

RECIKLIRANI AGREGAT U GRAĐEVINI KAO INOVACIJA ZA ZELENI RAZVOJ I ODRŽIVU TRANZICIJU / RECYCLED AGGREGATE IN CONSTRUCTION AS AN INNOVATION FOR GREEN DEVELOPMENT AND SUSTAINABLE TRANSITION

Zlatica Kuliš¹

¹IUT, Fakultet politehničkih nauka Travnik, Aleja konzula –Meljanac bb 72270 Travnik, BiH;
e-mail: zlatica.kulis@iu-travnik.com

Stručni članak

<https://www.doi.org/10.58952/zr20251401262>

UDK / UDC 620.1:624:504.6

Sažetak

Ovaj naučno istraživački rad bavit će se recikliranim agregatom i to od njegovog prikupljanja, obrade, ispitivanja i primjene u građevinskoj industriji. Dakle prvi korak kod izrade recikliranog betona je sakupljanje otpada sa građevinskih lokacija, koji obuhvata uništene i oštećene betonske elemente opločnike kao i ostatke betona od tehnološkog procesa spravljanja i betoniranja u konstrukcijama. Ovaj materijal se mora obraditi kako bi bio prikladan za ponovnu upotrebu. Dalji proces ide kroz razbijanje i selekciju tog agregata tj. ostatci betona se razbijaju i drobe u postrojenjima na manje komade, a proces može uključivati sortiranje i selekciju prema veličini i vrsti agregata. Veoma je važno odstraniti nečistoće (kao što su metalne, drvene ili plastične komponente), kako bi reciklirani agregat bio što čišći. Posljednji korak je laboratorijsko ispitivanje, dakle provjera svojstava recikliranog agregata kroz testiranje različitih fizičkih i mehaničkih osobina recikliranih agregata. Usporedbom ovih osobina sa prirodnim agregatima (koji se koriste u tradicionalnim betonskim mješavinama) pomoći će nam u određivanju optimalnih proporcija za spravljanje betonske mase.

Ključne riječi: recikliranje, agregat, beton, svojstva, ispitivanja.

JEL klasifikacija rada: L7

Abstract

This scientific research work will deal with recycled aggregate from its collection, processing, testing and application in the construction industry. Therefore, the first step in the production of recycled concrete is the collection of waste from construction sites, which includes destroyed and damaged concrete elements, pavers, as well as concrete remains from the technological process of making and concreting in structures. This material must be processed to make it suitable for reuse. The further process goes through the breaking and selection of that aggregate, i.e. residual concrete is broken and crushed in plants into smaller pieces, and the process may include sorting and selection by size and type of aggregate. It is very important to remove impurities (such as metal, wood or plastic components) in order to make the recycled aggregate as clean as possible. The last step is laboratory testing, i.e. checking the properties of the recycled aggregate through testing different physical and mechanical properties of the recycled aggregates. Comparing these properties with natural aggregates (used in traditional concrete mixes) will help us determine the optimal proportions for making the concrete mass.

Keywords: recycling, aggregate, concrete, properties, tests

JEL work classification: L7

UVOD

U posljednjim decenijama, izazovi vezani za očuvanje životne sredine, smanjenje otpada i učinkovitije korištenje resursa postali su ključni u svim industrijskim granama, uključujući i građevinsku industriju. Građevinska industrija suočava se s rastućim pritiskom da smanji svoj utjecaj na okoliš, a istovremeno se suočava s problemom nedostatka prirodnih agregata zbog prekomjernog vađenja i urbanizacije. Ovo dovodi do povećanja troškova materijala, smanjenja dostupnosti resursa kao i povećanih troškova odlaganja otpada. Kao jedna je od najvećih proizvođača otpada, a betonski agregat čini značajan dio tog otpada. Zbog toga se sve više istražuju alternativni izvori agregata koji bi mogli smanjiti potrebu za eksploatacijom prirodnih resursa i povećati održivost građevinskih projekata. Reciklirani agregat (RA) je materijal koji nastaje obradom starog betona i njegovom ponovnom upotrebom u novim betonskim smjesama.

Reciklirani agregat rezultat je obrade starog betona i njegovog ponovnog korištenja kao komponente u proizvodnji novog betona. Ovaj proces smanjuje potrebu za prirodnim agregatima i doprinosi smanjenju negativnog utjecaja na okoliš. Iako reciklirani agregat ima mnoge prednosti, kao što su smanjenje emisije ugljen-dioksida, smanjenje potrošnje prirodnih resursa i smanjenje količine otpada, njegova primjena u betonskim smjesama zahtijeva pažljivo istraživanje i ispitivanje kako bi se osigurala odgovarajuća svojstva betona.

U ovom radu istražiti ćemo proces reciklaže betonskog agregata, metode obrade i ispitivanja recikliranog agregata. Također, analizirat ćemo prednosti i nedostatke primjene recikliranog agregata u građevinskoj industriji, s posebnim fokusom na njegovu izvodljivost i učinkovitost u odnosu na prirodni agregat. Odnos frakcija u uzorku za ispitivanje agregata je identičan njihovom odnosu u uzorcima betona. Pored recikliranog agregata, u cilju uporedbe, pripremljen je uzorak prirodnog krečnjačkog agregata, te su paralelno ispitana važna fizičko-mehanička svojstva i jednog i drugog agregata.

1. PRIKUPLJANJE I OBRADA RECIKLIRANOG AGREGATA

U suvremenim postrojenjima za proizvodnju kako klasičnog tako i recikliranog agregata, proces separacije i pripreme sirovine provodi se u više faza, kako bi se osigurao kvalitetan materijal prilagođen specifičnim potrebama građevinske industrije, posebice za izradu betonskih i asfaltnih mješavina. Postupak se sastoji od sljedećih glavnih faza:

1. Sakupljanje sirovine
2. Obrada betonskog otpada
 - Drobljenje
 - Separacija (prosijavanje i klasifikacija)
 - Pranje
3. Kontrola kvaliteta (laboratorijska ispitivanja)
4. Skladištenje (specijalizovani prostori za frakcije)
5. Transport do proizvodnje betona

1.1. SAKUPLJANJE BETONSKOG OTPADA

Prvi korak u procesu reciklaže betonskog agregata je sakupljanje betonskog otpada s građevinskih lokacija. Ovaj materijal uglavnom čine uništeni betonski elementi (poput betonskih panela, ploča, greda, serklaža, opločnika) od uklanjanja ili rekonstrukcije i sanacije objekata, ostaci betona koji nastaju tijekom izgradnje objekata, kao i ostaci betona nastali iz tehnoloških procesa betoniranja.

Na separaciji Boljkovići-Lepenica općina Kiseljak poduzeća Transport beton doo Kiseljak formirana je privremena deponija otpadnog građevinskog materijala i to betona kao ostaci-višak od betoniranja prilikom gradnje, od transporta betona u vozilima, tehnološkog procesa betona kao i uništene i oštećene betonske galanterije koji će se koristiti za izradu recikliranog agregata u procesu spravljanja recikliranog betona. Navedeni materijal će se koristiti u eksperimentalne svrhe u procesu spravljanja gabiona od recikliranog betona. Betonski gabion je proizvod dizajniran za sprečavanje erozije zemljišta i pružanje potpore kod izgradnje potpornih zidova

1.2. OBRADA BETONSKOG OTPADA

Nakon prikupljanja i deponiranja na separaciji, materijal se transportuje u postrojenja za reciklažu gdje se podvrgava daljnjoj obradi. Eksploataciju i utovar sirovine, najčešće se radi pomoću bagera i utovarivača. Prijevoz sirovine do postrojenja vrši se kamionima i transportnim trakama. Ovaj proces obuhvaća nekoliko ključnih faza:

- Razbijanje - Prikupljeni betonski otpad za reciklažu prvo se razbija na manje komade pomoću mehaničkih drobilica, dakle prolazi kroz čeljustaste (vilaste) drobilice, gdje dolazi do grubog lomljenja materijala. Ovaj proces omogućuje dobivanje agregata koji je manje veličine i pogodniji za daljnju primjenu u betonu.
- Nakon drobljenja, agregat se podvrgava procesu separacije, koji ima za cilj razdvojiti čestice različitih veličina. Dakle agregat se selektira prema veličini, tj. klasificirat će se na sitni i krupni agregat. Klasifikacija agregata važna je jer različite veličine agregata imaju različite primjene u proizvodnji betona.
- Materijal se prenosi na situ s različitim dimenzijama otvora-vibracijsko mjesto, koji vibriraju i tako omogućuju razdvajanje zrna po veličini. Manje frakcije prolaze kroz nižu situ, dok se veće zadržavaju na gornjim razinama.
Na temelju prosijavanja, agregat se razdvaja u jasno definirane frakcije (npr. 0–4 mm, 4–8 mm, 8–16 mm, 16–31,5 mm, itd.). Svaka frakcija se skladišti odvojeno i koristi se prema specifičnim zahtjevima – sitni agregat za maltere, srednji i krupni za betonske konstrukcije. Ovaj korak je od ključne važnosti za ispunjavanje zahtjeva propisanih standarda, kao što su BAS EN 12620 za agregat za beton ili BAS EN 933-1 za određivanje granulometrijskih raspodjela.
- Uklanjanje nečistoća - Tijekom ovog procesa vrlo je važno eliminirati sve nečistoće, jer one mogu negativno utjecati na kvalitetu recikliranog betona.
- Pranje recikliranog agregata- U završnoj fazi procesa, agregat se podvrgava ispiranju, posebno ako sadrži značajne količine prašine, ilovače, gline ili organskih nečistoća. Tehnologija pranja obuhvaća upotrebu rotacijskih bubnjeva, prskalica i spiralnih separatora, koji učinkovito uklanjaju neželjene čestice. Cilj pranja je poboljšanje kvalitete agregata, jer prisustvo nečistoće može negativno utjecati na vezivanje sa cementnim tjesteninama u betonu, kao i na mehaničku čvrstoću i dugotrajnost gotovog materijala.

Pranje je posebno važno za agregat koji će se koristiti u proizvodnji betona visokih performansi, gdje je potrebna maksimalna čistoća i homogena struktura. Korištenje magnetskih separatora za metalne komponente i druge metode čišćenja ključno je za osiguranje čistog recikliranog agregata.

1.3. KONTROLA KVALITETE

Nakon tehničke obrade agregata, provodi se kontrola kvalitete u cilju osiguravanja usklađenosti s tehničkim standardima i zahtjevima krajnjih korisnika.

1.4. PRIPREMA ZA UPOTREBU

Kada su svi procesi obrade završeni, reciklirani agregat se priprema za upotrebu. S obzirom na vrstu i veličinu agregata, može biti potrebno dodatno usmjeriti njegovu primjenu na specifične betonske proizvode ili smjese. Također, neophodno je izraditi smjesu koja će omogućiti optimalnu interakciju recikliranog agregata s drugim komponentama betona (cement, voda, aditivi).

2. LABORATORIJSKA ISPITIVANJE SVOJSTAVA RECIKLIRANOG AGREGATA

2.1. FIZIČKA SVOJSTVA

Jedan od najvažnijih koraka u procesu reciklaže betonskog agregata je laboratorijsko ispitivanje njegovih fizičkih svojstava. Uzeti su uzorci klasičnog drobljenog agregata krečnjačkog porijekla i drobljenog recikliranog agregata nazivnih frakcija 0/4D, 0/4P, 4/8, 8/16 i 16/22,4 mm. Referentna dokumentacija će se uraditi u skladu sa zahtjevima Smjernica za projektovanje, građenje, održavanje i nadzor na putevima, knjiga 2, dio 5 (tč. 2.2.5.3.3.1., tabela 5.8) i BAS EN 12620 + A1:2009.

Izvršit će se sljedeća mjerenja na obje vrste agregata i to:

1. Granulometrijska analiza otvori sita (mm) ..
1. Sadržaj finih čestica $<0,063\text{mm}$
2. Određivanje sadržaja vode sušenjem u ventilacijskoj peć. Zasićenost vodom : Mjerenje zasićenosti vodom daje informacije o sposobnosti agregata za upijanje vode, što utječe na količinu vode koja je potrebna za pripremu betonske smjese.
3. Ekvivalent pijeska
4. Modul oblika - oznaka d_i/D_i frakcije (mm)
5. Otpornost protiv drobljenja (koeficijent Los Angeles) - razred prosija
6. Ispitivanje hemijskih svojstava agregata-Dio 1: Hemijske analize (organske materije - standardna rastopina)
7. Zapreminska masa zrna i upijanje vode

2.1.1. Granulometrijska analiza

Razlikovanje između sitnog i krupnog agregata u recikliranom materijalu ključno je za određivanje njegove primjene u betonskim smjesama. Veliki reciklirani agregat može se koristiti za izradu betona visoke čvrstoće, dok manji agregat omogućuje postizanje bolje obradivosti betonske smjese. Granulometrijski sastav agregata predstavlja raspodjelu zrna različitih veličina unutar uzorka agregata, i ima ključnu ulogu u određivanju njegovih fizičko-mehaničkih svojstava, kao što su zbijenost, nosivost, obradivost i trajnost betonske mješavine. Pravilna granulometrija agregata omogućuje optimalno sabijanje i minimalne praznine između zrna, što izravno utječe na čvrstoću i konačnu stabilnost proizvoda.

Ispitivanje je obuhvatilo sljedeće korake: pripremanog uzorka recikliranog agregata i klasičnog separisanog agregata određene mase, sušenje uzorka do konstantne mase, mehaničko prosijavanje kroz set standardiziranih sita različitih otvora (npr. 31,5 mm, 16 mm, 8 mm, 4 mm, itd.), mjerenje i zapisivanje mase zrna zadržanih na svakom mjestu, izračunavanje kumulativnih procenata prolaza i zadržanih frakcija.

Rezultati dobiveni prosijavanjem krečnjačkog separisanog agregata prikazani su u tablici br. 1. koje sadrže vrijednosti zadržane mase po situ, kao i pripadajuće procentualne raspodjele. Na temelju tih podataka izrađena je granulometrijska kriva koja omogućuje grafički prikaz raspodjele veličine zrna agregata.

Ova analiza je od posebnog značaja za kategorizaciju agregata (npr. prirodni šljunak, drobljeni kamen, pijesak), kao i za procjenu njegove upotrebljivosti u različitim građevinskim aplikacijama. Klasifikacija agregata prema granulometriji omogućuje njegovo svrstavanje u određene frakcije u skladu sa zahtjevima za određene betonske, asfaltne ili druge kompozitne materijale.

Vrsta ispitivanja	Jed. mjere	Datum ispitivanja	Metoda BAS EN	Veličina zrna (mm)						Zahtjevi Smjernica / Klasifikacija
				0/4D	0/4P	4/8	8/16	16/22,4		
1) Granulometrijska analiza otvori sita (mm) primjedba.: do zrna < 63 mm M - pranje in sijanje S - suho sijanje	%	27-29. 03.2024	933-1:2012	Prolazi						
				M	M	M	M	M		
0,063				12,3	1,6	2,4	1,4	0,3		
0,09				13	2	3	1	0		
0,125				15	3	3	1	0		
0,25				20	6	3	1	0		
0,5				30	15	3	1	0		
0,71				37	22	3	1	0		
1,0				46	32	3	1	1		
2,0				72	64	3	2	1		
4,0				99	97	11	2	1		
5,6				100	99	49	2	1		
8,0					100	97	7	1		
11,2						100	28	2		
16,0							91	7		
22,4							100	98		
31,5								100		
2) Sadržaj finih čestica <0,063mm	%	27-29. 03.2024	933-1:2012	12,3	1,6	2,4	1,4	0,3		
3) Određivanje sadržaja vode sušenjem u ventilacijskoj peći	%	22.-25. 03.2024	1097-5:2009	3,2	2,8	1,9	1,6	1,4		/
4) Ekvivalent pijeska	#	02.04.2024	933-8 +A1:2016	74	82	/	/			SE ₆₀
5) Modul oblika - oznaka d/D _i frakcije (mm) #	%	04-05. 04.2024	933-4:2011	/	/	8	6	8		SI ₁₅
6) Otpornost protiv drobljenja (koeficijent Los Angeles) - razred prosijavanja	#	09.-10.04. 2024	1097-2:2011	/	/	/	25 30-40% prolaza kroz sito 11,2	/		LA ₁₅ -LA ₃₀
7) Ispitivanje hemijskih svojstava agregata-Dio 1: Hemijske analize (organske materije- standardna rastopina)	/	03.-04. 04.2024	1744-1+A1, 2014, pog. 15.1	Svjetlija- negativan test	Svjetlija- negativan test	/	/	/		svjetlija
8) Zapreminska masa zrna	#	03.-10.04. 2024	1097-6:2014	$\rho_s=2,74$ $\rho_w=2,68$ $\rho_{rel}=2,64$	$\rho_s=2,73$ $\rho_w=2,68$ $\rho_{rel}=2,65$	$\rho_s=2,71$ $\rho_w=2,68$ $\rho_{rel}=2,66$	$\rho_s=2,71$ $\rho_w=2,68$ $\rho_{rel}=2,66$	$\rho_s=2,70$ $\rho_w=2,68$ $\rho_{rel}=2,67$		/
i - upijanje vode	#			1,4	1,1	0,7	0,6	0,4		WA ₁₅ 2
9) Ispitivanje natrijevim sulfatom Na ₂ SO ₄	#	08.-15. 04.2024	JUS B.B8 044	1,3	1,2	1,2	1,4	1,1		max. 5 %

Slika 1. Rezultati ispitivanja krečnjačkog separisanog agregata

2.1.2. Interpretacija granulometrijskih krivih

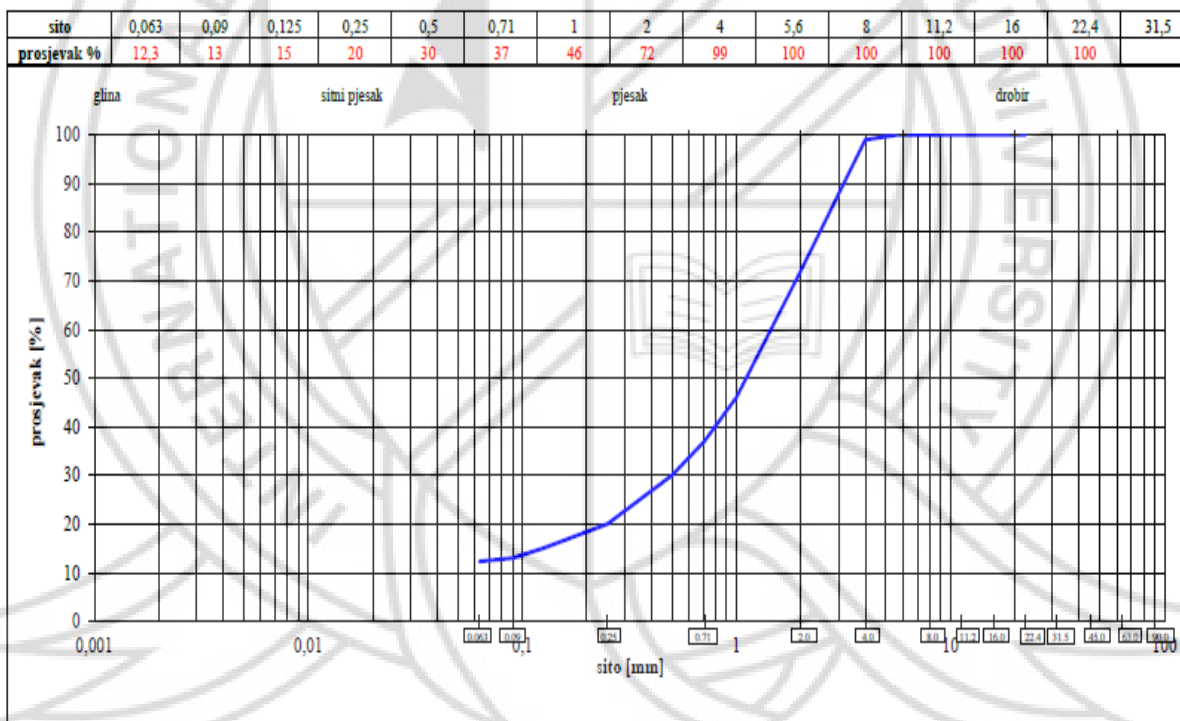
Na temelju dobivenih rezultata prosijavanja izrađena je granulometrijska kriva, koja predstavlja grafički prikaz kumulativnog procenta prolaza zrna kroz pojedina mjesta u ovisnosti o njihovoj veličini otvora. Kriva se najčešće prikazuje na polulogaritamskom dijagramu, gdje je osovina X logaritamaska i prikazuje veličinu zrna (mm), dok osovina Y prikazuje kumulativni postotak prolaza (% prikazuje kumulativni postotak prolaza (%)).

Oblik granulometrijske krive omogućuje analizu:

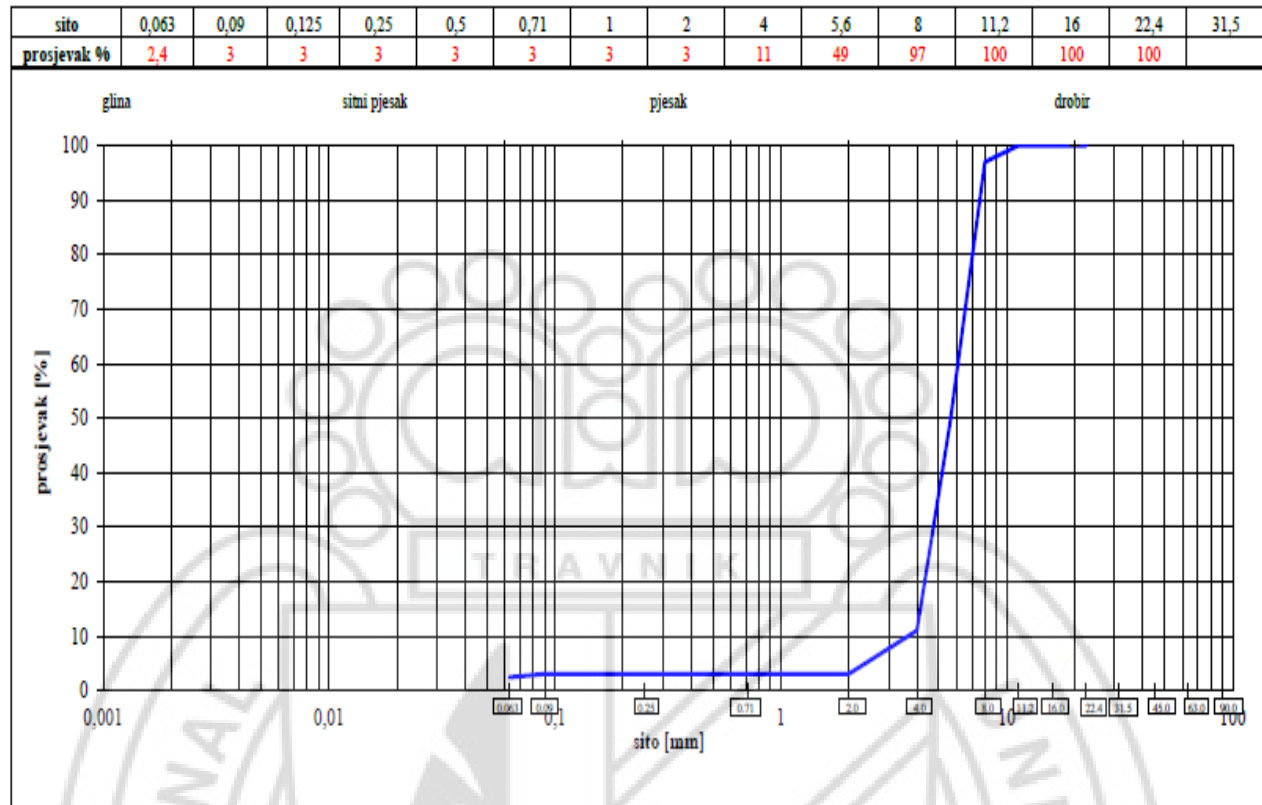
- Uniformnosti agregata – Ako kriva ima blagi nagib, uzorak je uniforman (sadrži zrna slične veličine). Ako je kriva strmija, agregat je dobro gradiran (različite veličine zrna su ravnomjerno raspoređene).
- Zastupljenosti pojedinih frakcija — Horizontalni dijelovi krive ukazuju na dominaciju jedne frakcije, dok vertikalni dijelovi ukazuju na nedostatak određenih veličina.
- Poređenja sa granicama granulometrijskih zona – Na temelju standarda ili zahtjeva konkretne primjene (npr. za beton ili asfalt), kriva se može uporediti s granicama propisanih zona kako bi se ocijenila podobnost agregata.

Ukoliko se granulometrijska kriva uklapa unutar propisanih granica, agregat se smatra odgovarajućim za upotrebu u zadatoj građevinskoj namjeni . U suprotnom, može biti potrebna korekcija mješavine agregata, npr. dodavanjem pijeska ili grubih frakcija kako bi se postigla željena granulometrija.

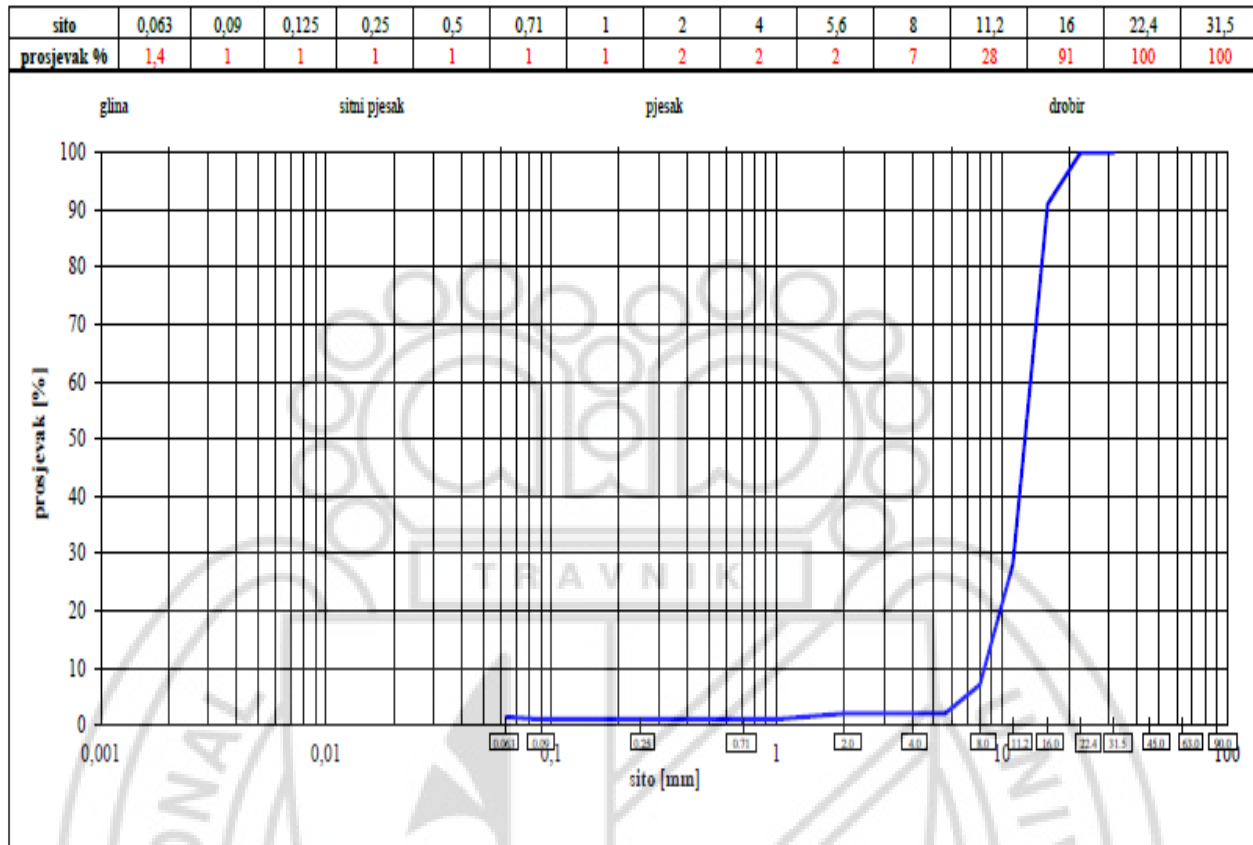
U ovom radu će biti prikazani dijagrami prosijavanja za krečnjački separisani agregat, dok će dijagrami prosijavanja za reciklirani agregat biti obrađeni sljedećim radovima.



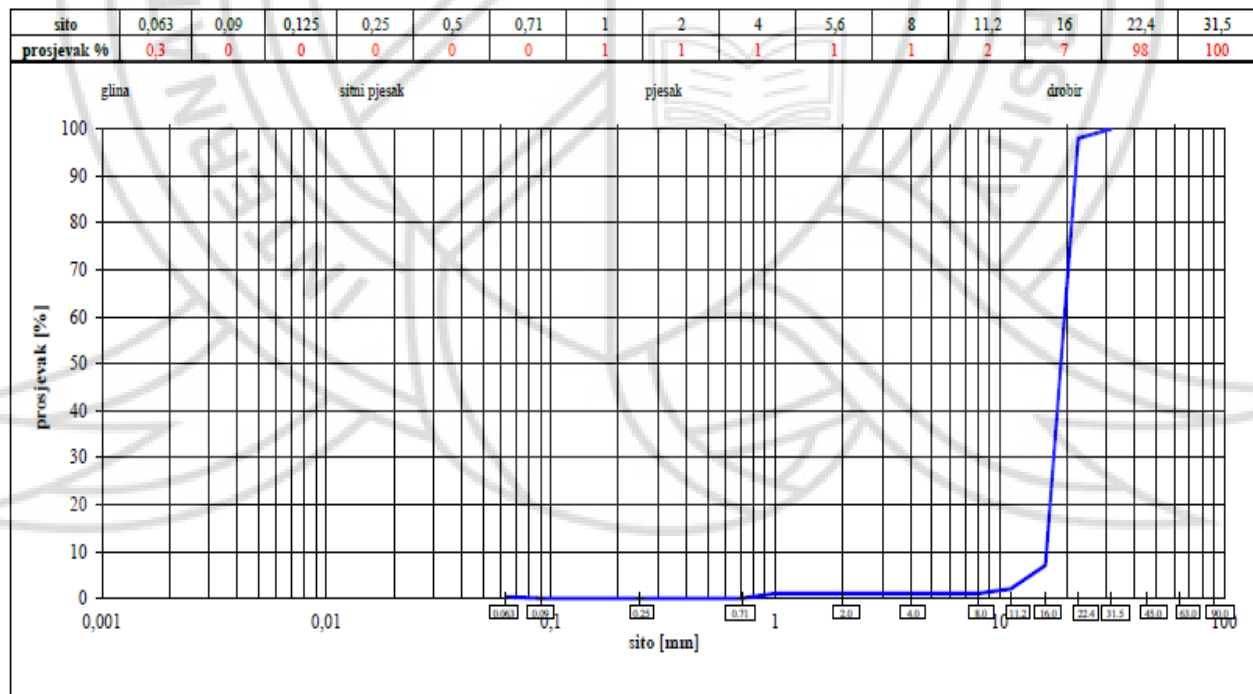
Slika 2. Dijagram prosijavanja 0/4D



Slika 3. Dijagram prosijavanja 4/8



Slika 4. Dijagram prosijavanja 8/16



Slika 5. Dijagram prosijavanja 16/22,

3. PREDNOSTI I NEDOSTACI PRIMJENE RECIKLIRANOG AGREGATA

Prednosti kod primjene recikliranog agregata su sljedeće :

- Ekološka održivost -Smanjenje potreba za eksploatacijom prirodnih resursa
- Smanjenje količine građevinskog otpada koji ide na deponije
- Smanjenje emisije ugljen-dioksida, jer reciklaža betona zahtijeva manje energije u odnosu na proizvodnju novog agregata.
- Dostupnost materijala i smanjenje troškova – reciklirani agregat često je jeftiniji od prirodnog, posebno kada se koristi lokalno.
- Poticanje kružnog gospodarstva – doprinosi reciklaži i ponovnoj upotrebi materijala.

Nedostaci kod primjene recikliranog agregata su sljedeće:

- Promjenjiva svojstva – sastav i kvaliteta recikliranog agregata mogu jako varirati.
- Potencijalno niža čvrstoća betona u odnosu na beton s prirodnim agregatom
- Moguće nepravilnosti u kvaliteti recikliranog agregata, zbog prisutnosti nečistoća
- Niža kvaliteta – može imati manju tlačnu čvrstoću i veću apsorpciju vode u odnosu na prirodni agregat.
- Ograničena primjena – ne koristi se često za konstrukcijske zahtjevne elemente (npr. armirani beton visoke čvrstoće)
- Potreba za dodatnim ispitivanjima – kako bi se osigurala prikladnost i sigurnost materijala
- Negativna percepcija – neki investitori ili izvođači još uvijek zaziru od upotrebe recikliranih materijala.

ZAKLJUČAK

Primjena recikliranog agregata u izradi betona predstavlja važan korak ka održivijoj građevinskoj industriji. Korištenje recikliranog betonskog agregata može značajno smanjiti okolišni otisak građevinske industrije, međutim, proces reciklaže i ispitivanja moraju biti temeljito izvedeni kako bi se osigurala kvaliteta gotovog proizvoda. Dalja istraživanja i razvoj tehnologije reciklaže mogu povećati učinkovitost i ekonomičnost upotrebe recikliranog agregata, omogućujući veću primjenu u građevinskoj industriji.

LITERATURA

1. L.K. Crouch, P.E.; Jordan Pitt, Ryan Hewitt: Aggregate effect on pervious portland cement concrete static moduls of elasicity, Journal of Materials in Civil Engineering, 2007.
2. P. Krstulović: Svojstva i tehnologija betona, Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu i Institut građevinarstva Hrvatske, Split, 2000.
3. Pravilnik o tehničkim propisima za građevinske proizvode koji se ugrađuju u betonske konstrukcije (Sl.novine FBiH 86/2008)
4. S. Mrakovčić, N. Čeh, V. Jugovac: Utjecaj granulometrijskog sastava na svojstva procjdnog betona, Građevinar 66 (2014) 2 pp. 107-113.
5. Thn Chi Fu, Weichung Yeih, Jiang Yu Chang, Ran Huang: The influence of aggregate size and binder material on the properties of pervious concrete, Taiwan, 2014.
6. V. Ukrainczyk: Beton, Struktura, svojstva, tehnologija, Građevinski fakultet sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 1994.
7. Izvještaj o ispitivanju frakcija za beton Igmata doo Sarajevo, 2024.

Internet izvori

1. <http://www.cemex.com/>
2. [/materijali/beton-sa-letecim-pepelom](http://www.cemex.com/materijali/beton-sa-letecim-pepelom)
3. <https://www.gradnja.me>
4. <http://info.grad.hr/>
5. <https://www.scribd.com>
6. <https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/beton.pdf>
7. http://www.quarzwerte.at/downloads/DE_Katalog_2014.pdf