

EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE UTJECAJA SUPERPLASTIFIKATORA NA SVOJSTVA MORTA

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF SUPERPLASTICIZER EFFECT ON MORTAR PROPERTIES

Andrina Mišan*, Natalija Bede Odorčić *

Sažetak

Ovaj rad bavi se istraživanjem utjecaja superplastifikatora na obradivost i mehanička svojstva cementnog morta pri starosti od 2 i 7 dana. Cilj istraživanja bio je ispitati kako različiti udjeli i načini (vrijeme) doziranja superplastifikatora utječu na svojstva svježeg i očvrslog morta, s naglaskom na tlačnu i vlačnu čvrstoću te obradivost. Superplastifikator je dodavan u udjelima od 0 %, 0,5 % i 1 % s obzirom na masu cementa, dok je vodocementni omjer u svim mješavinama držan konstantnim. Rezultati pokazuju da su mješavine s dodatkom superplastifikatora ostvarile veće tlačne i vlačne čvrstoće te obradivost u usporedbi s referentnim mješavinama bez dodatka. Posebno je uočeno da je učinkovitost aditiva značajno veća kada se dodaje zajedno s vodom u početnoj fazi miješanja sastojaka morta, dok je naknadno dodavanje u već izmiješanu svježju mješavinu rezultiralo manjim porastom čvrstoće. Ovi rezultati ukazuju na važnost ne samo pravilnog doziranja, već i načina primjene superplastifikatora. Navedeno upućuje da dodatak superplastifikatora pozitivno utječe na obradivost i mehanička svojstva morta, pri čemu pravilno projektiranje mješavine te odabir količine i optimalnog trenutka dodavanja aditiva igraju ključnu ulogu u postizanju željenih svojstava.

Ključne riječi: cementni mort, superplastifikator, obradivost, tlačna čvrstoća, vlačna čvrstoća savijanjem

* Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Radmile Matejčić 3, 51000 Rijeka

E-mail: amisan@student.uniri.hr, natalija.bede@uniri.hr

Abstract

This paper investigates the influence of superplasticizers on the workability and mechanical properties of cement mortar at the ages of 2 and 7 days. The aim of the study was to examine how different dosages and timing of superplasticizer incorporation affect the properties of fresh and hardened mortar, with focus on compressive and flexural strength as well as workability. Superplasticizer was added in proportions of 0%, 0.5%, and 1% by cement mass, while the water-cement ratio was kept constant in all mixtures. The results show that mixtures containing superplasticizer achieved higher compressive and flexural strengths, as well as improved workability, compared to the reference mixture without admixture. It was particularly observed that the effectiveness of the admixture is significantly higher when added together with water during the initial mixing phase of the mortar components, while adding the admixture after initial mixing of the fresh mortar resulted in a smaller increase in strength. These findings highlight the importance not only of correct dosing but also of the timing of superplasticizer application. This indicates that the addition of superplasticizer has a positive impact on the workability and mechanical properties of mortar, where proper mix design and the choice of the optimal timing for admixture addition play the key role in achieving the desired properties.

Key words: cement mortar, superplasticizer, workability, compressive strength, flexural strength

1. Uvod

U suvremenoj proizvodnji cementnih kompozita, poput betona i morta, kemijski se dodaci sve češće primjenjuju u svrhu poboljšanja ili modifikacije svojstava u svježem i očvrslom stanju. Kemijski dodaci, dostupni u tekućem obliku, dodaju se u malim količinama u odnosu na masu veziva, a neki od najčešće korištenih su aeranti, plastifikatori, superplastifikatori, usporivači i ubrzivači vezivanja. Njihova primjena omogućuje postizanje specifičnih svojstava, poput poboljšane obradivosti svježe mješavine, što olakšava njezinu ugradnju i zbijanje, regulacije vremena vezivanja te povećane otpornosti na agresivne utjecaje iz okoliša [1].

Djelovanje kemijskih dodataka ovisi o njihovim fizikalno-kemijskim svojstvima, kao i o karakteristikama cementa, agregata i međusobnom omjeru svih komponenata u mješavini. Razlog njihove široke primjene proizlazi iz potrebe za prilagodbom specifičnim zahtjevima pojedinih građevinskih projekata i uvjetima izvedbe, ali i iz ekonomskih razloga, poput smanjenja količine cementa ili sitnog agregata. Međutim, valja istaknuti da primjena kemijskih dodataka ne može nadomjestiti nedostatke uzrokovane lošim projektiranjem sastava, nepravilnim

omjerima komponenata, neadekvatnom izvedbom miješanja ili upotrebom sirovina niske kvalitete.

U posljednjih nekoliko godina, uporaba plastifikatora i superplastifikatora bilježi značajan porast, što je rezultat sve strožih zahtjeva za poboljšanjem kvalitete, čvrstoće i trajnosti suvremenih betona, kao i potrebe za smanjenjem troškova ugradnje uslijed porasta cijene energije i smanjene dostupnosti kvalificirane radne snage. Dostupni su isključivo u tekućem stanju i mogu se dozirati na dva načina: dodavanjem zajedno s vodom u početnoj fazi miješanja, ili naknadno, u već pripremljenu svježu mješavinu. U osnovi, ovi dodaci imaju dvostruko djelovanje: omogućuju znatno smanjenje količine vode u mješavini bez gubitka obradivosti ili značajno poboljšavaju obradivost bez povećanja količine vode [2]. Mehanizam njihova djelovanja temelji se na disperziji cementnih čestica, čime se smanjuje međusobno trenje i povećava pokretljivost mješavine, što rezultira znatnim povećanjem obradivosti [1].

Superplastifikatori zbog svog kemijskog sastava predstavljaju napredniju skupinu kemijskih dodataka u odnosu na klasične plastifikatore i omogućuju znatno izraženije smanjenje količine vode potrebne za postizanje željene obradivosti. Time se izravno povećavaju čvrstoća i trajnost očvrstlog betona. Eksperimentalna istraživanja provedena na običnim betonima spravljenim s različitim udjelima superplastifikatora i konstantnim vodocementnim omjerom pokazuju da su mješavine s dodatkom superplastifikatora ostvarile približno 50 – 60 % veću tlačnu čvrstoću nakon 7 dana te oko 70 % veću nakon 28 dana u usporedbi s referentnim uzorcima bez dodatka superplastifikatora [3]. Također, zabilježen je pozitivan učinak na vlačnu čvrstoću betona, što se pripisuje smanjenju poroznosti i povećanju zbijenosti cementne matrice, odnosno većoj gustoći očvrstnalog materijala [4]. Nadalje, prema istraživanju [5], povećanje udjela superplastifikatora uz konstantan vodocementni omjer povećava obradivost i tlačnu čvrstoću betona, no prekoračenjem optimalne količine narušava se kohezivnost i homogenost mješavine, što u konačnici rezultira padom tlačne čvrstoće.

Na temelju pretrage dostupne literature utvrđeno je da znanstveni radovi, osobito oni na hrvatskom jeziku, rijetko zasebno razmatraju utjecaj superplastifikatora na obradivost i mehanička svojstva cementnih kompozita [6,7]. Stoga se ovaj rad fokusira na eksperimentalno istraživanje utjecaja superplastifikatora na svojstva cementnog morta, s naglaskom na obradivost te tlačnu i vlačnu čvrstoću savijanjem, pri čemu je vodocementni omjer u svim mješavinama održavan konstantnim. Laboratorijska ispitivanja provedena su na uzorcima morta s različitim udjelima superplastifikatora (0 %, 0,5 % i 1 % u odnosu na masu

cementa). Ispitivanjem su obuhvaćena svojstva svježeg morta (konzistencija i gustoća) te mehanička svojstva očvrslog morta (vlačna čvrstoća savijanjem i tlačna čvrstoća) pri starosti od 2 i 7 dana. Poseban naglasak stavljen je i na vrijeme doziranja superplastifikatora. Budući da se kemijski dodaci poput superplastifikatora mogu dodavati u mješavinu zajedno s vodom u početnoj fazi miješanja, ili naknadno u već pripremljenu svježju mješavinu, analiziran je i utjecaj trenutka doziranja na promatrana svojstva morta.

2. Materijali i mješavine cementnog morta

Za izradu cementnih mješavina korišten je vapnenački pijesak granulacije 0 – 4 mm, podrijetlom iz kamenoloma Šumber, tvrtke Holcim d.o.o. (Hrvatska). Kao vezivo upotrijebljen je cement tipa CEM II/A-LL 42,5 R, gustoće $3,08 \text{ g/cm}^3$. Više informacija o fizikalnim i kemijskim svojstvima cementa dostupno je na stranici proizvođača [8]. Riječ je o portlandskom cementu s dodatkom vapnenca, koji udovoljava zahtjevima norme HRN EN 197-1 [9]. Sastav cementa uključuje 80 – 94 % portlandskog cementnog klinkera, 6 – 20 % prirodnog vapnenca (LL), te do 5 % filtarske prašine nastale tijekom proizvodnog procesa klinkera. Kao kemijski dodatak korišten je univerzalni superplastifikator na bazi modificiranih akrilnih polimera s pH vrijednošću u rasponu od 3,5 do 5,5 te gustoćom od $1,05$ do $1,09 \text{ g/cm}^3$ [10]. Preporučena doza primjene iznosi od 0,2 % do 2,0 % mase cementa, dok maksimalna dozvoljena količina iznosi 2,5 %. Ovaj dodatak razvijen je s ciljem smanjenja količine upotrijebljene vode u betonskoj mješavini, bez negativnog utjecaja na obradivost svježeg betona. Primjenom ovog dodatka moguće je postići povećanu tlačnu čvrstoću, smanjenu propusnost te poboljšanu trajnost očvrsnulog betona. Unatoč smanjenju vode, viskoznost svježje betonske mješavine ostaje niska, što omogućuje lakšu ugradnju i bolje svojstvo zbijanja.

Ukupno je pripremljeno osam mješavina cementnog morta, izrađenih u skladu sa zahtjevima norme HRN EN 196-1 [11]. Sve mješavine imale su standardni sastav s omjerom cementa, pijeska i vode $450 \text{ g} : 1350 \text{ g} : 225 \text{ g}$, pri čemu je vodocementni omjer bio konstantan i iznosio 0,5, dok se količina superplastifikatora mijenjala. Proces miješanja započinjao je dodavanjem vode pa cementa. Nakon 30 sekundi miješanja, u sljedećih 30 sekundi dodavan je pijesak u posudu miješalice, nakon čega je miješanje nastavljeno još 30 sekundi. Nakon pauze od 90 sekundi, svi su sastojci promiješani još 60 sekundi. Superplastifikator je dodavan u udjelima od 0,5 % i 1,0 % mase cementa, s ciljem ispitivanja njegova utjecaja na obradivost i mehanička svojstva cementnog morta. U slučajevima kada je upotreba superplastifikatora bila unaprijed predviđena, on je prethodno pomiješan s vodom. Kod mješavina s naknadnim dodavanjem,

superplastifikator se nije miješao s vodom, već je izravno dodan u mješalicu nakon završetka miješanja osnovnih sastojaka (cement, pijesak, voda). U tim slučajevima, nakon dodavanja superplastifikatora u gotovu mješavinu, postupak miješanja nastavljen je dodatnih 120 sekundi.

Od ukupno osam pripremljenih mješavina, četiri su različite, dakle svaka je izrađena dvaput kako bi se osigurali uzorci za ispitivanja mehaničkih svojstava pri starosti od 2 i 7 dana. Pripremljene su dvije referentne mješavine bez dodataka (oznake REF-1 i REF-2), dvije mješavine s dodatkom 0,5 % superplastifikatora (oznake 0,5 % SP-1 i 0,5 % SP-2), te dvije mješavine s dodatkom 1,0 % superplastifikatora (oznake 1 % SP-1 i 1 % SP-2). U navedenim mješavinama superplastifikator je prethodno pomiješan s vodom te zajedno miješan sa svim sastojcima. Uz to, izrađene su još dvije mješavine (oznake 0,5 % SP DOD-1 i 0,5 % SP DOD-2) kod kojih je superplastifikator u jednakom udjelu (0,5 %) dodan naknadno u veći izmiješan mort (nakon završetka miješanja svježe mješavine).

Nakon završetka miješanja u laboratorijskoj mješalici (Slika 1), svježi cementni mort ugrađen je u standardne kalupe dimenzija 40 mm × 40 mm × 160 mm (Slika 2) sukladno metodama za ispitivanje vlačne i tlačne čvrstoće morta prema HRN EN 196-1 [11]. Površina morta poravnana je metalnom mistrijom, a zatim su kalupi vibrirani na vibrostolu kako bi se osiguralo homogeno zbijanje mješavine i uklanjanje zarobljenog zraka pazeći da ne dođe do pojave segregacije. Nakon ugradnje, uzorci su prekriveni staklenom pločicom radi sprječavanja prebrzog isušivanja. Raskalupljivanje je provedeno 24 ± 2 sata nakon miješanja, nakon čega su uzorci njegovani u vodi temperature (20 ± 1) do trenutka ispitivanja mehaničkih svojstava sukladno normi HRN EN 196-1 [11].



Slika 1. Miješalica za pripremu cementnog morta



Slika 2. Cementni mort ugrađen u standardni kalup

3. Laboratorijska ispitivanja cementnog morta

Laboratorijska ispitivanja provedena su u Laboratoriju za materijale Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci. Svrha ispitivanja bila je istražiti utjecaj različitih udjela i vremena doziranja superplastifikatora na svojstva svježeg cementnog morta te očvrslog cementnog morta pri starosti od 2 i 7 dana pri konstantnom vodocementnom omjeru. Ispitivani su udjeli superplastifikatora od 0 %, 0,5 % i 1,0 % u odnosu na masu cementa.

Za svaku pripremljenu mješavinu najprije su ispitana svojstva svježe mješavine, uključujući gustoću (volumensku masu) u skladu s normom HRN EN 1015-6 [12] i obradivost (konzistenciju pomoću metode rasprostiranja), u skladu s normom HRN EN 1015-3 [13].

Na očvrsnulim uzorcima određena je gustoća (volumenska masa) te su ispitane vlačna čvrstoća savijanjem i tlačna čvrstoća prema normi HRN EN 196-1 [11], koja propisuje standardizirane metode za ispitivanje cementnih mortova. Za svaku mješavinu pripremljen je kalup s jednom serijom od tri ispitna uzorka dimenzija 40 mm × 40 mm × 160 mm. Ukupno je ispitano 24 uzorka, 12 nakon 2 dana i 12 nakon 7 dana od trenutka pripreme, a kako bi se analizirao razvoj mehaničkih svojstava tijekom vremena. Ispitivanja vlačne čvrstoće savijanjem i tlačne čvrstoće provedena su na hidrauličkoj preši s mjernim rasponima do 15 kN za vlačnu čvrstoću, odnosno do 600 kN za tlačnu čvrstoću.

4. Rezultati ispitivanja i analiza rezultata

U Tablici 1 prikazani su rezultati ispitivanja svježeg morta, dobiveni kao srednja vrijednosti dviju mješavina istog sastava. Primjerice, vrijednost prikazana za mješavinu oznake REF predstavlja srednju vrijednost dobivenu iz rezultata ispitivanja uzoraka mješavina REF-1 i REF-2. Na isti način obrađeni su i rezultati ostalih mješavina; primjerice za mješavinu s oznakom 0,5 % SP prikazana vrijednost predstavlja srednju vrijednost rezultata ispitivanja uzoraka 0,5 % SP-1 i 0,5 % SP-2.

Tablica 1. Rezultati ispitivanja svježeg morta

Naziv mješavine		REF	0,5 % SP	1 % SP	0,5 % SP DOD
Gustoća	Srednja vrijednost (kg/m ³)	2220	2270	2230	2320
	Povećanje (%)	0,0	2,3	0,5	4,5
Konzistencija	Srednja vrijednost (mm)	134	221	274	228
	Povećanje (%)	0	65	104	70

U Tablici 2 prikazani su rezultati ispitivanja očvrsllog morta pri starosti od 2 dana, dok Tablica 3 prikazuje rezultate pri starosti od 7 dana. Svaki je rezultat određen kao srednja vrijednost ispitivanja jedne serije uzoraka iste mješavine. Primjerice, vrijednost prikazana za mješavinu označenu kao REF u Tablici 2 predstavlja srednju vrijednost dobivenu iz rezultata uzoraka mješavine REF-1 (2 dana), a u Tablici 3 iz uzoraka mješavine REF-2 (7 dana). Svi dobiveni rezultati ispitivanja uspoređeni su s referentnom mješavinom u cilju dobivanja uvida u utjecaj primjene superplastifikatora na svojstva svježeg i očvrsllog cementnog morta.

Tablica 2. Rezultati ispitivanja očvrsllog morta pri starosti od 2 dana

Naziv mješavine		REF	0,5 % SP	1 % SP	0,5 % SP DOD
Gustoća	Srednja vrijednost (kg/m ³)	2210	2230	2220	2240
	Povećanje (%)	0,0	0,9	0,5	1,4
Vlačna čvrstoća savijanjem	Srednja vrijednost (MPa)	5,8	6,3	6,1	6,0
	Povećanje (%)	0,0	8,3	5,4	3,2
Tlačna čvrstoća	Srednja vrijednost (MPa)	33,0	34,1	34,2	43,0
	Povećanje (%)	0,0	3,2	3,6	30,4

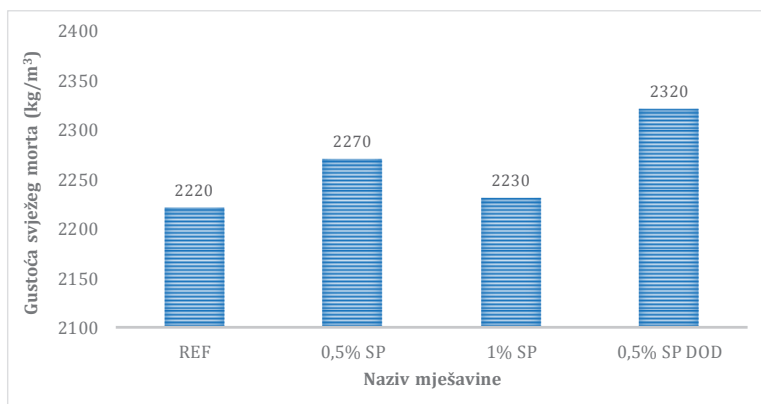
Tablica 3. Rezultati ispitivanja očvrsllog morta pri starosti od 7 dana

Naziv mješavine		REF	0,5 % SP	1% SP	0,5 % SP DOD
Gustoća	Srednja vrijednost (kg/m ³)	2210	2230	2250	2190
	Povećanje (%)	0,0	0,9	1,8	-0,9
Vlačna čvrstoća savijanjem	Srednja vrijednost (MPa)	6,2	6,5	7,0	5,5
	Povećanje/smanjenje (%)	0,0	4,6	12,6	-12,3
Tlačna čvrstoća	Srednja vrijednost (MPa)	44	45	47	41
	Povećanje/smanjenje (%)	0,0	3,5	8,2	-5,4

4.1 Gustoća svježeg morta

Gustoća, odnosno volumenska masa svježeg cementnog morta određena je kao omjer mase i volumena koji mort zauzima kada je ugrađen

u skladu s postupkom propisanim normom HRN EN 1015-6 [12]. Ukupno je provedeno osam ispitivanja, po jedno za svaku pripremljenu mješavinu. Jedan rezultat ispitivanja prikazan na Slici 3 predstavlja srednju vrijednost dviju mješavina istog sastava, zaokruženu na najbližih 10 kg/m^3 , sukladno zahtjevima norme.



Slika 3. Utjecaj superplastifikatora na gustoću svježeg cementnog morta

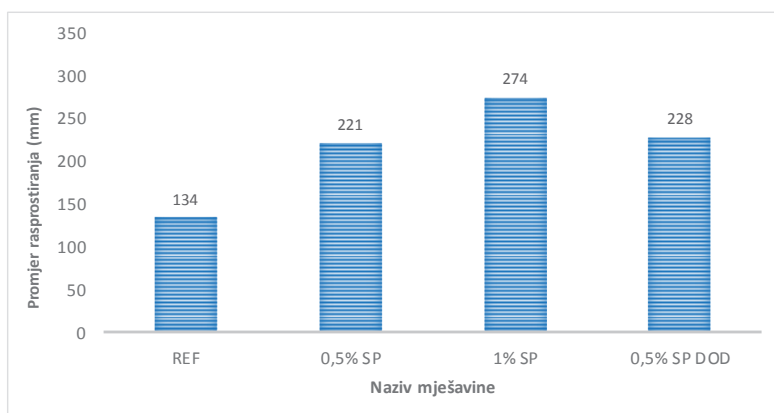
Dobivene vrijednosti kreću se u rasponu od 2220 do 2320 kg/m^3 , što ukazuje na očekivano malu razliku u rezultatima i potvrđuje da dodatak superplastifikatora ima zanemariv utjecaj na povećanje volumenske mase pri nepromijenjenim osnovnim sastojcima. Mješavine s dodatkom superplastifikatora pokazuju blago povećanje gustoće u odnosu na referentnu mješavinu, redom za 2,3 %, 0,5 % i 4,5 % (Tablica 1), što se može pripisati poboljšanoj obradivosti i učinkovitijem zbijanju, čime se omogućuje kompaktnije pakiranje materijala i smanjenje udjela zarobljenog zraka u mješavini.

4.2 Konzistencija svježeg morta

Konzistencija cementnog morta određena je primjenom metode rasprostiranja na potresnom stoliću (Slika 4), sukladno normi HRN EN 1015-3 [13]. Uzorak je pripremljen četvrtanjem, kalup je napunjen u dva sloja, pri čemu se svaki sloj nabija s 10 laganih udaraca. Nakon toga se kalup vadi i slijedi potresanje stolića 15 puta (1 udarac/s). Potom se mjeri srednja vrijednost dvaju međusobno okomitih promjera rasprostrtog morta s točnošću od 1 mm [13]. Jedan rezultat prikazan na Slici 5 predstavlja srednju vrijednost ispitivanja dviju mješavina istog sastava.



Slika 4. Potresni stolić za ispitivanje konzistencije cementog morta rasprostiranjem



Slika 5. Utjecaj superplastifikatora na konzistenciju (promjer rasprostiranja) svježeg cementnog morta

Dodavanje superplastifikatora u mješavinu rezultiralo je značajnim povećanjem promjera rasprostiranja u usporedbi s referentnom mješavinom čija prosječna vrijednost iznosi 134 mm. Mješavina s 0,5 % superplastifikatora pokazala je veću obradivost, s povećanjem od 65 %, dok je primjena istog udjela superplastifikatora u fazi nakon završetka miješanja (0,5 % SP DOD) dala usporedive rezultate s mješavinom 0,5% SP, s povećanjem od 70 % u odnosu na prosječnu vrijednost referentne mješavine. Daljnje povećanje udjela superplastifikatora na 1 % rezultiralo je dodatnim poboljšanjem konzistencije, pri čemu je prosječni promjer rasprostiranja iznosio 274 mm, što predstavlja povećanje od čak 104 % u odnosu na referentnu mješavinu (Tablica 1). Međutim, preveliki udio superplastifikatora može negativno utjecati na kohezivnost i homogenost svježe cementne mješavine, što je zapaženo kod mješavine s 1% superplastifikatora. Ova pojava može se pripisati prekomjernom

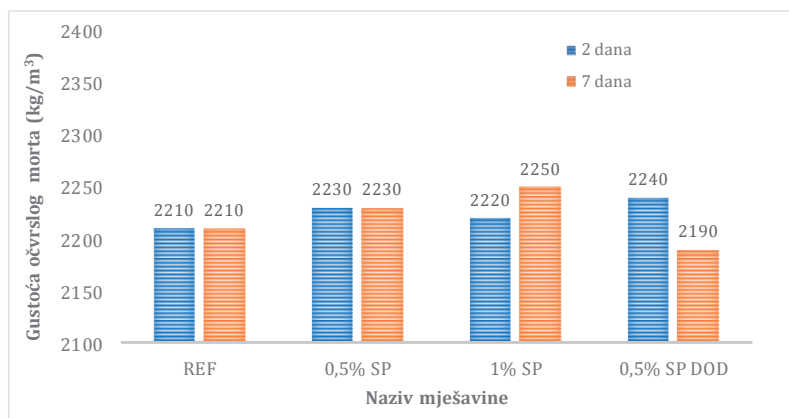
disperzivnom učinku superplastifikatora, koji rezultira odvajanjem vode i cementne paste ili agregata, odnosno dovodi do pojave segregacije [5]. Na Slici 6 (desno) vidljiv je vodeni prsten uz rub potresnog stolića, dok se u središtu ispitnog uzorka zapaža nakupina agregata, što potvrđuje pojavu segregacije pri većem udjelu superplastifikatora.



Slika 6. Obradivost (izražena kroz promjer rasprostiranja) svježeg cementnog morta za uzorke s 0,5 % SP (lijevo) i 1 % SP (desno)

4.3 Gustoća očvrslog morta

Prije ispitivanja čvrstoće uzorci cementnih prizmi su izvagani i izmjerene su im dimenzije, na temelju čega je određena gustoća (volumenska masa) očvrslog morta. Gustoća mješavine određena je kao srednja vrijednost triju standardnih ispitnih uzoraka iz jedne serije. Rezultati su prikazani na Slici 7 za uzorke stare 2 i 7 dana.



Slika 7. Utjecaj superplastifikatora na gustoću očvrslog cementnog morta pri starosti od 2 i 7 dana

Na temelju prikazanih rezultata može se zaključiti da je gustoća svih mješavina, uključujući referentne i one sa superplastifikatorima, relativno konstantna, neovisno o načinu i količini dodavanja superplastifikatora te starosti uzoraka. Uočava se blagi trend porasta gustoće s povećanjem udjela superplastifikatora, bez obzira na starost uzorka. Gustoće morta nakon 2 dana kreću se u rasponu od 2210 do 2240 kg/m³, dok se nakon 7 dana nalaze u rasponu od 2190 do 2250 kg/m³. Nadalje, nakon 7 dana primjećuje se da gustoća referentne mješavine i mješavine s 0,5 % superplastifikatora ostaje gotovo nepromijenjena, dok mješavine s 1 % SP i 0,5 % SP DOD pokazuju nešto izraženije razlike u gustoćama. Te se razlike mogu pripisati varijacijama u zbijenosti ili homogenosti mješavine, ali i potencijalnim problemima u ravnomjernom rasporedu superplastifikatora prilikom naknadnog dodavanja u već izmiješanu svježju mješavinu. Na primjer, mješavina s naknadno dodanim superplastifikatorom nakon 7 dana pokazuju pad gustoće u odnosu na referentnu mješavinu i mješavinu s 0,5 % SP.

4.4 Vlačna čvrstoća savijanjem očvrstlog morta

Ispitivanja vlačne čvrstoće savijanjem cementnog morta (Slika 8 i 9) provedena su prema normi HRN EN 196-1 [11] na uzorcima starima 2 i 7 dana. Vrijednosti čvrstoće predstavljaju srednju vrijednost jedne serije koja se sastoji od 3 ispitna uzorka prikazana na Slici 9.

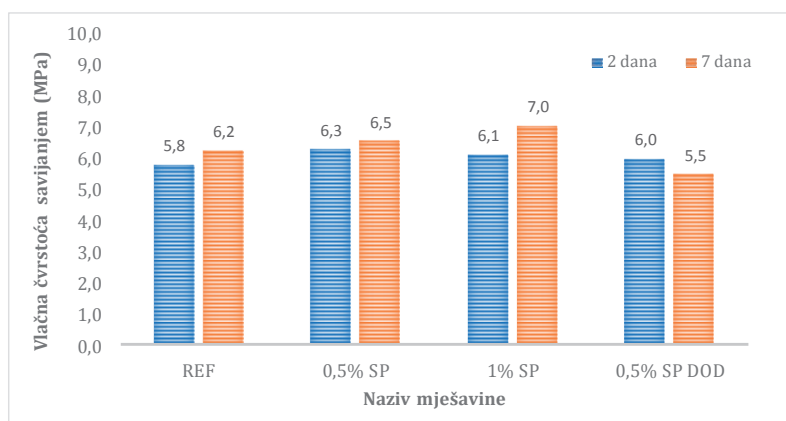
Na temelju rezultata ispitivanja uzoraka starih 2 dana može se zaključiti da sve mješavine s dodatkom superplastifikatora pokazuju višu vlačnu čvrstoću na savijanje u odnosu na referentnu mješavinu. Rezultati ispitivanja prikazani su u grafu na Slici 10. Mješavina s 0,5 % superplastifikatora pokazala je porast čvrstoće od 8,3 %, dok mješavina s 1 % superplastifikatora pokazuje nešto manji porast od 5,4 %. Smanjen učinak kod većeg udjela superplastifikatora može se pripisati gubitku homogenosti i kohezivnosti svježje mješavine, što je prikazano na Slici 6, desno. Mješavina s naknadno dodanim superplastifikatorom (0,5 % SP DOD) pokazuje nešto nižu čvrstoću u odnosu na onu u kojoj je isti udio superplastifikatora dodan zajedno s vodom u početnoj fazi miješanja, međutim i dalje za 3,2 % veću u odnosu na referentnu mješavinu (Tablica 2). Općenito, može se zaključiti da dodavanje superplastifikatora pozitivno utječe na rani razvoj vlačne čvrstoće savijanjem cementnog morta već nakon 2 dana očvršćivanja.



Slika 8. Ispitivanje vlačne čvrstoće savijanjem



Slika 9. Serija uzoraka nakon ispitivanja vlačne čvrstoće savijanjem



Slika 10. Utjecaj superplastifikatora na vlačnu čvrstoću savijanjem očvrslog cementnog morta pri starosti od 2 i 7 dana

Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće na savijanje uzoraka starih 7 dana pokazuju da sve mješavine kod kojih je superplastifikator prethodno pomiješan s vodom ostvaruju veću čvrstoću na savijanje u odnosu na referentnu. Mješavina s 0,5 % SP bilježi porast od 4,6 %, dok mješavina s 1 % SP postiže najveću vlačnu čvrstoću savijanjem i to 12,6 % veću od referentne. Suprotno tome, mješavina s naknadno dodanim superplastifikatorom (0,5 % SP DOD) pokazuje najnižu čvrstoću, čak 12,3 % manju u odnosu na referentnu mješavinu (Tablica 3). Ova smanjena čvrstoća može se djelomično objasniti nižom gustoćom očvrslih uzoraka (Slika 7). Općenito, superplastifikator doprinosi porastu vlačne čvrstoće

savijanjem, pri čemu se taj učinak dodatno pojačava s većim udjelom, pod uvjetom da se dodaje u početnoj fazi miješanja zajedno s vodom.

Zaključno, iz usporedbe čvrstoća uzoraka starih 2 i 7 dana (Slika 10) uočen je očekivani trend porasta čvrstoće kroz vrijeme za sve ispitane mješavine, uključujući i referentnu. Dodatno, potvrđeno je da povećanje udjela superplastifikatora pozitivno utječe na porast vlačne čvrstoće savijanjem cementnog morta. Najbolji rezultati postižu se kada se superplastifikator prethodno pomiješa s vodom u početnoj fazi miješanja. Nasuprot tome, naknadno dodavanje superplastifikatora u već izmiješanu svježju mješavinu dovodi do neujednačene raspodjele aditiva, smanjene homogenosti i povećane poroznosti. Takvi uvjeti često uzrokuju slabiju zbijenost i veću količinu zarobljenog zraka u mješavini, što u konačnici negativno utječe na mehanička svojstva očvrslog morta [14].

4.5 Tlačna čvrstoća očvrslog morta

Ispitivanje tlačne čvrstoće cementnog morta (Slika 11) provedeno je na polovicama prizmi koje su prethodno korištene za ispitivanje vlačne čvrstoće savijanjem (Slika 12). Prikazane vrijednosti tlačne čvrstoće (Slika 13) predstavljaju srednju vrijednost rezultata jedne serije uzoraka, računatu iz šest pojedinačnih mjerenja.

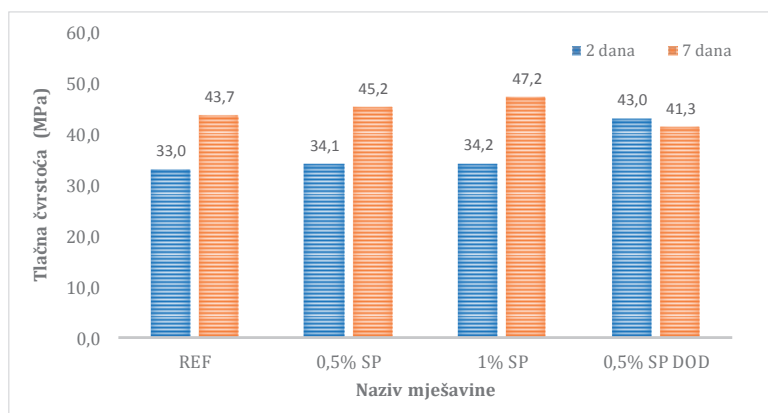
Na temelju rezultata ispitivanja nakon 2 dana starosti može se zaključiti da mješavina s dodatkom 0,5 % superplastifikatora pokazuje blago povećanje tlačne čvrstoće od 3,2 % u odnosu na referentnu, dok mješavina s 1 % superplastifikatora postiže nešto veći porast od 3,6 %. Ovi rezultati upućuju na to da veći udio superplastifikatora može doprinijeti boljoj zbijenosti svježje mješavine i povećanju rane čvrstoće. Neočekivano, mješavina s naknadno dodanim superplastifikatorom (0,5 % SP DOD) pokazala je znatno veći porast tlačne čvrstoće u odnosu na mješavinu gdje je superplastifikator doziran zajedno s vodom, čak 30,4 % u odnosu na referentnu mješavinu (Tablica 2). Iako ovaj rezultat sugerira pozitivan učinak superplastifikatora kada se dodaje naknadno u već izmiješanu mješavinu, moguće je da je on posljedica veće gustoće očvrslih uzoraka (Slika 7), a ne isključivo posljedica učinkovitosti naknadno dodanog superplastifikatora. Kako bi se potvrdila ili opovrgnula točnost ovih rezultata, potrebno je provesti dodatna ispitivanja na većem broju uzoraka.



Slika 11. Ispitivanje tlačne čvrstoće



Slika 12. Uzorci nakon ispitivanja tlačne čvrstoće



Slika 13. Utjecaj superplastifikatora na tlačnu čvrstoću očvrsllog cementnog morta pri starosti od 2 i 7 dana

Nakon 7 dana starosti, sve mješavine s dodatkom superplastifikatora postižu veće tlačne čvrstoće u odnosu na referentnu. Mješavina s 0,5 % superplastifikatora ostvaruje povećanje od 3,5 %, dok mješavina s 1 % superplastifikatora pokazuje porast od 8,2 % (Tablica 3), što dodatno potvrđuje pozitivan utjecaj većih doza superplastifikatora na razvoj tlačne čvrstoće. Isti trend prikazan je i u istraživanju koje su proveli Salem i suradnici [14]. Ovi rezultati ukazuju i na poboljšanu obradivost i zbijenost morta pri višem udjelu aditiva, što je i vidljivo nas Slici 5. Nasuprot tome, mješavina s naknadno dodanim superplastifikatorom (0,5 % SP DOD) pokazuje manju tlačnu čvrstoću u odnosu na mješavinu kod koje je isti udio superplastifikatora dodan u vodu prije miješanja, što opet potvrđuje

da kasnije dodavanje aditiva nije jednako učinkovito kao njegovo dodavanje u vodu u početnoj fazi miješanja.

Zaključno, usporedba rezultata tlačne čvrstoće pri starosti od 2 i 7 dana pokazuje da sve mješavine s dodatkom superplastifikatora ostvaruju bolje rezultate od referentne mješavine, pri čemu se učinak povećava porastom udjela superplastifikatora i vremenom, što je u skladu s rezultatima danim u [14]. Općenito, primjena superplastifikatora doprinosi poboljšanju tlačne čvrstoće cementnog morta, osobito kod većih doza i ako se doziraju zajedno s vodom u ranoj fazi miješanja.

5. Zaključak

Glavni cilj istraživanja bio je ispitati utjecaj različitih udjela i načina vremena doziranja superplastifikatora na svojstva svježeg i očvrslog cementnog morta, s posebnim naglaskom na obradivost te tlačnu i vlačnu čvrstoću savijanjem, pri konstantnom vodocementnom omjeru.

Provedena eksperimentalna ispitivanja potvrdila su da superplastifikatori mogu značajno poboljšati svojstva cementnih mješavina u svježem i očvrslom stanju, neovisno o starosti uzoraka, no njihova primjena mora biti pažljivo kontrolirana kako bi se postigli optimalni rezultati. Posebno je izražen pozitivan utjecaj na obradivost svježeg morta, omogućujući lakšu ugradnju bez povećanja vodocementnog faktora, čime se smanjuje rizik od segregacije, gubitka kohezivnosti i posljedičnog pada čvrstoće. Uočeno je da veći udio superplastifikatora doprinosi blagom povećanju gustoće uzoraka, što pozitivno utječe na trajnost očvrslog morta. Mješavine s dodatkom superplastifikatora ostvarile su veće tlačne i vlačne čvrstoće savijanjem u odnosu na referentne uzorke, pri čemu je zabilježen jasan trend rasta čvrstoće s povećanjem udjela superplastifikatora. Iako povećanje količine superplastifikatora općenito poboljšava svojstva morta, ključno je pažljivo odrediti optimalnu dozu kako bi se izbjegli neželjeni učinci poput segregacije, gubitka kohezivnosti i smanjenja čvrstoće. Nadalje, važno je napomenuti da naknadno dodavanje superplastifikatora u već izmiješanu svježju mješavinu može dovesti do smanjenog učinka u usporedbi s dodavanjem u vodu tijekom početnog miješanja.

Na temelju dobivenih rezultata može se zaključiti da pravilno odabrana količina superplastifikatora, kao i trenutak vremena doziranja, može imati utjecaj na njegovu učinkovitost i na svojstva cementnih kompozita u svježem i očvrslom stanju te je stoga pravilno projektiranje mješavine i procesa miješanja od iznimne važnosti. Za potvrdu ovih zaključaka preporučuje se provedba dodatnih ispitivanja, pri čemu bi trebalo koristiti

standardni pijesak radi osiguranja veće usporedivosti i ponovljivosti rezultata.

Zahvala. *Zahvaljujemo tvrtkama Holcim Hrvatska d.o.o. i Mapei Hrvatska d.o.o. na donaciji materijala koji su omogućili provedbu eksperimentalnih ispitivanja.*

Literatura

- [1] Bjegović, D., Štirmer, N. (2015). Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- [2] Beslač, J. (1980). Superplastificirani beton. Građevinski institut Zagreb. Sveučilišna naklada Liber, Zagreb.
- [3] Tareque, T., Tousif, F., Billah, M.A., Jabir, A.A.M, Mirmotalebi, S. (2023). Comprehensive Analysis of the Effects of Superplasticizer Variation on the Workability and Strength of Ready-Mix Concrete. Open Journal of Civil Engineering, 13, 756-770.
- [4] Bediako, M. (2024). Superplasticized vs. Conventional Concrete: A Comparative Review. Materials Sciences and Applications, 15, 271-284
- [5] Alsadey, S. (2015). Effect of Superplasticizer on Fresh and Hardened Properties of Concrete. Journal of Agricultural Science and Engineering, 1 (2), 70-74.
- [6] Marinković, S., Protić, M., Paunović, S., Nešović, I., Bijeljić, J. (2018). Application of Industrial By-Products as Mineral Admixtures for Self-Compacting Concrete, Građevinar, 70 (1), 31-38.
- [7] Malešev, M., Radonjanin, V., Vukoslavčević, S., Supić, S., Laban, M. (2017). Influence of Fly Ash and Decreasing Water-Powder Ratio on Performance of Recycled Aggregate Concrete, Građevinar, 69 (9), 811-820.
- [8] Holcim (Hrvatska) d.o.o., Proizvodi i usluge, <https://www.holcim.hr/proizvodi-i-usluge/cement/certifikati-i-tehnicke-upute>, pristup 20.06.2025.
- [9] HRN EN 197-1:2012. Cement – 1. dio: Sastav, specifikacije i kriteriji sukladnosti cementa opće namjene (EN 197-1:2011), Hrvatski zavod za norme, 2012.
- [10] Mapei, Dynamon SF 16, <http://www.mapei.com/>, pristup 20.06.2025.
- [11] HRN EN 196-1:2016. Metode ispitivanja cementa – 1. dio: Određivanje čvrstoće, Hrvatski zavod za norme, 2016.
- [12] HRN EN 1015-6:2000. Metode ispitivanja mortova za zide – 6. dio: Određivanje gustoće svježeg morta, Hrvatski zavod za norme, 2000.
- [13] HRN EN 1015-3:2000. Metode ispitivanja mortova za zide – 3. dio: Određivanje konzistencije svježeg morta (stolićem za potresanje), Hrvatski zavod za norme, 2000.