

Dr Marko Stojanović¹
Dr Anja Terzić²
Dr Ksenija Janković³
Dr Dragan Bojović⁴
Dr Željko Flajs⁵

UTICAJ DROBLJENE RECIKLIRANE GUME I VODOCEMENTNOG ODNOSA NA SVOJSTVA SVEŽEG I OČVRSLOG BETONA

0352-2733, 57 (2025), p. 83-122
doi: 10.5937/GK25057083S

UDK: 666.972.1:620.1
ORIGINALNI NAUČNI RAD

Rezime

U radu je analiziran uticaj drobljene reciklirane gume, dobijene procesom reciklaže otpadnih automobilskih pneumatika, na svojstva svežeg i očvrslog betona. Drobljena guma korišćena je kao delimična zapreminska zamena sitnog agregata u količinama od 2,5% i 5,0%. Eksperimentalna istraživanja obuhvatila su ispitivanje svojstava svežeg betona (konzistencija, zapreminska masa i sadržaj vazduha), kao i svojstava očvrslog betona (zapreminska masa, čvrstoća pri pritisku i vodonepropustljivost). Ispitivanja su sprovedena za dve vrednosti vodocementnog odnosa ($w/c = 0,55$ i $w/c = 0,45$). Rezultati istraživanja pokazali su da dodatak drobljene gume dovodi do smanjenja zapreminske mase i čvrstoće pri pritisku betona, kao i do povećanja sadržaja vazduha u svežoj beton-skoj mešavini. Takođe je uočeno povećanje dubine prodora vode kod mešavina sa većim procentom gume, naročito pri većem vodocementnom odnosu. Međutim, primena nižeg vodocementnog odnosa omogućava ublažavanje negativnih efekata dodatka gume, usled formiranja kompaktne mikrostrukture cementne matrice. Dobijeni rezultati ukazuju

¹ Institut za ispitivanje materijala IMS, Bulevar vojvode Mišića 43, Beograd, Srbija, e-mail: marko.stojanovic@institutims.rs

² Institut za ispitivanje materijala IMS, Bulevar vojvode Mišića 43, Beograd, Srbija, e-mail: anja.terzic@institutims.rs

³ Institut za ispitivanje materijala IMS, Bulevar vojvode Mišića 43, Beograd, Srbija, e-mail: ksenija.jankovic@institutims.rs

⁴ Institut za ispitivanje materijala IMS, Bulevar vojvode Mišića 43, Beograd, Srbija, e-mail: dragan.bojovic@institutims.rs

⁵ Institut za ispitivanje materijala IMS, Bulevar vojvode Mišića 43, Beograd, Srbija, e-mail: zeljko.flajs@institutims.rs

da se drobljena reciklirana guma može primeniti kao alternativni materijal u proizvodnji betona, uz pažljivo definisanje sastava mešavine i ograničenje procenta zamene agregata.

Ključne reči: drobljena reciklirana guma, reciklirani materijali, beton sa gumom, svojstva svežeg betona, čvrstoća pri pritisku, vodonepropustljivost, održiva gradnja

INFLUENCE OF CRUMB RUBBER AND WATER–CEMENT RATIO ON THE PROPERTIES OF FRESH AND HARDENED CONCRETE

Summary

This paper investigates the influence of crumb rubber obtained from recycled waste tires on the properties of fresh and hardened concrete. Crumb rubber was used as a partial volumetric replacement of fine aggregate in proportions of 2.5% and 5.0%. The experimental program included testing of fresh concrete properties (workability, density, and air content) as well as hardened concrete properties (density, compressive strength, and water permeability). Tests were conducted for two water–cement ratios ($w/c = 0.55$ and $w/c = 0.45$). The results showed that the addition of crumb rubber reduces concrete density and compressive strength while increasing the air content in fresh concrete mixtures. An increase in the depth of water penetration was also observed in mixtures containing higher percentages of crumb rubber, particularly at higher water–cement ratios. However, the use of a lower water–cement ratio mitigates the negative effects of rubber addition due to the formation of a denser cement matrix microstructure. The obtained results indicate that crumb rubber can be used as an alternative material in concrete production, provided that the mixture composition and replacement percentage are carefully defined.

Keywords: crumb rubber; recycled materials; rubberized concrete; fresh concrete properties; compressive strength; water permeability; sustainable construction

1. UVOD

Sitno usitnjena guma (CR) koja se dobija drobljenjem korišćenih pneumatskih guma, jedan je od otpadnih materijala koji se može koristiti u betonu, kao delimična ili potpuna zamena krupnog ili sitnog agregata ili oba [1].

Prema Evropskom udruženju proizvođača guma i gume (ETRMA), svetska proizvodnja guma iznosila je 5,1 milion tona u 2018. [2]. Sa ekološke perspektive, upotreba (CR) u betonu je korisna, jer vodi očuvanju mineralnih resursa, odnosno agregata i na taj način minimizira potrebu za novim deponijama potrebnim za odlaganje otpadnih guma, čime se rešavaju povezani problemi životne sredine [3].

Beton je krta materijal koji kada dostigne maksimalnu nosivost dolazi do loma konstrukcije. Stoga, duktilnost CR čestica može da bude iskorišćena za smanjenje krтости betona [4]. Takođe, u istraživačkim radovima prikazano je nekoliko prednosti betona sa recikliranom gumom (CRC), kao što su poboljšanje njegovog kapaciteta deformacije, apsorpcije energije, kapaciteta vlaženja i otpornosti na ciklično zamrzavanje i odmrzavanje, smanjenje vodopropustnosti, prodora hlorida i toplotnog širenja [5, 6]. Međutim, smanjenje čvrstoće pri pritisku CRC-a u poređenju sa običnim betonom je najveći nedostatak koji je ustanovljen kod ovog materijala. Ovaj nedostatak se, međutim, može prevazići povećanjem količine cementa, smanjenjem vodocementnog odnosa i upotrebom odgovarajućih hemijskih i mineralnih dodataka [6]. Primećeno je smanjenje čvrstoće na zatezanje savijanjem zbog povećanja količine CR u betonu. Ovo smanjenje je pripisano stvaranju prslina na granici između čestica CR i cementnog maltera. Formiranje prslina je posledica slabe veze između hidrofobnih CR čestica i cementnog maltera, i koncentracije napona u međufaznoj prelaznoj zoni (ITZ) usled nagle promene fleksibilnosti [4, 7–10].

Pojedini istraživači su u svojim radovima pokazali uticaj CR na otpornost betona na abraziju. Uočeno je da je dodavanje CR betonu negativno uticalo na otpornost na habanje zbog zamene prirodnih agregata koji se smatraju glavnim faktorom otpornosti betona na habanje [11–13]. Međutim, nekoliko drugih istraživača su objavili pozitivan uticaj na otpornost betona na abraziju usled upotrebe CR. Poboljšanje otpornosti na abraziju CRC-a se pripisuje upotrebi CR čestica koje deluju ograničavajuće na druge čestice zbog svoje visoke fleksibilnosti [14–16].

Dodavanje CR, do određene količine, može značajno poboljšati otpornost na udar i energiju apsorpcije betona uz zadržavanje drugih mehaničkih svojstava [12], [17–21]. Takav beton se može koristiti na

putevima i barijerama mostova ili na obalama reka kako bi se smanjila oštećenja usled sudara vozila i brodova. Chen i dr. [22] je ustanovio da je upotreba CR agregata u samozbijajućem betonu (SCC) poboljšala njegovu duktilnost i otpornost na zamor.

U pojedinim naučnim radovima su prikazana svojstva CRC-a koja su poboljšana zbog upotrebe CR, kao što su vodonepropustljivost, otpornost na prodiranje hlorida, otpornost betona koji je izložen kiselinama, otpornost betona na zamrzavanje–odmrzavanje, dubina karbonizacije, električna otpornost i korozija armature [13], [15], [23], [24], [25].

Pored toga, toplotna provodljivost CRC je manja od one kod normalnog betona, što se može objasniti povoljnijim termoizolacionim svojstvima gume i povećanom količinom zarobljenog vazduha [12], [26], [27], [28], [29].

Značajno poboljšanje u kapacitetu apsorpcije zvuka primećeno je nakon zamene nekih prirodnih agregata CR. Razvijeni materijal je pogodan za primenu u blokovima kao materijal za zvučnu izolaciju [21], [29], [30].

Rezultati ispitivanja pokazuju da je skupljanje CRC pri sušenju veće od normalnog betona. Međutim, razlika je bila beznačajna u CRC sa upotrebom u procentu manjem od 25% CR. Veća zamena CR dovela je do prekomernog skupljanja prilikom sušenja usled povećanja vazдушnih šupljina kroz koje isparava voda iz betonske mešavine [10], [31], [32].

2. PROCESI PROIZVODNJE, FIZIČKA I HEMIJSKA SVOJSTVA DROBLJENE GUME (CR)

CR se proizvodi na nekoliko načina, međutim, ambijentalne i kriogene metode su najčešće. U ambijentalnoj metodi, CR se proizvodi od otpadnih guma kroz različite nivoe mehaničkih procesa na temperaturi ne višoj od temperature degradacije gume (120°C). Prvi nivo obrade je sečenje guma pomoću drobilica za proizvodnju strugotina od guma veličine od 70 do 100 mm. Nakon toga, guma koja je veličine čipsa se smanjuje na manje od 10 mm u granulatoru. Konačno, materijal se ubacuje u mlin za proizvodnju finih čestica. Tokom svakog nivoa obrade, CR se klasifikuje, a čelične žice i vlakna se odvajaju pomoću magnetnih separatora.

U kriogenoj metodi, gumeni čips se izlaže veoma niskoj temperaturi (< -80 °C) da bi postao krt. Zatim se drobi pomoću velikih čekića do potrebne veličine sitne drobljene gume. CR proizveden kriogenom metodom ima malu količinu čelika i vlakana i pravilnog je oblika [33, 34].

Čestice drobljene gume CR imaju oštroičini oblik, dok je njihova površinska tekstura glatka i nepropusna [20, 30]. Zapreminska masa bez

šupljina i pora CR čestica je u opsegu od 1050–1150 kg/m³ [11, 25, 35]. Prema autoru Li i dr. [19], nasipna zapreminska masa drobljene gume CR se kreće od 260 do 460 kg/m³. Nekoliko istraživača je izvestilo da je temperatura topljenja CR oko 170°C [1, 36, 37]. Međutim, Saberian i dr. [38] prijavili su veću temperaturu topljenja koja iznosi 286°C.

Drobljena guma CR se smatra hidrofobnim materijalom sa velikim kontaktnim uglom sa vodom koji se kreće između 90° i 122° [19], [39], [40], [41]. Kaevunruen i dr. [42] su ustanovili da je CR toksičan materijal koji može da šteti životnoj sredini jer sadrži stiren, pa je opravdano njeno „zarobljavanje“ u betonu.

Hemijski sastav CR može da varira u zavisnosti od izvora osnovnog materijala i u zavisnosti od procesa proizvodnje guma. Prirodna i sintetička guma predstavljaju skoro 40% CR. Promene ovih količina direktno utiču na fleksibilnost CR [43]. Ganjian i dr. [44] su ustanovili da je jedina razlika između automobilskih i kamionskih guma vrsta gume. Gume za putnička vozila sadrže manje prirodne, a više sintetičke gume, dok gume za kamione sadrže veću količinu prirodne gume.

3. PREGLED LITERATURE ISTRAŽIVANJA BETONA SA DROBLJENOM GRANULISANOM GUMOM

3.1 Svojstva svežeg betona (CRC)

Pre početka eksperimentalnog istraživanja izvršen je pregled relevantne naučne i stručne literature koja se odnosi na primenu drobljene granulisanе gume kao delimične zamene prirodnog agregata u betonu. Analizirani su rezultati dosadašnjih istraživanja koji se odnose na uticaj gumenih čestica na svojstva svežeg i očvrslog betona, kao i mogućnosti njihove primene u savremenim betonskim konstrukcijama.

Posebna pažnja posvećena je analizi svojstava svežeg betona sa dodatkom drobljene gume, odnosno tzv. crumb rubber concrete (CRC). U okviru ovih istraživanja razmatrani su parametri kao što su konzistencija betonske mešavine, zapreminska masa svežeg betona, sadržaj uvučenog vazduha i obradivost betonske mešavine. Dosadašnja istraživanja pokazuju da dodavanje gumenih čestica može značajno uticati na reološka svojstva sveže betonske mešavine, pre svega zbog manje specifične težine gume u odnosu na prirodni agregat, kao i zbog specifične teksture i elastičnih svojstava gumenih čestica.

Pregled literature omogućio je identifikaciju ključnih faktora koji utiču na ponašanje sveže betonske mešavine sa dodatkom gume, kao što su

veličina i oblik gumenih čestica, procenat zamene agregata, vodocementni odnos i primena hemijskih dodataka. Na osnovu analize dostupnih istraživanja definisan je i pravac eksperimentalnog dela rada, sa ciljem detaljnijeg ispitivanja uticaja drobljene granulirane gume na osnovna svojstva sveže betonske mešavine.

3.1.1 Konzistencija betona

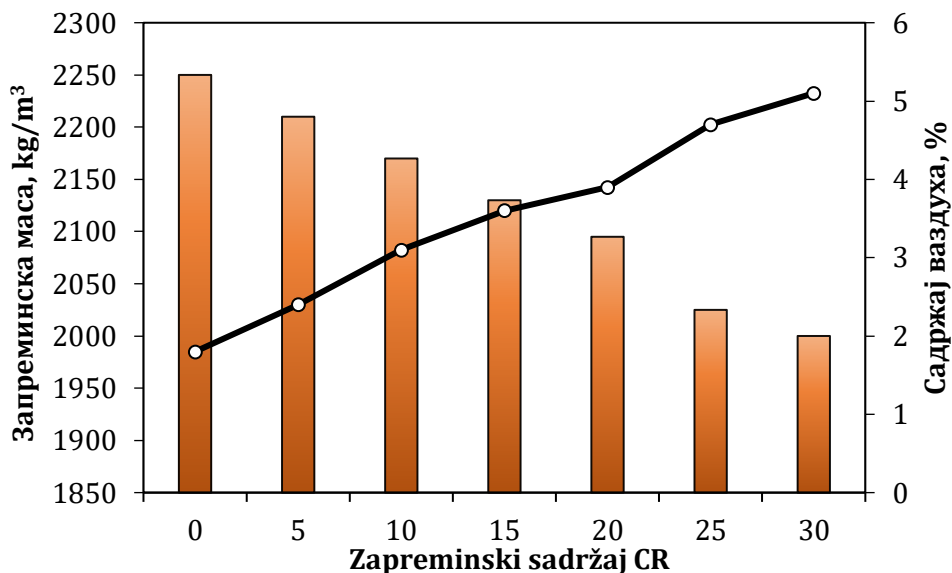
Obradivost betona se u većini slučajeva smanjuje sa povećanjem sadržaja drobljene gume (CR). Brojna istraživanja pokazuju da povećanje količine CR dovodi do smanjenja obradivosti, što se objašnjava činjenicom da lagane i hidrofobne gumenе čestice imaju tendenciju izdvajanja iz mešavine, što može izazvati segregaciju [45–48].

Međutim, pojedini autori navode da primena manjih količina CR (<20%), kada se koristi kao zamena za sitan agregat, može dovesti do povećanja obradivosti betona. Razlog za to je što gumenе čestice ne upijaju vodu, čime se povećava količina slobodne vode u betonskoj mešavini [34, 35].

Zamena prirodnog agregata gumom utiče na reološka svojstva betonske smeše zbog razlika u fizičkim karakteristikama između gumenih čestica i mineralnog agregata. Bisht i Ramana [13] su pokazali da je pri većem sadržaju CR potrebno koristiti veće količine superplastifikatora (SP) kako bi se postigao isti nivo zbijenosti. Zbog toga upotreba gumenog agregata može značajno uticati na konzistenciju betona sa drobljenom gumom (CRC).

3.1.2 Zapreminska masa

Zapreminska masa betona sa drobljenom gumom (CRC) obično je manja u odnosu na zapreminsku masu konvencionalnog betona, prvenstveno zbog manje gustine gume u poređenju sa mineralnim agregatom. Prethodna istraživanja ukazuju na postojanje obrnute veze između zapreminske mase betona i količine CR u betonskoj mešavini. Ismail i Hassan [4] su proučavali uticaj CR na zapreminsku masu i poroznost betona i pokazali da se zapreminska masa smanjuje sa povećanjem sadržaja gume. Osim manje gustine gumenih čestica, ovo smanjenje se može objasniti i povećanom količinom zarobljenog vazduha između čestica gume i cementnog maltera, koji raste sa povećanjem procenta CR.



Slika 1. Uticaj CR na zapreminsku masu i sadržaj vazduha svežeg betona [4]

Zapreminska masa predstavlja jedno od često ispitivanih svojstava svežeg CRC-a [51, 55]. Pojedini autori, poput Ramdani i dr. [52], ovaj parametar definišu kao jediničnu težinu svežeg betona. Istraživanja pokazuju da se zapreminska masa svežeg CRC-a, pri zameni sitnog agregata drobljenom gumom u opsegu od 5–30%, smanjuje približno za 2–6% u poređenju sa referentnim betonom bez gume [56]. Thomas i Gupta [14] su takođe pokazali da kod betona visoke čvrstoće, proizvedenog zamenom 2,5–20% sitnog agregata CR-om, dolazi do smanjenja zapreminske mase u rasponu od 0–9,6% u odnosu na kontrolnu mešavinu. Slične rezultate navode i Ramdani i dr. [52], koji su registrovali smanjenje zapreminske mase od 3,1–10,7% kod betonskih mešavina sa zamenom sitnog agregata gumom u opsegu od 10–60%.

3.2 Svojstava očvrslog betona (CRC)

Pored svojstava sveže betonske mešavine, značajan deo dosadašnjih istraživanja usmeren je i na analizu svojstava očvrslog betona sa dodatkom drobljene granulirane gume (crumb rubber concrete – CRC). Uvođenje gumenih čestica kao delimične zapreminske zamene prirodnog agregata može uticati na fizička, mehanička i trajnosna svojstva betona, pre svega zbog specifičnih karakteristika ovog materijala, kao što su manja zapreminska masa, elastičnost i hidrofobna priroda gumenih čestica.

U naučnoj literaturi posebno se analizira uticaj drobljene gume na osnovna svojstva očvrslog betona, kao što su zapreminska masa i čvrstoća pri pritisku, ali i na pojedine aspekte trajnosti betona u uslovima delovanja agresivnih sredina. Dosadašnja istraživanja pokazuju da primena gumenih čestica u betonu dovodi do smanjenja zapreminske mase, što je prvenstveno posledica manje gustine gume u poređenju sa mineralnim agregatom. Intenzitet ovog smanjenja zavisi od procenta zapreminske zamene agregata gumom, kao i od granulometrijskog sastava i veličine primenjenih gumenih čestica.

Čvrstoća betona pri pritisku predstavlja jedno od najvažnijih mehaničkih svojstava koje je predmet brojnih istraživanja u oblasti primene drobljene gume u betonu. Rezultati dosadašnjih studija ukazuju da povećanje udela gumenih čestica u betonskoj mešavini najčešće dovodi do smanjenja čvrstoće pri pritisku. Ovakvo ponašanje se najčešće objašnjava slabijom adhezijom između cementne matrice i gumenih čestica, kao i povećanjem ukupne poroznosti strukture betona. Ipak, pojedini autori ističu da se optimalnim izborom količine gume, uz odgovarajuću optimizaciju sastava betonske mešavine i primenu hemijskih dodataka, mogu ostvariti zadovoljavajuće mehaničke karakteristike, čime se omogućava primena ovakvih betona u određenim konstruktivnim i nekonstruktivnim elementima.

Pored mehaničkih svojstava, u literaturi je značajna pažnja posvećena i trajnosnim karakteristikama betona sa dodatkom drobljene gume. U prethodnim istraživanjima analizirani su različiti aspekti trajnosti, kao što su otpornost na cikluse zamrzavanja i odmrzavanja, prodor hloridnih jona i vodonepropustljivost betona. U okviru ovog rada posebna pažnja posvećena je analizi vodonepropustljivosti betona, odnosno dubini prodiranja vode pod pritiskom, kao jednom od ključnih parametara koji karakteriše propustljivost i trajnost betona.

3.2.1 *Upijanje vode*

Upijanje vode predstavlja jedan od važnih faktora koji utiče na trajnost betona. Poznato je da se većina hemijskih reakcija u betonu odvija u prisustvu vlage, pa samim tim i sposobnost betona da apsorbuje vodu ima značajnu ulogu u određivanju njegove dugotrajnosti. Zbog toga je u brojnim istraživanjima analiziran uticaj drobljene gume (CR) na upijanje vode kod betona sa dodatkom gume (CRC).

Rezultati većine dostupnih studija pokazuju da se upijanje vode kod CRC povećava sa porastom udela CR u betonskoj mešavini [29, 49, 58].

Međutim, pojedina istraživanja su zabeležila i suprotan trend, odnosno smanjenje upijanja vode sa povećanjem sadržaja gume [28, 54]. Gheni i dr. [3] su utvrdili gotovo linearnu zavisnost između upijanja vode i količine CR u betonu. Autori navode da povećanje sadržaja gumenih čestica dovodi do formiranja većeg broja vazdušnih šupljina u strukturi betona, što posledično povećava sposobnost materijala da apsorbuje vodu. Slični rezultati potvrđeni su i u drugim istraživanjima [13, 49, 53].

S obzirom na uočeni trend povećanja upijanja vode sa rastom udela drobljene gume, u literaturi se često ističe potreba za ograničavanjem količine CR u betonskoj mešavini kako bi se obezbedila odgovarajuća trajnost betona.

3.2.2 Čvrstoća pri pritisku

Na osnovu rezultata brojnih istraživanja utvrđeno je da čvrstoća pri pritisku betona sa dodatkom drobljene gume (CRC) u pravilu opada sa povećanjem udela gumenih čestica. Salehudin i dr. [49] ispitivali su čvrstoću pri pritisku betona pripremljenog sa tri različita procenta zamene sitnog agregata drobljenom gumom (2,5%, 5,0% i 7,5%). U istraživanju je korišćen vodocementni odnos $w/c = 0,50$, dok se veličina čestica CR kretala u opsegu od 2 do 4 mm. Rezultati ispitivanja pokazali su postepeno smanjenje čvrstoće pri pritisku sa povećanjem sadržaja drobljene gume u betonskoj mešavini.

Smanjenje čvrstoće objašnjeno je pre svega smanjenjem zapreminske mase betona usled zamene prirodnog peska drobljenom gumom, koja ima znatno manju gustinu. Pored toga, utvrđeno je da je međufazna prelazna zona (interfacial transition zone – ITZ) između cementnog maltera i gumenih čestica slabija u poređenju sa zonom kontakta između cementnog maltera i mineralnog agregata. Ovakvo ponašanje se pripisuje značajnoj razlici u krutosti između elastičnih čestica gume i krute cementne matrice, što dovodi do povećane koncentracije napona u oblasti ITZ-a i pojave mikropukotina u strukturi materijala [49].

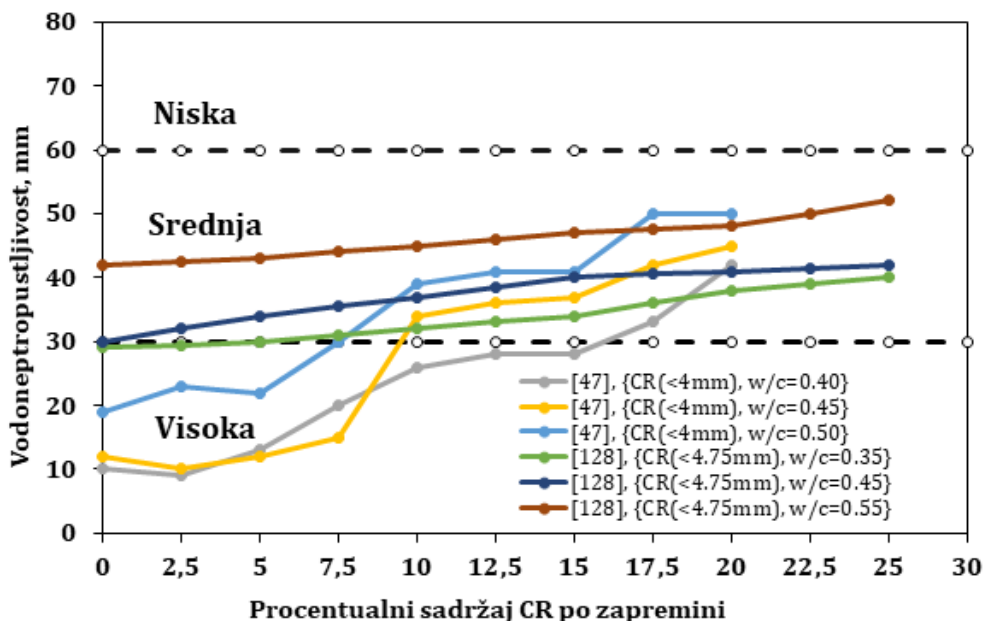
3.2.3 Vodonepropustljivost betona

Trajnost betona u velikoj meri zavisi od njegove propustljivosti [59]. Dosadašnja istraživanja pokazuju da se vodopropusnost betona sa dodatkom drobljene gume (CRC) uglavnom povećava sa porastom sadržaja CR u betonskoj mešavini. Ovo povećanje propustljivosti najčešće se povezuje sa većom poroznošću materijala i pojavom mikroprrsline u

međufaznoj prelaznoj zoni (interfacial transition zone – ITZ) između čestica gume i cementne paste. Munoz-Sanchez i dr. [60] navode da slaba adhezija između cementne matrice i gumenih čestica doprinosi formiranju diskontinuiteta u strukturi betona, što rezultira povećanom vodopropusnošću.

Ganjian i dr. [44] su pokazali da se vodopropusnost CRC-a povećava sa porastom veličine čestica drobljene gume. Slične zaključke iznose i Thomas i dr. [61], koji su uočili povećanje dubine prodiranja vode kod CRC mešavina sa 20% CR sa porastom odnosa voda/vezivo (w/b). Takođe, Su i dr. [57] su zamenili 20% prirodnog sitnog agregata drobljenom gumom različitih veličina (3, 0,5 i 0,3 mm) i utvrdili da je najveća dubina prodiranja vode zabeležena kod betona koji je sadržao krupnije čestice CR (>3 mm). Veće čestice gume ili neodgovarajući granulometrijski sastav mogu dovesti do neravnomerne raspodele čestica u betonskoj mešavini, što pogoduje povećanju propustljivosti betona [57].

Na osnovu toga zaključeno je da primena sitnijih čestica drobljene gume može doprineti smanjenju vodopropusnosti CRC-a. Bisht i Ramana [13] su takođe naveli da povećanje udela CR u betonu dovodi do većih dubina prodiranja vode, što se povezuje sa prisustvom dodatnih vazdušnih šupljina koje nastaju tokom mešanja betonske mešavine sa gumenim česticama.



Slika 2. Dubina prodiranja vode pod pritiskom u beton sa dodatkom drobljene gume [16], [59].

4. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

Za potrebe ovog istraživanja korišćeni su materijali koji su dostupni na teritoriji Republike Srbije, kako bi se obezbedila primenljivost dobijenih rezultata u uslovima domaće građevinske prakse. Pored standardnih komercijalnih materijala koji se uobičajeno koriste u proizvodnji betona, u eksperimentalnom programu primenjena je i reciklirana drobljena guma dobijena preradom otpadnih automobilskih pneumatika. Drobljena guma korišćena je kao delimična zapreminska zamena sitnog prirodnog agregata u betonskim mešavinama, sa ciljem ispitivanja njenog uticaja na svojstva svežeg i očvrslog betona. Ovakav pristup omogućava istovremeno sagledavanje mogućnosti primene recikliranog materijala u betonu i doprinosi razvoju održivijih rešenja u savremenoj betonskoj tehnologiji.

4.1 Cement

U eksperimentalnom programu korišćen je portland cement CEM I 42,5R proizvođača „Lafarge“, Beočinska fabrika cementa. Fizičke karakteristike upotrebljenog cementa bile su sledeće: ostatak na situ 0,09 mm iznosio je 0,1%, specifična površina određena Blaine metodom 4320 cm²/g, dok je specifična masa iznosila 3,01 g/cm³. Standardna konzistencija cementne paste iznosila je 28,4%. Početak vezivanja nastupio je nakon 150 min, a kraj vezivanja nakon 200 min. Stalnost zapremine, određena metodom Le Chatelier, iznosila je 0 mm.

4.2 Agregat

Za spravljanje betonskih mešavina korišćen je prirodni frakcionisani kameni agregat poreklom iz reke Dunav, proizvođača „HidroBaze“ d.o.o. iz Beograda. Agregat je pran i separisan na tri frakcije: 0/4 mm, 4/8 mm i 8/16 mm na separaciji u Ostružnici. Izgled pojedinačnih frakcija prirodnog rečnog agregata prikazan je na slici 3.



Frakcija 0/4 mm



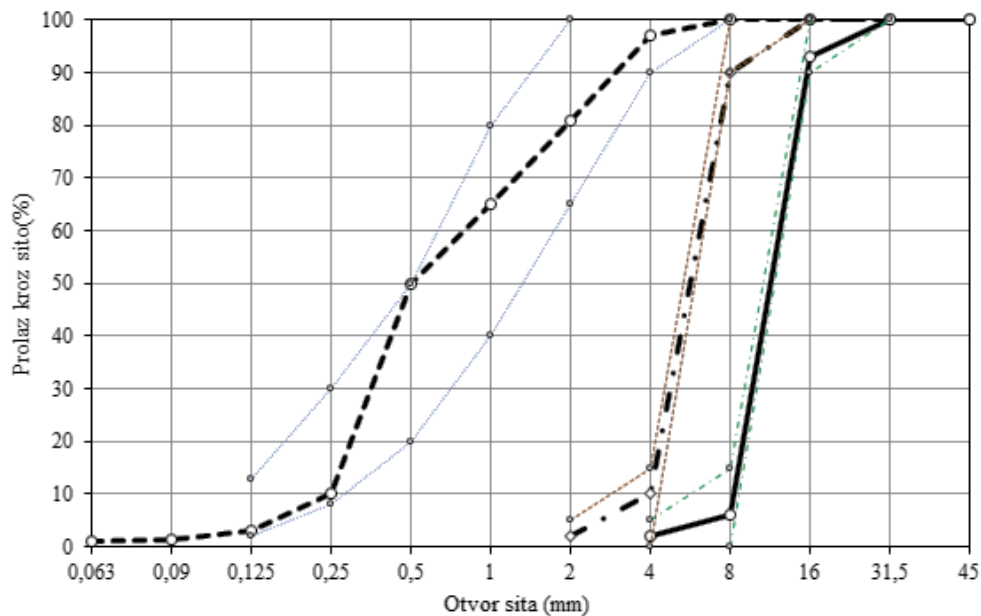
Frakcija 4/8 mm



Frakcija 8/16 mm

Slika 3. Izgled frakcija rečnog agregata

Rezultati ispitivanja granulometrijskog sastava agregata prikazani su grafički putem granulometrijskih krivih na slici 4.



Slika 4. Grafički prikaz granulometrijskog sastava frakcionisanog prirodnog agregata

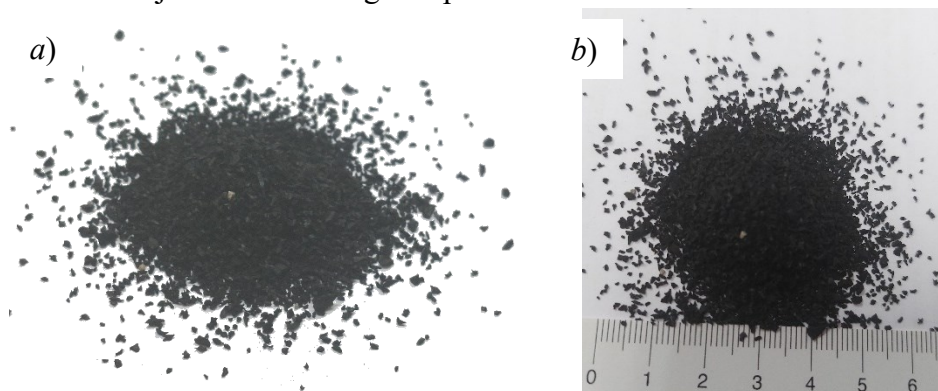
Radi lakšeg projektovanja sastava betona, kao i analize rezultata eksperimentalnog istraživanja, u tabeli 1 prikazani su osnovni rezultati ispitivanja fizičkih svojstava korišćenog prirodnog frakcionisanog agregata.

Tabela 1. Rezultati ispitivanja prirodnog frakcionisanog kamenog agregata

Svojstvo	Prilog pravilnika ili standardu	Rezultat		
		0/4 mm	4/8 mm	8/16 mm
Sadržaj sitnih čestica (mokra sejanje) [%]	Pravilnik – Prilog III-K	0.7	0.0	0.0
Oblik zrna	Pravilnik – Prilog III-S	–	0.24	0.26
Zapreminska masa vodom zasićenog, površinski suvog uzorka [kg/m ³]	SRPS ISO 6873; SRPS ISO 7033	2615	2618	2620
Upijanje vode [%]	SRPS ISO 6873; SRPS ISO 7033	0.9	0.9	1.0

4.3 Drobljena reciklirana guma (CR)

Drobljena reciklirana guma korišćena u ovom istraživanju dobijena je u postrojenju za reciklažu otpadnih automobilskih pneumatika kompanije „Eco Recycling“ d.o.o. iz Novog Sada. Za pripremu betonskih mešavina odabrana je frakcija drobljene gume veličine 0/1 mm. Izgled i granulacija čestica drobljene reciklirane gume prikazani su na slici 5.



Slika 5. Izgled i veličina zrna drobljene reciklirane gume (frakcija 0/1 mm): a) i b) makro prikaz

Tipičan hemijski sastav drobljene gume (CR) prikazan je u tabeli 2. Drobljena guma korišćena u ovom istraživanju dobijena je reciklažom otpadnih automobilskih pneumatika postupkom mehaničkog drobljenja, a proizvedena je u postrojenju za reciklažu guma „ECO-RECYCLING“ iz Novog Sada.

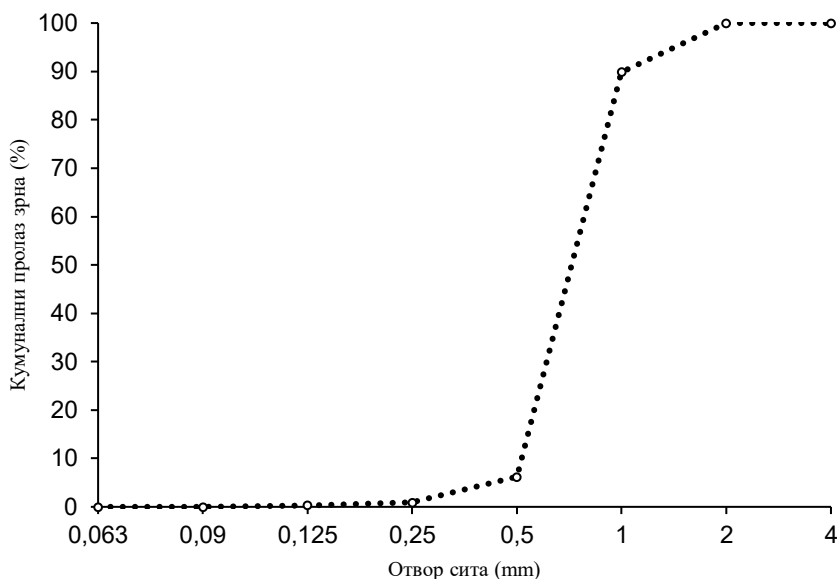
Ispitivanjima svojstava utvrđeno je da specifična masa drobljene gume, bez pora i šupljina, iznosi 1170 kg/m³. Izgled zrna i granulometrijski sastav drobljene gume prikazani su na slici 6 i slici 7.



Slika 6. Izgled drobljene gume frakcije 0–1 mm, „ECO Recycling“, Novi Sad.

Tabela 2. Hemijska svojstva drobljene gume frakcije 0–1 mm, „ECO Recycling“, Novi Sad

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	Cu mg/kg	Pb mg/kg	Co mg/kg
Drobljena guma	0.78	0.18	0.12	0.24	0.08	<0.01	0.07	3.05	147	26	276



Slika 7. Dijagram granulometrijskog sastava drobljene gume „ECO Recycling“, Novi Sad.

4.4 Hemijski dodaci

4.4.1 Superplastifikator „Sika Viscocrete 4077“

Radi poboljšanja obradivosti i ugradljivosti betonske mešavine predviđena je primena superplastifikatora „Sika ViscoCrete 4077“, koji pripada grupi modifikovanih polikarboksilatnih dodataka. Osnovne karakteristike korišćenog superplastifikatora prikazane su u tabeli 3.

Tabela 3. Osnovni podaci o primenjenom superplastifikatoru.

Vrsta superplastifikatora	Zapreminska masa [kg/m ³]	Sadržaj suve materije [%]	Uobičajeno doziranje (%m _c)
Sika ViscoCrete 4077	1050	26,37	0,6-1,2

4.4.2 Aerant „Sika Control Aer 100 RS“

Radi poboljšanja strukture betona i povećanja njegove otpornosti na naizmenične cikluse zamrzavanja i odmrzavanja, sa i bez prisustva soli za odmrzavanje, korišćen je hemijski dodatak za aeraciju „Sika Control AER

100 RS“, proizvođača „Sika“, Beograd. Osnovne karakteristike primenjenog aerantnog dodatka prikazane su u tabeli 4.

Tabela 4. Osnovni podaci o primenjenom aerantu

Vrsta aeranta	Zapreminska masa [kg/m ³]	Sadržaj suve materije [%]	Uobičajeno doziranje (%m _c)
Sika Control AER 100 RS	1010	5.29	0,02-0.15%

4.5 Voda

Za pripremu betonskih mešavina korišćena je voda iz gradskog vodovoda, koja je pogodna za upotrebu u proizvodnji betona bez potrebe za prethodnim ispitivanjem njenog kvaliteta.

5. PROJEKTOVANJE SASTAVA BETONSKIH MEŠAVINA

Projektovanje sastava betonskih mešavina za sve tipove betona izvršeno je na osnovu sledećih uslova:

- ukupna količina cementa u svim mešavinama iznosila je 360 kg/m³.
- usvojeni vodocementni odnosi iznosili su 0,55 i 0,45.
- sadržaj vazduha kod referentnih betona i betona sa dodatkom drobljene gume usvojen je u vrednosti $\Delta p = 2\%$, dok je kod betonskih mešavina sa hemijskim dodatkom aeranta predviđen sadržaj vazduha $\Delta p = 5\%$.
- količina drobljene reciklirane gume definisana je kao zapreminska zamena sitnog agregata u procentima od 2,5% i 5,0%, na osnovu analize relevantne naučne literature.
- granulometrijski sastav mešavine agregata projektovan je u obliku kontinuirane granulometrijske krive.
- početna konzistencija betonske mešavine određena metodom sleganja podešena je dodatkom superplastifikatora, sa ciljem postizanja konzistencije klase S4 (160–210 mm).

Za kompaktiranje betona korišćen je pervibrator. Nakon ugradnje, svi uzorci su tokom prvih 24 časa negovani u kalupima i zaštićeni PVC folijom. Uzorci u obliku kocki, namenjeni ispitivanju fizičko-mehaničkih svojstava i trajnosti betona, nakon vađenja iz kalupa negovani su u vodi na temperaturi 20 ± 2 °C do momenta ispitivanja.

Kombinacijom izabranih materijala i definisanih projektnih uslova formirano je ukupno osam betonskih mešavina. Oznake betonskih mešavina, uvedene radi lakše uporedne analize rezultata, prikazane su u tabeli 5.

Tabela 5. Obeležavanje betonskih mešavina.

Vodocementni odnos, w/c	0.55	0.45
Količina cementa, kg/m ³	360	360
Obični (referentni) betoni	P-1	P-3
Betoni sa dodatkom aeranta	P-5	P-7
Betoni sa drobljenom granulisanom gumom (0/1 mm)		
Zamena sitnog agregata 2.5% drobljenom recikliranom gumom (zapreminski udeo)	P-9	P-11
Zamena sitnog agregata 5.0% drobljenom recikliranom gumom (zapreminski udeo)	P-13	P-15

5.1 Primer određivanja sastava običnog (referentnog) betona sa prirodnim rečnim agregatom (P-1)

Sastav betonske mešavine P-1, pripremljene sa portland cementom CEM I i prirodnim frakcionisanim rečnim agregatom (sitnim i krupnim), definisan je na osnovu sledećih polaznih parametara:

- količina cementa iznosila je $m_c = 360 \text{ kg/m}^3$;
- količina vode određena je na osnovu usvojenog vodocementnog odnosa $w/c = 0,55$, pri čemu je dobijena vrednost $m_v = 198 \text{ kg/m}^3$;
- učešće pojedinih frakcija agregata definisano je na osnovu vizuelne procene obradivosti betonske mešavine, pri čemu je usvojen granulometrijski sastav sa sledećim procentualnim udelima frakcija:
 - frakcija 0/4 mm – 45%;
 - frakcija 4/8 mm – 15%;
 - frakcija 8/16 mm – 40%.

Radi postizanja željene konzistencije svežeg betona klase S4 (160–210 mm), u mešavinu je dodat superplastifikator u količini od 0,4% mase cementa.

Ukupna količina agregata određena je na osnovu sume apsolutnih zapremina svih komponenti u 1 m³ betona, pri čemu je pretpostavljen sadržaj uvučenog vazduha $\Delta p = 2\%$.

$$\frac{360}{3010} + \frac{198}{1000} + \frac{m_a}{2650} + \frac{1,4}{1050} + 0,02 = 1 \Rightarrow m_a = 1751 \text{ kg/m}^3$$

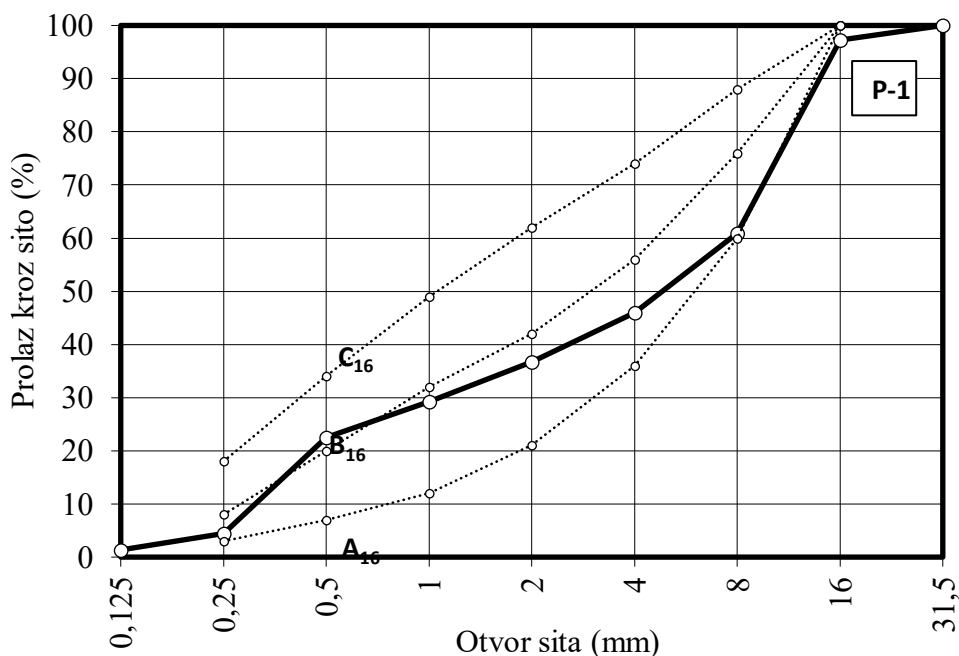
Količine pojedinačnih frakcija agregata, u skladu sa usvojenim procentualnim učešćima u mešavini, iznose:

- frakcija 0/4 mm = 788 kg;
- frakcija 4/8 mm = 263 kg;
- frakcija 8/16 mm = 700 kg.

Ukupna zapreminska masa betona u svežem stanju iznosi:

$$\gamma_{b,sv} = 360 + 198 + 1751 + 2,4 = 2310 \text{ kg/m}^3$$

Na slici 8 prikazane su vrednosti ordinata dobijene granulometrijske krive, kao i referentne krive koje predstavljaju povoljan granulometrijski sastav agregata (A16 i B16).



Slika 8. Granulometrijska kriva mešavine agregata i referentne krive (P-1)

5.2 Primer određivanja sastava betona sa 5% zapreminskom zamenom prirodnog sitnog agregata drobljenom recikliranom gumom (P-13)

Sastav betonske mešavine P-13 (beton pripremljen sa portland cementom CEM I, prirodnim frakcionisanim rečnim sitnim i krupnim agregatom, uz 5% zapreminske zamene sitnog agregata drobljenom recikliranom gumom) određen je na osnovu sledećih polaznih parametara:

- količina cementa iznosila je $m_c = 360 \text{ kg/m}^3$;
- količina vode određena je na osnovu usvojenog vodocementnog odnosa $w/c = 0,55$, pri čemu je dobijena vrednost $m_v = 198 \text{ kg/m}^3$;
- učešće pojedinih frakcija agregata definisano je na osnovu vizuelne procene obradivosti betonske mešavine, pri čemu je usvojen granulometrijski sastav mešavine agregata sa sledećim procentualnim udelima frakcija:
 - frakcija 0/4 mm – 45%;
 - frakcija 4/8 mm – 15%;
 - frakcija 8/16 mm – 40%.

Radi postizanja željene konzistencije svežeg betona klase S4 (160–210 mm) u mešavinu je dodat superplastifikator u količini od 0,4% mase cementa.

Ukupna količina agregata određena je na osnovu sume apsolutnih zapremina svih komponenti u 1 m^3 betona, uz pretpostavljeni sadržaj uvučenog vazduha $\Delta p = 2\%$, koji je prethodno definisan u primeru za referentnu betonsku mešavinu P-1, gde je dobijeno:

$$\frac{360}{3010} + \frac{198}{1000} + \frac{m_a}{2650} + \frac{1,4}{1050} + 0,02 = 1 \Rightarrow m_a = 1751 \text{ kg/m}^3$$

Usvojeno je da zapreminska zamena sitnog agregata drobljenom recikliranom gumom iznosi 5%, zbog čega je potrebno odrediti zapreminu gume i zapreminu agregata umanjenu za odgovarajući deo zapremine drobljene granulirane gume. Pri tome se polazi od sledećeg:

- zapremina sitnog agregata frakcije 0/4 mm iznosi:

$$\frac{m_a \cdot 0,45}{2650} = 0,297$$

- zapremina drobljene reciklirane gume, koja predstavlja 5% zapremine sitnog agregata, iznosi:

$$\frac{m_a \cdot 0,45 \cdot 0,05}{2650} = 0,0149$$

- zapremina sitnog agregata frakcije 0/4 mm, umanjena za 5% zapreminske zamene drobljenom granulisanom gumom, iznosi:

$$\frac{m_a \cdot 0,45}{2650} - \frac{m_a \cdot 0,45 \cdot 0,05}{2650} = 0,282$$

Količine drobljene reciklirane gume i agregata po pojedinačnim frakcijama sada iznose:

- frakcija 0/1 mm (drobljena reciklirana guma):

$$0,0149 \cdot 1130 = 17 \text{ kg/m}^3$$

- frakcija 0/4 mm:
 $0,282 \cdot 2650 = 748 \text{ kg/m}^3$
- frakcija 4/8 mm:
 $m_a \cdot 0,15 = 263 \text{ kg/m}^3$
- frakcija 8/16 mm:
 $m_a \cdot 0,40 = 700 \text{ kg/m}^3$

Ukupna količina agregata iznosi:

$$m_a = 17 + 748 + 263 + 700 = 1728 \text{ kg/m}^3$$

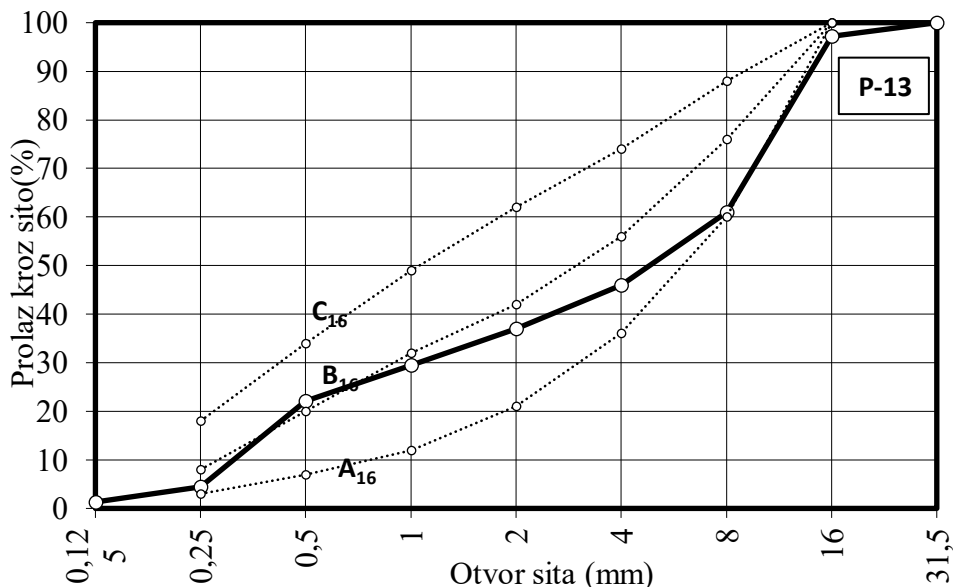
Količine pojedinačnih frakcija, u skladu sa usvojenim procentualnim učešćima, iznose:

- frakcija 0/1 mm – $X_{0/1}=1\%$;
- frakcija 0/4 mm – $X_{0/4}=44\%$;
- frakcija 4/8 mm – $X_{4/8}=15\%$;
- frakcija 8/16 mm – $X_{8/16}=40\%$.

Zapreminska masa betona u svežem stanju iznosi:

$$\gamma_{b,sv} = 360 + 198 + 1728 + 1,4 = 2287 \text{ kg/m}^3$$

Na slici 9 prikazane su vrednosti ordinata dobijene granulometrijske krive, kao i referentne krive koje predstavljaju povoljan granulometrijski sastav agregata (A₁₆ i B₁₆).



Slika 9. Granulometrijska kriva mešavine agregata i referentne krive (P-13)

Tabela 6. Količine komponentnih materijala (kg) po 1 m³ betona

Oznaka mešavine	w/c	Cement	Drobljena reciklirana guma 0/1 mm	Sitan agregat 0/4 mm	Krupan agregat 4/8mm	Krupan agregat 8/16mm	Sika Viscocrete 4077x	Sika Control AER 100RS	Voda	Zapreminska masa [kg/m ³]
P-1	0.55	360	0	788	263	700	1.4	0.0	198	2310
P-3	0.45	360	0	829	276	737	2.9	0.0	162	2367
P-5	0.55	360	0	762	254	677	1.4	0.029	198	2252
P-7	0.45	360	0	805	268	716	2.9	0.029	162	2314
P-9	0.55	360	8.4	768	263	700	1.4	0.0	198	2299
P-11	0.45	360	8.8	808	276	737	2.9	0.0	162	2355
P-13	0.55	360	16.8	748	263	700	1.4	0.0	198	2287
P-15	0.45	360	17.7	788	276	737	2.9	0.0	162	2344

6. IZRADA BETONSKIH MEŠAVINA, UZORAKA ZA ISPITIVANJE I NEGA UZORAKA

Priprema betonskih mešavina izvršena je u laboratorijskoj mešalici zapremine 160 litara. Konstrukcija mešalice omogućava horizontalno planetarno mešanje betonske mešavine oko jedne vertikalne ose. Ukupno vreme mešanja komponenti iznosilo je 5 minuta.

U mešalicu su najpre dodate potrebne količine svih frakcija agregata (prirodni agregat i drobljena reciklirana guma), koje su suvo mešane u trajanju od 30 sekundi. Nakon toga je postepeno dodata polovina predviđene količine vode, sa ciljem površinskog kvašenja agregata. Dva minuta nakon početka mešanja dodat je cement, a zatim i preostala količina vode u kojoj je prethodno rastvoren superplastifikator, uz kontinuirano mešanje.

Prosečna temperatura vazduha tokom pripreme betonskih mešavina iznosila je 23 °C.

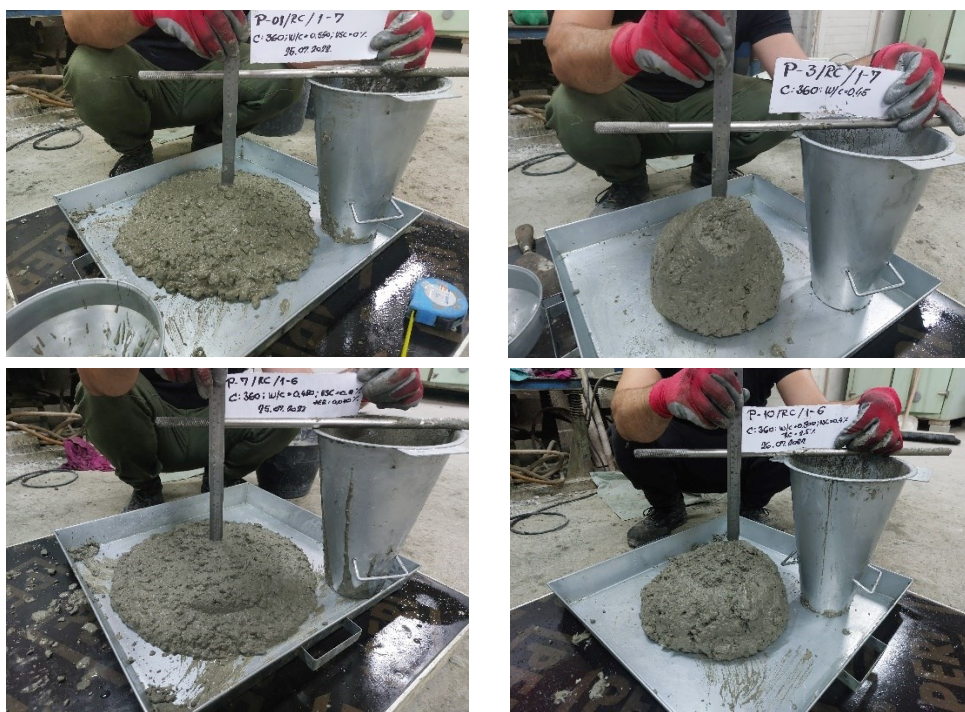
Nakon merenja temperature svežeg betona određivana je njegova konzistencija metodom sleganja, nakon čega je betonska mešavina ugrađivana u kalupe u obliku kocki.

7. REZULTATI ISPITIVANJA I DISKUSIJA

7.1 Svež beton

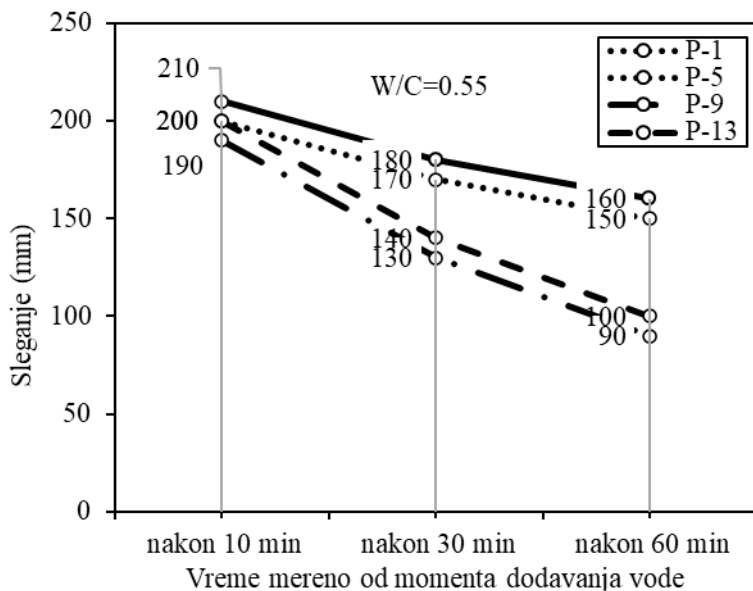
7.1.1 Konzistencija

Konzistencija betona određivana je metodom sleganja u skladu sa standardom SRPS EN 12350-2 [64]. Merenja su vršena nakon 10, 30 i 60 minuta od trenutka dodavanja vode u betonsku mešavinu. Temperatura svežeg betona merena je za svaku vrstu betona u navedenim vremenskim intervalima, pri čemu su zabeležene vrednosti bile u opsegu od 18,5 °C do 21,8 °C. Na slici 10 prikazan je postupak određivanja konzistencije betona.



Slika 10. Merenje konzistencije betona metodom sleganja za betone P-1, P-3, P-7 i P-10.

Dobijeni rezultati merenja konzistencije prikazani su u na slikama 11 i 12.

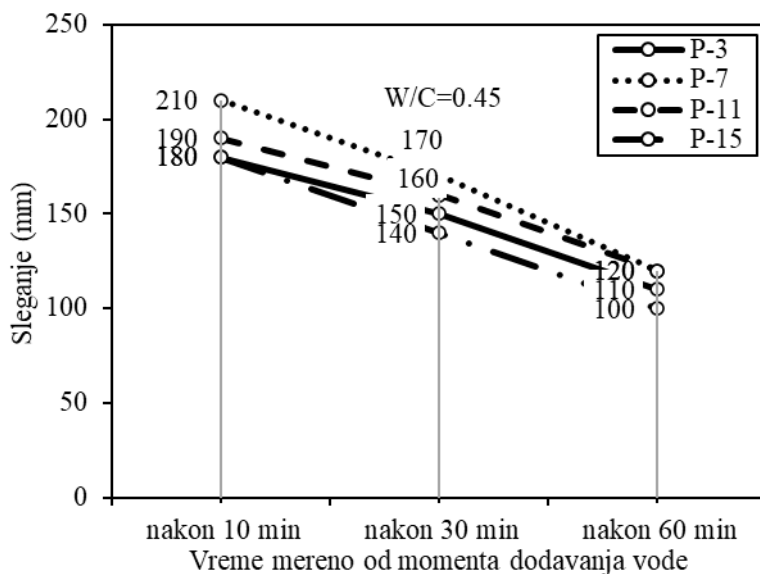


Slika 11. Rezultati merenja konzistencije betona (metodom sleganja), $w/c=0.55$

Kod betona sa $w/c = 0,55$, nakon 10 minuta od dodavanja vode, sve betonske mešavine ispunjavaju zahteve klase konzistencije S4 (160–210 mm).

Nakon 30 minuta uočeno je smanjenje vrednosti sleganja. Betonske mešavine koje sadrže drobljenu gumu kao delimičnu zamenu sitnog agregata (P-9 i P-13) prelaze u klasu konzistencije S3 (130–150 mm), dok referentni beton (P-1) i betonska mešavina sa hemijskim aerantnim dodatkom (P-5) ostaju u okviru klase konzistencije S4 (160–210 mm).

Nakon 60 minuta od dodavanja vode, mešavina sa 2,5% zapreminske zamene sitnog agregata drobljenom gumom (P-9) pokazuje konzistenciju koja odgovara klasi S2 prema metodi ispitivanja sleganja. Mešavina sa 5% zapreminske zamene drobljenom gumom (P-13) i mešavina sa hemijskim aerantnim dodatkom (P-5) zadržavaju klasu konzistencije S3, dok referentni beton bez dodataka (P-1) ostaje u klasi konzistencije S4.



Slika 12. Rezultati merenja konzistencije betona (metodom sleganja), $w/c=0.45$

Kod betona sa $w/c = 0,45$, nakon 10 minuta od dodavanja vode, sve betonske mešavine ispunjavaju zahteve klase konzistencije S4 (160–210 mm).

Nakon 30 minuta uočeno je smanjenje vrednosti sleganja. Mešavina koja sadrži 5% drobljene gume kao delimičnu zamenu sitnog agregata (P-15), kao i referentni beton (P-3), prelaze u klasu konzistencije S3 (130–150 mm). Nasuprot tome, mešavina sa 2,5% drobljene gume (P-11) i mešavina sa hemijskim aerantnim dodatkom zadržavaju konzistenciju u okviru klase S4 (160–210 mm).

Nakon 60 minuta od dodavanja vode, sve betonske mešavine nalaze se u okviru graničnih vrednosti klase konzistencije S3 (100–150 mm).

Na osnovu rezultata ispitivanja sleganja može se zaključiti da kod svih ispitivanih mešavina dolazi do postepenog smanjenja konzistencije svežeg betona tokom vremena.

7.1.2 Zapreminska masa i sadržaj vazduha

Zapreminska masa svežeg betona određivana je u skladu sa standardom SRPS EN 12350-6 [65] za svaku ispitivanu betonsku mešavinu. Sveži beton je, u zavisnosti od njegove konzistencije, ugrađivan u posudu zapremine $0,008 \text{ m}^3$ metodom slojeva. Konzistencija betonskih mešavina odgovarala je klasi S4 (160–210 mm). Beton je ugrađivan u tri sloja, pri čemu je svaki

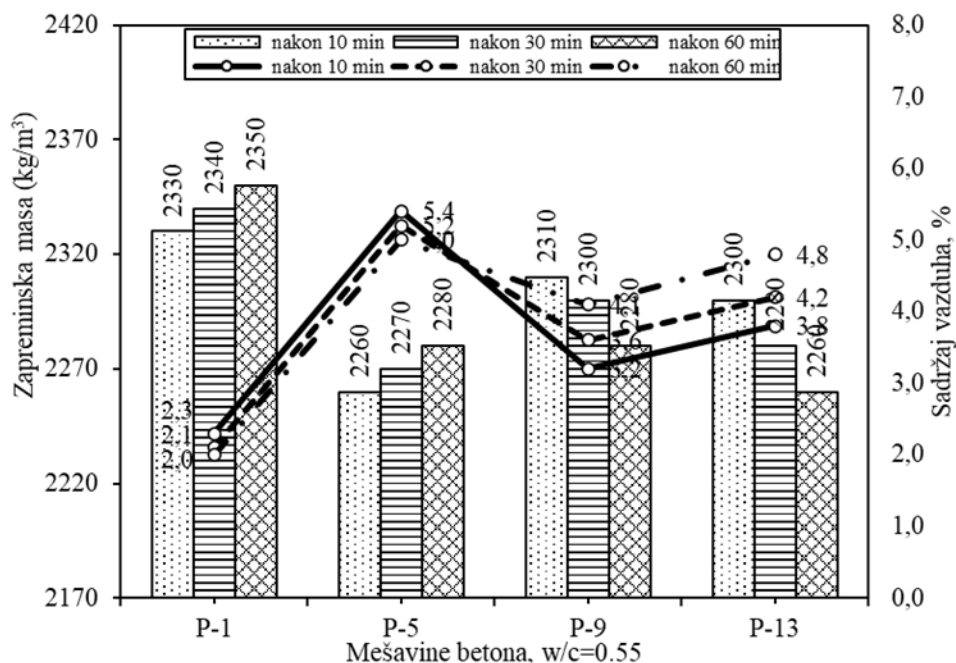
sloj zbijan sa 25 uboda čeličnom šipkom, nakon čega je spoljašnja strana posude udarana 10–15 puta gumenim čekićem radi boljeg zbijanja. Gornja površina uzorka potom je poravnavana lenjirom, a zatim je merena masa posude sa svežim betonom pomoću digitalne vage (slika 13).

Sadržaj vazduha u svežem betonu kod svih betonskih mešavina određen je nakon merenja zapreminske mase, metodom pritiska pomoću porozimetra proizvođača Testing (Nemačka), prikazanog na slici 13. Ispitivanje je sprovedeno u skladu sa postupkom definisanim standardom SRPS EN 12350-7 [63].

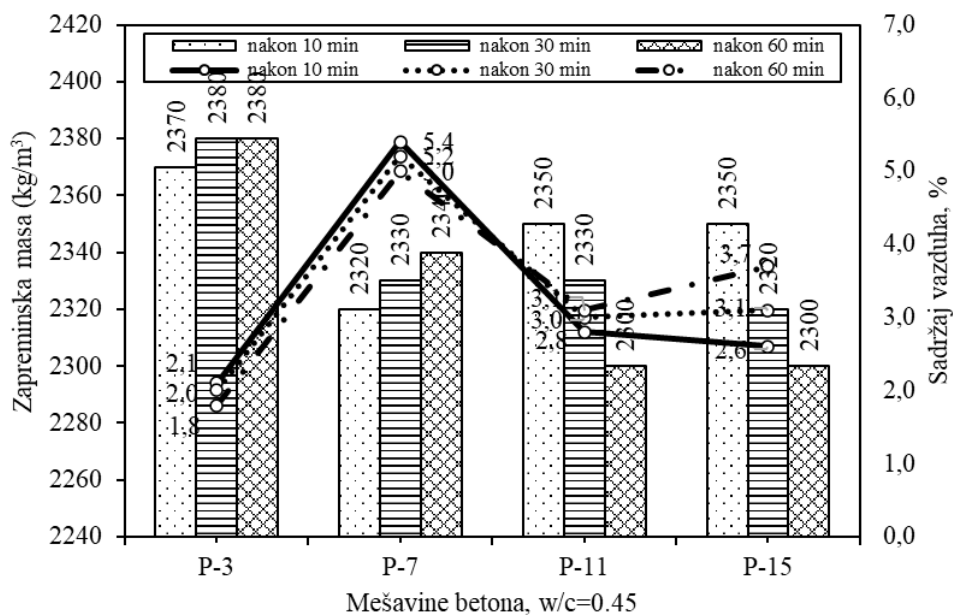


Slika 13. Postupak merenja zapreminske mase betona (levo) i merenje sadržaja vazduha (desno).

Na slici 14 prikazani su rezultati merenja zapreminske mase i sadržaja vazduha u svežem betonu za mešavine sa vodocementnim odnosom $w/c = 0,55$, dok su na slici 15 prikazani rezultati za mešavine sa vodocementnim odnosom $w/c = 0,45$.



Slika 14. Rezultati merenja zapreminske mase i sadržaja vazduha u svežem betonu ($w/c = 0,55$)



Slika 15. Rezultati merenja zapreminske mase i sadržaja vazduha u svežem betonu ($w/c=0.45$)

Rezultati prikazani na slikama 14 i 15 ukazuju da sastav betonske mešavine ima značajan uticaj na promene zapreminske mase i sadržaja vazduha u svežem betonu tokom vremena. Referentne mešavine i mešavine sa primenom hemijskog dodatka aeranta pokazuju blago povećanje zapreminske mase u periodu od 10 do 60 minuta nakon dodavanja vode. Nasuprot tome, kod betona sa dodatkom drobljene gume uočen je trend smanjenja zapreminske mase, praćen istovremenim povećanjem sadržaja vazduha u odnosu na referentne betone. Slična ponašanja zabeležena su kod oba analizirana vodocementna odnosa ($w/c = 0,55$ i $w/c = 0,45$).

Uporedivi rezultati navode se i u ranijim istraživanjima, gde je utvrđeno da prisustvo drobljene gume u betonskoj mešavini dovodi do smanjenja zapreminske mase i povećanja sadržaja vazduha, pre svega usled manje gustine gumenih čestica i slabije adhezije između gume i cementne paste [70–72].

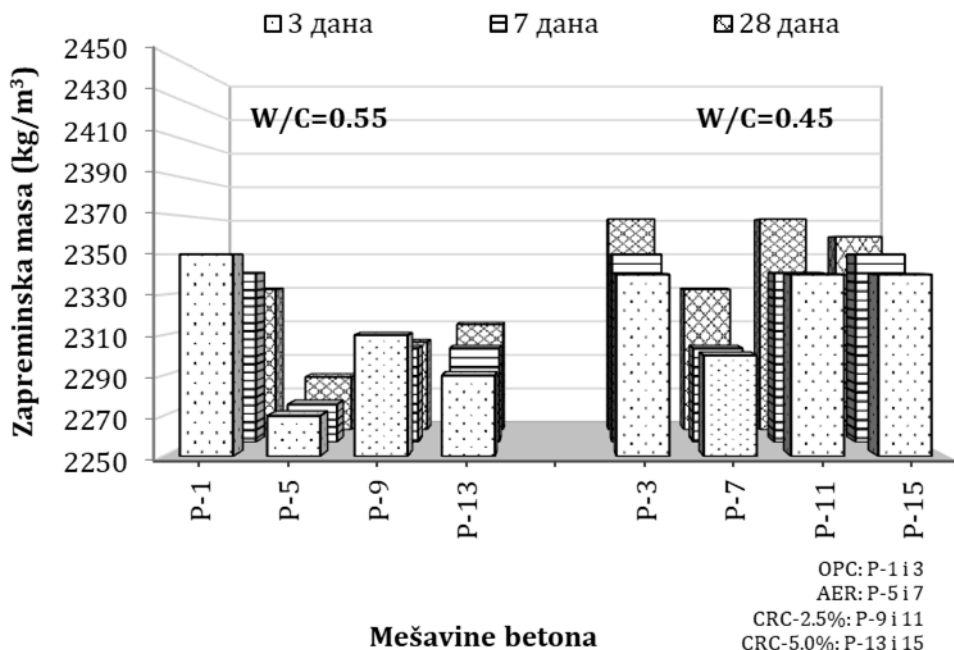
7.2 Očvršli beton

7.2.1 Zapreminska masa

Zapreminska masa predstavlja ključni parametar koji omogućava uspostavljanje funkcionalne korelacije sa mehaničkim svojstvima očvrslog betona, prvenstveno njegovom čvrstoćom pri pritisku. Određivanje zapreminske mase izvršeno je na uzorcima u obliku kocke sa ivicom dimenzije $d = 150$ mm. Vrednost je izračunata kao odnos mase uzorka i njegove zapremine, pri čemu je zapremina određena metodom hidrostatskog merenja.

Dobijene vrednosti zapreminske mase pružaju uvid u poroznost betonske matrice i predstavljaju pokazatelj očekivanih mehaničkih performansi očvrslog materijala.

Analiza promene zapreminske mase tokom vremena sprovedena je za starosti betona od 3, 7 i 28 dana, a odgovarajući rezultati prikazani su na slici 16.



Slika 16. Rezultati ispitivanja zapreminske mase očvrslog betona za mešavine sa vodocementnim odnosima $w/c = 0,55$ i $w/c = 0,45$.

Rezultati prikazani na slici 16 pokazuju da zapreminska masa očvrslog betona zavisi od sastava betonske mešavine, procenta zamene sitnog agregata drobljenom gumom i vodocementnog odnosa.

Kod betonskih mešavina sa $w/c = 0,55$ (P-1, P-5, P-9 i P-13) referentna mešavina P-1 ostvaruje najveće vrednosti zapreminske mase u svim starostima betona. Kod mešavina sa zapreminskom zamenom sitnog agregata drobljenom gumom uočeno je postepeno smanjenje zapreminske mase, pri čemu je pad najizraženiji kod mešavine P-5, a zatim kod mešavina P-9 i P-13. Ovo smanjenje posledica je manje gustine gumenih čestica u odnosu na mineralni agregat, što dovodi do smanjenja ukupne gustine betona.

Kod mešavina sa $w/c = 0,45$ (P-3, P-7, P-11 i P-15) zabeležene su veće vrednosti zapreminske mase u poređenju sa odgovarajućim mešavinama sa većim vodocementnim odnosom. Referentni beton P-3 pokazuje najveće vrednosti zapreminske mase, dok kod mešavina sa drobljenom gumom dolazi do smanjenja ovog parametra. I u ovom slučaju pad zapreminske mase povezan je sa prisustvom gumenog agregata, koji ima znatno manju zapreminsku masu od prirodnog agregata.

U svim mešavinama primećen je blagi porast zapreminske mase sa starošću betona, naročito između 3 i 28 dana, što se može objasniti napredovanjem procesa hidratacije cementa i zgušnjavanjem mikrostrukture betona.

U poređenju oba vodocementna odnosa može se zaključiti da mešavine sa $w/c = 0,45$ ostvaruju veće vrednosti zapreminske mase u odnosu na mešavine sa $w/c = 0,55$, što je posledica manjeg sadržaja vode u betonskoj mešavini i kompaktnije strukture očvrslog betona.

Dobijeni rezultati su u saglasnosti sa ranijim istraživanjima koja pokazuju da dodatak drobljene gume dovodi do smanjenja zapreminske mase betona usled manje gustine gumenog agregata i povećane poroznosti u interfacijalnoj prelaznoj zoni između gume i cementne matrice [73, 74]

7.2.2 Čvrstoća pri pritisku

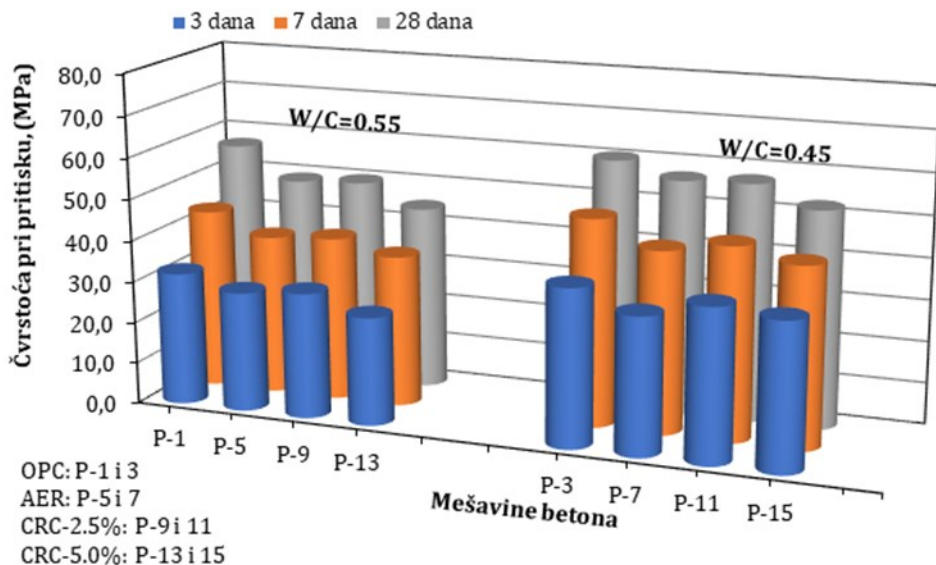
Ispitivanje čvrstoće betona pri pritisku sprovedeno je u skladu sa standardom SRPS EN 12390-3 [66] na uzorcima u obliku kocki ivice 15 cm, pri starostima od 3, 7 i 28 dana. Reprezentativna vrednost čvrstoće određena je kao srednja vrednost rezultata dobijenih na dva uzorka za svaku vrstu betona. Za potrebe ispitivanja korišćena je digitalna automatska hidraulična presa kapaciteta 3000 kN sa servo-kontrolom, pri čemu je brzina nanošenja opterećenja iznosila 0,6 MPa/s.

Pre početka ispitivanja uzorci su vađeni iz vode, a višak vode sa njihovih površina uklanjao je suvom krpom. Dimenzije uzoraka proveravane su kontrolnikom dužine radi određivanja ispitne površine A_c (mm²). Postupak određivanja čvrstoće betona pri pritisku prikazan je na slici 17.



Slika 17. Određivanje čvrstoće betona pri pritisku

Dobijeni rezultati ispitivanja prikazani su na slici 18.



Slika 18. Čvrstoća pri pritisku betona za mešavine sa vodocementnim odnosima $w/c = 0,55$ i $w/c = 0,45$.

Rezultati prikazani na slici 18 pokazuju da čvrstoća pri pritisku kod svih ispitivanih betonskih mešavina raste sa starošću betona, što je očekivano i posledica kontinuiranog procesa hidratacije cementa i postepenog zgušnjavanja mikrostrukture cementne matrice. U svim starostima najveće vrednosti čvrstoće ostvaruju referentni betoni P-1 i P-3, pri čemu beton P-3 sa vodocementnim odnosom $w/c = 0,45$ pokazuje veće vrednosti čvrstoće u poređenju sa betonom P-1 sa $w/c = 0,55$. Ovaj trend potvrđuje značajan uticaj vodocementnog odnosa na razvoj čvrstoće betona, jer niži odnos w/c dovodi do smanjenja kapilarne poroznosti i formiranja kompaktnije cementne matrice.

Kod betona P-5 i P-7 uočeno je smanjenje čvrstoće u odnosu na referentne betone. Na primer, nakon 28 dana čvrstoća betona P-5 bila je približno 6–8% niža u odnosu na referentni beton P-1, dok je kod betona P-7 smanjenje iznosilo oko 7–9% u poređenju sa betonom P-3. Ovo smanjenje može se povezati sa primenom hemijskog dodatka aeranta, koji dovodi do formiranja stabilnog sistema vazdušnih pora i povećanja ukupne poroznosti betona.

Dalje smanjenje čvrstoće uočeno je kod betona sa drobljenom gumom (P-9, P-11, P-13 i P-15). Pri tome je izražen trend da povećanje procenta zamene sitnog agregata gumom sa 2,5% (P-9 i P-11) na 5,0% (P-13 i P-15)

dovodi do dodatnog pada čvrstoće. Na primer, čvrstoća betona P-13 nakon 28 dana bila je približno 10–12% niža u odnosu na referentni beton P-1, dok je kod betona P-15 smanjenje iznosilo oko 11–13% u poređenju sa betonom P-3. Ovakav trend može se objasniti znatno manjom krutošću gumenih čestica u poređenju sa mineralnim agregatom, kao i slabijom interfacijalnom prelaznom zonom između gume i cementne paste.

Upoređivanjem rezultata za dva vodocementna odnosa može se uočiti da sve mešavine sa $w/c = 0,45$ ostvaruju veće vrednosti čvrstoće u odnosu na odgovarajuće mešavine sa $w/c = 0,55$, što ukazuje na dominantan uticaj vodocementnog odnosa na mehanička svojstva betona.

Dobijeni rezultati čvrstoće pri pritisku u skladu su sa prethodno analiziranim vrednostima zapreminske mase i sadržaja vazduha u svežem betonu. Mešavine koje su ostvarile manju zapreminsku masu i veći sadržaj vazduha pokazale su i niže vrednosti čvrstoće pri pritisku. Ovakav trend može se povezati sa povećanom ukupnom poroznošću betona i slabije razvijenom interfacijalnom prelaznom zonom (ITZ) između gumenih čestica i cementne matrice, koja je često poroznija zbog hidrofobne prirode gume, što dovodi do smanjenja sposobnosti prenosa napona kroz strukturu materijala [73 i 75].

7.2.4 Vodonepropustljivost betona

Dubina prodiranja vode pod pritiskom određena je prema standardu SRPS EN 12390-8 [126] na uzorcima u obliku kocke sa ivicom 150 mm, koji su do momenta ispitivanja negovani u vodi u skladu sa standardom SRPS EN 12390-2 [62]. Površina uzoraka bila je izložena dejstvu vodenog pritiska od (500 ± 50) kPa tokom perioda od (72 ± 2) sata.

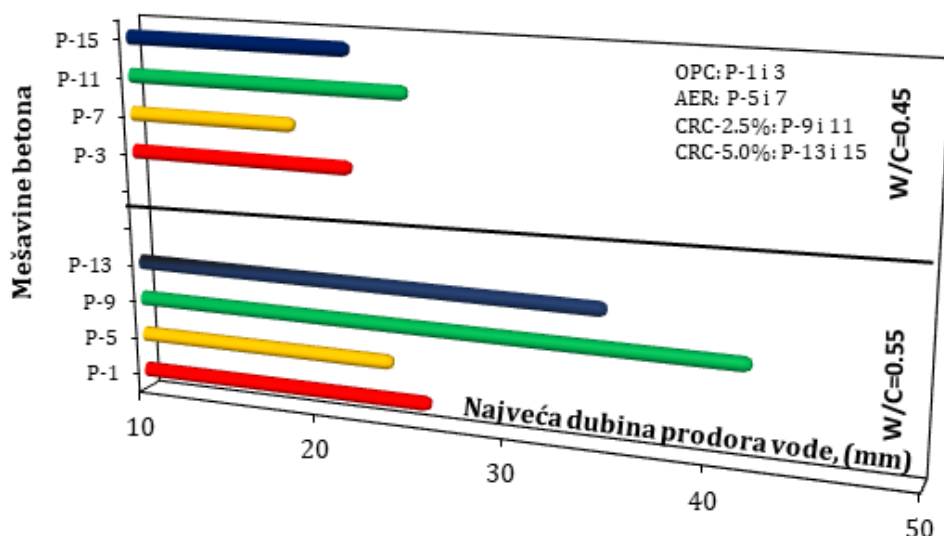
Po završetku izlaganja pritisku, uzorci su uklonjeni sa uređaja, nakon čega su betonske kocke lomljene na hidrauličnoj presi postupkom zatezanja cepanjem. Na dobijenoj površini preloma određena je maksimalna dubina prodora vode u beton. Izmerena vrednost dubine prodiranja vode izražena je u milimetrima (mm).

Aparatura korišćena za ispitivanje, postupak cepanja uzorka, kao i način određivanja dubine prodora vode u betonski uzorak prikazani su na slici 19.



Slika 19. Aparatura za ispitivanje, cepanje uzorka i merenje dubine prodiranja vode

Na slici 20 prikazane su vrednosti dubine prodora vode za svaku vrstu betona pri starosti uzoraka od 28 do 44 dana.



Slika 20. Dubina prodora vode pod pritiskom za betone sa vodocementnim odnosima $w/c = 0,55$ i $w/c = 0,45$.

Rezultati ispitivanja dubine prodiranja vode pod pritiskom, određeni u skladu sa standardom SRPS EN 12390-8, pokazuju da sastav betonske mešavine i vrednost vodocementnog odnosa imaju značajan uticaj na vodonepropustljivost očvrslog betona. Na osnovu rezultata prikazanih na slici 20, izmerene dubine prodora vode kreću se u približnom opsegu od 19 do 40 mm, pri čemu su sve ispitivane mešavine pokazale relativno dobru otpornost na prodor vode pri primenjenom pritisku od 500 kPa.

Referentni beton P-1 ($w/c = 0,55$) ostvario je dubinu prodora vode od približno 26 mm, dok je smanjenje vodocementnog odnosa na $w/c = 0,45$

kod referentne mešavine P-3 dovelo do smanjenja dubine prodora na oko 22 mm. Ovakav rezultat potvrđuje poznati uticaj smanjenja vodocementnog odnosa, koji doprinosi formiranju gušće i kompaktnije cementne matrice, uz smanjenje povezanosti kapilarnih pora kroz koje se voda može kretati.

Betonske mešavine sa primenom hemijskog dodatka aeranta (P-5 i P-7) pokazale su blago poboljšanje otpornosti na prodor vode u poređenju sa referentnim betonima. Kod mešavine P-5 ($w/c = 0,55$) dubina prodora iznosila je približno 24 mm, dok je kod mešavine P-7 ($w/c = 0,45$) zabeležena najmanja vrednost prodora, oko 19 mm. Ovakav rezultat može se objasniti formiranjem sistema sitnih i zatvorenih vazdušnih pora koje prekidaju kontinuitet kapilarne mreže i otežavaju transport vode kroz strukturu betona.

Kod betona sa zapreminskom zamenom sitnog agregata drobljenom gumom (P-9, P-11, P-13 i P-15) uočeno je povećanje dubine prodora vode, naročito kod mešavina sa većim vodocementnim odnosom $w/c = 0,55$. Mešavina P-9 pokazala je najveću dubinu prodora, približno 40 mm, dok je kod mešavine P-13 izmerena vrednost od oko 33 mm. Ovakvo ponašanje može se povezati sa povećanom poroznošću i slabije razvijenom interfacijalnom prelaznom zonom (ITZ) između čestica drobljene gume i cementne matrice. Hidrofobna priroda gume i slabija adhezija između gume i cementne paste mogu dovesti do formiranja lokalnih mikrošupljina koje olakšavaju prodor vode pod pritiskom.

Sa druge strane, kod mešavina sa nižim vodocementnim odnosom $w/c = 0,45$, negativan uticaj zapreminske zamene sitnog agregata drobljenom gumom znatno je manje izražen. Mešavine P-11 i P-15 ostvarile su dubine prodora vode od približno 25 mm i 19–20 mm, što je blisko vrednostima dobijenim kod referentnog betona P-3. Ovakav rezultat ukazuje da gušća mikrostruktura cementnog kamena pri nižem vodocementnom odnosu smanjuje kontinuitet kapilarnih pora i delimično ublažava negativan uticaj prisustva drobljene gume na sposobnost prodora vode kroz beton.

8. ZAKLJUČAK

Na osnovu sprovedenih ispitivanja može se zaključiti da upotreba drobljene reciklirane gume kao delimične zapreminske zamene sitnog agregata utiče na svojstva svežeg i očvrslog betona, pri čemu intenzitet tog uticaja zavisi pre svega od vodocementnog odnosa i procenta zamene agregata gumom. Kod betona sa dodatkom drobljene gume zabeleženo je postepeno smanjenje konzistencije tokom vremena, niža zapreminska masa svežeg i očvrslog betona, kao i povećanje sadržaja vazduha u poređenju sa

referentnim mešavinama. Istovremeno su ove mešavine pokazale i niže vrednosti čvrstoće pri pritisku, pri čemu je izraženiji pad čvrstoće uočen sa povećanjem zapreminske zamene sitnog agregata drobljenom gumom sa 2,5% na 5,0%.

Rezultati ispitivanja ukazuju da je vodonepropustljivost betona pre svega uslovljena vodocementnim odnosom. Mešavine sa $w/c = 0,45$ ostvarile su veću zapreminsku masu, veće vrednosti čvrstoće pri pritisku i manju dubinu prodora vode pod pritiskom u odnosu na odgovarajuće mešavine sa $w/c = 0,55$. Dobijeni rezultati pokazuju da se negativni efekti primene drobljene gume mogu delimično ublažiti primenom nižeg vodocementnog odnosa, čime se postiže kompaktnija i manje porozna struktura betona.

Na osnovu svega navedenog može se zaključiti da je primena drobljene reciklirane gume u betonu moguća, ali uz pažljivo projektovanje sastava betonske mešavine, naročito u pogledu procenta zamene agregata i izbora odgovarajućeg vodocementnog odnosa.

Zahvalnost

Ovo istraživanje finansijski je podržano od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije, na osnovu Ugovora br. 451-03-33/2026-03/200012.

9. LITERATURA

- [1] Guo, Y.C., Zhang, J.H., Chen, G.M., Xie, Z.H. (2014). *Compressive behaviour of concrete structures incorporating recycled concrete aggregates, rubber crumb and reinforced with steel fibre subjected to elevated temperatures*. Journal of Cleaner Production, 72, 193–203.
- [2] ETRMA (2018). *European Tyre and Rubber Manufacturers Association Report*. pp. 1–52.
- [3] Gheni, A.A., ElGawady, M.A., Myers, J.J. (2017). *Mechanical characterization of concrete masonry units manufactured with crumb rubber aggregate*. ACI Materials Journal, 114, 65–76.
- [4] Ismail, M.K., Hassan, A.A.A. (2017). *Use of steel fibers to optimize self-consolidating concrete mixtures containing crumb rubber*. ACI Materials Journal, 114, 581–594.
- [5] Strukar, K., Kalman Šipoš, T., Miličević, I., Bušić, R. (2019). *Potential use of rubber as aggregate in structural reinforced concrete elements – a review*. Engineering Structures, 188, 452–468.
- [6] Zhu, H. (2017). *Crumb Rubber Concrete Bridge Deck*.

- [7] Thomas, B.S., Gupta, R.C., Panicker, V.J. (2015). *Experimental and modelling studies on high strength concrete containing waste tire rubber*. Sustainable Cities and Society, 19, 68–73.
- [8] Hilal, N.N. (2017). *Hardened properties of self-compacting concrete with different crumb rubber size and content*. International Journal of Sustainable Built Environment, 6, 191–206.
- [9] Batayneh, M.K., Marie, I., Asi, I. (2008). *Promoting the use of crumb rubber concrete in developing countries*. Waste Management, 28, 2171–2176.
- [10] Mohammadi, I., Khabbaz, H. (2015). *Shrinkage performance of crumb rubber concrete prepared by water-soaking treatment method for rigid pavements*. Cement and Concrete Composites, 62, 106–116.
- [11] Hesami, S., Salehi Hikouei, I., Emadi, S.A.A. (2016). *Mechanical behavior of self-compacting concrete pavements incorporating recycled tire rubber crumb*. Journal of Cleaner Production, 133, 228–234.
- [12] Medina, N.F., Medina, D.F., Hernández-Olivares, F., Navacerrada, M.A. (2017). *Mechanical and thermal properties of concrete incorporating rubber and fibres from tyre recycling*. Construction and Building Materials, 144, 563–573.
- [13] Bisht, K., Ramana, P.V. (2017). *Evaluation of mechanical and durability properties of crumb rubber concrete*. Construction and Building Materials, 155, 811–817.
- [14] Thomas, B.S., Gupta, R.C. (2016). *Properties of high strength concrete containing scrap tire rubber*. Journal of Cleaner Production, 113, 86–92.
- [15] Sofi, A. (2018). *Effect of waste tyre rubber on mechanical and durability properties of concrete – a review*. Ain Shams Engineering Journal, 9, 2691–2700.
- [16] Thomas, B.S., Gupta, R.C., Kalla, P., Cseteneyi, L. (2014). *Strength, abrasion and permeation characteristics of cement concrete containing discarded rubber fine aggregates*. Construction and Building Materials, 59, 204–212.
- [17] Dong, Q., Huang, B., Shu, X. (2013). *Rubber modified concrete improved by chemically active coating and silane coupling agent*. Construction and Building Materials, 48, 116–123.
- [18] Ismail, M.K., Hassan, A.A.A. (2016). *Use of metakaolin on enhancing the mechanical properties of self-consolidating concrete containing high percentages of crumb rubber*. Journal of Cleaner Production, 125, 282–295.

- [19] He, L., Ma, Y., Liu, Q., Mu, Y. (2016). *Surface modification of crumb rubber and its influence on the mechanical properties of rubber-cement concrete*. Construction and Building Materials, 120, 403–407.
- [20] Dehdezi, P.K., Erdem, S., Blankson, M.A. (2015). *Physico-mechanical and microstructural properties of lightweight rubber concrete composite*. Composites Part B, 79, 451–455.
- [21] Ismail, M.K., Hassan, A.A.A. (2016). *Impact resistance and acoustic absorption capacity of rubberized concrete*. ACI Materials Journal, 113, 725–736.
- [22] Chen, X., Liu, Z., Guo, S., Huang, Y., Xu, W. (2019). *Experimental study on fatigue properties of normal and rubberized self-compacting concrete*. Construction and Building Materials, 205, 10–20.
- [23] Richardson, A.E., Coventry, K.A., Ward, G. (2012). *Freeze-thaw protection of concrete with optimum rubber crumb content*. Journal of Cleaner Production, 23, 96–103.
- [24] Richardson, A., Coventry, K., Edmondson, V., Dias, E. (2016). *Crumb rubber used in concrete to provide freeze-thaw protection*. Journal of Cleaner Production, 112, 599–606.
- [25] Thomas, B.S., Gupta, R.C., Panicker, V.J. (2016). *Recycling of waste tire rubber as aggregate in concrete: durability-related performance*. Journal of Cleaner Production, 112, 504–513.
- [26] Sukontasukkul, P. (2009). *Use of crumb rubber to improve thermal and sound properties of precast concrete panel*. Construction and Building Materials, 23, 1084–1092.
- [27] Marie, I. (2017). *Thermal conductivity of hybrid recycled aggregate–rubberized concrete*. Construction and Building Materials, 133, 516–524.
- [28] Kashani, A., Ngo, T.D., Mendis, P., Black, J.R., Hajimohammadi, A. (2017). *A sustainable application of recycled tyre crumbs as insulator in lightweight cellular concrete*. Journal of Cleaner Production, 149, 925–935.
- [29] Aliabdo, A.A., Abd Elmoaty, A.E.M., Abdelbaset, M.M. (2015). *Utilization of waste rubber in non-structural applications*. Construction and Building Materials, 91, 195–207.
- [30] Ghizdăveț, Z., Ștefan, B.M., Nastac, D., Vasile, O., Bratu, M. (2016). *Sound absorbing materials made by embedding crumb rubber waste in a concrete matrix*. Construction and Building Materials, 124, 755–763.

- [31] Wang, X., Xia, J., Nanayakkara, O., Li, Y. (2017). *Properties of high-performance cementitious composites containing recycled rubber crumb*. Construction and Building Materials, 156, 1127–1136.
- [32] Si, R., Guo, S., Dai, Q. (2017). *Durability performance of rubberized mortar and concrete with NaOH-treated rubber particles*. Construction and Building Materials, 153, 496–505.
- [33] Mavridou, S. (2010). *Integration of end-of-life tires in the life cycle of road construction*. Asphalt, 38.
- [34] Scrap Tire News (2016). *The source for news and information about the scrap tire and rubber recycling industry*.
- [35] Mohammadi, I., Khabbaz, H., Vessalas, K. (2014). *In-depth assessment of crumb rubber concrete prepared by water-soaking treatment method*. Construction and Building Materials, 71, 456–471.
- [36] J. Xie, J. Li, Z. Lu, Z. Li, C. Fang, L. Huang, et al., Combination effects of rubber and silica fume on the fracture behaviour of steel-fibre recycled aggregate concrete, Constr Build Mater, 203 (2019), pp. 164-173,
- [37] J. Xie, Y. Zheng, Y. Guo, R. Ou, Z. Xie, L. Huang, Effects of crumb rubber aggregate on the static and fatigue performance of reinforced concrete slabs, Compos Struct, 228 (2019),
- [38] Saberian, M. et al. (2019). *Recycled concrete aggregate mixed with crumb rubber under elevated temperature*. Construction and Building Materials, 222, 119–129.
- [39] C. Xiaowei, H. Sheng, G. Xiaoyang, D. Wenhui, Crumb waste tire rubber surface modification by plasma polymerization of ethanol and its application on oil-well cement, Appl Surf Sci, 409 (2017), pp. 325-342,
- [40] C.Y. Chen, M.T. Lee, Application of crumb rubber in cement-matrix composite, Materials, 12 (2019), p. 529,
- [41] H. Zhang, M. Gou, X. Liu, X. Guan, Effect of rubber particle modification on properties of rubberized concrete, J Wuhan Univ Technol Mater Sci Ed, 29 (2014), pp. 763-768,
- [42] Kaewunruen, S., Li, D., Chen, Y., Xiang, Z. (2018). *Enhancement of dynamic damping in railway sleepers using crumb rubber*. Materials, 11.
- [43] Sukontasukkul, P., Tiamlom, K. (2012). *Expansion under water and drying shrinkage of rubberized concrete*. Construction and Building Materials, 29, 520–526.

- [44] Ganjian, E., Khorami, M., Maghsoudi, A.A. (2009). *Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate in concrete*. Construction and Building Materials, 23, 1828–1836.
- [45] G. Yang, X. Chen, S. Guo, W. Xuan, Dynamic mechanical performance of self-compacting concrete containing crumb rubber under high strain rates, KSCE J Civ Eng, 23 (2019), pp. 3669-3681,
- [46] F.M.Z. Hossain, M. Shahjalal, K. Islam, M. Tiznobaik, M.S. Alam, Mechanical properties of recycled aggregate concrete containing crumb rubber and polypropylene fiber, Constr Build Mater, 225 (2019), pp. 983-996,
- [47] B.H. AbdelAleem, A.A.A. Hassan, Influence of synthetic fibers' type, length, and volume on enhancing the structural performance of rubberized concrete, Constr Build Mater, 229 (2019),
- [48] O. Onuaguluchi, D.K. Panesar, Hardened properties of concrete mixtures containing pre-coated crumb rubber and silica fume, J Clean Prod, 82 (2014), pp. 125-131,
- [49] S. Salehuddin, N.L. Rahim, N. Mohamad Ibrahim, S.A.N. Tajri, M.Z. Zainol Abidin, The behaviour of rubber tyre as fine aggregate in concrete mix, Appl Mech Mater, 754–755 (2015), pp. 427-431,
- [50] O. Youssf, J.E. Mills, R. Hassanli, Assessment of the mechanical performance of crumb rubber concrete, Constr Build Mater, 125 (2016), pp. 175-183,
- [51] A. Alsaif, L. Koutas, S.A. Bernal, M. Guadagnini, K. Pilakoutas, Mechanical performance of steel fibre reinforced rubberised concrete for flexible concrete pavements, Constr Build Mater, 172 (2018), pp. 533-543,
- [52] S. Ramdani, A. Guettala, M.L. Benmalek, J.B. Aguiar, Physical and mechanical performance of concrete made with waste rubber aggregate, glass powder and silica sand powder, J Build Eng, 21 (2019), pp. 302-311,
- [53] B.S. Mohammed, N.J. Azmi, Failure mode and modulus elasticity of concrete containing recycled tire rubber, J Solid Waste Technol Manag, 37 (2011), pp. 16-24,
- [54] R. Wang, P. Gao, M. Tian, Y. Dai, Experimental study on mechanical and waterproof performance of lightweight foamed concrete mixed with crumb rubber, Constr Build Mater, 209 (2019), pp. 655-664,
- [55] B.S. Thomas, R.C. Gupta, Long term behaviour of cement concrete containing discarded tire rubber, J Clean Prod, 102 (2015), pp. 78-87,

- [56] A. Moustafa, M.A. Elgawady, Mechanical properties of high strength concrete with scrap tire rubber, *Constr Build Mater*, 93 (2015), pp. 249-256,
- [57] H. Su, J. Yang, T.C. Ling, G.S. Ghataora, S. Dirar, Properties of concrete prepared with waste tyre rubber particles of uniform and varying sizes, *J Clean Prod*, 91 (2015), pp. 288-296,
- [58] T.M. Pham, M. Elchalakani, H. Hao, J. Lai, S. Ameduri, T.M. Tran, Durability characteristics of lightweight rubberized concrete, *Constr Build Mater*, 224 (2019), pp. 584-599,
- [59] T. Gupta, S. Chaudhary, R.K. Sharma, Mechanical and durability properties of waste rubber fiber concrete with and without silica fume, *J Clean Prod*, 112 (2016), pp. 702-711,
- [60] B. Muñoz-Sánchez, M.J. Arévalo-Caballero, M.C. Pacheco-Menor, Influence of acetic acid and calcium hydroxide treatments of rubber waste on the properties of rubberized mortars, *Mater Struct Constr*, 50 (2017), pp. 1-16,
- [61] B.S. Thomas, S. Kumar, P. Mehra, R.C. Gupta, M. Joseph, L.J. Csetenyi, Abrasion resistance of sustainable green concrete containing waste tire rubber particles, *Constr Build Mater*, 124 (2016), pp. 906-909,
- [62] SRPS EN 12390-2:2019 – Ispitivanje očvrstlog betona – Izrada i negovanje uzoraka.
- [63] SRPS EN 12350-7:2019 – Ispitivanje svežeg betona – Sadržaj vazduha.
- [64] SRPS EN 12350-2:2019 – Ispitivanje svežeg betona – Sleganje.
- [65] SRPS EN 12350-6:2019 – Zapreminska masa svežeg betona.
- [66] SRPS EN 12390-3:2019 – Čvrstoća betona pri pritisku.
- [67] SRPS EN 12390-8:2019 – Dubina prodora vode pod pritiskom.
- [68] Pravilnik o kvalitetu cementa, „Službeni glasnik RS“.
- [69] Pravilnik o tehničkim zahtevima za frakcionisani agregat za beton i asfalt.
- [70] Guo, S., Dai, Q., Si, R., Sun, X., & Lu, C. Evaluation of properties and performance of rubber-modified concrete for recycling of waste scrap tire. (2017). *Journal of Cleaner Production*, 148, 681–689.
- [71] Roychand, R., Gravina, R. J., Zhuge, Y., Ma, X., Youssf, O., & Mills, J. E. A comprehensive review on the mechanical properties of waste tire rubber concrete. *Construction and Building Materials*, 237, (2020). 117651.

- [72] Siddika, A., Mamun, M. A. A., Alyousef, R., Amran, Y. H. M., Aslani, F., & Alabduljabbar, H. Properties and utilizations of waste tire rubber in concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 224, (2019)., 711–731.
- [73] Kilani, A. J., Ikotun, B. D., & Abdulwahab, R. Effect of crumb rubber on concrete's and mortar's structural properties: A review. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 19, 47. (2025).
- [74] Azunna, S. U., Aziz, F. N. A. A., Rashid, R. S. M., & Bakar, N. B. A. Review on the characteristic properties of crumb rubber concrete. *Cleaner Materials*, 11, 100237. (2024).
- [75] Yang, G., Qi, Y., Ma, Z., Xu, J. Quantitative characterization of crumb rubber concrete interfacial transition zone based on microscopic test method. *Construction and Building Materials*, 505, 144689. (2025).