

Primljen / Received: 6.6.2022.

Ispravljen / Corrected: 24.5.2023.

Prihvaćen / Accepted: 11.7.2024.

Dostupno online / Available online: 10.9.2024.

Aspekti prikladnosti trostupanjskog miješanja gotove betonske smjese

Autori:



Prof.dr.sc. **Alena Sičáková**, dipl.ing.građ.
Tehničko sveučilište u Košicama, Slovačka
Građevinski fakultet
Institut za održivu i kružnu gradnju
alena.sicakova@tuke.sk
Autor za korespondenciju



Dr.sc. **Jeonghyun Kim**, dipl.ing.građ.
Sveučilište za znanost i tehnologiju
Građevinski fakultet
Wrocław, Poljska
jeonghyun.kim@pwr.edu.pl

Prethodno priopćenje

Alena Sičáková, Jeonghyun Kim

Aspekti prikladnosti trostupanjskog miješanja gotove betonske smjese

Nekoliko je istraživanja pokazalo da, u usporedbi s uobičajenim metodama miješanja, metode trostupanjskog miješanja (TM) poboljšavaju mehaničku čvrstoću i slijeganje betona, osobito kada se primjenjuje reciklirani betonski agregat. Međutim, većina istraživanja nije se bavila tehnološkim aspektima gotove betonske smjese, uključujući kontinuirano miješanje tijekom isporuke na gradilište. U ovom su istraživanju ispitivana svojstva betona (konzistencija slijeganjem i tlačna čvrstoća) na temelju vremenskog odmaka nakon miješanja metodom TM (tj. odmah, 45 min i 90 min nakon miješanja), a uzorci su ispitani nakon tri godine njege. Rezultati upućuju na neke pozitivne učinke metode TM na gotovu betonsku smjesu i njezine karakteristike pri isporuci na gradilište, točnije manji gubitak konzistencije u usporedbi s uobičajenom metodom miješanja, kao i pozitivan učinak na tlačnu čvrstoću pri primjeni letećeg pepela kao dodatka vezivu u prvoj fazi miješanja betona.

Ključne riječi:

beton, reciklirani betonski agregat, trostupanjsko miješanje, vrijeme miješanja, konzistencija, tlačna čvrstoća

Research Paper

Alena Sičáková, Jeonghyun Kim

Some aspects of the suitability of three-stage mixing for ready-mixed concrete

Several studies have indicated that three-stage mixing (TM) methods improve the mechanical strength and slump of concrete compared to those of normal mixing methods, particularly when a recycled concrete aggregate is used. However, most studies did not address the technological aspects of ready-mixed concrete, including continuous mixing during site delivery. In this study, the properties of concrete (slump and compressive strength) based on the time lapse after mixing via the TM method (i.e. immediately, 45 min, and 90 min after mixing) were investigated, and the samples were tested after three years of curing. The results indicate some positive effects of TM on ready-mixed concrete and its characteristics on a delivery to the construction site, particularly a less severe loss of consistency compared to that of conventional mixing, as well as a positive effect on the compressive strength when fly ash is used as an aggregate coating additive in the first stage of concrete mixing.

Key words:

concrete, recycled concrete aggregate, three-stage mixing, mixing time, consistency, compressive strength

1. Uvod

Beton s vremenom iz tekućeg stanja prelazi u kruto, pa stoga postoji jasna razlika u svojstvima između mješavina napravljenih neposredno nakon miješanja u laboratoriju i postrojenju s kontroliranim okruženjem i onih napravljenih nakon dopreme na gradilište [1]. U mnogim slučajevima, beton se primjenjuje kao gotova betonska smjesa koja se miješa od tvorničkih pogona tj. betonara do gradilišta. Stoga se s praktičnoga građevinskog stajališta moraju uzeti u obzir svojstva betona ovisna o vremenu. Glavna svojstva betona uključuju obradljivost i tlačnu čvrstoću. Uzimajući ih u obzir, produljeno vrijeme miješanja nije negativno utjecalo na tlačnu čvrstoću. Al-Negheimish i Alhozaimy [2] navode da je tlačna čvrstoća betona proizvedenog na gradilištu malo veća od čvrstoće betona proizvedenog u tvorničkom pogonu. Erdogdu [3] navodi da se tlačna čvrstoća betona 150 minuta nakon miješanja povećala za 15 % u usporedbi s čvrstoćom betona napravljenog neposredno nakon miješanja. Kirca i sur. [4] također su pratili učinak produljenog miješanja do 4 sata, tijekom kojeg se beton kontinuirano miješao malim brzinama. Prikazane vrijednosti čvrstoće upućuju na povećanje tlačne čvrstoće betona do 27 % u usporedbi s betonom napravljenim neposredno nakon miješanja, jer povišena temperatura unutar bubnja uzrokovana kontinuiranim miješanjem betona tijekom transporta ubrzava hidrataciju cementa te povećava isparavanje slobodne vode iz betona.

Međutim, za razliku od učinka na tlačnu čvrstoću, produljeno vrijeme miješanja uzrokuje ozbiljan gubitak obradljivosti. Al-Negheimish i Alhozaimy [2] naveli su da se slijeganje betona smanjilo za 37 %, a njegova temperatura porasla za 1,1 °C tijekom transporta ljeti. Vickers i sur. [5] pokazali su da je slijeganje betona miješanog 67 minuta bilo 60 do 75 % manje od početnog slijeganja nakon miješanja od 7 minuta. Mahmood i sur. [6] pokazali su da je slijeganje betona koji sadrži leteći pepeo (eng. *fly ash* - FA) nakon 90 min bilo 32 % manje nego kod betona neposredno nakon miješanja. Nadalje, uočeno je da produljeno vrijeme miješanja uzrokuje smanjenje slijeganja bez obzira na količinu i vrstu superplastifikatora [3, 7]. Ponovno miješanje dodavanjem vode i superplastifikatora može vratiti obradljivost betona na početnu razinu kako bi se nadoknadio navedeni gubitak slijeganja. Međutim, te metode smanjuju mehaničku čvrstoću i trajnost betona. Baskoca i sur. [8] zaključili su da, iako je produljeno vrijeme miješanja imalo minimalan učinak na tlačnu čvrstoću, tlačna čvrstoća betona se smanjila do 35 % pri ponovnom miješanju uz dodavanje vode kako bi se obradljivost vratila na početnu razinu zbog povećanog vodocementnog omjera.

Još jedno pitanje koje se tiče upotrebe recikliranih agregata (betona ili opeke) za proizvodnju betona za praktičnu upotrebu naveli su Malešev i sur. [9]. Oni tvrde da su svojstva čvrstoće i trajnosti betona koji sadrži reciklirani betonski agregat (eng. *recycled concrete aggregate* - RCA) lošija od betona koji sadrži prirodni agregat (eng. *natural aggregate* - NA). Učinak recikliranog agregata na svojstva betona detaljno su analizirali Baričević i sur. [10]. Glavna značajka je prisutnost mikropukotina i pora u već postojećem mortu prionulom na RCA, što je čimbenik pogoršanja kvalitete koji povećava upijanje vode i smanjuje gustoću u usporedbi s gustoćom NA-a. Visoka

razina upijanja vode RCA-a bila je razlog smanjenog slijeganja tijekom vremena, kao i smanjenog slijeganja i čvrstoće recikliranog betonskog agregata (RCA). Stoga su istraživači razvili i predložili različite metode miješanja za poboljšanje obradljivosti u svježem stanju te mehaničkih svojstava i trajnosti RCA-a u očvrslulom stanju. Tam i sur. [11] predložili su dvostupanjski pristup miješanju (eng. *two-stage mixing approach* - TSMA). Za razliku od metode uobičajenog miješanja (NM) u kojoj se svi materijali dodaju odjednom, polovica vode za miješanje dodaje se RCA-u i cementu kako bi se formirao tanki sloj paste na površini RCA-a za popunjavanje pukotina i praznina u TSMA, a druga polovica vode za miješanje dodaje se naknadno kako bi se završilo miješanje betona. Tanki sloj paste formiran na površini RCA-a poboljšao je sučeljak - prijelaznu zonu (eng. *interfacial transition zone* - ITZ) između RCA-a i nove cementne paste. Kong i sur. [12] razvili su metodu trostupanjskog miješanja (TM) kako bi dodatno poboljšali ITZ oblaganjem površine RCA-a pucolanskim materijalima te navode da je tlačna čvrstoća betona izrađenog pomoću metode TM bila ~20 % veća od čvrstoće betona miješanog pomoću metodom TSMA. Li i sur. [13] predložili su metodu u kojoj se dio vode i pucolanskih materijala najprije miješa kako bi se formirala pasta, a zatim je dodan RCA kako bi se površina obložila pastom. Prikazane metode miješanja povezane su s materijalima i nanošenjem sloja obloge tijekom procesa miješanja [11-16].

Navedena istraživanja upućuju na važnost metode oblaganja koja poboljšava obradljivost i mehanička svojstva RCA-a. Međutim, većina istraživanja se tek treba baviti tehnološkim aspektima gotove betonske smjese, uključujući kontinuirano miješanje tijekom isporuke na gradilište. Osim prethodnih istraživanja jednog od autora [1, 17], oni nisu pronašli istraživanja o složenim učincima dugotrajnog miješanja na konzistenciju i tlačnu čvrstoću betona miješanog metodom TM. Stoga je ovo istraživanje ispitivalo svojstva betona (slijeganje i tlačna čvrstoća) na temelju vremenskog odmaka nakon miješanja metodom TM (odmah, 45 min i 90 min nakon miješanja).

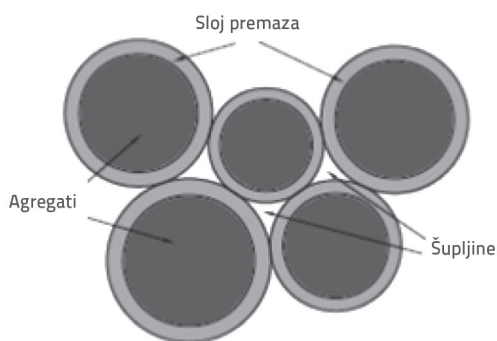
Istraživanje je jedinstveno jer prati dugoročni razvoj čvrstoće betona u rasponu od dva dana do tri godine, što je dragocjeno za razumijevanje učinka metode TM. Naknadno je metoda TM primijenjena na NA za usporedbu s RCA (istraživači uključuju samo RCA pri predstavljanju metode TM). Prah recikliranog betona (eng. *recycled concrete powder* - RP) primjenjuje se kao materijal za oblaganje, ali smatra se teškim za recikljanje i stoga je rijetko ispitivan. Prikazana istraživanja mogu se tumačiti u smislu procesa kontrole kvalitete betona na gradilištu i razlika između uzoraka proizvedenih u tvornici betona i onih proizvedenih nakon isporuke na gradilišta.

2. Materijali i metode

2.1. Tijek miješanja betonske mješavine

Metoda TM primijenjena je za poboljšanje svojstava RCA-a. Konfiguracija predstavljena u ovom istraživanju projektirana je sa sljedećim značajkama.

Prva faza miješanja: Samo su krupni agregati, i to prirodni (NA) i reciklirani betonski (RCA) obloženi vezivom. Naime, suhim krupnim agregatima dodana je voda (W_{ef1}) u količinama koje odgovaraju upijanju vode krupnih agregata. Suhi materijali za oblaganje dodani su mokrim krupnim agregatima u vodovezivnom omjeru (w/b) od 0,5, pri čemu je na površini krupnih agregata formiran sloj obloge. Tijekom ove faze miješanja izračunana je količina materijala za oblaganje za stvaranje sloja debljine 150 μm . Za izračun je primijenjena klasična Kennedyjeva metoda [18]. Ona omogućuje izračunavanje količine veziva potrebnog za odvojeno pokrivanje zrna i količine za popunjavanje preostalih šupljina primjenom modela debljine sloja koji se temelji na teoriji da se ista debljina δ formira na zrnima različite veličine. Različite hipoteze za kvantificiranje sloja cementne paste koji prekriva zrna predstavljene su u [19], kao što je prikazano na slici 1.



Slika 1. Model agregata sa slojem obloge debljine δ koji ima prazne šupljine [19]

Za ovaj eksperiment, debljina sloja obloge odabrana je na temelju graničnih uvjeta koje su dobili Poon i sur. [20], koji su

predložili 36-60 μm kao tipičnu debljinu ITZ-a u RCA-u te Li i sur. [13], koji su naveli debljinu od 500 μm za pokrivanje cijelog ITZ-a. Obujam paste za oblaganje krupnog agregata V_{cp} (m^3) izračunan je kao višekratnik površine agregata F (m^2) i debljine sloja δ (μm). Površina agregata izračunana je pomoću izraza (1) prema [18]:

$$F = f \cdot \frac{\rho_b}{\rho_p} \sum \frac{p_i}{0,1 \cdot d_i} \quad (1)$$

Površinu karakterizira kvaliteta površine agregata (f), nasipna gustoća u rastresitom stanju ρ_p , gustoća čestica agregata (ρ_p izražene u $[\text{kg}/\text{m}^3]$), raspodjela veličine čestica stvarnog agregata na temelju p_i (količina agregata prosječne veličine zrna d_i [%]) te prosječna veličina zrna parametara udjela agregata d_i [mm].

Određeni materijali primijenjeni su kao materijali za oblaganje: FA i RP upotrijebljeni su kao materijali za oblaganje. Nadalje, portlandski cement primijenjen je kao standardno vezivo za usporedbu s druga dva materijala za oblaganje i betonom običnog sastava bez dodataka, pri čemu je cement podijeljen na samo dva dijela u smislu postupka metode TM. Sitni agregati i cement dodani su tijekom druge faze miješanja.

U trećoj fazi miješanja dodana je voda (W_{ef2}) pomiješana s plastifikatorom kako bi se završilo miješanje betona. Količine cementa i vode potrebne za popunjavanje preostalih šupljina između zrna obloženih agregata izračunane su pomoću $w/b = 0,5$.

2.2. Materijali i mješavine

Gustoća prirodnog agregata (NA) iznosila je 2650 kg/m^3 , a gustoće recikliranog betonskog agregata (RCA) iznosile su

Tablica 1. Omjeri mješavine betona

Komponenta [kg/m^3]			Sastav betona prema vrsti krupnog agregata i materijala za oblaganje					
			RCA _C	RCA _{FA}	RCA _{RP}	NA _C	NA _{FA}	NA _{RP}
Agregati	NA	0/4	898	898	898	896	896	896
		4/8	-	-	-	269	269	269
		8/16	-	-	-	627	627	627
	RCA	4/8	224	224	224	-	-	-
		8/16	545	545	545	-	-	-
	Volumen [m^3]		0,676					
	Volumenski udio [%]		67,6					
Pasta za oblaganje agregata	Materijal za oblaganje		80	68	68	55	47	47
	Voda [W_{ef-1}]		39,8	33,8	33,8	27,4	23,2	23,2
	Volumen [m^3]		0,046					
	Volumenski udio [%]		4,6					
Pasta za popunjavanje praznina	CEM I 42,5 R		310	310	310	336	336	336
	Voda [W_{ef-2}]		155	155	155	168	168	168
	Volumen [m^3]		0,278					
	Volumenski udio [%]		27,8					
Dodaci		2,5	2,5	2,5	2,7	2,7	2,7	

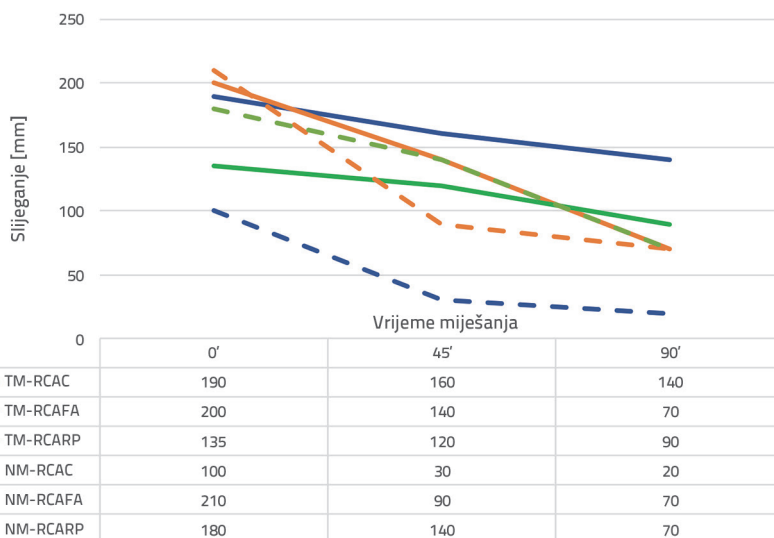
2200 kg/m³ (4/8) i 2300 kg/m³ (8/16). Reciklirani betonski agregati dobiveni su od tvrtke za recikliranje građevinskog otpada i otpada od rušenja. Cement CEM I 42,5 R (C) primijenjen je kao osnovno vezivo za miješanje komponenti u drugom i trećem koraku miješanja te kao materijal za oblaganje u prvom koraku miješanja. Kao alternativni materijali za oblaganje primijenjeni su FA dobiven iz energetskog sektora tvornice čelika [veličina zrna d(0,9) = 95 μm] i RP dobiven odvajanjem sitnih čestica recikliranog betona manjih od 125 μm. RP je primijenjen kao fini agregat RCA-a, koji se inače u proizvodnji betona teško reciklira. Potom je primijenjen polikarboksilatni plastifikator.

Kao kontrolni uzorci pripremljene su i ispitane mješavine samo s NA i mješavine proizvedene standardnim miješanjem (tj. metodom NM). Materijali za oblaganje dodavani su istovremeno s osnovnim vezivom (cementom) pri primjeni metode NM. Omjeri mješavine navedeni su u tablici 1. Pripremljeno je šest različitih betonskih kompozita koji su varirali prema vrsti agregata (RCA i NA) i materijala za oblaganje (FA, RP i C) (tablica 1.). Uzorci kocke dimenzija 100 mm izrađeni su u sljedećim vremenskim intervalima za određivanje učinka vremena pražnjenja na tlačnu čvrstoću betona: odmah nakon miješanja (0'), nakon 45 min (45') i nakon 90 min (90'). Svaka betonska mješavina ponovno je miješana svakih 15 minuta dok se čekalo na pražnjenje i lijevanje uzoraka. Kocke su njegovane u standardnim uvjetima tijekom vremena ispitivanja. Standardno ispitivanje slijeganja prema EN 12350-2 [21] provedeno je za svježi beton, a ispitivanje tlačne čvrstoće prema EN 12390-3 [22] provedeno je nakon 2, 28 i 90 dana te nakon 3 godine njege.

3. Rezultati

3.1. Konzistencija

Vrijednosti slijeganja za pojedina vremena mjerenja prikazane su na slici 2. (RCA beton) i slici 3. (NA beton). Varijacije u konzistenciji (predstavljene kao postotci) navedene su u tablici 2. Za sve uzorke uočen je gubitak konzistencije s produljenim miješanjem, što je uobičajeni rezultat zabilježen u drugim istraživanjima [3, 23]. Prosječne vrijednosti gubitka konzistencije prema vrsti agregata i metodi miješanja prikazane su kako slijedi: prosječni gubitak konzistencije mješavina s RCA: 34 % (45') i 55 % (90'); prosječni gubitak konzistencije mješavina sa NA: 16 % (45') i 34 % (90'); prosječni gubitak konzistencije mješavina pripremljenih metodom TM: 13 % (45') i 34 % (90'); i prosječni gubitak konzistencije mješavina pripremljenih metodom NM: 37 % (45') i 56 % (90').



Slika 2. Rezultati slijeganja za uzorke pripremljene primjenom RCA-a

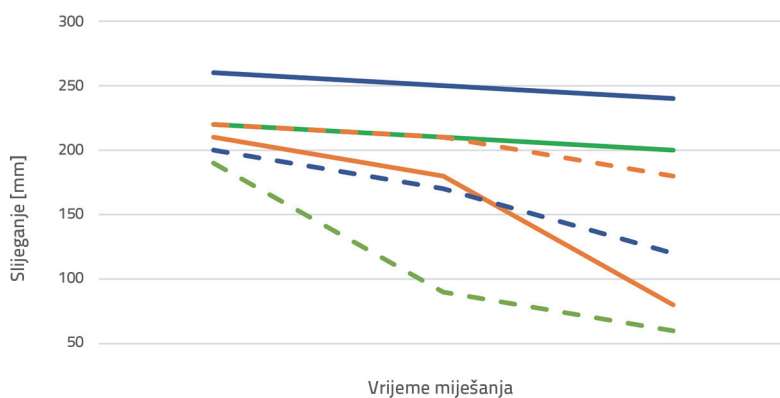
Tablica 2. Promjena konzistencije uzoraka uzrokovana produljenim miješanjem

Uzorak	Promjena konzistencije [%]		Promjena razreda konzistencije slijeganjem
	0'/45'	0'/90'	0'/90'
TM - RCA _C	-16	-26	S4/S3
TM - RCA _{FA}	-30	-65	S4/S2
TM - RCA _{RP}	-11	-33	S3/S2
TM - NA _C	-4	-8	S5/S5
TM - NA _{FA}	-14	-62	S4/S2
TM - NA _{RP}	-5	-9	S5/S4
NM - RCA _C	-70	-80	S3/S1
NM - RCA _{FA}	-57	-67	S4/S2
NM - RCA _{RP}	-22	-61	S4/S2
NM - NA _C	-15	-40	S4/S3
NM - NA _{FA}	-5	-18	S5/S4
NM - NA _{RP}	-53	-68	S4/S2

Beton na bazi RCA-a (slika 2.): Kao što pokazuju rezultati provedenih istraživanja (prosječno 69 % nakon 90' miješanja) i kao što je prikazano u [24], NM je povezana s velikim gubitkom konzistencije betona s RCA. U ovom je slučaju prijavljen gubitak konzistencije (28–37 %) nakon 90' primjene metode NM na beton s 20 do 100 % RCA. Navedeno je prikazano na slici 2. TM pomaže u postizanju bolje konzistencije pri primjeni CEM-a kao materijala za oblaganje. Navedeni se učinak odnosi na slijeganje neposredno nakon miješanja betona i slijeganje nakon duljeg miješanja. Nadalje, metoda TM održava konzistenciju u vremenu miješanja jer smanjenje vrijednosti konzistencije uzoraka pripremljenih metodom TM i NM nakon 90' miješanja iznosi 26 odnosno 80 %.

Uzorci s FA oblogom postigli su bolju konzistenciju pomoću metode TM do 90', uz gotovo isti gubitak konzistencije nakon 90' miješanja, dok metoda TM postiže bolju konzistenciju za uzorke obložene RP-om nakon samo 90' miješanja. Poboļšana konzistencija, kao i manji gubitak konzistencije uzoraka pripremljenih metodom TM, pripisuje se oblaganju hrapavih površina RCA praškastim materijalima tijekom prve faze miješanja, što rezultira ujednačenijom i glatkijom površinom zrna. Istovremeno, formirani sloj sprječava prodor vode dodane tijekom druge faze miješanja u zrna RCA-a, čime je otklonjen veliki nedostatak RCA-a (visoka razina apsorpcije vode), čime je ostavljeno dovoljno vode za miješanje radi postizanja i održavanja konzistencije.

Beton na bazi NA-a (slika 3.): Primjena metode NM rezultirala je gubitkom konzistencije betona sa 100 % NA, kao što pokazuju naši rezultati (prosječno 42 % nakon 90' miješanja), kao i rezultati u [24] (52 %). Slika 3. pokazuje da je metoda TM pozitivno utjecala na konzistenciju betona s CEM-om i RP-om kao materijalima za oblaganje, koji je primijenjen na neposredno slijeganje, kao i na onaj tijekom produljenog miješanja. Nadalje, primjenom metode TM, smanjenja vrijednosti konzistencije uzoraka bila su 8 % i 9 %, tj. metodom TM zadržana je konzistencija u vremenu miješanja. S druge strane, za metodu NM te su vrijednosti iznosile 40 odnosno 68 %. Trostruko miješanje uzoraka s FA nije bilo učinkovito. Uspoređujući prosječne vrijednosti svih uzoraka (gore prikazanih), metodom TM došlo je do manjeg gubitka konzistencije nego u slučaju primjene metode NM. Taj je učinak primijenjen pojedinačno na sve parove uzoraka osim na uzorke na bazi NA-a obložene FA-om ($TM-NA_{FA}/NM-NA_{FA}$). Ovdje je gubitak konzistencije uzrokovan produljenim miješanjem veći primjenom TM pristupa (14 % – 45', 62 % – 90') u usporedbi s gubitkom primjenom NM pristupa (5 % – 45', 18 % – 90').



	0'	45'	90'
TM-RCAC	260	250	240
TM-RCAFA	210	180	80
TM-RCARP	220	210	200
NM-RCAC	200	170	120
NM-RCAFA	220	210	180
NM-RCARP	190	90	60

Slika 3. Rezultati slijeganja za uzorke pripremljene s NA

Oblaganje agregata pastom prije dodavanja drugih sastojaka za dovršetak miješanja betona korisno je za kontrolu konzistencije gotovog betona tijekom vremena, u usporedbi s metodom NM. Rezultati za metodu NM s jačim gubitkom konzistencije nakon 90' u skladu su s nalazima autora Erdogdua i sur. [3]. Beton podvrgnut dugotrajnom miješanju rezultira relativno brzim gubitkom slijeganja do 90 minuta miješanja, što pokazuje da razdoblje miješanja od 90 minuta predstavlja prekretnicu za odgovarajuću ugradnju, zbijanje i naknadne postupke s betonom.

Tablica 2. navodi razrede konzistencije slijeganjem svakog betona za osnovno miješanje (0') i miješanje betona u trajanju od 90 minuta (90') prema [25]. Neke su mješavine pokazale da je razred konzistencije slijeganjem betona miješanog 90 minuta do dva stupnja niža od one betona miješanog 0 minuta, što predstavlja prekretnicu za odgovarajuće postavljanje, zbijanje i naknadne postupke s betonom [3, 5, 6]. Među šest serija betona pripremljenih primjenom metoda TM i NM, dvije serije betona pripremljenih pomoću metode TM ($TM - RCA_{FA}$ i $TM - NA_{FA}$) i četiri serije betona pripremljenih metodom NM ($NM - RCA_{CEM}$, $NM - RCA_{FA}$, $NM - RCA_{RP}$ i $NM - NARP$) smanjene su za dva stupnja. Stoga se čini da je metoda TM bolja za održavanje konzistencije do 90 min.

Najveće promjene vezane uz metodu TM odnose se na oblaganje agregata FA ($TM - RCA_{FA}$ i $TM - NA_{FA}$). Gubitak konzistencije u betonu pomiješanom s FA tijekom duljih vremena miješanja naveden je u [23]. U istraživanju, betonske mješavine s 20 % FA (što je otprilike slučaj u ovom istraživanju) imaju rezidualno slijeganje (nakon 90' miješanja) od ~50 % početnog slijeganja. Mahmood i sur. [6] otkrili su da je slijeganje betona koji je sadržavao FA nakon 90 min bilo 32 % manje nego kod betona neposredno nakon miješanja. Naši rezultati upućuju na rezidualno slijeganje od 38 odnosno 35 % za NA i RCA. Međutim, te se okolnosti kompenziraju svojstvima očvrstnuloḡ betona, pri čemu je metoda TM povoljna za uzorke pomiješane s FA.

3.2. Tlačna čvrstoća

Tablica 3. prikazuje rezultate tlačne čvrstoće svih pripremljenih betona pri različitim starostima. Sa stajališta metodologije ispitivanja betona u praksi, uzorci betona ugrađeni nakon osnovnog postupka miješanja smatraju se proizvedenima u tvorničkim pogonima, a uzorci ugrađeni nakon dužeg miješanja smatraju se proizvedenima na gradilištu. Granica značajnosti izražena je za svaku starost uzorka kako bi se procijenila značajnost promjena u tlačnoj čvrstoći uzrokovanih produljenim miješanjem. Tipična razlika jednog razreda čvrstoće kako je opisano u EN 206+A2 [25],

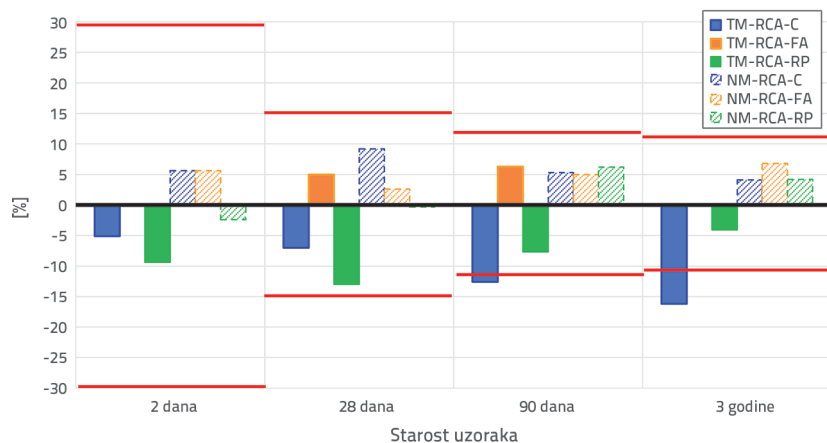
Tablica 3. Tlačna čvrstoća uzoraka pri različitim starostima i vremenima miješanja

Uzorak	f_c – tlačna čvrstoća [MPa]											
	2 dana			28 dana			90 dana			3 godine		
	0'	45'	90'	0'	45'	90'	0'	45'	90'	0'	45'	90'
TM - RCA _C	18,3	17,4	16,1	37,0	34,4	34,8	43,8	38,3	40,8	47,0	39,4	44,1
+/- između 0'/90'	-12 %			-6 %			-7 %			-6 %		
TM - RCA _{FA}	13,4	13,4	12,7	27,7	29,2	30,3	37,8	40,2	39,0	47,8	47,6	48,5
+/- između 0'/90'	-5 %			+9 %			+3 %			+2 %		
TM - RCA _{RP}	11,7	10,6	11,4	25,6	22,2	24,4	31,3	28,9	29,2	32,0	30,7	33,8
+/- između 0'/90'	-3 %			-5 %			-7 %			+6 %		
TM - NA _C	19,4	19,4	19,6	37,0	35,3	34,8	45,7	43,7	40,2	67,2	65,0	66,3
+/- između 0'/90'	+1 %			-6 %			-12 %			-1 %		
TM - NA _{FA}	17,6	18,6	19,0	38,2	39,9	41,7	51,1	51,1	54,8	52,6	54,3	57,6
+/- između 0'/90'	+8 %			+9 %			+7 %			+10 %		
TM - NA _{RP}	15,7	15,9	16,5	34,1	32,5	32,3	39,4	39,3	38,6	40,0	39,3	40,8
+/- između 0'/90'	+5 %			-5 %			-2 %			+2 %		
NM - RCA _C	16,2	17,1	17,6	24,9	27,2	28,1	32,3	34,0	37,1	31,5	32,8	35,5
+/- između 0'/90'	+9 %			+13 %			+15 %			+13 %		
NM - RCA _{FA}	13,2	13,9	14,1	34,4	35,4	36,3	37,9	39,8	40,3	40,0	42,7	42,9
+/- između 0'/90'	+7 %			+6 %			+6 %			+7 %		
NM - RCA _{RP}	12,7	12,4	12,6	33,8	33,7	34,3	40,1	42,6	41,2	37,7	39,3	38,2
+/- između 0'/90'	-1 %			+2 %			+3 %			+1 %		
NM - NA _C	20,8	20,9	20,3	42,9	40,7	39,3	48,3	45,5	50,9	48,2	50,2	52,1
+/- između 0'/90'	-2 %			-8 %			+5 %			+8 %		
NM - NA _{FA}	18,4	18,5	18,3	37,7	37,7	34,9	49,3	47,7	48,5	47,9	48,7	50,4
+/- između 0'/90'	-1 %			-7 %			-2 %			+5 %		
NM - NA _{RP}	19,4	19,6	21,8	39,3	41,4	43,3	45,9	46,2	48,0	42,2	42,3	44,0
+/- između 0'/90'	+12 %			+10 %			+5 %			+4 %		

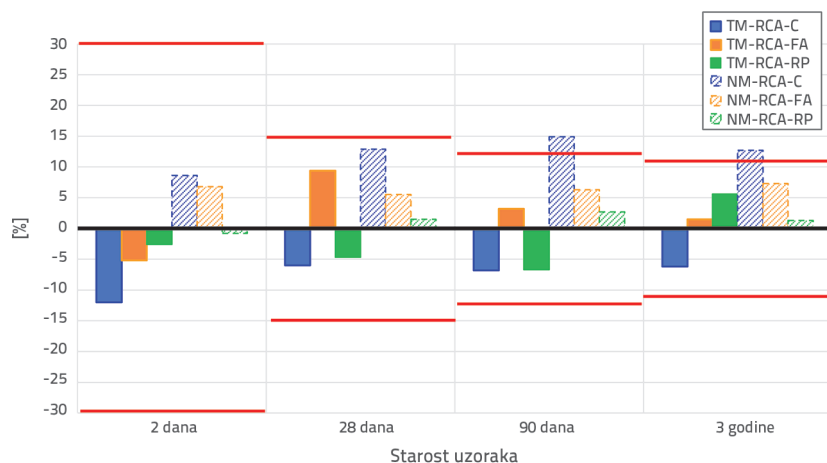
(tj. 5 MPa), smatrana je kriterijem i izražena je kao postotak prosječne čvrstoće uzoraka proizvedenih neposredno nakon miješanja (kontrolni uzorci, 0'). Na primjer, razina značajnosti promjena tlačne čvrstoće za dvodnevne uzorke bila je 30 % (5 MPa sa 16,4 MPa). Autori su svjesni da je takva procjena relevantna samo za uzorke stare 28 dana, za koje se prema zadanim postavkama primjenjuje specifikacija razreda tlačne čvrstoće. Procjenu uzoraka drugih starosti treba smatrati samo smjernicom. Razina značajnosti označena je crvenom linijom na slikama 4. do 7., koja pokazuju promjene u tlačnoj čvrstoći zbog produljenog miješanja za različite vrste agregata, vremena miješanja i starosti uzorka. Odabrani kut gledanja pokazuje da su, osim tri vrijednosti za metodu TM i dvije vrijednosti za metodu NM, sve promjene čvrstoće uzrokovane dugotrajnim miješanjem beznačajne jer čak i ne predstavljaju razliku u jednom razredu čvrstoće.

3.2.1. Analiza promjene relativne čvrstoće RCA betona

Daljnja analiza provedena je na temelju vrste agregata koji se primjenjuje u proizvodnji betona. Za RCA betone (betoni koji sadrže reciklirani betonski agregat) ne postoje zamjetne razlike u porastu/smanjenju između 0' i 45' (slika 4.), kao ni između 0' i 90' (slika 5.). Varijacija je ostala nakon 90 minuta miješanja ako se povećanje/smanjenje tlačne čvrstoće dogodilo nakon 45 minuta. U odnosu na vrijeme 0', uzorci pripremljeni metodom TM pokazali su smanjenje čvrstoće nakon 45' miješanja (slika 4.) i nakon 90' (slika 5.), pri čemu su čvrstoće nakon 90' bile veće od onih nakon 45'. Dakle, čvrstoća ponovno raste, ali ne doseže početnu čvrstoću uzoraka s dužim vremenom miješanja. Smanjenje čvrstoće nije značajno i prelazi razinu značajnosti samo za CEM kao materijal za oblaganje nakon 45' miješanja, tj. nakon 90 dana (smanjenje od 12 %) i 3 godine (smanjenje



Slika 4. Usporedba promjena tlačne čvrstoće za RCA betone nakon 45' miješanja; crvene linije označavaju razinu značajnosti za svaku starost uzorka



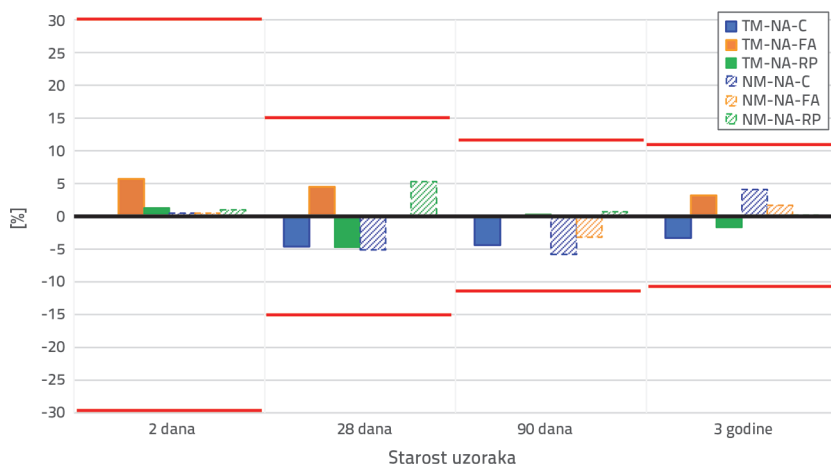
Slika 5. Usporedba promjena tlačne čvrstoće za RCA betone nakon 90' miješanja; crvene linije označavaju razinu značajnosti za svaku starost uzorka

od 16 %). Izuzetak je uzorak s FA materijalom za oblaganje, čija se čvrstoća jednolično povećava s vremenom miješanja. Međutim, to povećanje čvrstoće nije značajno. Maksimalne vrijednosti povećanja su 6 % nakon 45' miješanja (uzorci stari 90 dana) i 9 % nakon 90' (uzorci stari 28 dana). Stoga je vrsta materijala za oblaganje važna kada se beton pomiješan s TM-om podvrgava dodatnom miješanju. Autori vjeruju da na to utječe bolja stabilnost FA paste za oblaganje na površini zrna u usporedbi CEM i RP pastama s istim vodocementnim omjerom. Prema [12], FA djeluje kao mikropunilo, ispunjavajući ITZ između površine agregata i rasute cementne matrice, nakon čega slijedi pucolanska reakcija na istom mjestu. Tanki sloj pucolanskih čestica obložen je oko RA-a tijekom prve faze miješanja primjenom metode TM. Tijekom očvršćivanja betona, ovaj sloj poboljšava ITZ putem punila i pucolanskih reaktivnih učinaka. Svi uzorci pripremljeni primjenom metode NM pokazali su povećanje čvrstoće s povećanjem vremena miješanja, dok su vrijednosti uzoraka pripremljenih primjenom FA-a i RP-a smatrane zanemarivima. Uspoređujući druge materijale za

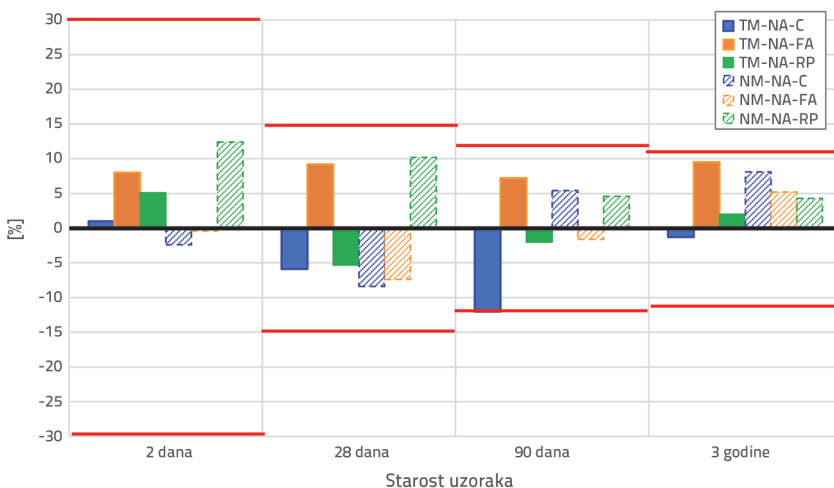
oblaganje, uzorci s CEM-om u većini su slučajeva pokazali bolje rezultate, dok su 45' nakon miješanja postigli vrijednosti do 9 % (28 dana), a nakon 90' miješanja postigli su povećanje od 13 (28 dana i 3 godine) i 15 % (nakon 90 dana), gotovo dosegnuvši ili čak premašivši razinu značajnosti (slika 4). Pozitivan učinak produljenog miješanja trajao je sa starenjem uzorka, tj. do tri godine ispitivanja, a činilo se da RP ima tendenciju pozitivnih manifestacija s povećanjem starosti. Kao što je vidljivo iz istraživanja autora Poona i sur. [26], frakcija RCA < 0,15 mm vjerojatno uzrokuje svojstva samocementiranja jer ta frakcija RCA sadrži najveću količinu C2S. Sa stvarnim česticama veličine < 12,5 mm, ovaj je učinak potvrđen kada je oko RCA zrna formiran sloj za očvršćivanje.

3.2.2. Analiza promjene relativne čvrstoće NA betona

Za NA betone (betoni koji sadrže reciklirani betonski agregat), uzorci koji su pokazali povećanje čvrstoće nakon 45' miješanja imaju još veće vrijednosti čvrstoće nakon 90' miješanja. To se odnosi, na primjer, na TM-NA-FA i NM-NA-RP (28 dana) ili sve uzorke osim TM-NA-CEM starosti tri godine. Čvrstoća se povećala s povećanjem vremena miješanja, što je u skladu s drugim istraživanjima koja ovaj učinak pripisuju smanjenom udjelu zraka uz povoljan učinak odgovarajućeg postavljanja i zbijanja betona [2, 3] ili povećanoj temperaturi unutar bubnja uzrokovanoj kontinuiranim miješanjem, što ubrzava hidrataciju cementa i povećava isparavanje slobodne vode iz betona [4]. Erdogdu i sur. [23] uočili su povećanje čvrstoće za uzorke s FA nakon 90' miješanja u rasponu od otprilike 15 do 20 %. U odnosu na vrijeme 0', uzorci pripremljeni metodom TM pokazuju smanjenje čvrstoće nakon 45' (slika 6.) i 90' miješanja (slika 7.). Čvrstoće nakon 90' veće su od onih nakon 45' samo za uzorke starosti tri godine. Međutim, smanjenje čvrstoće nije značajno i prelazi razinu značajnosti samo za CEM kao materijal za oblaganje nakon 90' miješanja, odnosno 90 dana (smanjenje od 12 %). Izuzetak je uzorak s FA materijalom za oblaganje, čija čvrstoća, u načelu, raste s vremenom miješanja. Međutim, to povećanje čvrstoće ne doseže razinu značajnosti. Pozitivan učinak produljenog miješanja ove mješavine zadržao se tijekom cijele ispitne starosti uzorka, tj. do tri godine ispitivanja, s maksimalnim povećanjem od 9 %. Dakle, vrsta obloge važna



Slika 6. Usporedba promjena tlačne čvrstoće za NA betone nakon 45' miješanja; crvene linije označavaju razinu značajnosti za svaku starost uzorka



Slika 7. Usporedba promjena tlačne čvrstoće za NA beton nakon 90' miješanja; crvene linije označavaju razinu značajnosti za svaku starost uzorka

je kada se beton pomiješan s TM-om podvrgava dodatnom miješanju pri primjeni NA-a.

NM uzorci nisu dali ujednačene rezultate kao RCA uzorci za učinak produljenog miješanja na uzorcima različite starosti. Za uzorke s cementom i FA, produljeno miješanje uzrokovalo je smanjenje čvrstoće do starosti betona od 90 dana. Međutim, nakon tri godine njege, čvrstoća uzoraka se povećala. Uzorci s cementom miješanim 90' ranije pokazuju navedenu tendenciju (od 90 dana njege). Pozitivan učinak produljenog miješanja bio je vidljiv kada je RP primijenjen kao materijal za oblaganje, s tendencijom smanjenja čvrstoće s povećanjem starosti uzoraka.

4. Zaključak

Ovim su se istraživanjem ispitivala svojstva betona (konzistencija slijeganjem i tlačna čvrstoća) na temelju vremenskog odmaka nakon miješanja primjenom metode TM (tj. odmah, 45 minuta i 90 minuta nakon miješanja). Uzorci

pomiješani s NA i RCA ispitivani su nakon tri godine njege. Produljeno miješanje nema značajan učinak (bilo pozitivan niti negativan) na tlačnu čvrstoću betona (primijenjeno na obje metode miješanja: NM i TM) pri analizi rezultata tlačne čvrstoće i uzimajući kao kriterij vrijednost jednog razreda tlačne čvrstoće. To se također može primijeniti na procese kontrole kvalitete betona pri proizvodnji i na gradilištima. Razlika u čvrstoći između uzoraka proizvedenih od strane proizvođača (odmah nakon miješanja) i onih proizvedenih nakon dopreme na gradilište (nakon 90 min miješanja) nije predstavljala razred tlačne čvrstoće. To se odnosi na rasprave o tome koje se vrijednosti smatraju značajnijima. Međutim, da bismo detaljnije razlikovali karakteristike betona razlikaovnog metodom TM tijekom produljenog miješanja, možemo navesti sljedeće:

- Metoda TM osigurava bolju početnu konzistenciju betona na bazi NA. Za beton koji sadrži RCA, navedeno vrijedi samo ako se cement koristi kao materijal za oblaganje.
- Metoda TM rezultirala je manjim gubitkom konzistencije s produljenim miješanjem nego ona s metodom NM. Stoga se preporučuje metoda TM kao pomoć kemijskim dodacima u održavanju konzistencije ako je to potrebno na gradilištu jer je mogući negativni učinak (ovisno o stvarnom sastavu betona) na tlačnu čvrstoću zanemariv.
- Za tlačnu čvrstoću važna je vrsta materijala za oblaganje kada se beton pomiješan pomoću metode TM podvrgava dodatnom miješanju. Povećanje tlačne čvrstoće nakon produljenog miješanja uočeno je kada se čini da je metoda TM učinkovitija tijekom primjene FA kao materijala za oblaganje za RCA i za NA.
- Povećanje čvrstoće u uzorcima s FA materijalom za oblaganje nije značajno.
 - za betone na bazi RCA: 6 % nakon 45' miješanja (starost uzoraka 90 dana) i 9 % za 90' miješanja (starost uzoraka 28 dana)
 - za betone na bazi NA: 5 % nakon 45' miješanja (starost uzoraka 28 dana) i 9 % za 90' miješanja (starost uzoraka 28 dana i 3 godine)
- Za gotovu betonsku smjesu, metodom TM dobiveno je sljedeće: s obzirom na to da je produljeno vrijeme miješanja povezano s udaljenošću isporuke, primijećena su povećanja

čvrstoće s dužim vremenom miješanja, a vrijednosti nakon 90' miješanja bolje su od onih nakon 45'.

- RP je ekvivalentan drugim materijalima za oblaganje i nema primjetnih negativnih učinaka na čvrstoću te upućuje na to da se čvrstoća betona miješanjem metodom TM obloženog RP-om dugoročno poboljšava.

Trostupanjsko miješanje betona uključuje nekoliko varijabli i nudi nekoliko mogućnosti modifikacije, od kojih svaka utječe na konačnu kvalitetu betona. To se odnosi na izbor materijala za beton i njihove relativne proporcije. Sljedeće je ključno: izbor materijala za oblaganje zrna u prvoj fazi miješanja i njegove količine, točan redoslijed doziranja komponenti, vremena utovara, posebice redoslijed i dodavanje vode, vrijeme miješanja tijekom

svakog koraka i pauze između njih i intenzitet miješanja. Sukladno tome, trenutačno se čini da budućnost istraživanja uključuje primjenu različitih sekundarnih sirovina u sastavu betona za proučavanje učinaka različitih procesnih parametara na svojstva betona i optimiziranje kombinacije procesnih parametara.

Zahvala

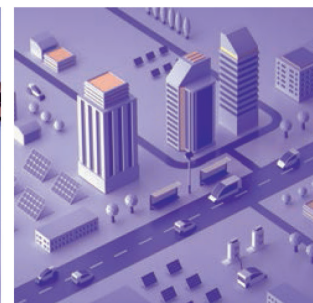
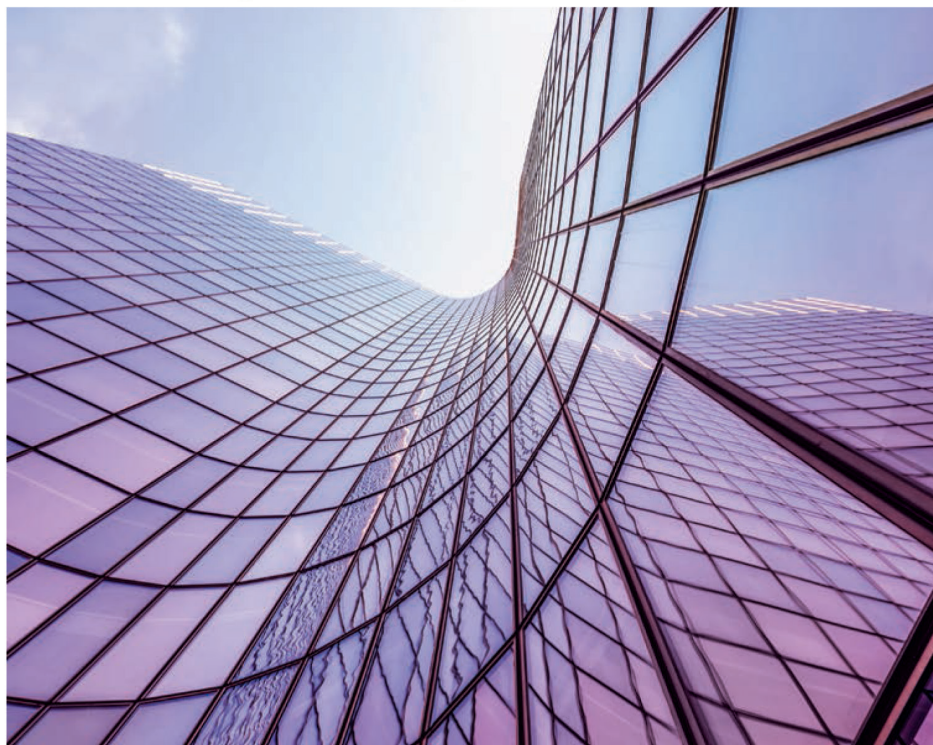
Ovo je istraživanje provedeno u okviru projekta slovačke znanstvene agencije za bespovratna sredstva VEGA (potpora br. 1/0336/22) pod nazivom "Istraživanje o učincima učinkovite (Lean) proizvodnje/gradnje za poboljšanje učinkovitosti građevinskih tehnologija na gradilištu i izvan njega" te NFP projekta br. 313010T578.

LITERATURA

- [1] Urban, K., Sicakova, A.: The Effect of Mixing Technique and Prolonged Mixing Time on Strength Characteristics of Concrete. U: Environment, Green Technology, and Engineering International Conference. Basel Switzerland: MDPI; 2018:1290.
- [2] Al-Negheimish, Al., Alhozaimy, AM.: Impact of extremely hot weather and mixing method on changes in properties of ready mixed concrete during delivery, *ACI Materials Journal*, 105 (2008) 5, pp. 438.
- [3] Erdogdu, Ş.: Effect of retempering with superplasticizer admixtures on slump loss and compressive strength of concrete subjected to prolonged mixing, *Cement and Concrete Research*, 35 (2005) 5, pp. 907–912. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.08.020>.
- [4] Kirca, Ö., Turanlı, L., Erdoğan, T.Y.: Effects of retempering on consistency and compressive strength of concrete subjected to prolonged mixing, *Cement and Concrete Research*, 32 (2002) 3, pp. 441–445. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00699-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00699-8).
- [5] Vickers, T.M., Farrington, S.A., Bury, J.R., Brower, L.E.: Influence of dispersant structure and mixing speed on concrete slump retention, *Cement and Concrete Research*, 35 (2005) 10, pp. 1882–1890. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.04.013>.
- [6] Mahmood, A.H., Foster, S.J., Castel, A.: Effects of mixing duration on engineering properties of geopolymer concrete, *Construction and Building Materials*, 303 (2021), 124449. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124449>.
- [7] Nehdi, M., Al-Martini, S.: Coupled effects of high temperature, prolonged mixing time, and chemical admixtures on rheology of fresh concrete, *ACI Materials Journal*, 106 (2009) 3, pp. 231.
- [8] Baskoca, A., Ozkul, M.H., Artirma, S.: Effect of chemical admixtures on workability and strength properties of prolonged agitated concrete, *Cement and Concrete Research*, 28 (1998) 5, pp. 737–747. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00029-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00029-5).
- [9] Malešev, M., Radonjanin, V., Vukoslavčević, S., Supić, S., Laban, M.: Influence of fly ash and decreasing water-powder ratio on performance of recycled aggregate concrete, *Građevinar*, 69 (2017) 9, pp. 811–820, <https://doi.org/10.14256/JCE.1379.2015>
- [10] Baričević, A., Kovač, D., Didulica, K.: Construction of a new day hospital in Zadar using recycled aggregate concrete, *Građevinar*, 73 (2021) 8, pp. 833–844, <https://doi.org/10.14256/JCE.3233.2021>
- [11] Tam, V.W.Y., Gao, X.F., Tam, C.M.: Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach, *Cement and Concrete Research*, 35 (2005) 6, pp. 1195–1203. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.10.025>.
- [12] Kong, D., Lei, T., Zheng, J., Ma, C., Jiang, J., Jiang, J.: Effect and mechanism of surface-coating pozzalanic materials around aggregate on properties and ITZ microstructure of recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, 24 (2010) 5, pp. 701–708. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.038>.
- [13] Li, J., Xiao, H., Zhou, Y.: Influence of coating recycled aggregate surface with pozzolan powder on properties of recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, 23 (2009) 3, pp. 1287–1291. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.07.019>.
- [14] Tam, V.W.Y., Tam, C.M.: Diversifying two-stage mixing approach (TSMa) for recycled aggregate concrete: TSMAs and TSMAsc, *Construction and Building Materials*, 22 (2008) 10, pp. 2068–2077. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.07.024>.
- [15] Zhang, W., Wang, S., Zhao, P., Lu, L., Cheng, X.: Effect of the optimized triple mixing method on the ITZ microstructure and performance of recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, 203 (2019), pp. 601–607. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.071>.
- [16] Ozbakkaloglu, T., Gholampour, A., Xie, T.: Mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete: effect of recycled aggregate properties and content, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30 (2018) 2., [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002142](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002142).
- [17] Sicakova, A., Urban, K.: Influence of discharge time, type of additive, and type of aggregate on the properties of three-stage mixed concrete, *Sustainability*, 10 (2018) 11, pp. 3862. <https://doi.org/10.3390/su10113862>.

- [18] Kennedy, et al.: The design of concrete mixes, Journal Proceedings, 36 (1940) 2, pp. 373–400.
- [19] Nguyen, D.H., Sebaibi, N., Boutouil, M., Leleyter, L., Baurd, F.: A modified method for the design of pervious concrete mix, Construction and Building Materials, 73 (2014), 271–282. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.088>
- [20] Poon, C.S. et al.: Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates, Construction and Building Materials, 18 (2004) 6, pp. 461–468. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.03.005>
- [21] CEN EN 12350-2.: Testing Fresh Concrete – Part 2: Slump Test. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2019.
- [22] CEN EN 12390-3.: Testing Hardened Concrete. Part 3: Compressive Strength of Test Specimens. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2019.
- [23] Erdogdu, Ş., Arslantürk, C., Kurbetci, Ş.: Influence of fly ash and silica fume on the consistency retention and compressive strength of concrete subjected to prolonged agitating, Construction and Building Materials, 25 (2011) 3, pp. 1277–1281. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.024>.
- [24] Hawileh, R.A., Mhanna, H.H., Abdalla, J.A., et al., Properties of concrete replaced with different percentages of recycled aggregates, Materials Today: Proceedings (article in press 2023), <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.336>
- [25] CEN EN 206+A2.: Concrete, Specification, Performance, Production and Conformity. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2021.
- [26] Poon, C.S., Qiao, X.C., Chan, D.: The cause and influence of self-cementing properties of fine recycled concrete aggregates on the properties of unbound sub-base, Waste Management, 26 (2006) 10, pp. 1166–1172. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2005>

THE FUTURE OF BUILDING



BAU

**13. –17. siječnja 2025.
Messe München**

Vodeći svjetski stručni sajam
za arhitekturu, građevinske materijale
i sustave

bau-muenchen.com/tickets

**SECURE
YOUR
TICKET!**

Kontakt:
Belimpex d.o.o.
office@belimpex.hr
www.belimpex.hr