

Radević Aleksandar¹
Škondrić Marina²
Govedarica Ognjen³
Lekić Branislava⁴
Naunović Zorana⁵
Rajaković-Ognjanović Vladana⁶

PREDNOSTI UPOTREBE MODIFIKOVANIH POROZNIH BETONA ZA POPLOČAVANJE U URBANIM SREDINAMA

0352-2733, 56 (2024), p. 80-106
doi: 10.5937/GK24056080R

UDK: 666.974:539.217
ORIGINALNI NAUČNI RAD

Rezime

Zbog povećanja nivoa urbanizacije gradova i njihovog šireg okruženja, planeta je izložena višem nivou poplava nego što je to bio slučaj prethodnih decenija. Jedan od načina da se ublaže štetni efekti koje urbanizacija gradova ima kako na pojavu poplava, tako i na globalne klimatske promene, jeste upotreba poroznih betonskih ploča spravljenih sa recikliranim materijalima. Pravilnom upotrebom poroznih ploča može se unaprediti kontrola atmosferskih padavina, u smislu usmeravanja vode koja otiče i skupljanja štetnih materija koje atmosferske vode nose.

U radu su prikazane karakteristike poroznih betonskih ploča, izrađenih sa različitim recikliranim materijalima (neutral, leteći pepeo). Reciklirani materijali i nus proizvodi industrije korišćeni su kao delimična (ili potpuna) zamena za cement. Delimična zamena cementa različitim nus proizvodima, vršena je u količinama 0-30%. Rezultati ispitivanja pokazuju da sa povećanjem sadržaja nus proizvoda većima mehaničkih karakteristika poroznih betona opada. Ipak, u zavisnosti od ispitivane betonske mešavine, moguće je odrediti optimalan sadržaj nus proizvoda, tako da mehaničke karakteristike zadovolje zahtevane tehničke propise, uz ekološke prednosti upotrebe takvih betona. Ispitivanja fizičkih i mehaničkih karakteristika su se odnosila na parametre: zapreminske mase, čvrstoće pri pritisku, čvrstoće pri savijanju i upijanja vode.

¹ Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu

² Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu

³ Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu

⁴ Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu

⁵ Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu

⁶ Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu

Ključne reči: porozni betonski kolovozi, porozne betonske ploče, urbane poplave, fizičke i mehaničke karakteristike betona

THE ADVANTAGES OF USING MODIFIED POROUS CONCRETE FOR PAVING IN URBAN AREAS

Summary

Due to the increasing level of urbanization in the cities and their surrounding areas, the planet is exposed to a higher level of flooding than in previous decades. One way to mitigate the harmful effects that urbanization has on both flooding and global climate change is the use of porous concrete slabs made with recycled materials. Proper use of porous slabs can improve the control of atmospheric precipitation by directing runoff water and collecting harmful substances carried by rainwater.

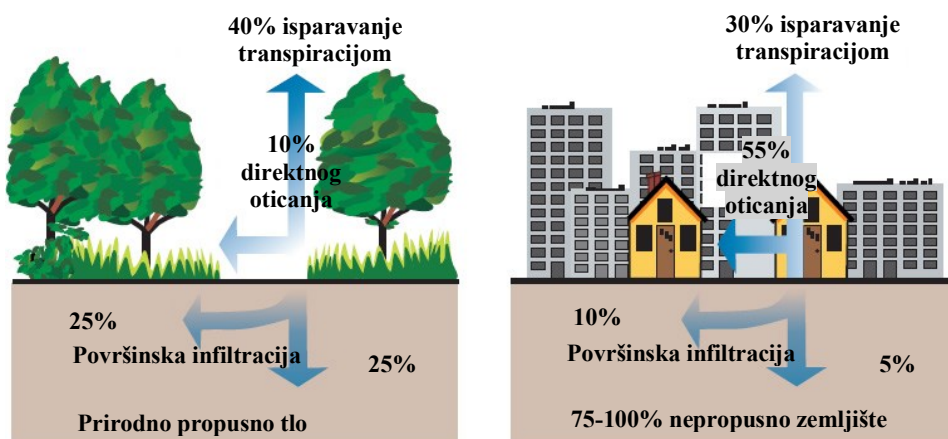
This paper presents the characteristics of porous concrete slabs made with various recycled materials (neutral, fly ash). Recycled materials and by-products from industry were used as partial replacements for cement. The partial replacement of cement with different by-products was performed in quantities ranging from 0-30%. The results of the tests show that as the content of by-products increases, the mechanical properties of porous concrete decrease. However, depending on the specific concrete mix being tested, it is possible to determine the optimal content of by-products so that the mechanical properties meet the required technical regulations, while still providing ecological benefits from the use of such concretes. Testing of physical and mechanical properties was conducted to determine parameters such as bulk density, compressive strength, bending strength and water absorption.

Keywords: Porous concrete pavements, porous concrete slabs, urban flooding, and the physical and mechanical properties of concrete

1. UVOD

U poslednjim decenijama svedoci smo klimatskih promena i sve češćih pojava intenzivnih atmosferskih padavina. U prirodnim uslovima deo atmosferske vode koji se zadrži na površini vremenom ispari, dok se veći deo infiltrira kroz tlo, nadopunjava podzemne vode ili apsorbuje i prirodnim putevima odvodi do rečnih tokova.

Sve intenzivnije migracije stanovništva iz sela u gradove dovode do ubrzane izgradnje, koja za posledicu ima smanjenje zelenih površina čije mesto zauzimaju objekti zgradarstva, industrijski i saobraćajni objekti. Na taj način veliki deo površine tla biva pokriven vodonepropusnim slojevima: krovni pokrivači, asfaltne i betonske površine, koje zahtevaju adekvatno odvođenje vode sa ovih površina. Tako kapaciteti već izgrađenih sistema za odvodnjavanje vode vremenom postaje nedovoljni, što za posledicu ima pojavu poplava u gradskim sredinama. Problem postaje još veći u slučaju obilnih padavina kada količina vode koja se sliva sa nepropusnih površina postane sve veća, što posledično utiče i na proporcionalni rast same brzine vodenog toka. U tom slučaju vreme tokom kojeg se atmosferska voda zadržava na jednom mestu je mnogo duže nego isto to vreme u nekoj prirodnoj sredini, pa to sve dovodi do poplavljanja donjih delova slivova. Na slici 1 prikazan je uticaj urbanizacije na direktno oticanje atmosferskih padavina, a na slici 2 direktne posledice neadekvatnog oticanja površinskih voda.



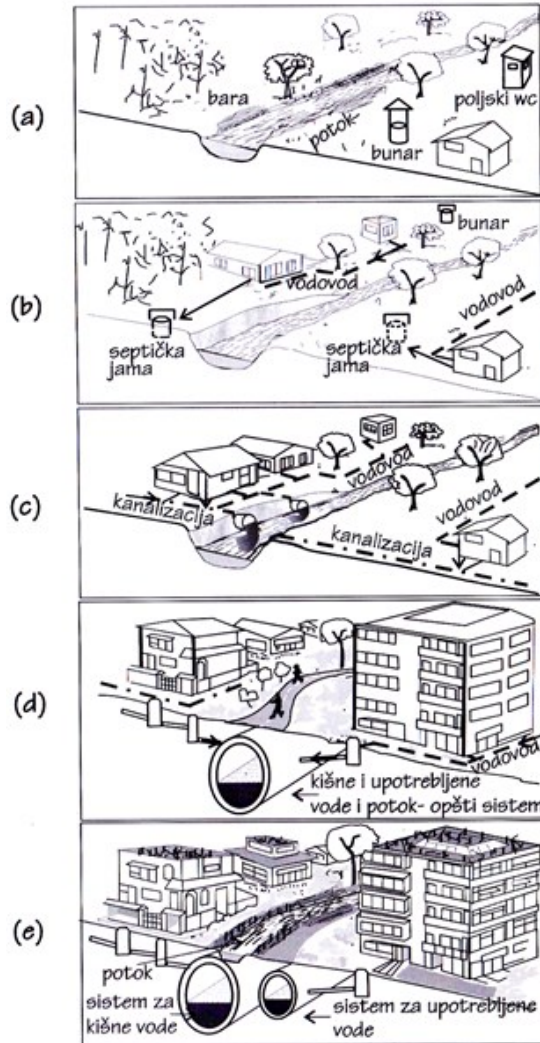
Slika 1. Uticaj urbanizacije na direktno oticanje atmosferskih padavina: pre izgradnje (levo), posle izgradnje (desno)[1]



Slika 2. Poplave u Beogradu nakon obilnih padavina

Organizovano i sistematsko prikupljanje otpadnih voda primenjivalo se još od davnih vremena, ali razvoj podzemnih sistema za prikupljanje otpadnih voda, kakve danas poznajemo, datira iz 19. veka, prvo u Zapadnoj Evropi, a ubrzo nakon toga i u Severnoj Americi. Razvoj ovakvih kanalizacionih sistema bio je pod uticajem brzog razvoja gradova tokom industrijske revolucije i čestih epidemija vezanih za vodu u gradovima zbog njihove prenatrpanosti i neadekvatne sanitarne zaštite. Slika 3 prikazuje razvoj sistema za snabdevanje vodom i prikupljanje otpadnih voda.

Na početku je vodosnabdevanje bilo individualno rešavano, kao i odlaganje otpadnih voda. Sa porastom urbanizacije, uvedeni su javni sistemi za snabdevanje vodom, dok je odlaganje otpadnih voda ostalo decentralizovano. Podzemni sistemi za prikupljanje otpadnih voda uvedeni su krajem 19. veka, pretežno iz sanitarnog razloga, kako bi se zaštitio ljudski kontakt sa zagađenim i inficiranim otpadnim vodama. Kombinovani kanalizacioni sistemi primenjeni su da zajednički transportuju domaće otpadne vode i kišnicu kroz iste cevi. Potreba za prečišćavanjem otpadnih voda postavljena je ubrzo nakon što je primećeno da prirodne prijemne vode nisu dovoljno aerisane da efikasno obrade sav organski otpad koji je ispuštan iz kanalizacionih sistema u jezera, reke i potoke koji su u isto vreme korišćeni za snabdevanje vodom (20. vek). Savremena praksa prečišćavanja otpadnih voda ukazala je na potrebu za razdvajanjem kombinovanog kanalizacionog sistema na odvojene sisteme (gde domaće otpadne vode idu kroz jedan set kanalizacije, dok kišnica ide kroz drugi set kanalizacije) kako bi se zaštitile fabrike za prečišćavanje otpadnih voda od dodatnih hidrauličkih opterećenja koja dolaze od kišnih voda koje nastaju tokom padavina.



Slika 3. Evolucija sistema odvodnjavanja

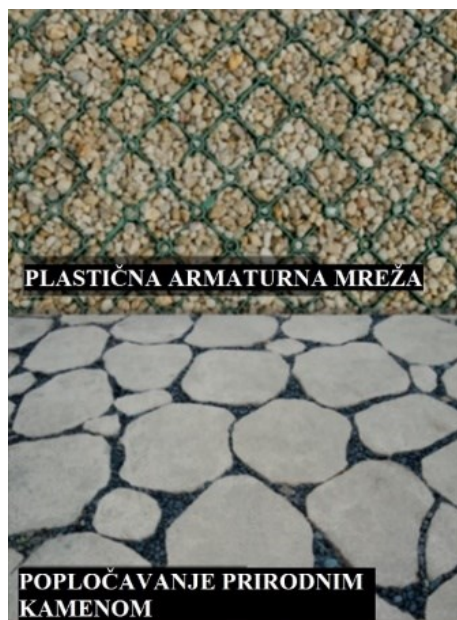
Ograničenja postojećih sistema urbanog odvodnjavanja izazivaju interesovanje za zelenu infrastrukturu koja može ublažiti efekte urbanih poplava. Metode i rešenja pomoću kojih se postiže "zelenija infrastruktura" mogu biti [2]:

- Očuvanje zelenih površina – ovo rešenje ima višestruku korist. Osim već pomenutog prirodnog načina odvodnjavanja, zelene oaze u sred urbane sredine doprinose i kvalitetu vazduha, raznolikosti prirode, a služi kao i prostor za rekreaciju.

- Kišne bašte – dekorativne baštice koje služe za sakupljanje atmosferskih voda. Dospela voda se filtrira kroz zemljište i pomoću biljaka, dok se višak vode odлива pomoću projektovanih kanala.
- Bioretenzioni vrtovi – slično kao i kišne bašte, samo sa većom površinom. Poseduju i sistem odvodnjavanja isfiltrirane vode ispod drenažnog sloja, kao i ventil pomoću koga se reguliše nivo vode u vrtu, kako bi stvorili optimalni uslovi za uzgoj biljaka.
- Zeleni krovovi – specijalni krovovi sa biljkama i zemljištem koji filtriraju i usporavaju atmosfersku vodu koja dospe na njih.
- Drenažni kanali za odvodnjavanje kišnice – plitki kanali za odvodnjavanje kišnice. Usporedno usporavaju brzinu odvodnjavanja, filtriraju i povećavaju upijanje kišnice u zemlju.
- Burad za prikupljanje kišnice – prikupljanje kišnice za kasnije korišćenje, uglavnom navodnjavanje.
- Veštačke močvare – konstruisane da se ponašaju kao i prirodne močvare, da sakupljaju, filtriraju prikupljenu kišnicu koja se apsorbuje u zemljište.
- Propusni betoni/asfalti – dozvoljavaju atmosferskoj vodi da prođe kroz podlogu u drenažni sloj ispod. Može biti uklopljen i sistem cevi za odvodnjavanje viška atmosferske vode.
- Restauracija tokova – vraćanje oštećenih tokova u krivudavu putanju sa raznolikom vegetacijom. Rezultat toga je da tokovi mogu da prime znatno više atmosferske vode.

U sferi saobraćajne infrastrukture u urbanom okruženju, implementacija principa održivog razvoja zahteva da se tradicionalne (energetski zahtevne) procedure izgradnje transformišu na način da se smanji njihov uticaj (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 4. 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.



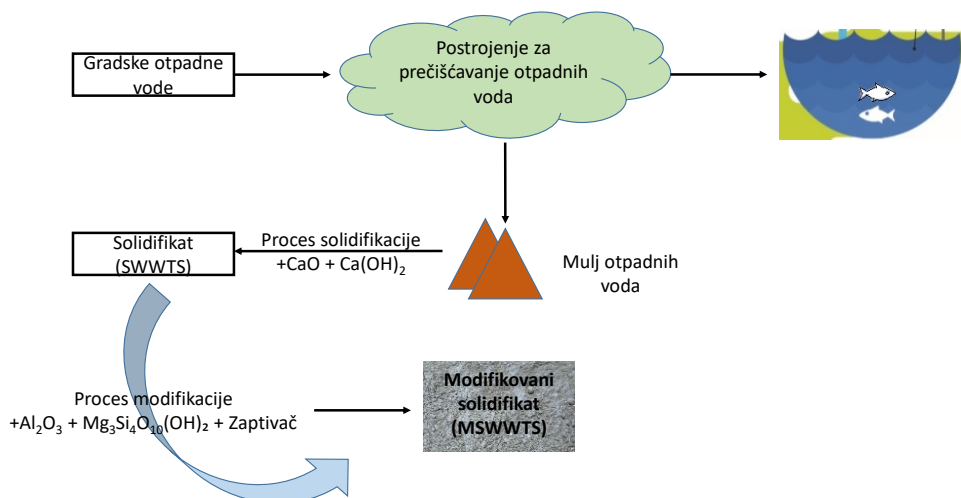
Slika 4. Najčešći tipovi poroznih podloga [3]

Dodatni problem predstavlja i činjenica da atmosferska voda koja se sliva sa vodonepropusnih površina u sebi može sadržati i štetne materije. Imajući u vidu da se u većini slučajeva kišnica u urbanim sredinama

direktno odvodi u rečne tokove ovo potencijalno štetno može uticati i na bio-diverzitet rečnog toka. Zato je ogromna prednost svih prethodno navedenih rešenja, da se kišnica na mestu gde padne, odmah uključi u proces filtracije i apsorpcije u tlo, ili da se sakuplja i naknadno podvrgne tretmanu pročišćavanja.

Osnovni cilj eksperimentalnih istraživanja prikazanih u ovom radu bio je da odgovori na hitnu potrebu za održivim rešenjima u kontekstu sve većeg rizika od poplava izazvanih urbanizacijom i klimatskim promenama, uz istovremeni ekološki aspekt kroz upotrebu različitih otpadnih materijala kao komponenti za spravljanje betona.

Jedan od nusproizvoda koji nastaje tokom procesa prečišćavanja otpadnih voda je mulj od prečišćavanja otpadnih voda. Mulj se obično tretira u drugom koraku kroz različite procese, od kojih je jedan solidifikacija. Solidifikovani mulj od prečišćenih otpadnih voda (SWWTS), takođe poznat kao neutral, je belo-sivi inertni granularni prah koji se može odložiti na deponiju za neopasan otpad. Dalje poboljšanje mogućnosti primene SWWTS postignuto je njegovim mešanjem sa mineralnim aditivima: aluminijum-oksidiom, magnezijum-silikat-hidratom i zaptivačem, i označeno je kao MSWWTS (slika 5). U poslednjim godinama sprovedeni su različiti pokušaji kako bi se zaustavilo deponovanje ovog materijala, kao i da se on iskoristi kao komponentni material za spravljanje betonskih mešavina [4].



Slika 5. Proces dobijanja neutrala i modifikovanog neutrala

Još jedan otpadni material koji u poslednjim decenijama nalazi veliku primenu u industriji proizvodnje betona, zbog svojih pucolanskih svojstava je i leteći pepeo – fly ash. Leteći pepeo nastaje prilikom sagorevanja uglja u termoelektranama i sakuplja se iz izduvnih gasova pomoću mehaničkih i elektrostatičkih separatora.

2. POROZNI BETONSKI KOLOVOZI

2.1 Struktura poroznih betonskih kolovoza

Propusni (porozni) beton se pravi od krupnog agregata, vode i veziva. U poređenju sa običnim betonom, glavna razlika je u izostavljanju manjih čestica poput peska, što omogućava stvaranje većeg procenta krupnijih pora (slika 6). Idealni su za pešačke i biciklističke staze, kao i za parkinge. Budući da opterećenje na parking mestima može biti značajno, to diktira debljinu i precizniju strukturu ovih ploča i celokupnog sistema. Propusne betonske ploče treba da zadovolje dva kriterijuma koja su po svojoj prirodi suprotna:

- da omoguće prolaz vode kroz šupljine, a ako je moguće, i zadrže fine sitne čestice, što se postiže poroznom strukturom betona i
- da izdrže saobraćajna opterećenja, iako imaju poroznu strukturu, koja direktno za posledicu ima smanjenje čvrstoće pri pritisku

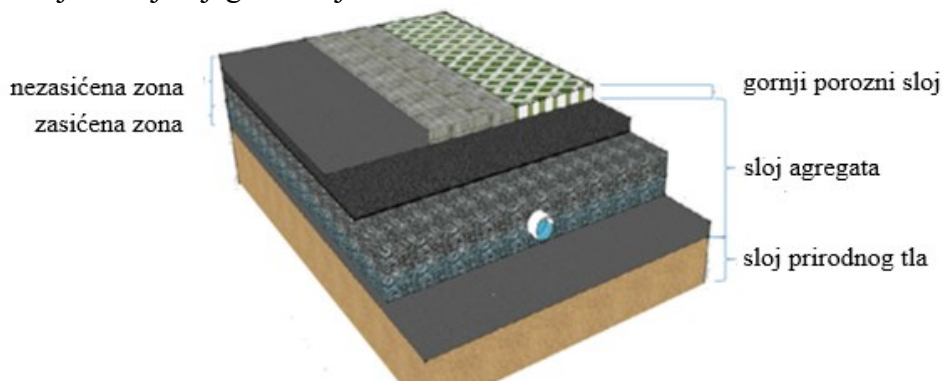


Slika 6. Penetracija vode u propusnom i običnom betonu [5]

Smatra se da procenat šupljina u poroznim betonima treba da bude između 15% i 30%, kako bi se postigla zadovoljavajuća nosivost, ali i vodopropusnost ovakvih ploča. Pored šupljina, odnosa vode i cementa, svojstva cementne paste, veličine zrna agregata i dodaci koji se koriste imaju veliki uticaj na osobine propusnog betona [6].

Za pravilno funkcionisanje poroznih površina, osim osobina pojedinih proizvoda, važno je i formiranje celokupnog sistema, koji se sastoji od

nekoliko različitih slojeva, zavisno od vrste i namene elementa. Na slici 7 prikazan je poprečni presek kolovoza koji omogućavaju apsorpciju vode kroz habajući sloj i njegovu dalju drenažu kroz telo kolovoza.



Slika 7. Poprečni presek poroznog kolovoza [7]

Habajući sloj koji je izložen spoljnim uslovima je napravljen od propusnog betona. Važno je da ovaj sloj ima dovoljnu nosivost da izdrži saobraćajno opterećenje, kao i dovoljnu trajnost da podnese različite ekstremne uslove kojima će biti izložen tokom eksploatacije. Debljina habajućeg sloja od poroznih betona se obično kreće u granicama 10-15 cm, a poroznost ovakvih betona 15-25% [8,9]. Ispod habajućeg sloja (poroznih betonskih ploča) izvodi se nevezani noseći sloj od agregata krupnoće 4/8 mm u debljini od 3-4 cm, koji služi kao ravnaјуći sloj. Ispod sloja sitnozrnog agregata izvodi se nevezani sloj krupnijih frakcija agregata npr. 31.5/63 mm koji ima ulogu drenažnog sloja. Ovaj sloj akumulira vodu koja prolazi kroz sloj propusnog betona i transportuje je u zemlju ili u sistem za odvodnjavanje vode. Poroznost ovog sloja obično je između 20% i 40% [8], dok je debljina nevezanog sloja obično preko 20 cm. Nevezani noseći sloj se obično odvaja od prirodnog tla geotekstilnom membranom kako bi se sprečio transpor sitnih čestica tla između zrna agregata u nevezanom sloju. Ako se ovaj sistem primenjuje za pešačke ili biciklističke staze, gde su saobraćajna opterećenja znatno manja, debljina ovih slojeva može biti manja [9].

Kako bi se obezbedio efikasan prolaz vode kroz šupljine u poroznom betonu, prečnik pora treba da bude između 2 i 8 mm. Ukoliko posmatramo strukturu poroznih betona jasno se mogu uočiti tri vrste šupljina-pora: zatvorene, otvorene i povezane pore. Otvorene pore omogućavaju vodi da prodre unutar strukture betona i bitno utiču na čvrstoću betona, dok povezane pore igraju ključnu ulogu u drenaži vode kroz beton. Ukupna

poroznost često uključuje 10-20% zatvorenih pora i 80-90% efektivnih, tj. povezanih pora. Broj, razmak, oblik i veličina pora u poroznom betonu direktno utiču i na disipaciju energije u betonu usled spoljašnjeg opterećenja. Veće pore povećavaju koncentraciju napona, smanjujući žilavost, što dovodi do bržeg propadanja betonske strukture [10]. Stoga je potrebno odabrati odgovarajuću cementnu pastu i agregat dovoljno velikih dimenzija kako bi se realizovala osnovna funkcija propusnog betona.

2.2 Komponentni materijali

Kao što je prethodno rečeno sa porastom poroznosti betona opada njegova čvrstoća pri pritisku, pa ona kod ovakvih betona može imati vrednosti od 2-28 MPa. Da bi se dobile što bolje mehaničke karakteristike poroznog betona, uz zadržavanje njegove osnovne funkcije – drenaže vode, potrebno je održati vodocementni faktor u granicama od 0,26 do 0,45. Prethodna istraživanja su pokazala da debljina sloja cementne paste koja obavlja zrna agregata, igra ključnu ulogu sa aspekta hidrauličnih i strukturnih osobina propusnog betona. Generalno, maseni odnos količine agregata i cementne paste kreće se u granicama od 4 do 6.

Kako bi se zadovoljile zahtevane karakteristike sa aspekta trajnosti i mehaničkih karakteristika poroznih betona, uz zadržavanje zadovoljavajuće propusnosti za vodu posebna pažnja se mora obratiti prilikom izbora komponentnih materijala.

2.1.1 Agregat

Agregat čini osnovnu strukturu poroznog betona i direktno utiče na njegovu čvrstoću. Da bi se obezbedila dovoljna vodopropusnost i dobra mehanička svojstva, treba koristiti jednu, a najviše dve različite frakcije agregata. U tu svrhu obično se koriste zrna agregata krupnoće 10-20 mm ili 5-10 mm [11]. Poznato je da nepravilan oblik zrna omogućava bolju adheziju između zrna agregata i cementne paste, što doprinosi povećanju čvrstoće ovakvih betona. Vodopropusnost poroznih betona se poboljšava upotrebom drobljenih zrna agregata sa što više ivica. Takođe, sa smanjenjem veličina zrna agregata poboljšavaju se mehanička svojstva poroznih betona, uz istovremeno smanjenje koeficijenta filtracije [10].

Kao agregat za spravljanje poroznih betona obično se koriste prirodni drobljeni agregati različitog porekla: krečnjaci, dolomiti, andeziti i sl. Pored prirodnih agregata mogu se koristiti i neki veštački agregati: različite vrste lakih agregata, reciklirani beton, reciklirana opeka, gumeni agregat, kao i industrijski nusproizvodi: bakarna šljaka, čelična šljaka itd. [11].

2.2 Projektovanje betonskih mešavina za porozne betone

Propusni beton se obično projektuje sa sadržajem šupljina u opsegu od 15 do 30%. S obzirom na to da agregati čine 70-80% zapremine poroznih betona, veoma je važno u prvom koraku projektovanja betonske mešavine odrediti karakteristike odabranog agregata. To se pre svega odnosi na izbor krupnoće agregata, njegove zapreminske i specifične masu, sadržaj šupljina, upijanje vode i ukupni sadržaj vlage. U zavisnosti od granulometrije odabranog agregata, može se razmotriti primena ograničenih količina sitnog agregata ($d \leq 4$ mm). U nekim slučajevima, upotreba peska može povećati čvrstoću betona i poboljšati njegovu trajnost. Sa druge strane upotreba peska smanjuje sadržaj šupljina i propusnost poroznog betona, ali ako se adekvatnim izborom količine sitnog agregata i dalje može obezbediti zadovoljavajuća vodopropusnost. U prethodno navedenom slučaju sadržaj peska se kreće od 5-10% u odnosu na ukupnu masu agregata. Kod krupnozrnih agregata sadržaj šupljina varira u granicama od 35-45%. Logično u mineralnim mešavinama agregata sadržaj šupljina se znatno smanjuje, jer sitnije frakcije agregata popunjavaju šupljine između krupnijih frakcija agregata.

U drugom koraku, potrebno je odrediti zapreminu cementne paste (V_p). Zapremina cementne paste V_p se može odrediti ukoliko je poznat sadržaj šupljina između zrna agregata ($V_{s,a}$) i projektovani sadržaj šupljina u betonu ($V_{s,b}$) [12]:

$$V_p = V_{s,a} + CI - V_{s,b} \quad (1)$$

gde CI predstavlja indeks zbijenosti propusnog betona. Vrednost indeksa zbijenosti može se usvojiti u granicama 1-2% za slučaj intenzivnijeg kompaktiranja betona, odnosno od 7-8% za slučaj slabijeg kompaktiranja betona u procesu njegove ugradnje. U svakom slučaju više vrednost CI će rezultirati većim zapreminama cementne paste.

Vodocementni faktor ($\omega = w/c$) kod poroznih betona kreće se u granicama od 0,27 do 0,36. Ukoliko se za spravljanje betona koriste hemijski dodaci plastifikatori/superplastifikatori, treba usvojiti niže vrednosti vodocementnog faktora 0,27 do 0,30. Smatra se da je odabir optimalnog w/c faktora vrlo važan za propusni beton, jer previše nizak w/c faktor može rezultirati lošom obradivošću i posledično višim sadržajem šupljina nego što je projektovano. Slično tome, previše visok w/c faktor može izazvati zaptivanje šupljina u betonu [13].

U situacijama kada se za spravljanje poroznih betona koristi samo jedna frakcija agregata, proračun količina komponentnih materijala za 1 m³ betona može se sprovesti na sledeći način:

$$V_{s,a} = 1 - \frac{\gamma_a}{\gamma_{s,a}} \quad (2)$$

$$V_a = 1 - \left(\frac{V_p}{100} - V_{s,b} \right) \quad (3)$$

$$m_a = V_a \cdot \gamma_{s,a} \quad (4)$$

$$\frac{V_p}{100} = V_c + V_w \quad (5)$$

$$\frac{V_p}{100} = \frac{m_c}{\gamma_{s,c}} + \frac{\omega \cdot m_c}{\gamma_{s,w}} \quad (6)$$

$$m_w = \omega \cdot m_c \quad (7)$$

gde je:

- γ_a - zapreminska masa agregata,
- $\gamma_{s,a}$ - specifična masa agregata,
- V_a - apsolutna zapremina agregata,
- V_c - apsolutna zapremina cementa,
- V_w - apsolutna zapremina vode,
- V_p - zapreminu cementne paste,
- m_a - masa agregata (kg/m³),
- m_c - masa cementa (kg/m³),
- m_w - masa vode (kg/m³).

3. EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA

3.1 Metodologija

U cilju utvrđivanja mogućnosti upotrebe različitih otpadnih materijala napravljene su tri serije poroznih betonskih ploča. U sve tri serije vršena je delimična zamena cementa odgovarajućim praškastim materijalom – filerom. Kao filer korišćeni su:

- serija 1: solidifikat SWWTS (u količini od 0 i 20% u odnosu na masu cementa),

- serija 2: modifikovani solidifikat MSWWTs (u količini od 0 i 30% u odnosu na masu cementa),
- serija 3: leteći pepeo (u količini od 0 i 20% u odnosu na masu cementa).

3.2 Komponentni materijali

U sve tri faze korišćen je čist portland cement CEM I 52.5 R, voda iz gradskog vodovoda i odgovarajući hemijski dodaci. U sve tri mešavine korišćen je agregat krupnoće 2/4 mm, različitog porekla. Tako je za spravljanje betonskih mešavina *serije 1* korišćen keramzit (ekspandirana glina), u *seriji 2* drobljeni agregat – andezit, a u *seriji 3* drobljeni agregat – dijabaz.

Neutral (solidifikat) generalno predstavlja proizvod dobijen tretmanom (solidifikacijom) sledećih otpada: otpada iz štamparske industrije (8%), otpadnih ulja (7%), otpadne vode iz tehnoloških procesa (14%), otpadnih muljeva i pogača iz industrijskih postrojenja za preradu otpadnih voda (25%), otpadnih muljeva iz metalurških procesa (1%), otpadnih hemikalija i otpada iz hemijske industrije (17%), otpadnih emulzija (11%) i ostalih otpada (7%). U konkretnom slučaju u ovom istraživanju, kao delimična zamena cementa u predmetnim poroznim betonskim pločama korišćen je neutral dobijen tretmanom mulja otpadnih voda (Solidified Waste Water Treated Sludge -SWWTS) kako je to prikazano na slici 5.

U prvoj fazi istraživanja izvršena je hemijska analiza solidifikata (videti tabelu 1), kao potpuno novog materijala koji ranije nije korišćen u betonima.

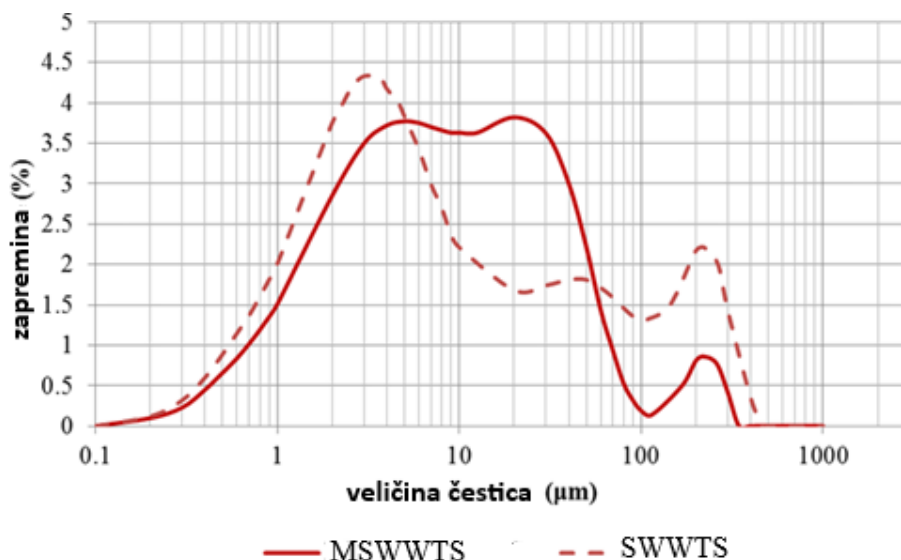
Tabela 1. Hemijski sastav SWWTS [14]

Komponente	Količina (%)
Gubitak žarenjem 1000°C	26.93
SiO ₂	0.14
Al ₂ O ₃	0.14
Fe ₂ O ₃	0.03
CaO	71.70
MgO	0.51
Na ₂ O	0.01
K ₂ O	0.07
SO ₃	0.27
Ostatak	0.20

Modifikacija neutrala izvršena je suvim mešanjem (dodavanjem) aluminijum oksida, magnezijum silikata i hemijskog dodatka (zaptivača), u sledećem odnosu:

- 90% - neutral;
- 6.3% - Al_2O_3 ;
- 3.0% - $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$;
- 0.7% - zaptivač.

Procesom obrade i modifikacije neutrala (SWWTS) dobijaju se fine čestice MSWWTS sa 10% zrna manjih od $1370 \mu\text{m}$, 50% zrna manjih od $8,492 \mu\text{m}$ i 90% zrna manjih od $45,541 \mu\text{m}$. Udeo pojedinih veličina zrna SWWTS i MSWWTS dat je na slici 8. Oba materijala su fino sprasena, sa većinskim udelom čestica sitnijih od 0,1 mm. MSWWTS sadrži veću količinu zrna prečnika između $10 \mu\text{m}$ i $50 \mu\text{m}$ u odnosu na SWWTS, što je posledica mineralnih primesa korišćenih u njegovoj proizvodnji. Zapreminska masa primenjenog MSWWTS iznosila je $1,79 \text{ g/cm}^3$.



Slika 8. Veličina zrna običnog i modifikovanog neutrala

Leteći pepeo koji je korišćen u ovom istraživanju, dobijen je iz termoelektrane "Morava". Na predmetnom letećem pepelu ispitivani su: hemijski sastav, sadržaj teških metala, zapreminska masa u zbijenom stanju, specifična površinu, indeks aktivnosti i raspodela veličine čestica.

Rezultati pokazuju da SiO_2 , Al_2O_3 i Fe_2O_3 čine 83,96% hemijskog sastava ispitivanog uzorka, što je više od 75% (granica za pucolanska svojstva materijala). Najveći sadržaj među teškim metalima je izmeren za

barijum (617 mg/kg). Zapreminska masa u zbijenom stanju iznosi 2,12 g/cm³. Specifična površina iznosi 3710 cm²/g. Indeks aktivnosti na 28 dana je dostigao vrednost 105,2, a na 90 dana 115,0 što znači da je dobijena veća čvrstoća pri pritisku maltera spravljanog sa zamenom cementa pepelom u količini od 25% u odnosu na referentne uzorke. Raspodela veličine čestica pokazala je da je 90% čestica manje od 0,250 mm, dok je 50% čestica manje od 0,05 mm. Dobijeni rezultati pokazuju da predmetni pepeo ima potencijal da se koristi u cementnim kompozitima kao delimična zamena za cement.

Agregat od ekspanzirane gline, proizvođača "Liapor" sa zrnima krupnoće od 1 do 4 mm, sa zapreminskom masom od 900 kg/m³, korišćen je pri proizvodnji uzoraka serije 1.

Nakon ispitivanja osnovnih fizičkih i hemijskih karakteristika pojedinih komponentnih materijala, u drugoj fazi istraživanja pristupilo se spravljanju poroznih betonskih ploča dimenzija 200×200×60 mm. Spravljanje predmetnih ploča sprovedeno je na fabrici "Promobet" iz Mladenovca (videti sliku 9).





Slika 9. Proces proizvodnje poroznih betonskih ploča [15]

3.3 Betonske mešavine

Recepture predmetnih betonskih mešavina date su u tabeli 2.

Tabela 2. Sastavi pojedinih betonskih mešavina

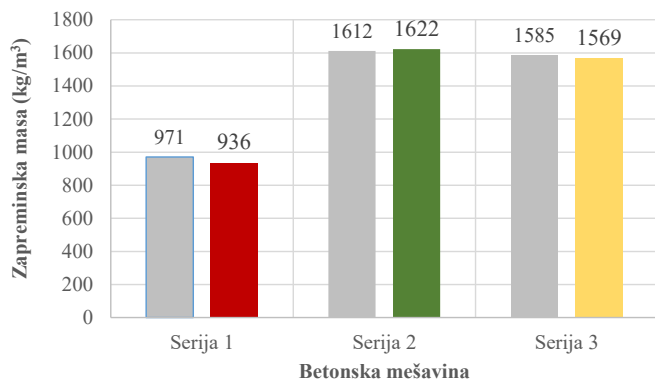
Seriya	Cement	Filer		Agregat		Voda	Dodatak 1	Dodatak 2
	(kg/m ³)	(kg/m ³)		(kg/m ³)		(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)
1	300	SWWTS	0	Liapor	720	90	1.8	0.09
	240		60		720	90	1.8	0.09
2	470	MSWWTS	0	Ande- zit	1175	105	3,5	2,4
	329		141		1175	74	3,5	2,4
3	342	Leteći pepeo	0	Dijabaz	1590	90	1.2	-
	276		66		1590	90	1.2	-

Prilikom spravljanja predmetnih betonskih mešavina, dodavana je i mala količina pigmenata različitih boja kako bi se omogućila proizvodnja poroznih ploča koje će se vizuelno razlikovati od referentnih uzoraka. Na tako dobijenim betonskim pločama sprovedena su sledeća ispitivanja: zapreminska masa u očvrslom stanju, upijanje vode, čvrstoća pri pritisku i čvrstoća pri savijanju.

3.4 Zapreminska masa

Imajući u vidu da su porozne betonske ploče prizmatičnog oblika, zapremina ovih uzoraka određena je na osnovu izmerenih dimenzija svake ploče. Dimenzije i masa uzoraka su merene nakon sušenja do stalne mase. Zapreminske mase predmetnih uzoraka u suvom stanju izračunate su kao količnik mase i odgovarajuće zapremine uzorka i prikazane su na slici 10.

Svetlijom bojom na dijagramu su obeležene referentne mešavine, dok su sa desne strane u odnosu na referentne mešavine prikazani rezultati koji se odnose na odgovarajuće mešavine u kojima je izvršena delimična zamena cementa odgovarajućim filerom.

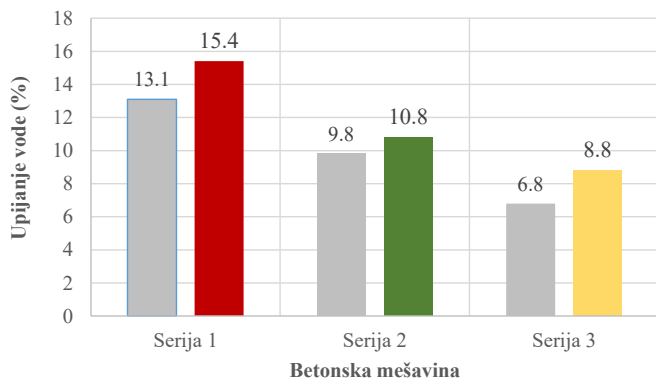


Slika 10. Rezultati ispitivanja zapreminske mase betona

Na uzorcima serije 1 dobijene su značajno niže zapreminske mase u odnosu na uzorke serija 2 i 3, što je i logično, s obzirom da je samo kod uzoraka serije 1 korišćen laki agregat – keramzit. Ukoliko se, uporede vrednosti za svaku seriju zasebno, može se zaključiti da delimična zamena cementa filerom u količinama od 20% i 30% ne utiče značajno na izmerene vrednosti zapreminskih masa.

3.5 Upijanje vode

Za potrebe merenja upijanja vode, vršeno je postepeno potapanje uzoraka u vodu, u sledećim vremenskim intervalima: u prvih sat vremena (1/4 visine uzorka), nakon 1 h (2/4 visine uzorka), nakon 20 h (3/4 visine uzorka) i nakon 24 h (4/4 visine uzorka), nakon čega je izvršeno prvo merenje mase uzoraka zasićenih vodom. Nakon ovog merenja, uzorci su ponovo uronjeni u vodu na još 24 h, nakon čega je ponovo izmerena masa uzoraka. Postupak je ponovljen sve dok nije izmerena ista masa u dva uzastopna očitavanja. Na slici 11 prikazani su dobijeni rezultati ispitivanja.



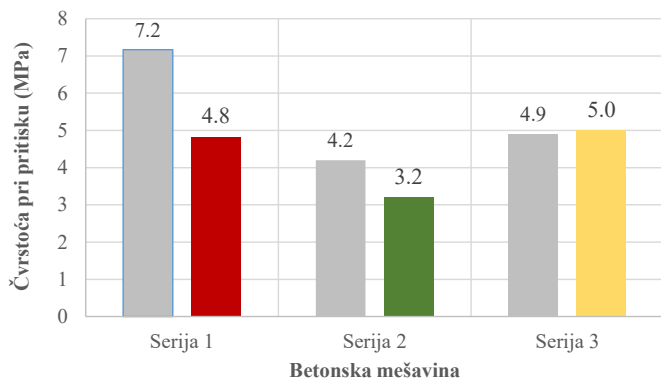
Slika 11. Rezultati ispitivanja upijanja vode betonskih ploča

Na osnovu rezultata prikazanih na slici 11 može se zaključiti da mešavine napravljene sa dodatkom filera SWWTS-a, MSWWTS-a i letećeg pepela (tamniji stubci) imaju nešto veće vrednosti upijanja vode u poređenju sa referentnim mešavinama (svetliji stubci). U poređenju sa referentnim mešavinama, apsolutno povećanje upijanja vode iznosilo je 18%, 10% i 29%, respektivno. Izmerene vrednosti su svakako znatno veće u poređenju sa vrednostima za običan beton i na prvi pogled mogu ukazivati smanjenu trajnosti predmetnih ploča, u poređenju sa referentnim mešavinama pre svega. Ipak, treba imati na umu da su u pitanju porozni kompoziti, i da su isti manje osetljivi na dejstvo niskih temperatura, jer po prirodi stvari zbog svoje velike otvorene poroznosti imaju sposobnost da se u relativno kratkom vremenskom periodu oslobode većeg dela upijene vode, smanjujući na taj način štetne efekte koji mogu nastati u trenutku kada voda promeni agregatno stanje i zaleđi.

3.6 Čvrstoća pri pritisku

Ispitivanje čvrstoće pri pritisku sprovedeno je na prizmatičnim uzorcima (60×60×200 mm) starim 28 dana, dobijenim isecanjem iz ploča (200×200×60 mm). Ispitivanje čvrstoće pri pritisku izvršeno je uskladu sa standardom SRPS EN 12390-3. Prosečne vrednosti rezultata ispitivanja čvrstoće pri pritisku za sve serije prikazane su na slici 12. U mešavinama serije 1 i 2 u kojima je vršena delimična zamena cementa običnim i modifikovanim solidifikatom, uočava se očigledan trend smanjenja čvrstoće pri pritisku u poređenju sa odgovarajućim referentnim mešavinama. U poređenju sa referentnim mešavinama smanjenje čvrstoće pri pritisku iznosi 32% i 24%, respektivno za serije 1 i 2. Očigledan razlog

za ovakvo smanjenje čvrstoće pri pritisku je 20%, odnosno 30% manja količina cementa u mešavinama sa SWWTS-om i MSWWTs-om. Razlike u procentima smanjenja čvrstoće pri pritisku između ove dve serije betona rezultat su izmena u sastavu mešavine. Ako uporedimo samo smanjenje čvrstoće pri pritisku između mešavina serije 1 i serije 2, može se doneti zaključak da je modifikacija SWWTS-a imala određene pozitivne efekte na čvrstoću betona. To bi moglo biti posledica delimično inicirane pucolanske aktivnosti MSWWTs-a (u poređenju sa relativno inertnim SWWTS-om), ali ova pretpostavka mora biti potvrđena budućim istraživanjima pucolanskih svojstava. Za razliku od prethodne dve serije betonskih mešavina, kod betona serije 3 uočava se povećanje čvrstoće pri pritisku u iznosu od 2% u odnosu na referentnu mešavinu. Dobijeni rezultat pokazuje da je zamena cementa letećim pepelom u količini od 20% moguća, uz zadržavanje praktično iste čvrstoće pri pritisku. Razlog za ovako dobro ponašanje betona sa dodatkom letećeg pepela svakako je posledica pucolanske aktivnosti pepela, kao i povoljnog oblika i veličine zrna pepela.

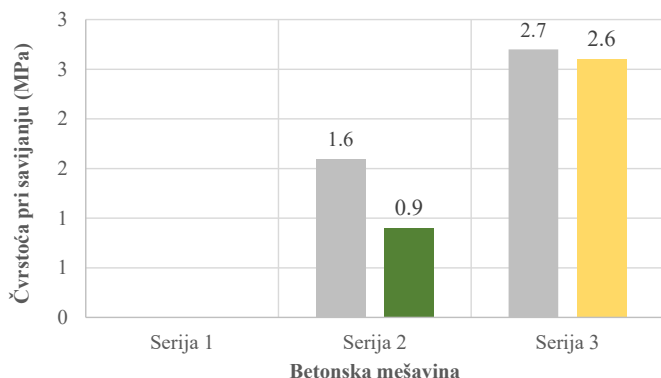


Slika 12. Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku

3.6 Čvrstoća pri savijanju

Čvrstoća pri savijanju ispitana je na prizmatičnim uzorcima približnih dimenzija 60×60×200 mm, koji su dobijeni isecanjem iz ploča, kao što je opisano u tački 3.5. Predmetni uzorci su opterećivani koncentrisanom silom u sredini raspona. Kao i u slučaju ispitivanja čvrstoće pri pritisku, čvrstoća pri savijanju uzoraka napravljenih sa MSWWTs-om bila je niža u poređenju sa odgovarajućom referentnom mešavinom (videti sliku 13), dok je kod mešavine sa letećim pepelom dobijena približno ista vrednost kao kod referentne mešavine. Razlog za ovakvo smanjenje čvrstoće ponovo je

manja količina cementa u mešavini serije 2, odnosno pucolanska aktivnost letećeg pepela u mešavini serije 3.



Slika 13. Rezultati ispitivanja čvrstoće pri savijanju

4. LCA

Procena životnog ciklusa (LCA) je metodologija za procenu uticaja na životnu sredinu koji su povezani sa svim fazama životnog ciklusa komercijalnog proizvoda, procesa ili usluge. Na primer, u slučaju proizvedenog proizvoda, uticaji na životnu sredinu se procenjuju od faze vađenja i obrade sirovina, kroz proizvodnju proizvoda, distribuciju i upotrebu, do reciklaže ili konačnog odlaganja materijala koji ga čine.

Aplikacija CCaLC2 omogućava brze i jednostavne procene uticaja na životnu sredinu i dodate vrednosti duž lanaca snabdevanja. Koristi pristup životnom ciklusu i omogućava procenu sledećih uticaja na životnu sredinu: karbonski otisak (ili potencijal globalnog zagrevanja); vodni otisak; potencijal zakiseljavanja; potencijal eutrofikacije; potencijal smanjenja ozonskog sloja; fotohemijski smog, i potencijal ljudske toksičnosti.

LCA korišćenjem CCaLC2 je izvršena za porozne betonske ploče (PPB) serija 2; u kojima su kao hemijski dodaci korišćeni: Cementol A, Cementol Omega F, Hidrofob M.

S obzirom da je analiza izvršena korišćenjem programa CCaLC2, bilo je potrebno zadati količine materijala potrebne za funkcionalnu jedinicu. U ovom slučaju, funkcionalna jedinica za koju je izvršena analiza je 1 m³ betona. Ova jedinica za mešavinu se koristi za evaluaciju i upoređivanje subjekta sa referentnom mešavinom.

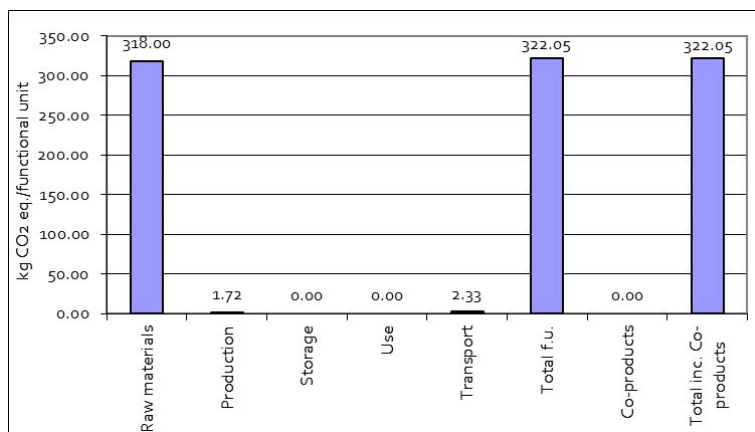
Pored sirovina, za svaku fazu je potrebno navesti energiju koja je korišćena za dobijanje finalnog proizvoda iz faze, kao i otpad koji je dobijen

tom fazom. U slučaju faze mešanja, predviđena je upotreba mešalice za beton od 1 m^3 sa snagom motora od 37 kW i vremenom mešanja od 5 minuta.

Pored svih pomenutih faza, potrebno je definisati transport proizvoda između faza, kao i transport otpadnih materijala do reciklaže (ako je dostupna) ili na označenu deponiju.

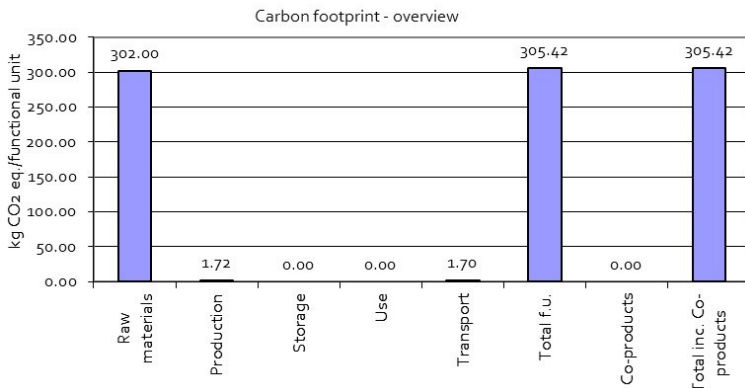
Referentna mešavina je mešavina koja se koristi za proizvodnju drugih tipova betonskih blokova, klasičnih neporoznih betonskih blokova koji se koriste za popločavanje terasa, dvorišta ili drugih javnih površina. Za pravljenje referentne mešavine usvojene su sledeće sirovine: cement u količini od 400 kg/m^3 ; pesak (0/4 mm) u količini od 1000 kg/m^3 ; drobljeni kamen (4/8 mm) u količini od 800 kg/m^3 i voda u količini od 200 kg/m^3 .

Funkcionalna jedinica je ista za obe vrste mešavine, tj. za oba modela proračuna, radi lakšeg upoređivanja rezultata, a to je 1 m^3 . Za lakše i jednostavnije upoređivanje rezultata, sve druge pretpostavke koje su navedene za primer pripreme PPB su takođe uzete u obzir prilikom pripreme referentne mešavine. Faze proizvodnje, skladištenja, upotrebe, kao i transporta i upravljanja otpadom su iste kao i za PPB.



Slika 14. Rezultati karbonskog otiska za referentnu mešavinu

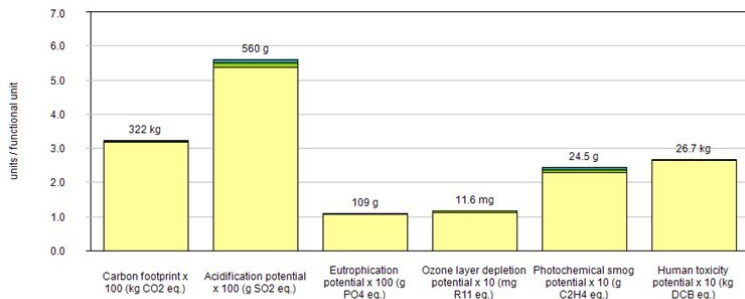
Na slici 14 može se videti da je najveći karbonski otisak prisutan u fazi sirovina i iznosi $318 \text{ kg CO}_2\text{-eq/m}^3$, dok je ukupna količina oko $322 \text{ kg CO}_2\text{-eq/m}^3$.



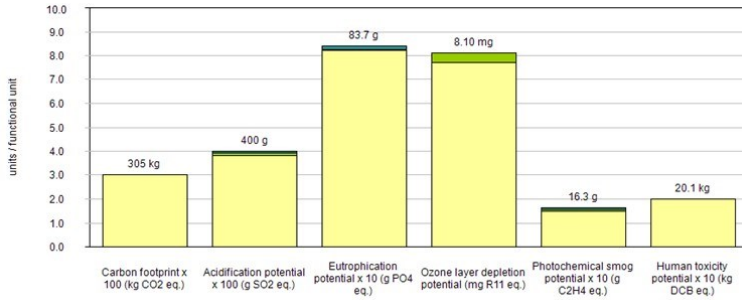
Slika 15. Rezultati karbonskog otiska za PPB

Kao što se vidi u dijagramu na slici 15, najveći procenat emitovanog karbonskog otiska je u fazi sirovina. Ukupna količina karbonskog otiska je 305 kg CO₂-eq/m³, što je 17 kg CO₂-eq/m³ manje nego u slučaju referentne mešavine.

Pogled na više grafika uticaja najbolji je način da se uporede rezultati ekološkog uticaja betonskih ploča sa referentnom mešavinom i PPB. Svaki od prikazanih podataka daje bolje rezultate i manji negativni uticaj na životnu sredinu u slučaju PPB u odnosu na referentne blokove. Rezultati pokazuju vrednosti manje za 5 do 20%. Rezultati sažetih grafika koji daju vrednosti svih rezultata za oba tipa betonskih ploča prikazani su na slikama 16 i 17. Tamni deo predstavlja negativni uticaj na različite aspekte životne sredine u fazi proizvodnje, dok svetli deo predstavlja uticaj faze sirovina. Pored ove dve faze, faze skladištenja, upotrebe i transporta imaju mali uticaj.



Slika 16. Grafikon rezultata za referentne betonske blokove



Slika 17. Grafikon rezultata za referentne betonske PPB

5. ZAKLJUČAK

Sve veće migracije stanovništva iz ruralnih u urbane sredine za posledicu imaju smanjenje odnosno zamenu zelenih površina u gradovima različitim vodonepropusnim materijalima. Ako se u obzir uzmu i ograničenja postojećih sistema urbanog odvodnjavanja, jasno je da za posledicu svega ovoga imamo sve češće poplave u gradovima u situacijama kada dođe do obilnih padavina. Zbog toga je interesovanje za zelenu infrastrukturu koja može ublažiti efekte urbanih poplava sve veće u poslednje vreme. U radu su navedene metode i rešenja pomoću kojih se postiže "zelenija infrastruktura" sa posebnim akcentom na tehnička rešenja upotrebe poroznih betonskih ploča za popločavanje. Dodatan ekološki aspekt prikazan je kroz upotrebu poroznih betonskih ploča spravljenih sa različitim otpadnim materijalima.

U cilju utvrđivanja mogućnosti upotrebe različitih otpadnih materijala napravljene su tri serije poroznih betonskih ploča. U sve tri serije vršena je delimična zamena cementa odgovarajućim praškastim materijalom – filerom. Kao filer korišćeni su:

- *serija 1*: solidifikat SWWTS (u količini od 0 i 20% u odnosu na masu cementa),
- *serija 2*: modifikovani solidifikat MSWWTS (u količini od 0 i 30% u odnosu na masu cementa),
- *serija 3*: leteći pepeo (u količini od 0 i 20% u odnosu na masu cementa).

Na tako dobijenim betonskim pločama sprovedena su ispitivanja različitih karakteristika u očvrslom stanju i dobijeni su sledeći zaključci:

- delimična zamena cementa filerom u količinama od 20% i 30% ne utiče značajno na izmerene vrednosti zapreminskih masa,

- u poređenju sa referentnim mešavinama, apsolutno povećanje upijanja vode iznosilo je 18%, 10% i 29%, respektivno za sve tri serije betona,
- u poređenju sa referentnim mešavinama smanjenje čvrstoće pri pritisku iznosilo je 32% i 24%, respektivno za serije 1 i 2. Očigledan razlog za ovakvo smanjenje čvrstoće pri pritisku je 20%, odnosno 30% manja količina cementa u mešavinama sa SWWTS-om i MSWWTS-om. Kod betona serije 3 uočava se povećanje čvrstoće pri pritisku u iznosu od 2% u odnosu na referentnu mešavinu, što je posledica pucolanske aktivnosti pepela, kao i povoljnog oblika i veličine zrna pepela,
- čvrstoća pri savijanju uzoraka napravljenih sa MSWWTS-om bila je niža u poređenju sa odgovarajućom referentnom mešavinom, dok je kod mešavine sa letećim pepelom dobijena približno ista vrednost kao kod referentne mešavine.

Procena životnog ciklusa (LCA) urađena je za betonske ploče serije 2, ali u odnosu na referentnu mešavinu koja predstavlja neporozni beton, koji se najčešće koristi u praksi za proizvodnju betonskih ploča za popločavanje. Rezultati predmetne analize pokazali su manji negativni uticaj na životnu sredinu u slučaju betona serije 2 u odnosu na referentne betonske blokove. Analizirani paramterij pokazuju vrednosti manje za 5 do 20% u odnosu na referentnu mešavinu.

Unapređenje održive gradnje kroz upotrebu otpadnih materijala u poroznim betonima predstavlja korak napred ka ostvarenju ciljeva održivog razvoja, stvarajući urbane sredine koje su prilagođene klimatskim uslovima, ali istovremeno i bezbedne sa aspekta zaštite životne sredine.

Zahvalnost

Ovo istraživanje je finansirano od strane Fonda za nauku Republike Srbije kroz projekat „Zero-waste concept for flood resilient cities – Ø-Waste-Water” iz poziva IDEJE (ID:7737365) i UNDP programa „EU for Green Agenda in Serbia Circular Economy for Resource Efficiency and Industrial Symbiosis“, kroz projekat „Zero-waste porous pavement alternatives for flood resilient cities“ (ID: 00139323/00129089/2023/3).

6. LITERATURA

- [1] Sullivan, S.; Bowers, R.; Low-Impact Development: Concrete Options for Porous Pavements. Construction Canada. 2013.
- [2] Holm, A. ; Holm, K. E.; Shelton, D. P.; Rodie, S. N.; Feehan K. A. / Franti, T. G. Stormwater Mangement: What Stormwater Management Is and Why It Is Important, University of Nebraska, Lincoln, 2014. „Report on Pervious Concrete,“ Amereican Concrete Institution.
- [3] Sprouse, C. E.; Hoover, C.; Obritsch, O.; Thomazin, H. Advancing Pervious Pavements through Nomenclature, Standards, and Holistic Green Design. *Sustain.* 2020, 12 (18).
- [4] Nakic, D.; Vouk, D.; Serdar, M.; Cheeseman, C.R. Use of MID-MIX® Treated Sewage Sludge in Cement Mortars and Concrete. *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* 2020, 24, 1483–1498. <https://doi.org/10.1080/19648189.2018.1474383>.
- [5] Zhong R., Leng Z., Poon C. “Research and application of pervious concrete as a sustainable pavement material: A state-of-the-art and state-of-the-practice review“, *Construction and Building Materials* 183, 2018. 544-553
- [6] Ramadhansyah P. J., Mohd Ibrahim M. Y., Mohd Rosli H., Mohd Haziman W. I. “A Review of Porous Concrete Pavement: Applications and Engineering Properties“, *Applied Mechanics and Materials* Vol. 554, 2014.
- [7] Kuruppu U., Rahman A., Rahman M.A. “Permeable pavement as a stormwater best management practice: a review and discussion”, *Environmental Earth Sciences*, 2019,78:327
- [8] Ahmed T., Hoque S.: “Study on pervious concrete pavement mix designs” *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 476, 2020, 012062, doi:10.1088/1755-1315/476/1/012062
- [9] Harber P. “Applicability of No-Fines Concrete as a Road Pavement”, University of Southern Queensland, Faculty of Engineering and Surveying, 2015
- [10] Seeni S. M., Madasamy M., “Factors influencing performance of pervious concrete”, *Grādevinar* 73, 10, 2021, 1017-1030
- [11] Vijayalakshmi R., “Recent studies on the properties of pervious concrete; A sustainable solution for pavements and water treatment“, *Civil and encironmental engineering reports*, 31, 3, 2021, 54-84, <https://doi.org/10.2478/ceer-2021-0034>

- [12] “Pervious Concrete: Guideline to Mixture Proportioning“, NRMCA Engineering Division, 2PE001, 2009.
- [13] Škondrić, M., Govedarica, O., Rajaković-Ognjanović, V., Jevtić D., Zakić D., Lightweight pervious concrete flags – current status and application perspective, 31th Slovenian colloquium on concrete, Ljubljana, Slovenija, 2024, pp. 87-98.
- [14] Govedarica O., Aškrabić 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, MDPI, Materials, 2022.
- [15] Stojković M, Aškrabić M, Radević A, Savić A, Zakić D. (2023), Solidified waste water treated sludge as partial replacement of cement in concrete composites, 20th International Symposium „Resilient structures“, MASE -Macedonian Association of Structural Engineers, 28-29 September 2023, Skopje, Macedonia, ISBN 978-608-66946-3-0, pp. 1151-1160