiranje srušenih elemenata konstrukcije, slika 3. Tako pripremljeni materijal je potom mehaničkim drobljenjem usitnjen do tražene veličine te primjenom sita različite veličine separiran u frakciju 16/32 mm, slika 4.

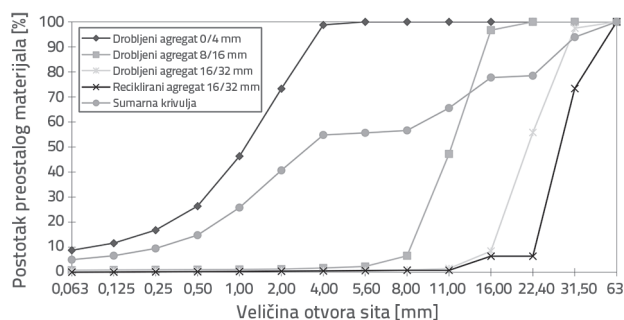
Glavnim projektom su predviđena detaljna ispitivanja krupnog recikliranog agregata (tablica 4.), a svojstva prirodnog (drobljenog) agregata potrebna za provedbu projektiranja betona preuzeta su od proizvođača. Rezultati provedenih ispitivanja krupnog recikliranog agregata, tablica 4, pokazuju da su sve ostvarene vrijednosti u skladu s kriterijima postavljenim u normi HRN EN 12620 [8]. Navedeno potvrđuje da se reciklirani agregat proizveden rušenjem postojeće zgrade Opće bolnice Zadar, može upotrijebiti za izgradnju nove građevine.

Gustoća drobljenog agregata u zasićenom površinski suhom stanju iznosi $2,67 \text{ kg/dm}^3$, dok je ista vrijednost za reciklirani agregat $2,48 \text{ kg/m}^3$. Manja gustoća recikliranog agregata posljedica je prisutnosti morta i ostalih nečistoća na površini recikliranog agregata. Reciklirani agregat se može deklarirati kao R_{c90} (tablica 1), tip A (tablica 2.), iz čega slijedi da se za razred okoliša XC1 može upotrijebiti u maksimalnom udjelu do 30 %.

Rezultati ispitivanja granulometrijskog sastava drobljenog agregata (0/4 mm, 8/16 mm, 16/32 mm) i recikliranog agregata (16/32 mm) prikazani su na slici 5. Iz grafičkog prikaza rezultata ispitivanja granulometrijskog sastava vidljivo je da nema velikih odstupanja krivulje recikliranog agregata u odnosu na drobljeni agregat. Frakcija drobljenog agregata 16/32 mm se u potpunosti zamijenila s recikliranim agregatom iste frakcije. U ukupnom volumenu agregata to znači da je udio recikliranog agregata 22 %.

Tablica 4. Rezultati ispitivanja fizikalnih i kemijskih svojstava krupnog recikliranog agregata u skladu s HRN EN 12620 [8]

Svojstvo	Norma	Rezultat	Kriterij za prihvaćanje	Kriterij zadovoljen	
Granulometrijski sastav	HRN EN 933-1 [24]	Slika 5.	Određeno deklariranjem	Nije primjenjivo	
Udio sitnih čestica	HRN EN 933-1 [24]	1,6 g	Određeno deklariranjem	Nije primjenjivo	
Indeks oblika	HRN EN 933-1 [24]	4 %	F_{15}	$\leq F_{15}$	DA
Otpornost na abraziju	HRN EN 1097-2 [25]	34	LA_{35}	$\leq LA_{50}$ ili SZ_{32}	DA
Suha gustoća	HRN EN 1097-6 [26]	2380 kg/m ³		≥ 2100 kg/m ³	DA
Upijanje vode	HRN EN 1097-6 [26]	3,75 %		Određeno deklariranjem	Nije primjenjivo
Udio sulfata topivih u kiselini	HRN EN 1744-1 [27]	0,2 %	$AS_{0,2}$	$AS_{0,2}$	DA
Udio klorida topivih u vodi	HRN EN 1744-1 [27]	0,001 %		Određeno deklariranjem	Nije primjenjivo



Slika 5. Grafički prikaz rezultata ispitivanja granulometrijskog sastava drobljenog i recikliranog agregata

3.2. Metode ispitivanja

Program ispitivanja svježeg i očvrstnalog betona s recikliranim agregatom podijeljen je u dvije faze: a) izrada probnih mješavina i b) gradnja zidova. Probne mješavine izrađene su u laboratoriju Zavoda za materijale Građevnog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu i betonari tvrtke Cemex d.o.o. u Zadru. Nakon dostizanja zahtijevane 28-dnevne tlačne čvrstoće probnih mješavina izrađenih na betonari, pristupilo se gradnji zidova trećeg kata novog objekta Opće bolnice Zadar primjenom betona istog sastava.

U svim fazama provedena su ispitivanja svojstava svježeg betona, dok su u očvrstnulom stanju provedena ispitivanja tlačne čvrstoće pri starosti od 2, 7 i 28 dana. Iznimno, zbog zahtjeva

izvođača radova za brzim nastavkom građenja, tlačna čvrstoća za probnu mješavinu BRA1 (izrađenu u laboratoriju) ispitana je isključivo pri starosti od 2 i 7 dana. Primjenom teorijskih funkcija predviđanja porasta vrijednosti tlačne čvrstoće [36], a na temelju rezultata tlačne čvrstoće betona u laboratorijskim uvjetima 2. i 7. dan starosti zaključeno je da bi očekivana vrijednost tlačne čvrstoće 28. dan bila u skladu sa zahtjevima projekta te se odmah pristupilo izradi probne mješavine na betonari. Dodatno su tijekom druge faze provedena ispitivanja modula elastičnosti, kapilarnog upijanja, vodonepropusnosti i skupljanja uslijed sušenja. U tablici 5. su prikazane norme za ispitivanja i dimenzije uzoraka. Sva ispitivanja provedena su na tri uzorka.

3.3. Projektiranje sastava betona i izrada uzoraka

Sastav betona prikazan je u tablici 6. Pripremljene su ukupno četiri mješavine: a) probna mješavina BRA1 u laboratoriju, b) probna mješavina BRA2 na betonari, c) mješavina BRA3 korištena u gradnji zidova, d) mješavina običnog betona OB kao referentna mješavina pripremljena na betonari. Sve mješavine pripremljene su s istim sastavom betona prikazanim u tablici 6. Jedina razlika je što mješavine oznake BRA umjesto frakcije 16/32 mm drobljenog agregata sadrže reciklirani agregat.

Način miješanja i priprema uzoraka razlikovao se u laboratorijskim uvjetima i na betonari. U laboratorijskim uvjetima u miješalicu se najprije stavio sav agregat i pola izračunane količine vode, slika 6. Nakon dvije minute

Tablica 5. Metode ispitivanja svojstava betona u svježem i očvrstnulom stanju

Ispitivanje	Norma	Dimenzije uzoraka
Konzistencija slijeganjem	HRN EN 12350 – 2:2009 [28]	-
Ispitivanje gustoće betona	HRN EN 12350 – 6:2009 [29]	-
Ispitivanje udjela pora	HRN EN 12350 – 7:2009 [30]	-
Tlačna čvrstoća	HRN EN 12390 – 3:2009 [31]	150 x 150 x 150 mm
Modul elastičnosti	HRN EN 12390 – 13:2013 [32]	d/h = 10 x 200 mm
Vodonepropusnost	HRN EN 12390 – 8:2019 [33]	150 x 150 x 150 mm
Kapilarno upijanje	HRN EN 13057:2003 [34]	d/h = 10 x 50 mm
Skupljanje uslijed sušenja	HRN EN 12390 – 16:2019 [35]	100 x 100 x 400 mm

Tablica 6. Sastav betona

Komponente	Cement [kg]	Voda [l]	Superplastifikator (0,36 % m _c , l)	Agregat [kg]		
				0/4 mm	8/16 mm	16/32 mm
	320	180	1,15	1029	412	398



Slika 6. Priprema betona s recikliranim agregatom u laboratoriju: a) agregat, b) ispitivanje konzistencije slijeganjem, c) ispitivanje udjela pora, d) uzorci za ispitivanje tlačne čvrstoće



Slika 7. Priprema svježeg betona s recikliranim agregatom: a) svježi beton, b) uzorkovanje, c) ispitivanje udjela pora, d) određivanje gustoće

miješanja, da se osigura upijanje vode u agregat, napravljena je dvominutna stanica te su dodani preostali sastojci. Nakon toga je nastavljeno miješanje uz dodavanje superplastifikatora. Beton se ugrađivao u kalupe uz vibriranje na vibracijskom stolu. Uzorci su nakon 24 sata izvađeni iz kalupa i čuvani do starosti od 7 dana u vlažnoj komori gdje je temperatura $20 \pm 2^\circ\text{C}$ i relativna vlažnost 95 %.

Na betonari su svi sastojci dozirani automatski, osim recikliranog agregata i superplastifikatora. Sastojci su dodani istovremeno, nakon čega je nastavljeno miješanje u trajanju od 2 minute. Nakon pripreme, beton je utovarivačem dostavljen ispred terenskog laboratorija gdje je provedeno uzorkovanje i ugradnja betona u kalupe uz vibriranje na vibracijskom stolu, slika 7.

4. Rezultati i diskusija

4.1. Prva faza - probne mješavine

Tijekom prve faze provedena je izrada betonskih mješavina s recikliranim krupnim agregatom, najprije u laboratoriju Zavoda za materijale Građevnog fakulteta u Zagrebu te potom na betonari. Veća dopuštena odstupanja uređaja za automatsko doziranje sastojaka na betonari utjecali su na povećani udio frakcije 0/4 mm drobljenog agregata u iznosu od 4,3 % u odnosu na laboratorijsku mješavinu. Ostali sastojci dozirani su u skladu s projektiranim sastavom betona. Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 7. Za mješavinu BRA2 pripremljenu na betonari, vrijednost konzistencije slijeganjem 6 % je veća u odnosu na

Tablica 7. Rezultati ispitivanja svojstava betona s recikliranim agregatom u laboratoriju i na betonari

Svojstvo		1. faza – probne mješavine		2. faza – gradnja zidova	
		BRA1 laboratorij	BRA2 betonara	BRA3 betonara	OB betonara
Konzistencija slijeganjem [mm]		160	170	170	170
Udio pora [%]		2,5	1,9	2,5	2,4
Gustoća [g/cm ³]		2355	2337	2290	2363
Temperatura [°C]		25,4	29,3	20,2	20,4
Tlačna čvrstoća [MPa]	2. dan starosti	25,28 ± 0,52	19,87 ± 0,46	11,63 ± 0,46	14,77 ± 0,58
	7. dan starosti	33,75 ± 0,88	27,63 ± 0,81	22,59 ± 1,45	22,85 ± 0,71
	28. dan starosti	-	32,54 ± 0,11	30,09 ± 0,10	30,62 ± 0,43
Modul elastičnosti [GPa]		-	-	28,82 ± 1,9	30,80 ± 3,8
Dubina prodora vode [mm]		-	-	45 ± 8	44 ± 7

istu vrijednost za mješavinu BRA1 pripremljenu u laboratoriju. Međutim, obje mješavine ubrajaju se u razred konzistencije slijeganjem S4 (160 - 210 mm).

Udio zraka svježeg betona niži je 24 % za mješavinu BRA2 pripremljenu na betonari u odnosu na mješavinu BRA1. Niži udio zraka može biti posljedica većeg udjela sitnih čestica u mješavini zbog načina doziranja agregata, ali i kraćeg vremena miješanja na betonari, jer je udio zahvaćenog zraka u korelaciji s vremenom miješanja. Takvo ponašanje u skladu je s pretpostavkama iz literature [18, 21]. Temperatura svježeg betona ovisi o uvjetima okoliša u trenutku betoniranja. U laboratoriju su uvjeti kontrolirani i materijal je 24 sata prije miješanja čuvan na temperaturi od 20°C. S druge strane, na dan miješanja mješavine BRA2 temperatura u Zadru dosegla je 34°C. Porast vanjske temperature odrazio se na temperaturu sastavnih komponenti i svježeg betona, ali je i dalje bila u granicama predviđenim normom HRN EN 13670 [37]. Gustoća svježeg betona niža je 1 % za mješavinu BRA2 u odnosu na mješavinu BRA1, pa se ostvarena minimalna razlika može zanemariti. Vrijednosti tlačne čvrstoće za mješavinu BRA2 pri starosti 2 i 7 dana prosječno su niže 21 % i 18 % u odnosu na vrijednosti tlačne čvrstoće mješavine BRA1 pripremljene u laboratoriju, tablica 7. Treba istaknuti da su ovakvi rezultati djelomično očekivani zbog drugačijih uvjeta u laboratoriju i na betonari te je stoga preporuka uvijek izraditi probne mješavine i na betonari.

Tablica 8. Ocjena stalnosti tlačne čvrstoće mješavine BRA2 u skladu s HRN EN 206 [7]

Rezultati ispitivanja		Kriterij za C20/25	
f_{ci}	32,42 MPa	21 MPa	DA
f_{cm}	32,54 ± 0,11 MPa	29 MPa	DA
Ukupna ocjena		DA	

Pri starosti od 28 dana određena je tlačna čvrstoća samo za mješavinu BRA2 pripremljenu na betonari. Ta je mješavina

korištena za ocjenu stalnosti tlačne čvrstoće za početno ispitivanje tipa betona u skladu s HRN EN 206 [7], tablica 8. Na temelju provedenih ispitivanja može se zaključiti da se projektirani sastav betona s recikliranim agregatom, prikazan u tablici 6, može deklarirati kao C20/25 čime se potvrđuje da je u skladu s uvjetima danim u glavnom projektu konstrukcije.

4.2. Druga faza - ugradnja betona s recikliranim krupnim agregatom u zidove

U ovoj fazi korištena je mješavina s recikliranim krupnim agregatom čija je usklađenost s glavnim projektom potvrđena tijekom prethodnih faza. Dodatno, pripremljena je referentna mješavina običnog betona (OB) kako bi se ocijenio doprinos krupnog recikliranog agregata na svojstva betona. Uzorci su uzorkovani tijekom gradnje zidova trećega kata dnevne bolnice Zadar, slika 8. Prije isporuke betona s recikliranim agregatom na gradilište, iz miješalice je uzet beton za ispitivanje svojstva u svježem stanju i pripremu uzoraka za ispitivanje svojstava u očvrslom stanju. Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 7.



Slika 8. Ugradnja betona s recikliranim agregatom u zidove trećega kata dnevne bolnice Zadar

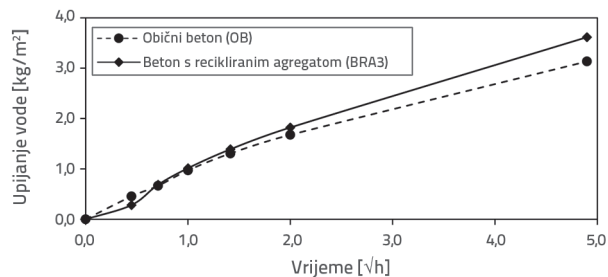
Općenito, primjena recikliranog agregata doprinosi smanjenoj vrijednosti gustoće betona kao posljedica niže gustoće recikliranog agregata u odnosu na prirodni agregat [11, 14, 15,

19, 21]. Usporedbom svojstava utvrđena je 3 % niža gustoća svježeg betona oznake BRA3 u odnosu na referentnu mješavinu oznake OB, a što se može povezati s inicijalno nižom gustoćom recikliranog agregata. Prosječno smanjenje gustoće za beton sa 100 % recikliranim krupnim agregatom iznosi 5 %, a promjena gustoće zanemariva je kod zamjene do 50 % krupnog agregata recikliranim [14-16, 19, 21].

Obradivost betona se, suprotno tomu, povećava ako se za izradu koristi reciklirani agregat u zasićenom površinski suhom stanju. Treba ipak napomenuti da primjena recikliranog agregata u ovom stanju vlažnosti nije prikladna za uobičajenu proizvodnju betona, pa možemo govoriti o nižoj obradivosti betona s recikliranim agregatom kao posljedicom njegovog većeg upijanja. Prema [15], za postizanje iste konzistencije kao kod običnog betona potrebno je 5 % više vode tijekom upotrebe krupnog recikliranog agregata, odnosno 15 % više vode tijekom upotrebe sitnog recikliranog agregata. U ovom slučaju za postizanje istog razreda konzistencije kod mješavina s recikliranim agregatom bilo je potrebno povećati udio superplastifikatora za 0,07 % na masu cementa (m_c) u odnosu na mješavinu s drobljenim agregatom. To je direktno povezano s udjelom morta u recikliranom agregatu, odnosno udjelom novog i starog sučeljka.

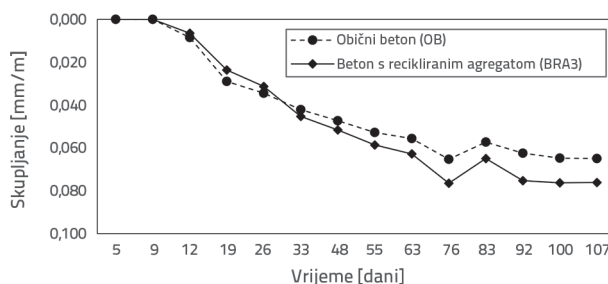
Vrijednosti tlačne čvrstoće betona s recikliranim krupnim agregatom (BRA3) pri starosti 2,7 i 28 dana prosječno su niže 21 %, 1 % i 2 % u odnosu na vrijednosti tlačne čvrstoće običnog betona (OB). Iako je kod betona s recikliranim agregatom ostvaren sporiji prirast tlačne čvrstoće, vrijednosti tlačne čvrstoće 28. dan starosti mogu se smatrati jednakima, tablica 7. Slično ponašanje je zabilježeno tijekom ispitivanja modula elastičnosti betona, gdje je vrijednost modula elastičnosti prosječno 6 % niža za beton s recikliranim materijalom u odnosu na obični beton. Modul elastičnosti ovisan je o tlačnoj čvrstoći, volumnom udjelu agregata i modulu elastičnosti agregata. Smanjenjem vrijednosti tlačne čvrstoće te manjom krutosti i gustoćom agregata očekivano je smanjenje vrijednosti modula elastičnosti [10, 12, 16-18]. Istraživanja pokazuju da kod 30 % zamjene agregata recikliranim vrijednosti modula elastičnosti približno su 15 % niže u odnosu na referentnu mješavinu [17].

Rezultati ispitivanja svojstava trajnosti upućuju na veću propusnost, odnosno veće upijanje betona s recikliranim agregatom u odnosu na obični beton, slika 9. Utvrđeno je povećanje od 15 % upijene vode nakon 24 sata za mješavinu BRA3 u odnosu na mješavinu OB. Dosadašnja istraživanja pokazuju da povećana poroznost recikliranog krupnog agregata može umanjiti kvalitetu veze između cementne paste i agregata u području zone sučeljka i na taj način dovesti do povećane propusnosti betona [18]. Međutim, dobivene vrijednosti ovisit će i o v/c omjeru. Primjerice rezultati ostvareni u istraživanjima [15-17] upućuju na povećanu propusnost, dok je ona smanjena za sve vrste recikliranog agregata u odnosu na beton s prirodnim agregatom u radu [18]. Treba također istaknuti kako je ispitivanjem vodonepropusnosti utvrđeno da mješavine BRA3 i OB pripadaju istom razredu vodonepropusnosti VDP3, tablica 7.



Slika 9. Grafički prikaz ispitivanja kapilarnog upijanja na običnom i betonu s recikliranim agregatom

Na slici 10. dan je grafički prikaz rezultata srednje vrijednosti provedenog ispitivanja skupljanja tijekom 90 dana. Iz grafičkog prikaza su vidljive neznatno veće volumne promjene betona s recikliranim agregatom (BRA3) u odnosu na obični beton (OB). Nakon 107 dana mjerenja, skupljanje uslijed sušenja je 17 % veće u odnosu na referentnu mješavinu OB. Povećano skupljanje posljedica je prisutnosti morta na recikliranom agregatu, a posljedično i povećanog upijanja vode. Ovaj rezultat upućuje na veće skupljanje mješavine BRA3 u odnosu na podatke iz literature. Oni pokazuju da se porast vrijednosti skupljanja u iznosu od 15 do 40 % bilježi kod 100-postotne zamjene krupnog prirodnog agregata recikliranim, a zamjenom 30 % krupnog prirodnog agregata, vrijednosti skupljanja običnog betona i betona s recikliranim agregatom ostaju slične [17].



Slika 10. Grafički prikaz rezultata ispitivanja skupljanja uslijed sušenja običnog i betona s recikliranim agregatom

5. Zaključak

Studija slučaja prikazana u ovom radu pozitivan je primjer implementacije svih temeljnih zahtjeva za građevinu u glavni projekt, kako zahtjeva mehaničke otpornosti i stabilnosti tako i zahtjeva kojima se osigurava održiva uporaba prirodnih resursa. Napredak društva prati kontinuirani razvoj građevnog sektora koji već godinama uspješnim primjerima pokazuje pozitivne strane implementacije građevnog otpada u proizvode nove vrijednosti.

U pogledu svojstava betona s recikliranim agregatom, a u usporedbi s referentnom mješavinom običnog betona s drobljenim agregatom, dobiveni su sljedeći rezultati:

- smanjena je obradivost svježije mješavine zbog većeg upijanja recikliranog agregata u odnosu na drobljeni

- smanjena je vrijednost gustoće betona 3 % što je u izravnoj vezi sa smanjenom gustoćom recikliranog agregata u odnosu na drobljeni
- iako je prisutan sporiji prirast tlačne čvrstoće na uzorcima betona s recikliranim agregatom, 28-dnevne vrijednosti se razlikuju tek za 2 %
- modul elastičnosti na uzorcima betona s recikliranim agregatom je prosječno 6 % niži u odnosu na beton s drobljenim agregatom
- ispitivanjem skupljanja uslijed sušenja, nakon 107 dana dobivene su 17 % veće vrijednosti u odnosu na beton s drobljenim agregatom
- svojstva trajnosti su smanjena, odnosno ostvareno je do 15 % veće kapilarno upijanje vode na uzorcima betona s recikliranim agregatom u odnosu na drobljeni, ali treba naglasiti da obje vrste betona pripadaju razredu vodonepropusnost VDP3.

Višestruke prednosti ovog pristupa u pogledu održivosti ne treba puno objašnjavati:

- smanjena potrošnja prirodnih resursa
- smanjene potrebe za odlaganjem
- ponovna upotreba na mjestu nastanka otpada.

Prikazano istraživanje primjene recikliranog materijala u betonskim mješavinama te uporaba betona od recikliranog agregata u izgradnji novih građevina može poslužiti kod obnove zgrada oštećenih u potresu 2020. godine. U radu [38] je detaljno prikazan broj oštećenih građevina te razine oštećenja iz čega je vidljiva buduća potreba za velikom količinom građevnog materijala. Upravo građevni otpad koji nastaje rušenjem oštećenih građevina ili njihovih dijelova može biti odgovor na značajne potrebe za osnovnim komponentama u proizvodnji betona, ali i smanjiti pritisak na i onako pretrpana odlagališta otpada.

Osim primjene recikliranog materijala, treba promišljati i o primjeni brojnih vrsta nusproizvoda i otpadnih materijala koji

se mogu koristiti za razvoj različitih vrsta alternativnih veziva u betonu sukladno [39].

Sve navedeno pridonosi razvoju društva koje će osigurati nasljeđe generacijama koje dolaze, društva koje će se znati nositi s golemim količinama otpada nastalim u potresima koji su opustošili Hrvatsku u protekloj godini. Zato je studija slučaja prikazana u ovom radu iznimno važna, prije svega jer pokazuje da se jednostavnim metodama ispitivanja i kontrole kvalitete može osigurati primjena nastalog građevnog otpada.

Ispitivanja provedena u sklopu pilot-projekta "Projektiranje i primjena betona od recikliranog agregata" tijekom gradnje nove zgrade Dnevne bolnice Zadar potvrđuju da je uzimajući u obzir aktualne norme i propise za reciklirani agregat te poznavanjem njegova porijekla moguće takav agregat koristiti za pripremu betona čija su svojstva istovrijedna običnom betonu. Na temelju provedenih ispitivanja možemo zaključiti da je za zadane uvjete trajnosti upotreba recikliranog betona kao zamijene dijela agregata opravdana s ekološkog, ekonomskog i uporabnog stajališta. Ipak treba istaknuti da postoji značajna razlika između vrijednosti svojstava određenih na uzorcima pripremljenim u laboratoriju i na betonari, posebno kada je beton uzorkovan tijekom gradnje. To upućuje na važnost kontrole kvalitete svih komponenti, ali i konačnog proizvoda, a sve s ciljem otklanjanja potencijalnih nesukladnosti.

Zahvala

Istraživanje prikazano u ovom radu provedeno je u sklopu projekta naziva "Izgradnja i opremanje dnevnih bolnica Odjela za pulmologiju, onkologiju, infektologiju i dermatologiju Opće bolnice Zadar". Taj se projekt financirao iz fondova Europske unije u okviru Operativnog programa "Konkurentnost i kohezija 2014. – 2020." Autori posebno žele zahvaliti tvrtki Cemex d.o.o. na ustupljenim resursima tijekom provedbe pilot-projekta.

LITERATURA

- [1] Bjegović, D., Serdar, M., Rukavina, M.J., Baričević, A.: Istraživanja kriterija održivosti armiranog betona, GRAĐEVINAR, 62 (2010) 10, pp. 931-940
- [2] Zakon o održivom gospodarenju otpadom, NN 94/13 (98/19), Narodne novine, 2019.
- [3] Kufirin, J.: Pregled podataka o gospodarenju građevnim otpadom u 2018. godini, Ministarstvo zaštite okoliša i energetike, Zavod za zaštitu okoliša i prirode, 2019.
- [4] Pravilnik o katalogu otpada, NN 90/15, Narodne novine, 2015.
- [5] Vermeulen, J.: Protokol EU-a za gospodarenje građevnim otpadom i otpadom od rušenja, Europska Komisija, 2016.
- [6] Bjegović, D., Štirmer, N.: Teorija i tehnologija betona, Građevni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2015.
- [7] Hrvatski zavod za norme: Beton - Specifikacija, svojstva, proizvodnja i sukladnost; HRN EN 206:2016m, (EN 206:2013+A1:2016)
- [8] Hrvatski zavod za norme: Agregati za beton; HRN EN 12620:2008, (EN 12620:2002+A1:2008)
- [9] Damdelen, O.: Investigation of 30% recycled coarse aggregate content in sustainable concrete mixes, Construction Building Materials, 184 (2018), pp. 408-418, doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.06.149.
- [10] Butler, L., West, J.S., Tighe, S.L.: Effect of recycled concrete coarse aggregate from multiple sources on the hardened properties of concrete with equivalent compressive strength, Construction Building Materials, 47 (2013), pp. 1292-1301, doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.05.074.

- [11] Rashid, K., Rehman, M.U., De Brito, J., Ghafoor, H.: Multi-criteria optimization of recycled aggregate concrete mixes, *Journal of Cleaner Production*, (2020), pp. 276, doi:10.1016/j.jclepro.2020.124316.
- [12] Tahar, Z., El Abidine, T.T., Kadri, E.H., Bouvet, A., Debieb, F., Aggoun, S.: Effect of cement and admixture on the utilization of recycled aggregates in concrete, *Construction Building Materials*, 149 (2017), pp. 91–102, doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.04.152.
- [13] Larsen, O., Naruts, V., Aleksandrova, O.: Self-compacting concrete with recycled aggregates, *Materials Today: Proceedings*, 19 (2019), pp. 2023–2026, doi:10.1016/j.matpr.2019.07.065.
- [14] Bidabadi, M.S., Akbari, M., Panahi, O.: Optimum mix design of recycled concrete based on the fresh and hardened properties of concrete, *Building Engineering*, 32 (2020), doi:10.1016/j.jobbe.2020.101483.
- [15] Berredjem, L., Arabi, N., Molez, L.: Mechanical and durability properties of concrete based on recycled coarse and fine aggregates produced from demolished concrete, *Construction Building Materials*, 246 (2020), doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.118421.
- [16] Verian, K.P., Ashraf, W., Cao, Y.: Properties of recycled concrete aggregate and their influence in new concrete production, *Resources, Conservation & Recycling*, 133 (2018), pp. 30–49
- [17] Kovač, D.: Beton od recikliranog agregata, Magistarski rad, Građevni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2008.
- [18] Sironić, H.: Primjena recikliranih materijala u proizvodnji betona, Magistarski rad, Građevni fakultet Sveučilišta u Rijeci, 2010.
- [19] Lavado, J., Bogas, J., de Brito, J., Hawreen, A.: Fresh properties of recycled aggregate concrete, *Construction Building Materials*, 233 (2020), doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117322.
- [20] El-Hawary, M., Al-Sulily, A.: Internal curing of recycled aggregates concrete, *Journal of Cleaner Production*, 275 (2020), doi:10.1016/j.jclepro.2020.122911.
- [21] Silva, R.V., De Brito, J., Dhir, R.K.: Fresh-state performance of recycled aggregate concrete: A review, *Construction Building Materials*, 178 (2018), pp. 19–31, doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.05.149.
- [22] Zakon o gradnji, NN 153/13 (125/19), Narodne novine, Zagreb, 2019.
- [23] Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija - 1. dio: Opća pravila, potresna djelovanja i pravila za zgrade; HRN EN 1998-1:2011, (EN 1998-1:2004+AC:2009)
- [24] Hrvatski zavod za norme: Ispitivanje geometrijskih svojstava agregata - 1. dio: Određivanje granulometrijskog sastava - Metoda sijanja; HRN EN 933-1, (EN 933-1:2012)
- [25] Hrvatski zavod za norme: HRN EN 1097-2:2011 Ispitivanja mehaničkih i fizikalnih svojstava agregata - 2. dio: Metode za određivanje otpornosti na drobljenje, (EN 1097-2:2010)
- [26] Hrvatski zavod za norme: HRN EN 1097-6:2004 Ispitivanja mehaničkih i fizikalnih svojstava agregata - 6. dio: Određivanje gustoće i upijanja vode, (EN 1097-6:2000+AC:2002)
- [27] Hrvatski zavod za norme: HRN EN 1744-1:2012 Ispitivanja kemijskih svojstava agregata - 1. dio: Kemijska analiza, (EN 1744-1:2009+A1:2012)
- [28] Hrvatski zavod za norme: Ispitivanje svježega betona - 2. dio: Ispitivanje slijeganjem; HRN EN 12350-2:2019, (EN 12350-2:2019)
- [29] Hrvatski zavod za norme: Ispitivanje svježega betona - 6. dio: Gustoća; HRN EN 12350-6:2019, (EN 12350-6:2019)
- [30] Hrvatski zavod za norme: Ispitivanje svježega betona - 7. dio: Udio pora - Tlačne metode; HRN EN 12350-7:2019, (EN 12350-7:2019)
- [31] Hrvatski zavod za norme: Ispitivanje očvrsluologa betona - 3. dio: Tlačna čvrstoća ispitnih uzoraka; HRN EN 12390-3:2019, (EN 12390-3:2019)
- [32] Hrvatski zavod za norme: Ispitivanje očvrsluologa betona - 13. dio: Određivanje sekantnog modula elastičnosti pri tlaku; HRN EN 12390-13:2013, (EN 12390-13:2013)
- [33] Hrvatski zavod za norme: Ispitivanje očvrsluologa betona - 8. dio: Dubina prodora vode pod tlakom; HRN EN 12390-8:2019, (EN 12390-8:2019)
- [34] Hrvatski zavod za norme: Proizvodi i sustavi za zaštitu i popravak betonskih konstrukcija - Ispitne metode: Određivanje otpornosti na kapilarno upijanje; HRN EN 13057:2003, (EN 13057:2002)
- [35] Hrvatski zavod za norme: Ispitivanje očvrsluologa betona - 16. dio: Određivanje skupljanja betona; HRN EN 12390-16:2019, (EN 12390-16:2019)
- [36] Eurokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcija - Dio 1-1: Opća pravila i pravila za zgrade; HRN EN 1992-1-1:2013, 2010, (EN 1992-1-1:2004+AC:2010)
- [37] Hrvatski zavod za norme: Izvedba betonskih konstrukcija; HRN EN 13670, (EN 13670:2009)
- [38] Šavor Novak, M., Uroš, M., Atalić, J., Herak, M., Demšić, M., Baniček, M., Lazarević, D., Bijelić, N., Crnogorac, M., Todorčić, M.: Zagreb earthquake of 22 March 2020 – preliminary report on seismologic aspects and damage to buildings, *GRAĐEVINAR*, 72 (2020) 10, pp. 843–867, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.2966.2020>
- [39] Serdar, M., Bjegović, D., Štirmer, N., Pečur, I.B.: Research challenges for broader application of alternative binders in concrete, *GRAĐEVINAR*, 71 (2019) 10, pp. 877–888, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.2729.2019>