

MOGUĆNOST PRIMENE POROZNIH BETONSKIH PLOČA SA UDELOM OTPADNIH MATERIJALA ZA SMANJENJE POVRŠINSKOG OTICAJA U URBANIM SREDINAMA

Aleksandar SAVIĆ, Aleksandar RADEVIĆ, Marina AŠKRABIĆ, Ognjen GOVEDARICA,
Vladana RAJAKOVIĆ-OGNJANOVIĆ, Dimitrije ZAKIĆ
Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, Srbija

REZIME

Globalne klimatske promene, kao posledica ljudskih aktivnosti, dovode do negativnih efekata, kao što su: iscrpljivanje prirodnih resursa, zagađenje eko-sistema i narušavanje prirodne ravnoteže procesa na Zemlji. Kao pokušaj da se ublaži odgovor na pomenute fenomene pojavio se koncept održivog razvoja koji podrazumeva da se prirodni resursi i već nastala dobra koriste tako da se uvažavaju i potrebe budućih generacija.

Jedna od preporuka, u duhu održivog razvoja, je primena reciklaže. Za primenu reciklaže građevinarstvo je pogodna industrijska grana. Mogućnost primene cementnih kompozita sa recikliranim materijalima višestruko pospešuje primenu postulata održivog razvoja i koncepta bez otpada, jer se istovremeno zbrinjava otpad, smanjuje upotreba prirodnih resursa i emisija štetnih materija (prevashodno ugljen-dioksid) u životnu sredinu.

U radu su prikazane karakteristike poroznih betonskih ploča, izrađene sa recikliranim materijalima (neutral) i mogućnost primene u urbanim sredinama, za unapređenu kontrolu i usmeravanje atmosferskih padavina.

Prikazane i analizirane ploče zadovoljavaju kriterijume po pitanju zapreminske mase, čvrstoće pri pritisku, čvrstoće pri savijanju, upijanju vode i vodopropustljivosti, ali potreban je njihov dalji razvoj po pitanju otpornosti na habanje i otpornosti na dejstvo mraza i soli.

Podaci o prihvatanju članka

Primljen: 6.10.2023.

Ispravljen: -

Prihvaćen: 26.10.2023.

Kontakt: savic.alexandar@gmail.com

Ključne reči: održivi razvoj, reciklaža, beton, fizičko-mehanička svojstva

1. UVOD

Savremeno društvo suočava se sa izazovom globalnih klimatskih promena, kao posledicom narušavanja složenog balansa celokupnog ekosistema na planeti. Obim ljudskog delovanja je odavno prevazišao zanemarljiv nivo u globalnom smislu, pa se u interakciji sa prirodom odvijaju nepovratne negativne promene.

Potreba i jedan od osnovnih principa funkcionisanja ljudskog društva je razvoj koji veoma često podrazumeva: iscrpljivanje prirodnih resursa, zagađenje životne sredine i narušavanje prirodne ravnoteže. Kao odgovor na navedene fenomene savremeno društvo predlaže primenu koncepta održivog razvoja (slika 1), koji podrazumeva da se prirodni resursi i već stvorena dobra koriste na takav način da potrebe sadašnjih generacija budu zadovoljene, bez ugrožavanja potreba budućih generacija. Koncept održivog razvoja primenljiv je jedino ukoliko se primene adekvatne procedure. Te procedure često podrazumevaju da se sprovedu značajne izmene postojećih procesa i da se sagledaju efekti svake ljudske aktivnosti u cilju optimizacije, na celovit način.

U građevinskoj industriji, princip održivog razvoja podrazumeva osiguranje odgovarajućeg kvaliteta materijala i konstrukcija u smislu nosivosti, trajnosti i funkcionalnosti, uz energetske, ekološke i ekonomsku prihvatljivost, u cilju smanjenja ukupne potrošnje energije potrebne za proizvodnju građevinskih materijala i za eksploataciju objekta [1]. Na primer, kao pogodnu privrednu granu, građevinarstvo, karakteriše mogućnost reciklaže materijala, pre svega betona.

Danas se sve češće koristi agregat od recikliranog betona [2,3], čak i u naprednim betonima, kao što je samougrađujući beton. Tako je nastao pojam „zeleni beton“, odnosno ekološki prihvatljiv beton. Osnovna odrednica ovakvih betona je da se proizvode od recikliranih ili otpadnih materijala, uz smanjenje količine cementa [4].



Slika 1. Tri osnovne komponente održivog razvoja [1]

U cementnim kompozitima je, sa aspekta poboljšanja strukture, naročito interesantna upotreba mineralnih dodataka, fino sprasanih materijala koji se doziraju prilikom samog spravljanja betona u širokom opsegu količina, a najčešće u određenom procentu u odnosu na masu cementa. Pojedini mineralni dodaci mogu doprinositi poboljšanju fizičko-mehaničkih svojstava: leteći pepeo, zgura visokih peći, silikatna prašina, aktivirani metakaolin i sl. (takozvani aktivni mineralni dodaci prema SRPS EN 206 [5]). U drugu grupu mineralnih dodataka spadaju inertni mineralni dodaci, kao što su krečnjačko brašno, dolomitsko brašno i drugi spraseni materijali. Danas se istražuje upotreba recikliranih materijala, kao što su: reciklirano staklo, pepeo iz bioenergetskih postrojenja, neutral (neopasan i inertan materijal, nastao inertizacijom otpadnih materijala – otpada iz hemijske industrije, štamparske industrije, otpadnih ulja i dr – pomoću kalcijum-hidroksida) [6].

Zbog ubrzanе urbanizacije, smanjenog udela zelenih površina unutar i van gradova, planeta je izložena većem stepenu poplava nego što je to bio slučaj ranije. Tako je, na osnovu istraživanja u 170 naučnih studija pokazano da je pojava poplava direktna posledica

nivoa urbanizacije i veličine sliva [4]. U sferi saobraćajne infrastrukture u urbanom okruženju, implementacija principa održivog razvoja zahteva da se tradicionalne (energetski zahtevne) procedure izgradnje transformišu u pravcu sa malim uticajem (*eng.* Low Impact Development - LID). Cilj ove politike je da se što je više moguće obnovi prirodna sposobnost površine da apsorbuje atmosferske vode.

Jedno od rešenja koja se primenjuje širom sveta je formiranje poroznih podloga u urbanim sredinama. Pomenute podloge se mogu podeliti u dve velike grupe: porozni (propustljivi) asfalt i beton i međusobno povezani propusni pločnici kao što je prikazano na slici 2. Razlika između ovih proizvoda je zasnovana na mehanizmu prema kojem iskazuju propustljivost: da li materijal od kojeg su napravljeni sadrži pore koje su u stanju da transportuju veću količinu kišnice ili su postavljene na licu mesta na način koji omogućava kišnici da prolazi kroz prostore između proizvoda koji se koriste za popločavanje.



Slika 2. Najčešći tipovi poroznih podloga [7]

Ovaj rad daje detaljniji uvid u mogućnosti primene zelenog poroznog betona u obliku betonskih ploča za popločavanje, koji doprinosi smanjenju opasnosti od poplava u urbanim sredinama.

2. POROZNI BETONI

Porozni betoni spadaju u lake betone. U ovu grupu betona spadaju oni betoni čija se zapreminska masa u suvom stanju kreće u rasponu od 300 – 2000 kg/m³ što je znatno manje u poređenju sa običnim betonima (2100 - 2500 kg/m³) [8], a to predstavlja njihovu glavnu prednost. Velika poroznost lakih betona posledično uzrokuje njihovu manju zapreminsku masu, a postiže se na sledeće načine [9]:

- Izostavljanjem sitnijih frakcija agregata kako bi se formirale šupljine između krupnijih čestica, ispunjene vazduhom, dok cementna pasta formira tanak film oko krupnijih čestica i spaja ih tačkasto (kaverozni ili porozni betoni);
- Iniciranjem formiranja velike količine mehurića vazduha u cementnoj pasti u cilju formiranja ćelijaste strukture betona, što se postiže ili dodacima koji prouzrokuju pojavu pene ili dodacima koji putem hemijskih reakcija u svežem kompozitu oslobađaju gas (ćelijasti, odnosno gas- betoni);
- Potpunom ili delimičnom zamenom prirodnog agregata takvim agregatima koji sadrže porozne čestice (lakoagregatni betoni).

Prema nameni i fizičko-mehaničkim svojstvima, može se izvršiti podela lakih betona, data u tabeli 1 [10].

Tabela 1. Klasifikacija lakih betona [10]

Svojstvo, jedinica	I Konstrukcijski	II Konstrukcijski /Izolacioni	III Izolacioni
Zapreminska masa (kg/m ³)	1600-2000	< 1600	<< 1450
Čvrstoća pri pritisku (MPa)	> 15,0	> 3,5	> 0,5
Koeficijent toplotne provodljivosti (W/m ² K)	-	< 0,75	< 0,30

Kaverozni betoni su vrsta lakih betona koji se dobijaju izostavljanjem sitne frakcije agregata, odnosno, upotrebom krupnog agregata čija je nominalna veličina zrna ista (jedna frakcija krupnog agregata). Ovakav agregat se nakon kvašenja meša sa smesom koja se sastoji od cementa i vode. Na ovaj način se postiže da se svako zrno agregata obavije tankim slojem cementne paste, približne debljine od 1 do 3 mm, tako da su zrna međusobno povezana tačkasto, a između zrna ostaje prazan prostor [8]. Prostori između zrna su međusobno povezani čime je formirana otvoreno – porozna struktura betona. Na ovaj način, dobijaju se betoni čija je zapreminska masa 25 – 30% manja od zapreminske mase običnih betona.

Obično se primenjuju agregati čija se veličina zrna kreće u rasponu od 10 – 20 mm.

Uslovi koji se odnose na agregat obuhvataju sadržaj sitnih čestica, oblik, tip i veličinu zrna. Tako na primer, ovakav agregat ne bi trebalo da sadrži više od 10% sitnijih čestica, kao ni čestice čija su zrna manja od 5 mm. Oblik zrna agregata je takođe posebno značajan prilikom projektovanja betonske mešavine, naime ne preporučuje se upotreba agregata čija su zrna izdužena ili sadrže oštre ivice kako bi se smanjila mogućnost lokalnog drobljenja zrna prilikom dejstva opterećenja. Tip i veličina zrna agregata utiču na zapreminsku masu očvrstlog betona. Najmanja vrednost zapreminske mase se može postići upotrebom agregata čija je veličina zrna približno ista, odnosno, upotrebom jedne frakcije krupnog agregata. Rezultujuća zapreminska masa, pored veličine zrna agregata, zavisice i od odnosa agregata i cementa u betonu.

U tabeli 2 su prikazane karakteristike kaveroznih betona u funkciji pomenutih faktora.

Tabela 2. Karakteristike kaveroznih betona

Parametar	Običan agregat	Laki agregat
Odnos agregat/cement (po masi)	6 - 10	3 - 8
Vodocementni faktor	0,38 – 0,45	0,38 – 0,45
Zapreminska masa betona (kg/m ³)	1200 - 1900	800 - 1400
Čvrstoća pri pritisku (MPa)	3 - 7	3 - 7

Kaverozni betoni, kao i većina lakih betona, imaju manju zapreminsku masu i lošije mehaničke karakteristike (manju pritisnu i zateznu čvrstoću) u odnosu na obične betone. Kod kaveroznih betona, osim na čvrstoću, vodocementni faktor ima uticaj i na strukturu, jer u slučaju da je vrednost vodocementnog faktora niska, cementna pasta će biti veće viskoznosti i neće pravilno obaviti sva zrna agregata, a u slučaju da je vrednost vodocementnog faktora visoka, cementna pasta će biti manje viskoznosti i popuniće praznine između zrna agregata čime se dobija beton manje poroznosti [8]. Kod ovakvog tipa betona posebnu pažnju treba posvetiti određivanju optimalne vrednosti vodocementnog faktora.

Za razliku od običnih betona kod kojih čvrstoća zavisi primarno od vodocementnog faktora, čvrstoća kaveroznih betona zavisi i od odnosa agregat – cement i zapreminske mase betona. Međutim, sa obzirom na to da se kod kaveroznih betona troši manja količina cementa, i cena kaveroznih betona je niža. Osim velike vodopropustljivosti, kao posledice porozne strukture, kaverozne betone odlikuju i bolje termičke karakteristike (koeficijent toplotne provodljivosti okvirno postiže vrednost oko $0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$, dok kod običnih betona ova vrednost iznosi oko $2,0 \text{ W/m}^2\text{K}$). Pravilno formulisane recepture kaveroznih betona odlikuju se i odsustvom segregacije i kapilarnog upijanja, zbog čega su vrlo otporni na cikluse smrzavanja i odmrzavanja [11].

Ovakvi betoni zbog svoje porozne strukture smatraju se eko-materijalom kao elementom održive gradnje sa višestrukim prednostima korišćenja [12]:

- 1) Značajno doprinose upravljanju odvođenja atmosferskih voda, obezbeđuju infiltraciju i smanjuju količinu zagađujućih materija pre nego što dospeju u podzemne vode. Takođe, sprečavaju pojavu poplava na površinama.
- 2) Zbog svoje svetlije boje u poređenju sa asfaltom, imaju sposobnost da reflektuju sunčevo zračenje, a relativno otvorena struktura pora akumulira manje toplote od asfalta.
- 3) Doprinosu smanjenju toplote u urbanim sredinama, apsorpciji zvuka i poboljšanju kvaliteta vazduha.
- 4) Smanjuju potrebu za korišćenjem vode za navodnjavanje drveća i drugih biljaka koje su okružene betonskim elementima.
- 5) U sastavu mogu imati određen procenat recikliranih materijala a da se time ne ugroze konstruktivne performanse ili trajnost propusnih betona.

3. MOGUĆNOST ODVOĐENJA ATMOSFERSKIH VODA KOD UPOTREBE POROZNIH BETONSKIH PLOČA

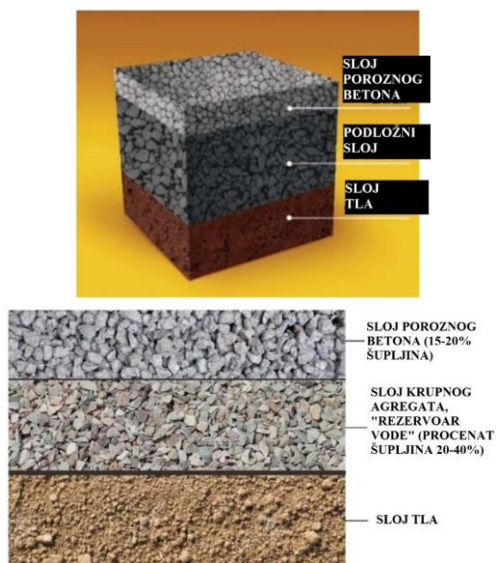
Najveći ekološki značaj propusnog betona se ogleda upravo u njegovoj osnovnoj primeni – mogućnosti odvođenja površinske i atmosferske vode. Najčešća primena ovih betona je za popločavanje parkinga, trotoara, sportskih igrališta, staza itd. gde je saobraćaj nižeg intenziteta. Naime, primenom elemenata za popločavanje izrađenih od ovog betona, sprečava se zadržavanje atmosferske vode na površini tla. Prema nekim istraživanjima, porozni betoni imaju pozitivan uticaj na atmosferske vode koja dopunjuje podzemne vode [13]. Doprinos je oko 70%. Kišnica prolazi kroz pore betona i dolazi direktno do tla čime se dopunjuju podzemne vode, zemlja ispod betona održava vlažnom, održava se vegetacija čije se korenje nalazi ispod betona i na taj način se smanjuje mogućnost poplava. Smanjuje se i potreba za infrastrukturnim odvodnjavanjem, odnosno omogućen je još jedan način odvodnjavanja, koji se može planirati.

Zbog nečistoća koje sa sobom nosi površinska voda, može doći do začepjenja pora u kaveroznim pločama za popločavanje. Iskustvo je pokazalo da se redovnim održavanjem ovakvih ploča može održati njihova prvobitna propusnost.

Problem takođe mogu predstavljati mesta na kojima se nalaze zagađene otpadne vode. Otpadne vode prisutne su u industrijskim zonama, u krugu fabrika, oko pumpi za gorivo i sl. Naime, u slučaju otpadnih voda opterećenih zagađujućim materijama, ne bi trebalo primenjivati kaverozne betone za popločavanje, jer bi infiltracijom kontaminiranih voda kroz ove betone moglo doći do potencijalnog zagađenja podzemnih voda, čime se narušava zdravlje ljudi i okoline [14].

Najčešće se porozni sloj sastoji iz sloja poroznog betona (sa poroznošću od 15% do 20%) i podlozno sloja (u opštem slučaju izrađenog od sloja krupnog agregata sa procentom šupljina koji se kreće u granicama od 20% do 40%). Ispod ovog dvoslojnog sistema nalazi se sloj tla koji upija vodu, slika 3.

Zaštita životne sredine primenom kaveroznih betona se može postići indirektno u pogledu ušteda i očuvanju pijaće vode u zgradama. Naime, pojedina istraživanja su pokazala da je moguće iskoristiti kišnicu koja protiče kroz porozni beton za čišćenje spoljašnjih površina, zalivanje bašta i druge slične namene [15].



Slika 3. Ilustracija slojeva poroznog betona za oticanje atmosferskih voda [13]

Moguće je primeniti i geotekstil između slojeva zemlje i krupnog agregata koji ima funkciju sprečavanja prodora sitnih čestica i gornje slojeve, čime se sprečava začepljenje pora gornjeg sloja, ali i sprečava se da kontaminirane materije koje prođu kroz gornji sloj, dopru do zemlje ispod njega i eventualno dođu u kontakt sa podzemnim vodama [14,16].

4. REZULTATI EKSPERIMENTALNIH ISTRAŽIVANJA POROZNIH BETONSKIH PLOČA

U sklopu prve faze istraživanja proizvedene su i ispitane četiri različite recapture poroznog lakoagregatnog zelenog betona. Beton je proizveden i ugrađen u kalupe za ploče u pogonu za prefabrikaciju "Promoter" u Mladenovcu. Za proizvodnju ovih betona upotrebljen je laki agregat ekspandirane gline proizvođača Liapor (slika 4), a izvršena je i zamena jednog dela cementa neutralom (slika 5) u određenom procentu, na sledeći način:

- ploče kod kojih je za proizvodnju upotrebljena količina od 400 kg/m³ cementa, bez zamene cementa neutralom, takozvane referentne recepture (sive boje).
- druga grupa ploča proizvedena je tako što je 10% mase cementa u recepturi zamenjeno neutralom u odnosu na prvobitnu recepturu (ploče sive boje) tako da je za ove ploče korišćeno 360 kg/m³ cementa (smeđe boje.)

- kod treće grupe ploča (crvene boje) izvršena je zamena cementa neutralom u masenom sadržaju od 20% u odnosu na referentnu recepturu (korišćeno je 320 kg/m³ cementa).

- četvrta grupa ploča (zelene boje) izrađena je od betona kod koga je izvršena masena zamena cementa neutralom u iznosu od 30% u odnosu na referentnu recepturu (korišćeno je 280 kg/m³ cementa).

Komponentni materijali koji su korišćeni za pravljenje pomenutih uzoraka lakoagregatnih poroznih betonskih ploča i njihove količine prikazane su u tabeli 3. U tabeli je prikazan sastav ploča izrađenih od referentne mešavine, u kojoj nije izvršena zamena cementa neutralom. Kod ostalih ploča sastav je identičan, a jedina razlika je u zameni cementa neutralom u određenom procentu (10, 20 i 30% zamene cementa).

Tabela 3. Sastav referentne mešavine lakoagregatnih poroznih ploča

Komponentni materijali	Količina
Liapor kuglice od ekspandirane gline, frakcije 1-4 mm	400 kg/m ³
Prirodni rečni pesak, frakcije 0-4 mm	770 kg/m ³
Portland cement CEM II (A-L) „Moravacem“ Popovac	400 kg/m ³
Voda (vodocementni faktor: 0,5)	200 l
Hemijski dodatak superplastifikator	0,4%



Slika 4. Fotografija kuglice Liapora [17]

Neutral je praškast materijal belo-sive i/ili sivo-smeđe boje, sledećih karakteristika [6]:

- Hidraulička provodljivost: $2,0 \cdot 10^{-7} > K > 1,1 \cdot 10^{-7}$ cm/s

- Specifična masa: 730 – 960 kg/cm³
- Sadržaj vlage < 10%
- Pliva na vodi, ne reaguje i ne meša se sa vodom.

Neutral je termin korišćen za proizvod dobijen tretmanom sledećih otpada: otpadi iz štamparske industrije (8%), otpadna ulja (7%), otpadne vode iz tehnoloških procesa (14%), otpadni muljevi i pogače iz industrijskih postrojenja za preradu otpadnih voda (25%), otpadni muljevi iz metalurških procesa (1%), otpadne hemikalije i otpad iz hemijske industrije (17%), otpadne emulzije (11%) i ostali otpadi (7%). U konkretnom slučaju u ovom istraživanju, kao delimična zamena cementa u predmetnim pločama korišćen je neutral dobijen tretmanom mulja otpadnih voda (Solidified Waste Water Treated Sludge).



Slika 5. Fotografija neutrala

Od fizičkih i mehaničkih svojstava, ispitivani su: zapreminska masa, upijanje vode, čvrstoća pri pritisku, nosivost ploča, čvrstoća pri zatezanju savijanjem, otpornost na dejstvo mraza i soli i otpornost na habanje brušenjem [11]. Otpornost na dejstvo mraza i soli karakteriše trajnost ispitivanih kompozita, pri čemu je poželjno obaviti i inspekciju distribucije soli u njima [18].

Rezultati ispitivanja zapremine mase i upijanja vode prikazani su u tabeli 4, dok je postupak zasićenja uzoraka prilikom upijanja vode ilustrovan na slici 6.

Tabela 4. Rezultati ispitivanja zapremine mase i upijanja vode na četiri ispitivane serije uzoraka

Seriya	Zapreminska masa (kg/m ³)	Upijanje vode (%)
I	971	13,1
II	939	14,5
III	936	15,4
IV	934	16,3

Ispitivanje jednoaksijalne čvrstoće pri pritisku poroznog betona vršeno je na ukupno 24 uzoraka, odnosno po 6 uzoraka za svaki tip ploče. Uzorci su postavljeni u hidrauličku presu, a opterećenje je ravnomerno povećavano sve do loma. Za svaki uzorak pojedinačno je zabeležena vrednost opterećenja prilikom koga je došlo do loma (sila loma).

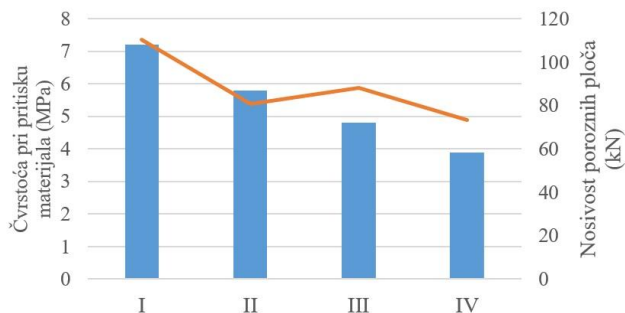


Slika 6. Fotografija faze zasićenja uzoraka postepenim potapanjem prilikom merenja upijanja vode

Pored određivanja čvrstoće pri pritisku, na uzorcima ploča kaveroznog betona rađeno je ispitivanje nosivosti uzoraka. Ispitivanje je vršeno na po dva uzorka za svaku od četiri serije ploča (ukupno 8 uzoraka). Nakon što su izmerene mase uzoraka u suvom stanju i određene njihove dimenzije, uzorci su postavljeni u presu gde su opterećeni do loma, uz registrovanje vrednosti sila pritiska. Ispitivanja čvrstoće pri pritisku na uzorcima isečenim iz ploča i nosivosti samih betonskih ploča ilustrovani su na slici 7, a rezultati ispitivanja prosečnih vrednosti čvrstoće i nosivosti prikazani su na slici 8.



Slika 7. Fotografije ispitivanja čvrstoće pri pritisku (levo) i nosivosti (desno)

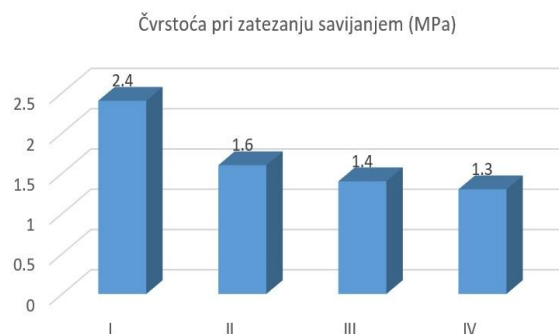


Slika 8. Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku u MPa i nosivosti u kN

Ispitivanje čvrstoće pri zatezanju savijanjem je vršeno na 12 uzoraka prizmatičnog oblika, po 3 za svaki tip poroznog betona (slika 9). Uzorci su postavljeni u presu i opterećeni do loma, a nakon registrovanja sile pri kojoj je došlo do loma uzoraka, sračunate su vrednosti čvrstoće pri savijanju (rezultati dati na slici 10).



Slika 9. Fotografija pri ispitivanju čvrstoće pri zatezanju savijanjem



Slika 10. Rezultati ispitivanja čvrstoće pri zatezanju savijanjem

Ispitivanje na istovremeno dejstvo mraza i soli prikazano je na slici 11, a ispitivanje otpornosti na habanje prikazano je na slici 12. Uzorci referentnog materijala izdržali su 14 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja, dok su ostali uzorci izdržali 12 ciklusa, 9 ciklusa i 3 ciklusa za mešavine II, III i IV redom. Srednje vrednosti habanja brušenjem Bemeovom metodom bile su relativno visoke i kretale su se od 32,3 cm³/50cm² (za mešavinu II sa 10% zamene cementa neutralom) do 47,9 cm³/50cm² (za mešavinu IV sa 30% zamene cementa neutralom).



Slika 11. Fotografija pri ispitivanju na istovremeno dejstvo mraza i soli



Slika 12. Fotografija pri ispitivanju otpornosti na habanje brušenjem

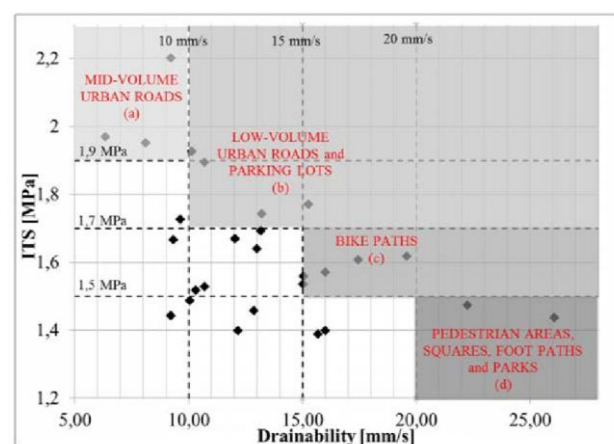
U drugoj fazi istraživanja je cement u propustljivim (kaveroznim) betonskim pločama zamenjen u količini od 30% modifikovanim neutralom, pomešanim sa dodatnim komponentama, odabranim tako da poboljšaju njegovu sposobnost vezivanja [19, 20, 21]. Procedura modifikacije podrazumevala je mešanje neutrala (90%) sa Al_2O_3 (6,3%), $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$ (3%) i zaptivačem (0,7%). Referentna mešavina je sadržala samo cement kao vezivo. Obe vrste betonskih ploča su proizvedene sa drobljenim agregatom prirodnog porekla, u dve frakcije – 2/4 mm i 4/8 mm.

Rezultati mehaničkih ispitivanja izvedenih na betonskim pločama starosti 28 dana prikazani su u tabeli 5. Prosečna otpornost na habanje brušenjem referentnih ploča iznosila je $18,7 \text{ cm}^3/50\text{cm}^2$, dok je za ploče koje su sadržale neutral ova vrednost iznosila $26,4 \text{ cm}^3/50\text{cm}^2$.

Prema prikazanim rezultatima, dodatak modifikovanog neutrala u količini od 30% (kao zamena cementa) je doveo do pogoršanja svih mehaničkih svojstava. Ako se vrednosti čvrstoće pri zatezanju cepanjem uporede sa kategorizacijom prikazanom na slici 13 (ITS vrednosti), može se zaključiti da bi se referentna mešavina mogla koristiti za: pešačke površine, trgove, pešačke staze i parkove, što nije slučaj za mešavinu sa 30% modifikovanog neutrala. Ipak, manji procenat zamene cementa, zajedno sa više ispitivanja na mešavinama, može najverovatnije rezultirati većom čvrstoćom na pritisak i zatezanje i dovesti do formiranja propustljivih betonskih ploča sa odgovarajućim svojstvima za pešačke površine.

Tabela 5. Rezultati ispitivanja mehaničkih karakteristika betonskih ploča sa neutralom (MPa) [20]

Svojstvo	Referentna mešavina	30% neutrala
Čvrstoća pri pritisku	4.21	3.17
Čvrstoća pri zatezanju cepanjem	1.44	0.95
Čvrstoća pri savijanju	1.58	0.85
"Pull-off" čvrstoća veze	1.33	1.18



Slika 13. Kategorizacija podloge u zavisnosti od ITS vrednosti [22]

5. ZAKLJUČAK

U radu je istaknuta mogućnost primene poroznih betonskih ploča za bolje upravljanje oticajem površinskih i atmosferskih voda u urbanim sredinama.

U tu svrhu napravljeni su betoni sa recikliranim otpadnim materijalima, u cilju promocije održivog razvoja.

Prva faza istraživanja prikazanih u radu dala je širok spektar svojstava poroznih ploča izrađenih sa lakim agregatom i neutralom. Na osnovu ovih ispitivanja, mogu se izvesti zaključci da dolazi do izvesnog pada vrednosti čvrstoće pri pritisku i čvrstoće pri savijanju od 46% pri zameni cementa neutralom u masenom iznosu od 30%, odnosno do pada vrednosti nosivosti poroznih betonskih ploča sa lakim agregatom u iznosu od 34% pri istom procentu zamene. Ispitivanja su pokazala i pad otpornosti na simultano dejstvo mraza i soli, kao i na habanje brušenjem. Svi rezultati

ispitivanja iz ove prve faze ukazali su na potrebu za korekcijom sastava betonskih mešavina od kojih su sastavljene porozne betonske ploče.

U drugoj fazi izvršena je modifikacija u sastavu, ali i karakteru doziranog neutrala, da bi se dobili rezultati koji odgovaraju graničnim vrednostima koji se mogu preporučiti za upotrebu kod pešačkih površina, trgova, pešačkih staza i parkova, uz napomenu da je potrebna dalja modifikacija optimizacijom sadržaja dodatka, upotrebom drugih materijala i njihovim odnosima u recepturi. Svakako su dobijene vrednosti otpornosti na habanje brušenjem više oko 42% nego u prvoj fazi.

Konačno, treba naglasiti da u kontekstu održivog razvoja posebno ohrabrujuće deluje mogućnost delimične zamene cementa mineralnim dodacima koji predstavljaju industrijske otpadne materijale. Kroz ovakvu zamenu ostvaruje se: značajan doprinos očuvanju životne sredine, smanjenje emisije štetnih gasova, očuvanje prirodnih neobnovljivih resursa, smanjenje potrošnje energije i manji udeo zemljišta koji zauzimaju deponije.

6. ZAHVALNOST

Ovo istraživanje podržano je od strane Fonda za nauku Republike Srbije, 7737365, Koncept "0 otpada" za gradove otporne na kišne poplave - Ø-Waste-Water i Ministarstvo nauke, inovacija i tehnološkog razvoja Republike Srbije (broj granta 200092).

LITERATURA

- [1] Mehrdad Jafari Salim, GIScience for Sustainable Development, Journal of Geographic Information System, 9, 482-492, 2017.
- [2] Savić Aleksandar, Broćeta Gordana, Jelić Ivana, Aškračić, Marina, Green Concrete and Mortar Made with Recycled Aggregate – a Step towards Sustainability in Civil Engineering, Plenary lecture, IRASA International Scientific Conference SETI IV, Book of Proceedings, 62-81, 2022.
- [3] Broćeta Gordana, Malešev Mirjana, Radonjanin Vlastimir, Trajnost samougrađujućeg betona u funkciji primijenjene vrste agregata, Monografija, Univerzitet u Banjaluci, Arhitektonsko-građevinsko-geodetski fakultet, Banjaluka 2021.
- [4] Blenkinsop, S.; Muniz, L.; Smith, A. J. P. Climate Change Increases Extreme Rainfall and the Chance of Floods. Sci. Br. Rev, 1–5. 2021.
- [5] SRPS EN 206 Beton – Specifikacija, performanse, proizvodnja i usaglašenost
- [6] <https://www.yunirisk.com/mid-mix/>, poslednji put pristupljeno 07.11.2023.
- [7] Sprouse, C. E.; Hoover, C.; Obritsch, O.; Thomazin, H. Advancing Pervious Pavements through Nomenclature, Standards, and Holistic Green Design. Sustain. 2020, 12 (18).
- [8] Newman J, Owens P. Advanced Concrete Technology - Processes Newman J, Choo B S, editors. Oxford: Elsevier Ltd.; 2003
- [9] John L. Clarke – Structural Lightweight Aggregate Concrete, CRC Press, 1993.
- [10] RILEM. Functional classification of lightweight concretes: Recommendation LC2. 2nd ed.;1978.
- [11] Parezanović Aleksandra, Kiana Ehsan, Rajović Andrijana, Govedarica Ognjen, Aškračić Marina, Radević Aleksandar, Savić Aleksandar, Zakić Dimitrije, Investigation of the mechanical, hydrophysical and thermotechnical properties of porous lightweight aggregate concrete, Zbornik radova XXVIII kongres DIMK i IX kongres SIGP sa Međunarodnim simpozijumom o istraživanjima i primeni savremenih dostignuća u građevinarstvu u oblasti materijala i konstrukcija, Društvo za ispitivanje i istraživanje materijala i konstrukcija Srbije I Udruženje savremene industrije glinenih proizvoda Srbije, 433-442, 2022.
- [12] G. Topličić-Ćurčić, D. Grdić, N. Ristić: „Ekološki značaj, sastav i svojstva propusnog betona“, Građevinski materijali i konstrukcije, (15-27), 2016
- [13] American Concrete Pavement Association: “Stormwater Management with Pervious Concrete Pavement”, Concrete Information.
- [14] T. Ahmed, S. Hoque, Study on pervious concrete pavement mix designs, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 476:1-9 2020.
- [15] Lucas Niehuns Antunes, Enedir Ghisi, Roni Matheus Severis: „Environmental assessment of a permeable pavement system used to harvest stormwater for non-potable water uses in a building“,
- [16] Paul James Harber: “Applicability of No-Fines Concrete as a Road Pavement”, University of Southern Queensland, Faculty of Engineering and Surveying, 2015.
- [17] <https://liapor.rs/proizvodi/>, poslednji put pristupljeno 07.11.2023.

- [18] Marina Aškračić, Dimitrije Zakić, Aleksandar Savić, Ljiljana Miličić, Ivana Delić-Nikolić, Martin Vyšvařil, Determination of the Salt Distribution in the Lime-Based Mortar Samples Using XRF and SEM-EDX Characterization, Conservation and Restoration of Historic Mortars and Masonry Structures, RILEM publications, pp. 542-553, 2023.
- [19] Govedarica, O.; Aškračić, M.; Hadnađev-Kostić, M.; Vulić, T.; Lekić, B.; Rajaković-Ognjanović, V.; Zakić, D. Evaluation of Solidified Wastewater Treatment Sludge as a Potential SCM in Pervious Concrete Pavements. *Materials* (Basel). 2022, 15 (14). <https://doi.org/10.3390/ma15144919>.
- [20] Marina Aškračić, Aleksandar Radević, Aleksandar Savić, The role of permeable products in the paving of urban environment in the light of sustainable use of resources, Proceedings of the 11th International Conference on the Renewable Electrical Power Sources, pp. 301-307, 2023.
- [21] Milica Stojković, Marina Aškračić, Aleksandar Radević, Aleksandar Savić, Dimitrije Zakić, Solidified waste water treated sludge as partial replacement of cement in concrete composites, Proceedings of the 20th International Symposium Resilient structures, Macedonian association of structural engineers, pp. 1151-1160, 2023.
- [22] Bonicelli, A.; Arguelles, G. M.; Pumarejo, L. G. F. Improving Pervious Concrete Pavements for Achieving More Sustainable Urban Roads. *Procedia Eng.* 2016, 161, 1568–1573. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.628>.

POSSIBILITY OF APPLICATION OF POROUS CONCRETE PANELS MODIFIED WITH WASTE MATERIALS IN URBAN ENVIRONMENT

by

Aleksandar SAVIĆ, Aleksandar RADEVIĆ, Marina AŠKRABIĆ, Ognjen GOVEDARICA,
Vladana RAJAKOVIĆ-OGNJANOVIĆ, Dimitrije ZAKIĆ
Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade, Serbia

Summary

Global climate change, as a result of human actions, leads to significant negative effects, such as the depletion of natural resources, environmental pollution and imbalance. In response to the mentioned phenomena, the concept of sustainable development appeared, which implies that natural resources and created goods are used in such a way that the needs of current generations are met, without the risk that meeting the needs of future generations will be threatened.

One of the aspects of sustainable development is recycling, and in this context, construction is a suitable industrial branch. The possibility of applying cement composites with recycled materials multiplies the progress towards sustainable development and the concept without waste, because on the one hand it disposes of waste, and on the other hand it reduces the use of natural resources and the emission of harmful

substances (primarily carbon dioxide) into the environment.

The paper shows porous concrete slabs, made with recycled materials (neutral) and their possibility of application in urban areas, when there is a possibility of flooding, controlling the amount of atmospheric precipitation that remains on the surface in those areas, as well as the direction and character of their further care.

The presented solution of the panels met the criteria in terms of volumetric mass, compressive strength, bending strength, water absorption and permeability, but their further development is needed in terms of resistance to wear and resistance to the effects of frost and salt.

Key words: sustainable development, recycling, concrete, physical-mechanical properties