

Utjecaj doze superplastifikatora na ponašanje mortova sa kalcij aluminatnim cementom

Filipović, Mario

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:

University of Split, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy / Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:123:377429>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-22**



Repository / Repozitorij:

[FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



**SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I
GEODEZIJE**

ZAVRŠNI RAD

Mario Filipović

Split, srpanj 2021.

**SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I
GEODEZIJE**

ZAVRŠNI RAD

**Utjecaj doze superplastifikatora na ponašanje
mortova sa kalcij aluminatnim cementom**

Mario Filipović

Split, srpanj 2021.

Utjecaj doze superplastifikatora na ponašanje mortova s kalcij aluminatnim cementom

Sažetak

U suvremenom građevinarstvu sve je češća primjena aditiva. Razlog njihove primjene je u njihovom povoljnom djelovanju na betone i mortove. U ovom radu istraženo je kako različita doza aditiva „superplastifikator“ utječe na obradivost i čvrstoću morta izrađenog sa kalcij aluminatnim cementom, te kakva su krajnja svojstva tog morta. U eksperimentalnom dijelu napravljene su 4 recepture na kojima je provedeno ispitivanje. Jedna od receptura je napravljena bez aditiva i ona služi kao referenti uzorak, ostale 3 recepture su napravljene sa različitim udjelom aditiva. Na temelju provedenog istraživanja napravljena je usporedba svojstava morta bez aditiva u odnosu na mort sa aditivom. Dobiveni rezultati su obrazloženi te prikazani grafički i tablično te je donesen zaključak.

Ključne riječi

Plastifikator, superplastifikator, mort, čvrstoća, obradivost, brzina ultrazvuka

Influence of superplasticizer dose on the behavior of mortars with calcium aluminate cement

Abstract:

In modern construction work, the use of additives is becoming more common. The reason for their application is in their beneficial effect on concrete and mortar. In this research, it was investigated how the additive „superplasticizer“ affects the flow and strength of mortar made with aluminous cement, and what are the final characteristic of this mortar. In the experimental part, 4 samples were made for testing. One of samples was made without additives and it serves as a reference sample, the other 3 samples were made with different proportions of additive. Based on the conducted research, a comparison of the mortar without additives was made in relation to mortar with additive. The obtained results were explained and presented graphically and tabularly, and a conclusion was reached.

Keywords:

Plasticizer, superplasticizer, mortar, strength, workability, ultrasound speed

SVEUČILIŠTE U SPLITU

FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

Split, Matice hrvatske 15

STUDIJ: **PREDDIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ
GRAĐEVINARSTVA**

KANDIDAT: Mario Filipović

BROJ INDEKSA: 4697

KATEDRA: **Katedra za građevinske materijale**

PREDMET: Građevinski materijali 1

ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Tema: Utjecaj doze superplastifikatora na ponašanje mortova s kalcij aluminatnim cementom

Opis zadatka: Zadatak ovog završnog rada je prikazati utjecaj doze superplastifikatora na ponašanje mortova s kalcij aluminatnim cementom. Potrebno je prikazati osnovna svojstva aluminatnog cementa, te mehanizam djelovanja superplastifikatora na cement. Prikazati karakteristike materijala i relevantne metode ispitivanja koje su korištene u radu. Eksperimentalno ispitati mješavine morta sastavljene od kalcij aluminatnog cementa, vode, pijeska te superplastifikatora pri različitim dozama. Sve rezultate prikazati tablično i grafički, te dati najvažnije zaključke istraživanja.

U Splitu, 31.03.2020.

Voditelj Završnog rada:

doc.dr.sc. Goran Baloević

Sadržaj

1	UVOD	1
2	OPĆI DIO.....	2
2.1	Sastav i struktura mortova	2
2.2	Općenito o cementima	3
2.2.1	Aluminatni cement	4
2.2.2	Proizvodnja aluminatnog cementa	6
2.3	Agregat.....	7
2.3.1	Granulometrijski sastav agregata	8
2.4	Aditivi	8
2.4.1	Plastifikatori	8
2.4.2	Superplastifikatori	11
2.4.3	Primjena i uporaba superplastifikatora	13
2.4.4	Utjecaj superplastifikatora na hidrataciju cementa.....	14
3	METODE ISPITIVANJA	15
3.1.1	Ispitivanje svježeg morta	15
3.1.2	Ispitivanje očvrsllog morta	17
4	EKSPERIMENTALNI DIO.....	21
4.1	Uvod.....	21
4.2	Korišteni materijali	21
4.2.1	Cement.....	21
4.2.2	Agregat	23
4.2.3	Voda	25
4.2.4	Aditiv	25
4.3	Izrada uzoraka morta	26
4.3.1	Izrada mješavina	28
4.4	Ispitivanje obradivosti prema EN 1015 – 3	29
4.4.1	Ugradnja morta u kalupe	31
4.5	Ispitivanje čvrstoće morta.....	32
4.5.1	Dobiveni rezultati ispitivanja	33
4.6	Ispitivanje morta nerazornom metodom – metoda ultrazvuka	35
4.6.1	Rezultati ispitivanja.....	35
5	ZAKLJUČAK	38
	LITERATURA	40
	PRILOZI.....	41

1 UVOD

Aditivi su tvari, najčešće organskog podrijetla, koje u malim količinama dodane u svježu mješavinu, tijekom miješanja ili transporta, modificiraju svojstva svježeg ili očvrsllog betona, ili morta ili cementne paste [1]. Iako su u primjeni već duže vrijeme, još se uvijek ne zna puno njihovih karakteristika. Aditivi bi se trebali upotrebljavati samo ako ćemo njihovom upotrebom biti u prednosti pri izradi betona, morta ili cimente paste. Odnosno, mora postojati dovoljan broj razloga da se opravda njihova upotreba, kao što su ekonomska isplativost i smanjenje utrošenog rada. Međutim, neka tražena svojstva betona ne možemo postići bez upotrebe aditiva iako oni predstavljaju značajan trošak. Tu se upotreba aditiva nastoji opravdati kvalitetom i trajnošću betona odnosno morta.

Posebno se naglašava da određeni aditiv može znatno poboljšati ona svojstva za koja je predviđen, ali ne može popraviti pogreške u projektiranju i sastavu betona i tehnološkom procesu pripreme, transporta i ugradbe betona [2].

Neke od najvažnijih mogućnosti modifikacije svojstava svježeg i očvrsllog betona su:

- Povećanje obradivosti betona u svježem stanju bez povećanja količine vode
- Smanjiti segregaciju
- Usporiti ili ubrzati vrijeme početka vezanja cementa
- Poboljšati pumpabilnost
- Povećati trajnost betona, posebno u ekstremnim klimatskim uvjetima
- Povećati čvrstoću

Prema sastavu i načinu na koji djeluju, mogu se razvrstati u 3 grupe: površinski aktivne tvari, topljive kemikalije i praktično netopljivi minerali.

Prema normativima dijele se na:

- Aerante
- Plastifikatore i superplastifikatore
- Usporivače vezanja
- Ubrzivače vezanja i druge [1]

2 OPĆI DIO

2.1 Sastav i struktura mortova

Podjela mortova općenito ide na:

- Prema namjeni
- Prema sastavu
- Prema maksimalnom zrnu agregata
- Prema obradivosti i konzistenciji
- Prema procesu očvršćivanja
- Prema mjestu proizvodnje

Mort se sastoji od veziva, pijeska, vode i raznih dodataka.

Veziva koja se koriste za pripravu mortova se dijele na mineralna i organska veziva. Mineralna veziva mogu biti hidraulična i nehidraulična, dok se organska veziva dijele na bitumen i polimerna veziva. Ukoliko se primjenjuje više od jednog veziva (obično dva), takvi mortovi se nazivaju složeni mortovi.

Agregat za mort mora zadovoljavati određena ograničenja kao što su granulometrijski sastav, mehanička svojstva te maksimalno zrno koje mora biti manje od polovice najmanjeg presjeka ugrađenog morta. Agregati za izradu morta mogu biti neorganskog ili organskog podrijetla: prirodni i drobljeni pijesak, pucolanska zemlja, leteći pepeo, ekspandirana glina, razne vrste zgura, strugotina od drveta i drugi [7].

Voda za pripravu morta uglavnom mora biti istih karakteristika kao i voda za pripravu betona, a to je da pH vrijednost mora biti minimalno 4.5, te da se moraju izbjegavati štetne tvari prisutne u vodi kao što su sulfati, spojevi klora, anorganske i organske soli te organske tvari. Uporaba određene vode može se ispitati postupcima kvalitativne i kvantitativne kemijske analize.

Također se primjenjuju razni dodatci za poboljšanje svojstava, a to su: aeranti, plastifikatori, stabilizatori, usporivači i ubrzivači vezivanja i ostali. Također, često se dodaju i različite boje

za mortove koji se koriste kao završni sloj. Boje moraju biti postojane i ne smiju negativno utjecati na svojstva morta.

Prema tehnologiji pripremanja mortovi se dijele na:

- Transportni mortovi
 - Gradilišni mortovi
 - Suhi mortovi
- } Klasični mortovi

2.2 Općenito o cementima

Riječ cement dolazi od dviju latinskih riječi caedere = lomiti i lapidem = kamen. Cement je praškasti materijal, koji s dodanom vodom, kemijskim reakcijama i pratećim fizikalnim procesima prelazi u očvrslu cementnu pastu ili cementni kamen. Na tržištu postoji veliki broj vrsta cemenata, a u građevinarstvu se najčešće upotrebljava portland cement. Neke od važnijih vrsta cementa su: aluminatni cement, pucolanski cement i metalurški cement, ekspanzivni cement i supersulfatni cement.

Prema mineralnom sastavu cemente dijelimo na dvije grupe:

- Aluminatni cement
- Silikatni cement

Silikatni su oni cementi kod kojih su glavni minerali klinkera silikati, a prema svom sastavu mogu se podijeliti u više podgrupa:

- Čisti Portland cement
- Portland cement s dodacima
- Pucolanski cement
- Metalurški cement
- Miješani cement
- Bijeli cement [4]



Slika 1, Različite vrste cementa

Osnovni sastojci portland cementa su CaO , SiO_2 , Al_2O_3 i Fe_2O_3 [7].

Portland cement se može podijeliti na 5 tipova:

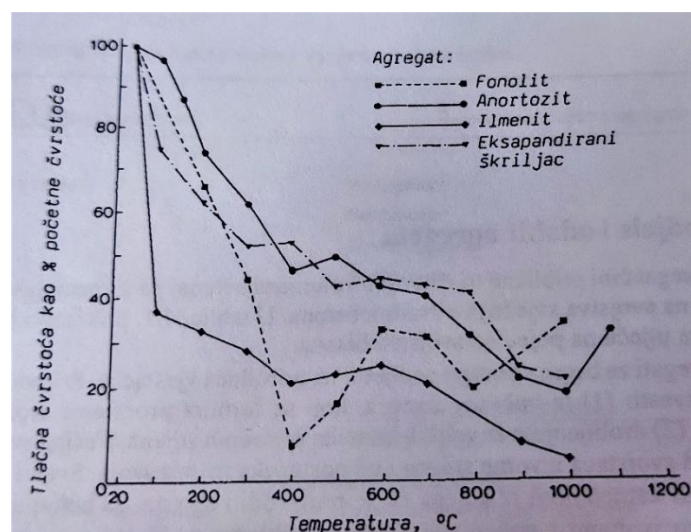
- Tip I – običan cement
- Tip II – modificirani cement
- Tip III – brzo očvršćivajući
- Tip IV – cement niske topline hidratacije
- Tip V – sulfatnootporni cement

2.2.1 Aluminatni cement

Aluminatni cement ili Lafarge cement je cement koji je razvijen tako da je otporan na djelovanje sulfata. Razlikuje se od portland cementa po mineraloškom sastavu. Međutim, znatno se manje zna o njegovom mineraloškom sastavu nego za portland cement.

Primjeri posebice uspješne primjene aluminatnog cementa su mjesta gdje se traži visoka otpornost na kiseline, temperaturne šokove i abraziju.

Glavna prednost i jedno od svojstava je da aluminatni cement razvija čvrstoću jako brzo. Oko 80 % čvrstoće se razvije već nakon 24 sata, dok portland cement istu čvrstoću postiže tek nakon 28 dana. Uz brzinu hidratacije, također ide i velika toplina hidratacije, stoga je on prikladan za betoniranje na mrazu i niskim temperaturama.



Slika 2, Promjene čvrstoće aluminatnog cementa u funkciji promjene temperature [1]

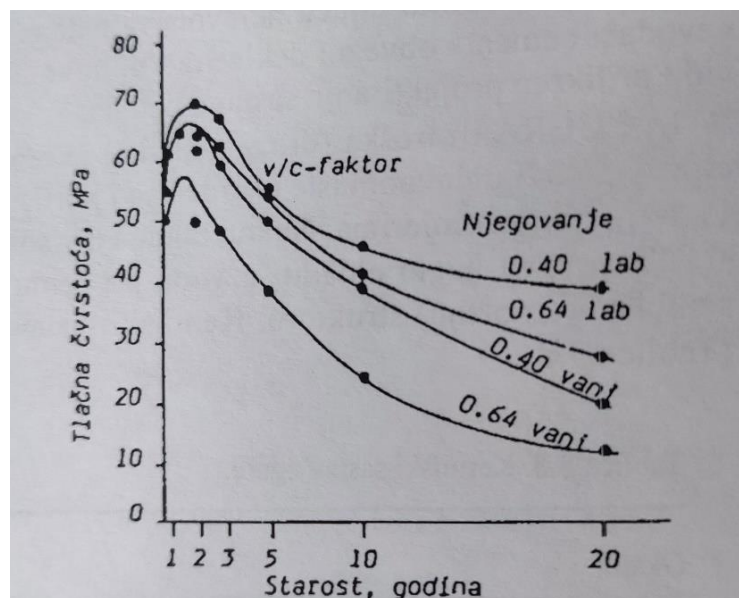
Bitno je naglasiti da aluminatni cement spada u brzočvršćujuće cemente, a ne u brzovezajuće cemente. Početak vezanja je kasniji nego kod portland cementa, ali sami kraj vezanja uslijedi brže. Brzo vezanje možemo postići tako da cementu dodamo gipsa, vapna, portland cementa i organskih dodataka.

Postoje tri osnovne skupine aluminatnog cementa:

- Cement sa niskim udjelom aluminata
- Cement sa srednjim udjelom aluminata
- Cement sa visokim udjelom aluminata

Svojstva aluminatnog cementa:

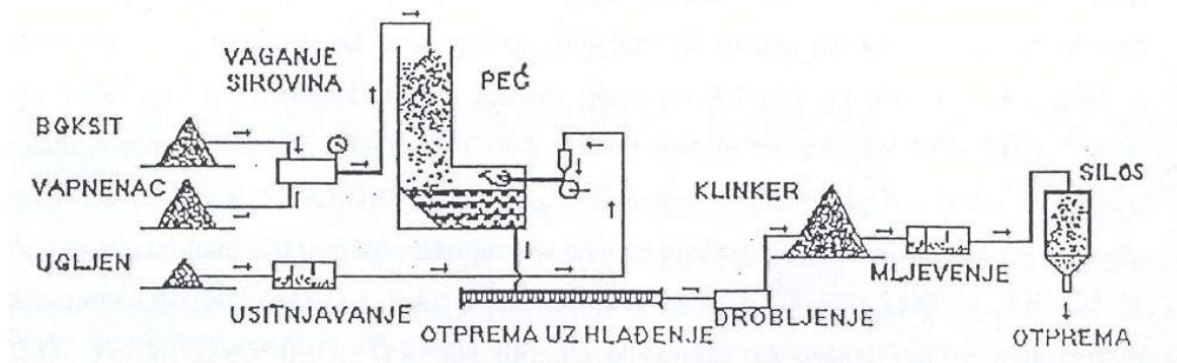
- Brzo stvrdnjavanje, 2-4h
- Brzo postizanje čvrstoće, unutar 24h
- Dobra vatrostalna svojstva
- Otpornost na kiseline
- Velika otpornost na abraziju
- Niske temperature primjene do -10 C° [4]



Slika 3, Promjene čvrstoće tijekom vremena za betone spravljene s aluminatnim cementom [1]

2.2.2 Proizvodnja aluminatnog cementa

Sirovine za proizvodnju aluminatnog cementa su boksit sa udjelom od cca. 60% i vapnenac sa udjelom od cca. 40%. Kemijski sastav boksita tvore oksidi aluminija, željeza i titana uz niski sadržaj silikata te ostalih spojeva. Proizvodnja cementa se odvija u više faza, a u prvoj od njih boksit i vapnenac se drobe na komade veličine cca. 10 cm. U peći, koja je kombinacija vertikalne i horizontalne peći, događa se taljenje sirovina. Kao gorivo se upotrebljava ugljena prašina. Cementi koji sadrže mali postotak željeza su svijetli i jako slični portland cementu, a oni koji imaju veliki postotak željeza su tamnije boje. Specifična površina cementa ovisi o finoći mliva. Aluminatni cement se proizvodi u Engleskoj, Hrvatskoj, Španjolskoj, Francuskoj, SAD-u. [8]



Slika 4, Shematski prikaz proizvodnje aluminatnog cementa [7]

Tablica 1, Klasifikacija aluminatnog cementa

Vrsta	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	Proizvodni proces	Boja
visok sadržaj željezo oksida	nizak udio aluminata 36-42	12-20	3-8	36-42	taljenje	tamno siva
niski sadržaj željezo oksida	srednji udio aluminata 48-60	1-3	3-8	36-42	taljenje/sinteriranje	svjetlo siva
bez željezo oksida	visoki udio aluminata 65 - 80	0-0,5	0-0,5	17-27	sinteriranje	bijela

2.3 Agregat

Agregat za obični beton se dobiva od kamena. Često se naziva kameni ili mineralni agregat. Prema načinu i vrsti mljevenja dijeli se na prirodni i umjetno drobljeni. Umjetno drobljeni agregat se dobiva drobljenjem u posebnim drobilicama te ga nazivamo drobljeni agregat. Prije modernih strojeva, agregat je se drobio ručnim razbijanjem, odnosno tucanjem većih komada, pa je stariji naziv tucanik. [2]

Umjetni agregati se proizvode obično za neku posebnu namjenu, kao što je npr. lakoagregatni beton. To su agregati od ekspandirane i pečene gline, perlita ili vermikulita. [1]

Prirodni agregat nastaje raspadanjem velikih kamenih masiva. Raspadnute komade nose potoci i rijeke tijekom čega se oni drobe i bruse. Pa su zbog toga zrna agregata iz riječnih nanosa najboljeg kvaliteta. Lošiji komadi su razbijeni i odneseni vodom, a preostala zrna su zaobljena. [2]

2.3.1 Granulometrijski sastav agregata

Podaci koji definiraju od kakvih se veličina zrna sastoji agregat i kolika je količina svake vrste zrna, nazivaju se granulometrijski sastav ili granulacija agregata. Granulometrijski sastav se ispituje tako što se agregat prosijava na standardnim sitima. Utvrđuje se koliko je agregata prošlo kroz određeno sito i svaki podatak se naziva prolaz. Jedan od nedostataka je što dio sitnijih zrna od 0.063 mm, zbog djelovanja intermolekularnih sila, ostaje vezan za krupnija zrna pa stoga prolaz na situ može biti znatno manji od stvarnog.

Podatci koji se dobiju ispitivanjem mogu se prikazati dijagramom. Prolaz kroz sito se nanosi na ordinatu, a veličina otvora na apscisu. Najbolje je odabrati takav sustav sita, gdje je otvor svakog sita dvostruko veći od prethodnog. Područje između dva susjedna sita standardne serije naziva se razred veličine zrna. [2]

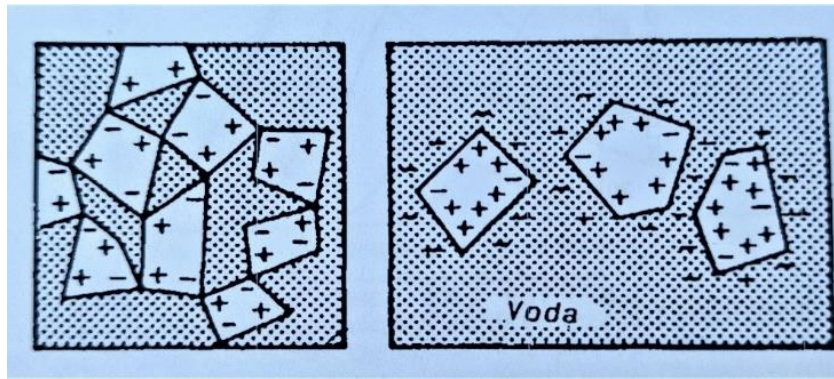
2.4 Aditivi

Kao što je spomenuto u uvodu, aditivi su tvari koje se dodaju u malim količinama kako bi se modificirala svojstva svježeg i očvrslog betona, morta ili cementne paste.

U ovom radu veća pozornost će se obratiti na djelovanje plastifikatora i superplastifikatora.

2.4.1 Plastifikatori

Prisustvo molekula plastifikatora u vodi za pripremu betona omogućava stvaranje debljeg adsorpcijskog sloja oko čestica veziva. Budući da su molekule plastifikatora mnogo veće nego molekule vode, taj sloj je znatno deblji nego kada je oko čestica prisutna samo voda. Također, površina adsorpcijskog sloja svake čestice ima električni naboj (zeta potencijal do 30 mV) istog predznaka pa se čestice međusobno odbijaju. Budući da su čestice međusobno razmaknute, smanjuju se otpori između njih što nam daje bolju obradivost. [2]



Slika 5, Shematski prikaz djelovanja plastifikatora [1]

Plastifikatori mogu smanjiti potrebnu količinu vode od 5 do 15% , što ovisi o vrsti cementa koji koristimo, agregatu i količini vode.

Plastifikatori mogu imati trojaku namjenu:

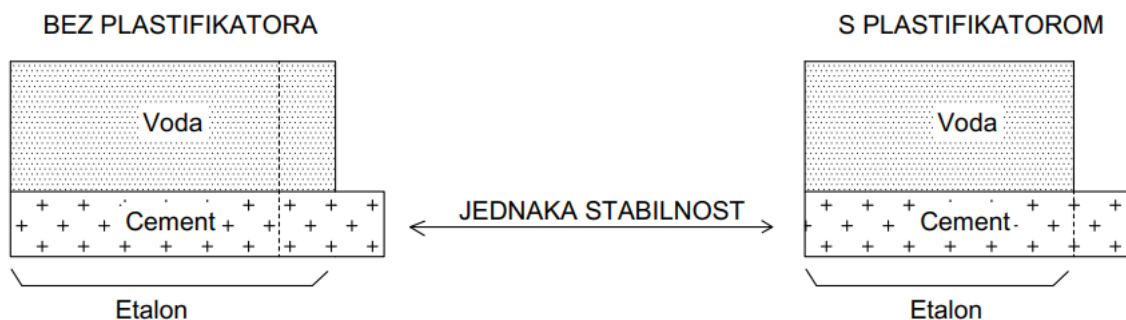
- a) Povećavaju čvrstoću, tako da smanjuju potrebnu količinu vode ali obradivost ostaje ista
- b) Smanjuju količinu potrebnog cement uz zadržavanje iste konzistencije, što rezultira smanjenom toplinom hidratacije kod masivnih betona
- c) Poboljšavaju obradivost, lakša ugradba, samozbijajući beton

Ovisno o tome kako utječe na stupanj hidratacije cementa (α) razlikujemo:

- normalni plastifikator (Np) koji puno ne mijenjaju (α)
- plastifikatori – ubrzivači (PA) koji utječu na povećanje (α)
- plastifikatori – usporivači (PR) koji smanjuju (α) tijekom rane hidratacije (do cca. 14 dana) [10]

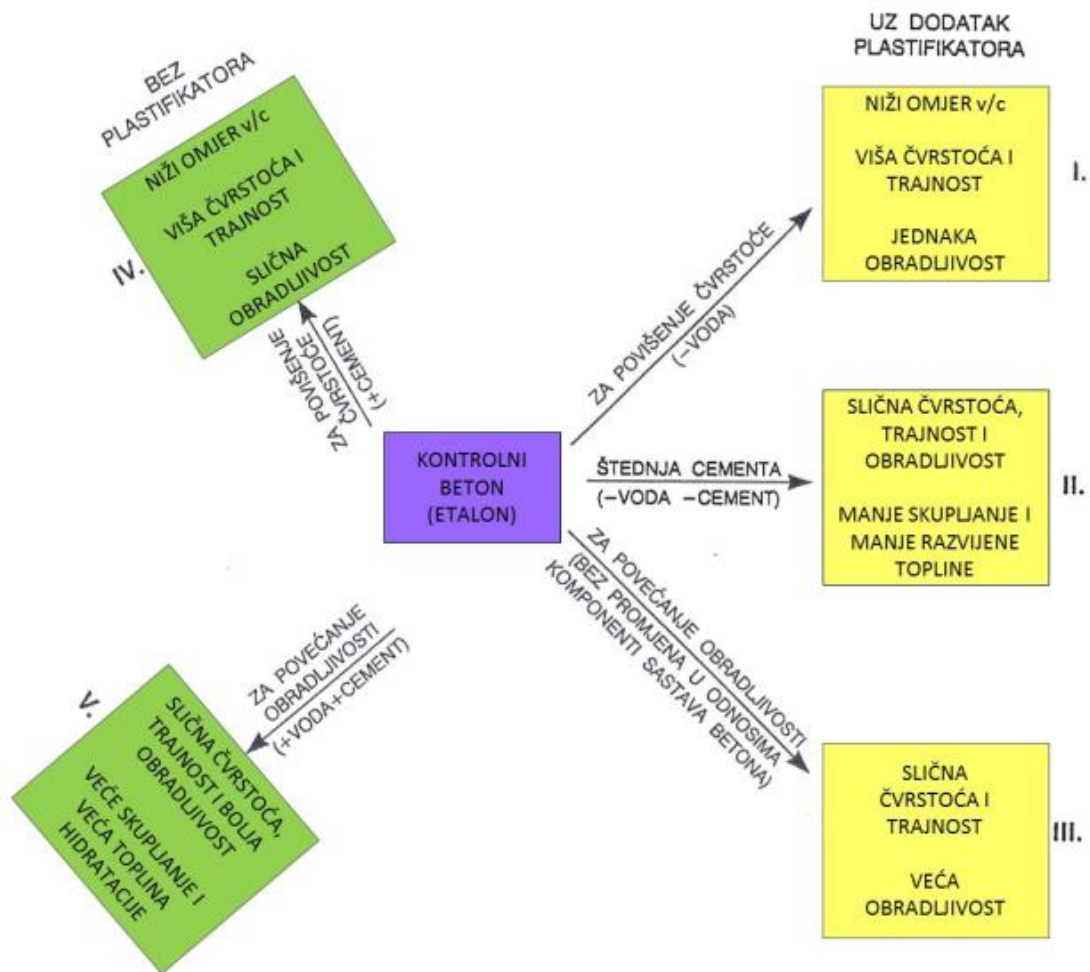
Kemijski sastav plastifikatora:

- Lignosulfonati
- Soli hidrosikarbonske kiseline
- Ostale vrste tvari



Slika 6, Shematski prikaz utjecaja plastifikatora na poboljšanje obradivosti svježeg betona, bez promjene njegove stabilnosti u odnosu na etalon. Prikazana samo pasta, volumen agregata nepromijenjen. [2]

Ako se betonu istog sastava kao etalon doda plastifikator, poveća se žitkost paste i time obradivost betona, ali se smanji njegova stabilnost, slično kao što se to postiže povećanjem sadržaja vode u betonu bez aditiva. Da bi taj beton imao jednaku stabilnost kao etalon i ovdje je potrebno istodobno povećati sadržaj cementa, ali je to povećanje manje nego kod betona bez aditiva. [2]



Slika 7, Shematski prikaz načina i svrhe uporabe plastifikatora [5]

2.4.2 Superplastifikatori

Način djelovanja superplastifikatora je isti kao i kod plastifikatora, ali njegov učinak je još više izražen. Zbog toga superplastifikator postiže rezultate koje uz upotrebu običnog plastifikatora ne bi mogli dobiti.

Po europskoj normativnoj specifikaciji HRN EN 934-5:2008 superplastifikator je dodatak koji ima dvostruko djelovanje:

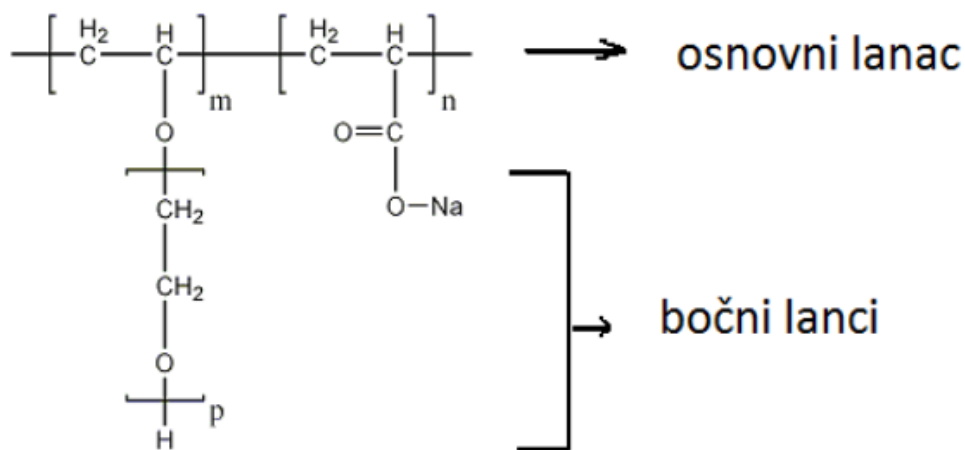
- omogućuje veliko smanjenje vode određenoj betonskoj mješavini, a da se pri tom ne promijeni njezina obradivost
- omogućuje veliko poboljšanje obradivosti, a da sadržaj vode ostane isti

Možemo ih podijeliti u 4 grupe promatrajući prema kemijskom sastavu:

- sulfonirane melamin- formaldehidne kondenzate (SMF)
- sulfonirane naftale – formaldehidne kondenzate (SNF)
- modificirane lignosulfonate (MLS)
- ostale tipove superplastifikatora

U svima navedenim grupama postoje dodatne varijacije, pa je tako i pojašnjeno djelovanje polikarboksilat etera (PCE) kao vrlo interesantnog aditiva.

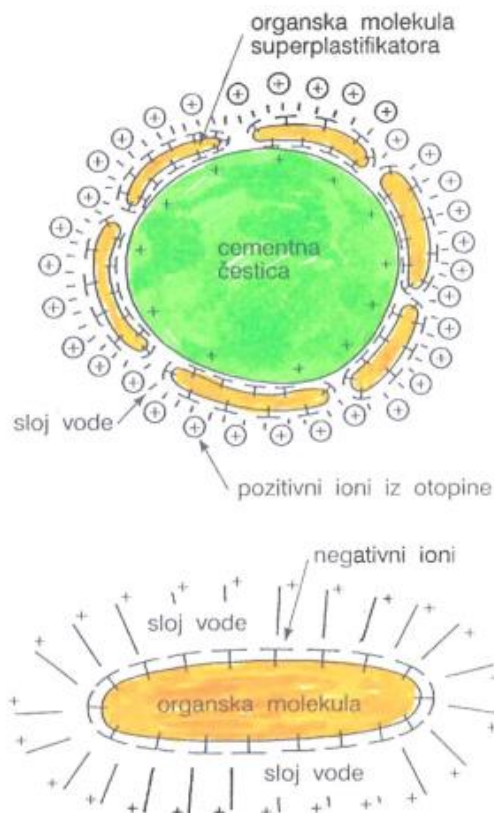
Polikarboksilat eter (dalje PCE) je polimer velike molekularne mase.



Slika 8, Polimerna osnovna struktura PCE-a s karboksilnim grupama u osnovnom lancu i polietilenglikolnim bočnim lancima [5]

Kako bismo mogli postići zadovoljavajuću konzistenciju aluminatno cementnog materijala s niskim sadržajem vode, potrebno je dodati efikasne disperzante. Polikarboksilatni eteri, polimeri temeljeni na anionskom osnovnom lancu i neionskim bočnim lancima predstavljaju jednu od najnovijih generacija disperzanata (Slika 8). Istraživanja su pokazala pozitivan utjecaj PCE-a na smanjenje udjela vode, obradivost i razvoj čvrstoće. Efikasno djelovanje PCE-a na dispergiranje čestica aluminatnog cementa objašnjava se kombinacijom:

- a) jakog elektrostatskog privlačenja između osnovnog ionskog lanca PCE-a s česticama cementa te
- b) steričkog odbijanja bočnih lanaca PCE-a koji se ne adsorbiraju na površinu cementa [5]



Slika 9, Shematski prikaz interakcije molekula superplastifikatora u sustavu cement-voda-superplastifikator [5]

2.4.3 Primjena i uporaba superplastifikatora

Upotreba superplastifikatora je trenutno ograničena jako velikom cijenom, što je rezultat složenosti proizvodnje.

Superplastifikatori omogućavaju ugradnju betona tamo gdje je postavljena vrlo gusta armatura, te do teško dostupnih mjesta. Primjenjuju se također kod prefabriciranih elemenata jer omogućuju postizanje visokih čvrstoća već nakon 8 ili 16 sati poslije ugradnje u kalupe.

Superplastifikatori se uglavnom rabe za:

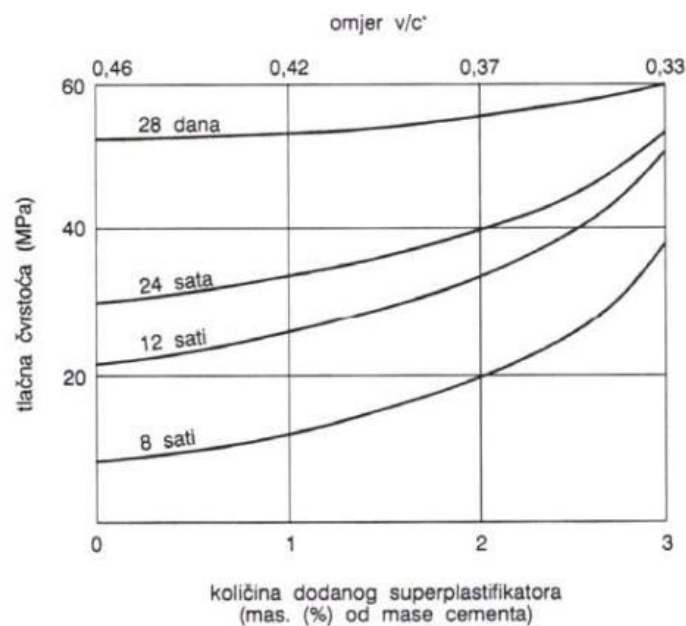
- proizvodnju betona s vrlo niskim w/c. Rezultat je jako visoka čvrstoća ako se zadrži ista količina cementa. Taj omjer može ići do čak 0.28.

- proizvodnju betona sa manjom količinom cementa uz zadržavanje konstantnog omjera w/c
- proizvodnju tekućeg betona (samonivelirajući beton) [10]

2.4.4 Utjecaj superplastifikatora na hidrataciju cementa

Brzina hidratacije cementa i njegovih spojeva se mijenja pod djelovanje superplastifikatora. Ishod ovisi o vodocementnom omjeru, količini dodanog superplastifikatora, molekularnoj masi superplastifikatora, odnosu triklacij – aluminata prema gipsu, temperaturi i ostalim uvjetima.

Superplastifikatori na bazi SMF – a i SNF- a usporavaju hidrataciju tri – kalcij aluminata. Efekt usporene C₃A hidratacije se povezuje sa usporenom pretvorbom entrigita u monosulfat. Rana hidratacija alita uz normalni vodocementni faktor se usporava dodatkom superplastifikatora tipa SMF. Poboľšanje disperznosti anhidritnih čestica veziva djelovanje superplastifikatora ima veliku važnost kod cementnih kompozita s niskim vodocementnim faktorom, jer bolja disperzija čestica pridonosi povećanju stupnja hidratiziranosti veziva. [9]



Slika 10, Utjecaj količine superplastifikatora na prirast čvrstoće na pritisak [6]

3 METODE ISPITIVANJA

Ispitivanje materijala se vrši prema standardima ili normama koje trebaju obuhvatiti slijedeće:

- način pripreme uzoraka za ispitivanje
- metode ispitivanja
- način obrade rezultata

Za svaki od postupaka, postoji određeni način, uvjeti, oprema i drugi faktori koji se moraju izvršiti, tako da ispitivanje uzoraka u različitim laboratorijima omogućava dobivanje praktički istih rezultata. Svi rezultati ispitivanja se upisuju u odgovarajući formular. Svaki laboratorij bi trebao imati svoje formulare iz kojih se jasno mogu pročitati mjereni rezultati.

Postoji razni broj metoda i instrumenata za ispitivanje, budući da su postupci jako opširni, opisati ćemo samo nekolicinu postupaka i metoda.

3.1.1 Ispitivanje svježeg morta

- a) Ispitivanje konzistencije morta



Slika 11, Protresni stol

Prema standardima, konzistencija (plastičnost) morta se definira na bazi mjerenja veličine rasprostiranja d , koja se dobije nakon protresanja morta na protresnom stolu. Nakon 15 udaraca (1 udarac po sekundi) mjeri se promjer „pogače“ .

U slučaju morta za zidanje određena su tri tipa konzistencije:

- tekuća konzistencija – kod koje je $d > 200$ mm,
- plastično – elastična sa $d = 140 - 200$ mm,
- plastična konzistencija < 200 mm. [7]

Također, koristi se metoda mjerenja dubine prodiranja standardnog metalnog konusa koji ulazi u sustav aparature prikazane na Slici 12. Ovaj postupak predstavlja jedan od mogućih načina određivanja viskoziteta svježeg morta te se vrlo često koristi. U zavisnosti od viskoziteta morta, dubine prodiranja standardnog konusa biti će različite. Za zidanje zidova, preporučuje se mort kod kojeg je dubina prodiranja 9-13 cm, ukoliko se koriste šuplje opeke preporučuje se 7-8 cm, a ako se radi o kamenim zidovima onda treba iznositi 4 do 6 cm.



Slika 12, Aparatura za mjerenje konzistencije

3.1.2 Ispitivanje očvrstlog morta

b) Ispitivanje čvrstoće

Čvrstoća uzorka prema HRN B.C8.022. se ispituje na vlak savijanjem i na pritisak. Za ispitivanje se izrađuju serije od 3 prizme dimenzija 40x40x160 mm.

Prizme se izrađuju od cementnog morta masenog omjera 1:3.

Čvrstoća na vlak savijanjem. Svaku prizmu ispituujemo kao prostu gredu raspona l . Naprezanje na rubu poprečnog presjeka prizme pri lomu iznosi:

$$f_s = \frac{M}{W} = \frac{F * l}{\frac{4}{b^3}} = \frac{3}{2} * \frac{l}{b^3} * F$$

gdje je F sila pri lomu u N. [2]

Rezultat ispitivanja je srednja vrijednost 3 pojedinačna rezultata.

Čvrstoća na pritisak. Ispitivanje se vrši na polovicama prizama koje su ostale nakon ispitivanja na savijanje. Čvrstoća pritiska za svaku polovicu prizme iznosi :

$$f_s = \frac{F}{A} \dots (Mpa)$$

gdje je F sila pri lomu u N. [2]

Rezultat ispitivanja je srednja vrijednost 6 pojedinačnih rezultata.



Slika 13, Uređaj za određivanje čvrstoće

c) Nerazorne metode – metoda ultrazvuka

Ultrazvuk su vibracije istog tipa kao i zvuk, ali budući da su to vrlo visoke frekvencije, ljudsko uho ih ne može registrirati. Frekvencije o kojima govorimo dane su formulom:

$$f = \frac{v}{\lambda}$$

gdje je v (m/s) brzina rasprostiranja ultrazvučnog vala, a λ valna dužina.

U praktičnoj primjeni metode ultrazvuka, ultrazvučni impulsi se dobivaju primjenom specijalnih generatora. A prijenos ultrazvučnih valova se vrši pomoću posebnih prijenosnika. Postavljanjem tih prijenosnika na uzorak, kroz element dolazi do prijenosa uzdužnih, poprečnih i površinskih ultrazvučnih valova.

Svaki aparat koji radi na principu rasprostiranja longitudinalnih valova sastoji se od generatora, prijenosnika (koji uvode ultrazvuk u ispitno tijelo), prijemnika (koji pretvaraju mehaničke valove u električne) i indikatora vremena prolaska. Poznavajući dužinu puta (s) kroz koji je

ultrazvuk prošao i izmjereno vrijeme trajanja kretanja ultrazvuka, dolazi se do brzine ultrazvuka.

$$v = \frac{s}{t}$$

Brzina prolaza longitudinalnih ultrazvučnih valova kroz homogena tijela zavisi od fizičko – mehaničkih svojstava materijala, kao i od geometrijskih karakteristika tijela. U važnosti su sljedeće teorijske zavisnosti:

- za slučaj prolaza ultrazvuka kroz linijske elemente, tj. kroz elemente prizmatičnog ili cilindričnog oblika kod kojih je $h/a > 5$, $\lambda > 3a$:

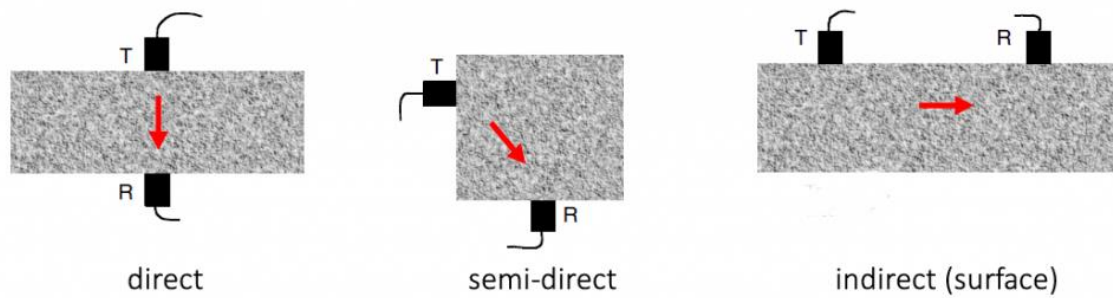
$$v = \sqrt{\frac{Ed}{\gamma}}$$

- za slučaj prolaza ultrazvuka kroz površinske elemente debljine d , a pod uslovom da je $d < 2\lambda$:

$$v = \sqrt{\frac{Ed}{(1 - \mu^2) * \gamma}}$$

- za slučaj prolaza ultrazvuka kroz tijela neograničenih dimenzija – masive, a pri $d > 2\lambda$:

$$v = \sqrt{\frac{Ed * (1 - \mu)}{(1 + \mu) * (1 - 2\mu) * \gamma}} \quad [6]$$



Slika 14, Načini mjerenja brzine ultrazvuka

Tablica 2, Brzine rasprostiranja ultrazvuka kroz razne materijale

Materijal (sredina)	v (m/s)
zrak	340
voda	1490
pleksiglas	2540
beton	2500-5000
staklo	3600-6100
lijevano željezo	4410
kvarc	6580
čelik	5850
aluminij	6300

4 EKSPERIMENTALNI DIO

4.1 Uvod

Eksperimentalni dio rada je istraživanje utjecaja doze superplastifikatora na svojstva morta koji je izrađen sa kalcij – aluminatnim cementom. Cilj zadatka je proučiti, analizirati i obraditi svojstva navedenog morta.

Za potrebe eksperimentalnog dijela napravljene su četiri recepture, od kojih je svaka izrađena sa različitim dozama sastojaka. Napravljena je jedna referentna receptura bez superplastifikatora, kako bi se moglo usporediti i uočiti koje su razlike, prednosti i mane dodavanja superplastifikatora u mort.

Uzorci su čuvani u komori na temperaturi od $20 \pm 2 \text{ C}^\circ$.

Provedeno je ispitivanje na svježem i očvrsлом mortu. Na svježem mortu rađeno je ispitivanje razastiranja, dok je na očvrsлом rađeno ispitivanje pomoću metode ultrazvuka te ispitivanje vlačne i tlačne čvrstoće.

U nastavku slijedi opis materijala koji su korišteni, opis postupaka koji su rađeni te predstavljanje dobivenih rezultata.

4.2 Korišteni materijali

4.2.1 Cement

U pripremi mješavina korišten je kalcij – aluminatni cement.

Tablica 3, Kemijski sastav

SiO ₂	<6
Al ₂ O ₃	38 – 42
Fe ₂ O ₃	13 – 17
CaO	36 – 40
MgO	< 1,5
SO ₃	< 0,4

Korišten je ISTRA 40 CAC, s uobičajenim vremenom vezivanja i brzim stvrdnjavanjem pri čemu se postižu visoke rane čvrstoće. ISTRA 40 je sastavljen od kalcijevih aluminata sa sljedećim karakteristikama :

- brzi razvoj čvrstoće
- otpornost na visoke temperature
- visoki stupanj otpornosti na abraziju
- otpornost na biogensku koroziju uzrokovanu sumpornom kiselinom

Navedeni cement udovoljava zahtjevima standarda HRN EN 14647 te se kontrolira sukladno zahtjevima standarda HRN EN 14647.

Mineraloški sastav

ISTRA 40 sadrži uglavnom mono – kalcijev aluminat (CA). Ta faza je odgovorna za postizanje visokih ranih čvrstoća. Kada se miješa s vodom, ISTRA 40 stvara kalcij – aluminatne hidrate kao produkte hidratacije.

Mineralne faze su: glavna CA, sporedne – C₄AF, C₂AS, C₁₂A₇.

Tehničke značajke

Tablica 4, Teh. podatci

ostatak na situ pri:	90µm <5%
finoća (Blaine) oko:	3100 – 3700 cm ² /g
nasipna gustoća:	1.15 g/cm ³
specifična gustoća:	3.2- 3.3 g/cm ³
vatrostalnost oko:	1270 C ^o

Tablica 5, Razvoj čvrstoće [N/mm²]

Vrijeme	6h	1d
Tlačna čvrstoća	>39	>50

4.2.2 Agregat

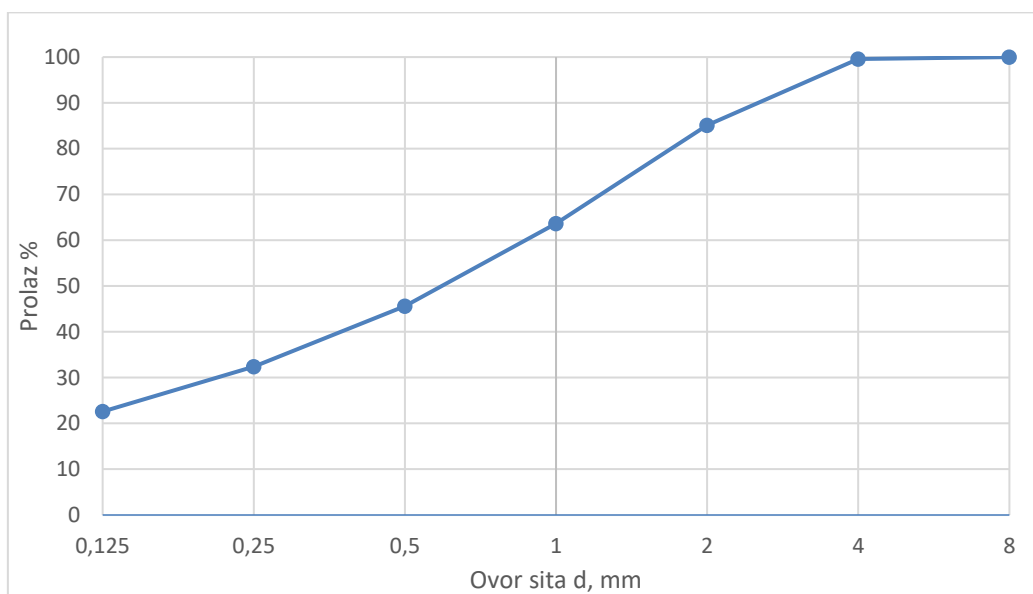
Za potrebe izrade mješavina korišten je pijesak granulacije 0-2mm, po sastavu vapnenac čija je granulacija ispitana u laboratoriju.

Tablica 6, Granulometrija agregata

FRAKCIJA		0-2		
sito		OSTATAK	PROLAZ	PROLAZ
PROLAZI	OSTAJE	gr	gr	%
	63			
63	31,5			
31,5	16			
16	8			
8	4	3,2	815,8	100
4	2	118,5	812,6	99,6
2	1	174,7	694,1	85,08
1	0,5	147,1	519,4	63,66
0,5	0,25	108,1	372,3	45,63
0,25	0,125	79,9	264,2	32,39
0,125	tava	184,3	184,3	22,59
UKUPNO		815,8		
POČETNA MASA		819,1		

Tablica 7, Mokro sisanje

MOKRO SIJANJE	gr	%
MASA PRIJE ISPIRANJA	415,4	-
OSTATAK NA SITU 0,09	337,1	18,85



Graf 1, Granulometrijska krivulja korištenog agregata

Granulometrijski sastav se može definirati približno sa modulom zrnatosti tj. modulom finoće. Vezano za sitni agregat, najčešće se proizvodi frakcija 0-4 mm. Takva frakcija mora imati modul zrnatosti u granicama od 2.30 do 2.60, te ostatak između dva uzastopna sita smije biti najviše 45 %. Kada bi sitni agregat imao modul zrnatosti veći od 3.60, dobio bi se neobradiv beton.

Modul zrnatosti je površina lika iznad granulometrijske krivulje.

$$MF = \frac{\sum_{0,125}^D o}{100}$$

gdje je o ostatak na situ, a D maksimalno zrno agregata.

U ovom slučaju, modul finoće agregata iznosi : $MF = \frac{236,98}{100} = 2,37$

Koeficijent zrnatosti je površina lika ispod granulometrijske krivulje, a kod Tylerovog sustava sita iznosi: $K = \frac{\sum_{0,125}^D p}{100} = n - M$, gdje je n broj sita.

U ovom slučaju, koeficijent zrnatosti iznosi : $K = \frac{448,95}{100} = 4,49$

4.2.3 Voda

Za izradu morta može se upotrebljavati samo čista voda. Tvari otopljene u vodi ili tvari koje plivaju u vodi mogu štetno djelovati na kvalitetu svježeg i očvrstlog betona. Iznimno su opasni: šećeri, masti, sapuni i deterdženti, razna kemijska otapala. Prema PBAB, voda bi trebala imati pH – faktor između 4.5 i 9.5.

Voda ne bi smjela sadržavati:

- sulfate
- spojeve klora
- anorganske i organske soli
- organske tvari

Pitka voda se može upotrebljavati, ali ona ne smije sadržavati previše klora. Za sve ostale vode potrebna je kemijska analiza. [2]

U eksperimentalnom dijelu korištena je demineralizirana voda.

4.2.4 Aditiv

Aditiv koji je korišten u eksperimentalnom dijelu je superplastifikator, Glenium Ace 430.

Promatrani aditiv je na bazi polikarboksilnog etera. Njegova nova molekularna struktura uzrokuje bolju reakciju sa postojećim česticama cementa. Posjeduje veliku disperzijsku snagu i vrlo brzu adsorpciju sa česticama cementa. Prema svemu tome, rezultati su izraziti brzi razvoj čvrstoće u betonu.

Tablica 8, karakteristike aditiva

pH vrijednost	5,5
gustoća	1,06 kg/ltr
sadržaj klora	<0,01%
boja i oblik	smeđa tekućina

Neke od prednosti Glenium Ace 430 su:

- znatno veća rana čvrstoća betona
- poboljšana svojstva betona
- ubrzanje demontiranja oplata

Navedeni aditiv se dozira u mjeri od **0.3% - 1.0 %** doze cementa.

4.3 Izrada uzoraka morta

Za potrebe eksperimenta napravljene su četiri recepture. Za svaku recepturu su određene potrebne količine cementa, pijeska, vode i aditiva. Pri izradi je paženo da sve bude točno vagano kako bi se dobili mjerodavni rezultati.

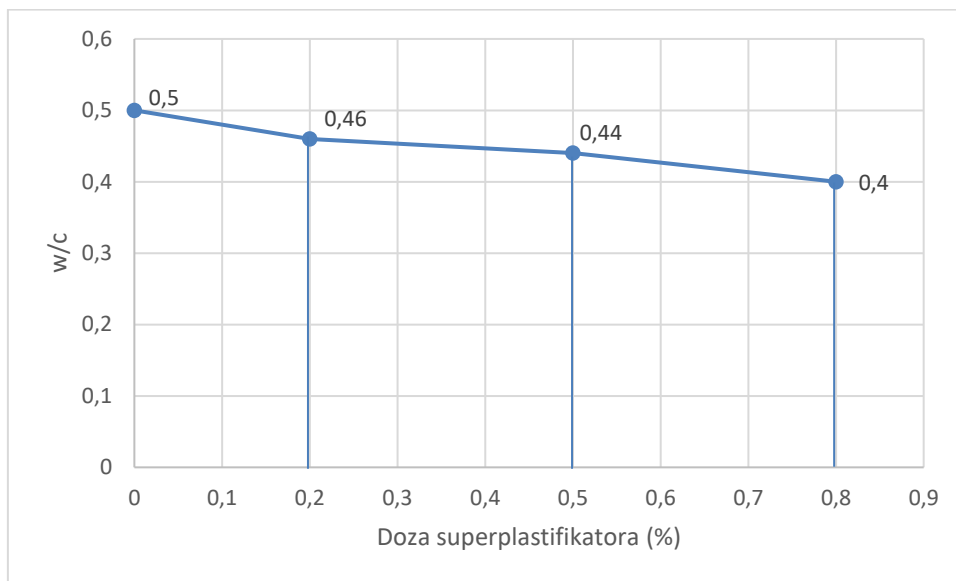
Kao referentni uzorak izrađena je mješavina bez aditiva, kako bismo mogli usporediti i uočiti kakav utjecaj ima aditiv u odnosu na smjesu bez aditiva. Ostale 3 mješavine su izrađene sa različitom dozom aditiva i vode.

Recepture uzoraka:

Tablica 9, Recepture

Sastav (g)	cement CAC	voda	pijesak 0 - 2mm	superplastifikator	w/c
RECEPTURA 1	500	250	1500	0	0,5
RECEPTURA 2	500	230	1500	1,0	0,46
RECEPTURA 3	500	220	1500	2,5	0,44
RECEPTURA 4	500	200	1500	4,0	0,40

Povećanjem doze superplastifikatora, nastoji se uz smanjenje vodocementnog faktora dobiti istu obradivost.



Graf 10, Prikaz smanjenja vodocementnog faktora u mješavinama sa povećanjem doze superplastifikatora

4.3.1 Izrada mješavina

Izrada mješavina započela je vaganjem sastojaka na preciznoj vagi. Nakon što su se svi sastojci precizno izvagali slijedi njihovo spajanje.

U posudu za miješanje dodana je demineralizirana voda, potom kalcij – aluminatni cement, te nakon toga pijesak. Bitno je da svi sastojci koji su izvagani, dođu u istoj količini u posudu za miješanje.



Slika 15, Miješalica za miješanje [slika iz laboratorija]

Miješa se električnom miješalicom tako da prvih 90 sekundi miješalica radi u prvoj brzini, te se potom prebacuje na drugu brzinu još 90 sekundi.

Nakon što je miješanje gotovo, miješalica se gasi te se promatra dobiveni mort i potom slijedi ispitivanje obradivosti i ugradnja u kalupe.

4.4 Ispitivanje obradivosti prema EN 1015 – 3

Ispitivanje obradivosti je rađeno standardnom metodom na protresnom stolu. U mesingani kalup se ugrađuje mort u dva sloja, svaki sloj se zbije 10 puta pomoću drvenog bata. Potom se kalup odstranjuje te se okreće ručka stola 15 puta (1 okretaj u sekundi). Mjeri se promjer razastiranja morta u dva okomita smjera.



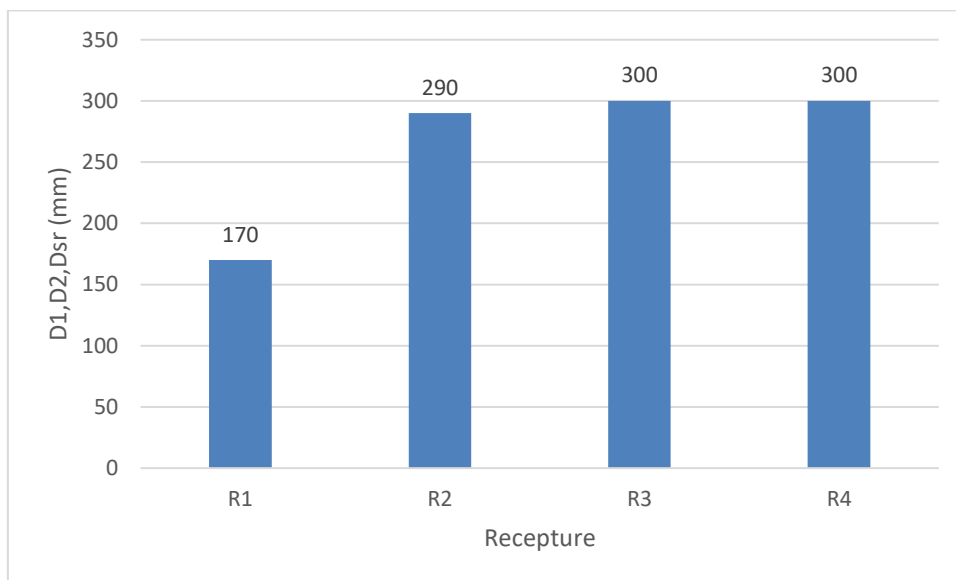
Slika 16, Ispitivanje obradivosti [slika iz laboratorija]

Dobivene vrijednosti mjerenja obradivosti prikazane su tablično i grafički.

Tablica 11, Ispitivanje obradivosti - rezultati

	RECEPTURA 1	RECEPTURA 2	RECEPTURA 3	RECEPTURA 4
Promjer (mm)				
D1	170	290	300	300
D2	170	290	300	300
Dsr	170	290	300	300

Može se primijetiti da se u uzorcima sa superplastifikatorom dobivene veće i uglavnom iste vrijednosti promjera. Tj. uzorci sa superplastifikatorom imaju promjer veći od 200 mm te se svrstavaju u kategoriju tekuće konzistencije.



Graf 17, Rezultati ispitivanja obradivosti (mm)

4.4.1 Ugradnja morta u kalupe

Dobiveni mort se ugrađuje u standardne kalupe dimenzija 4x4x16 cm. Kalupi su prethodno namazani sredstvom kako bi se uzorci lakše odvojili. Mort se pažljivo ubacuje u kalupe te se kalupi potom postavljaju na poseban vibro stol, kako bi se mort pravilno ugradio. Vrijeme trajanja vibriranja stola je 120 sekundi.



Slika 18, Ugradnja morta u kalupe [slika iz laboratorija]

Nakon izvršene ugradnje, kalupi se skidaju sa vibro stola te se skida dio morta koji prelazi preko kalupa.

Postupak je ponavljan za sve rađene uzorke.

Uzorci su čuvani u vlažnoj komori 7 dana te je na istim provedeno ispitivanje.



4.5 Ispitivanje čvrstoće morta

Tlačna i vlačna čvrstoća morta je ispitana nakon 7 dana. Ispitivanje je vršeno na uzorcima dimenzija 4x4x16 cm, zasićenim vodom. Ispitivanje je vršeno na uređaju koji ima mogućnost ispitivanja tlačne i vlačne čvrstoće. Postupak je takav da se uzorak stavi u stroj te se opterećuje postepeno do loma, a zatim se očitava naprezanje i sila u trenutku loma. Prilikom ispitivanja dobiveni su različiti rezultati u ovisnosti o dozi superplastifikatora.



Slika 19, Ispitivanje čvrstoće [slika iz laboratorija]

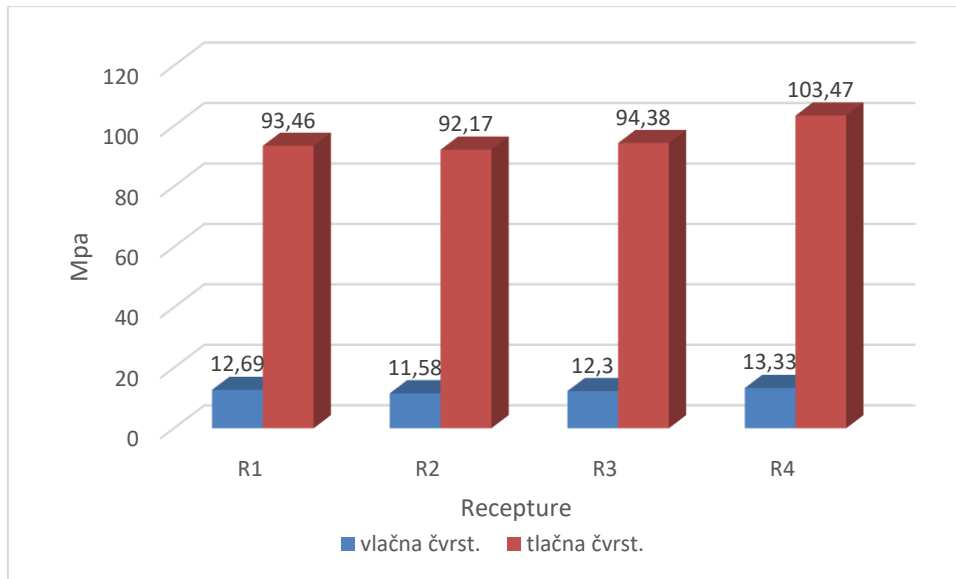
4.5.1 Dobiveni rezultati ispitivanja

Tablica 12, Srednje vrijednosti čvrstoća

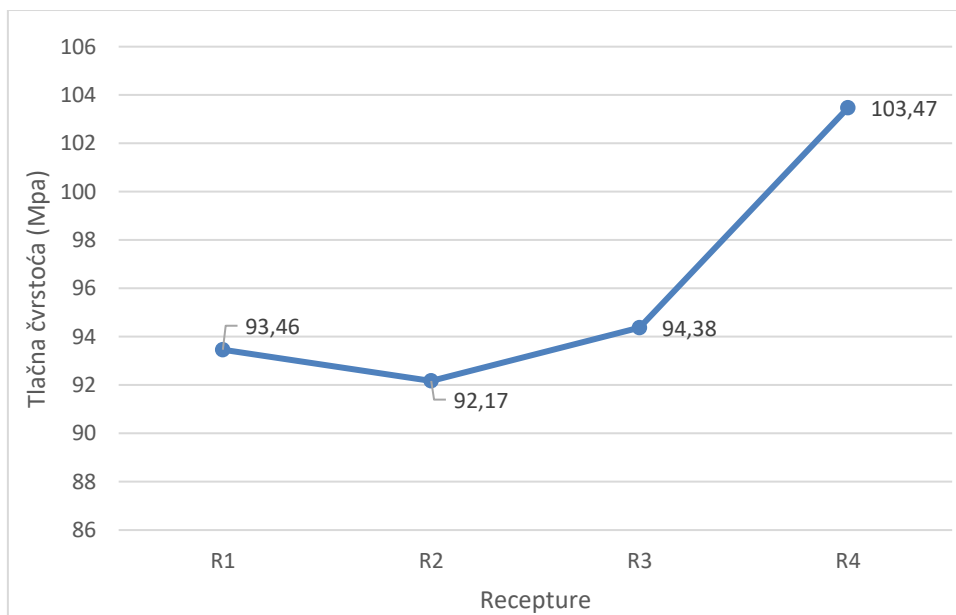
	Vlačna čvrst. sr. vrijed. (Mpa)	Tlačna čvrst. sr. vrijed.(Mpa)
RECEPTURA 1	12,69	93,46
RECEPTURA 2	11,58	92,17
RECEPTURA 3	12,3	94,38
RECEPTURA 4	13,33	103,47

Rezultati ispitivanja čvrstoća dani su u prilogima iz kojih se može detaljno proučiti ponašanje morta. Srednje vrijednosti čvrstoća dane su u tablici br. 12. Ustanovili smo da upotrebom superplastifikatora postizemo veće čvrstoće u zavisnosti o dozi superplastifikatora. Ovakvo ponašanje morta možemo protumačiti smanjenjem potrebne vode. Budući da cement reagira s vodom i time daje nove hidratne faze, tako svaki višak vode koji ne reagira ostaje nevezan i povećava poroznost materijala i smanjuje čvrstoću.

Za recepturu broj 2 dobila je se nešto manja čvrstoća, te to možemo protumačiti kao lokalno odstupanje (Graf 20, 21.). Gledajući ostala dva uzorka koji u sebi sadrže superplastifikator, jasno je vidljivo da je povećanje čvrstoće u porastu u odnosu na referentni uzorak bez aditiva. Najveću čvrstoću je postigla receptura 4 sa najvećom dozom plastifikatora i najmanjim udjelom vode.



Graf 20, Vrijednosti tlačne i vlačne čvrstoće



Graf 21, Rezultati tlačne čvrstoće sa povećanjem doze superplastifikatora

4.6 Ispitivanje morta nerazornom metodom – metoda ultrazvuka

Uz korištenje nerazorne metode ispitivanja, ispitana su svojstva morta kao što su brzina ultrazvuka te su određeni moduli elastičnosti. Određivanje brzine longitudinalnog ultrazvučnog impulsa je provedeno prema normi EN 12504. Metoda je jako jednostavna te ima široku primjenu u građevinarstvu.



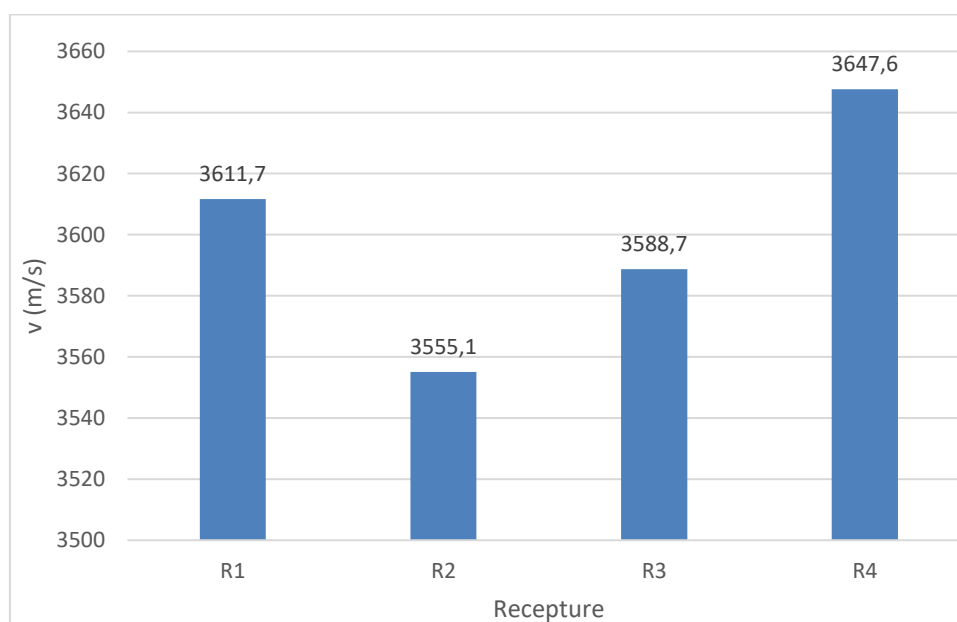
Slika 22, Ispitivanje ultrazvukom [slika iz laboratorija]

4.6.1 Rezultati ispitivanja

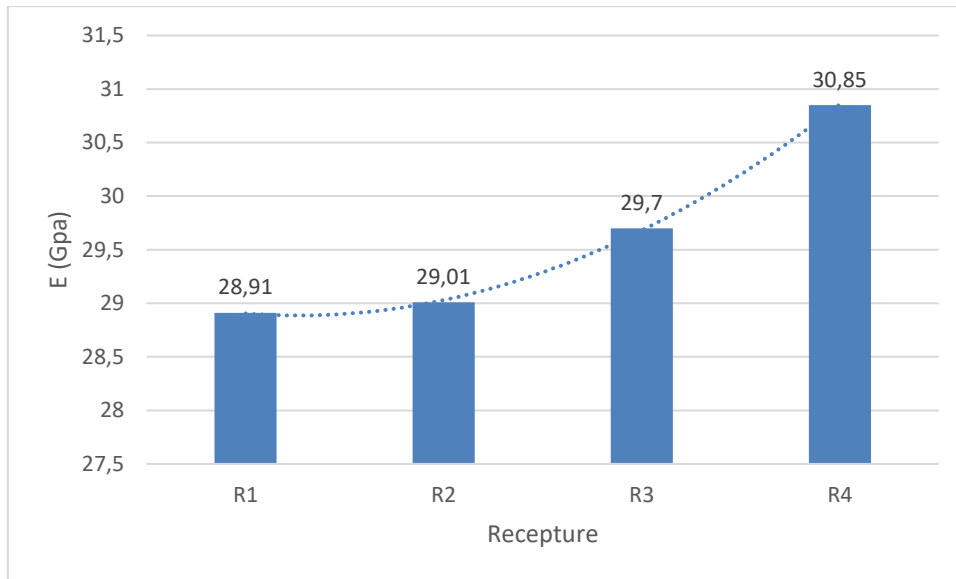
Određene su pojedinačne vrijednosti za svaki element, te je izračunata srednja vrijednost modula elastičnosti svakog uzorka. Iz provedenog ispitivanja uočen je porast gustoće uzoraka sa porastom doze superplastifikatora, što je očekivano. Budući da modul elastičnosti ovisi samo o čvrstoći, postoji povećanje modula elastičnosti prouzročeno povećanjem doze superplastifikatora. Najveći modul elastičnosti ima receptura broj 4 sa najvećom dozom aditiva.

Tablica 13, Brzina ultrazvuka za različite recepture

	v (m/s)	v_{sr} (m/s)
RECEPTURA 1	3555,6	3611,7
	3433,5	
	3846,2	
RECEPTURA 2	3678,2	3555,1
	3470,7	
	3516,5	
RECEPTURA 3	3426,1	3588,7
	3703,7	
	3636,4	
RECEPTURA 4	3644,6	3647,6
	3619,9	
	3678,2	



Graf 23, Brzina ultrazvuka za različite recepture



Graf 24, Srednja vrijednost dinamičkog modula elastičnosti uzoraka

5 ZAKLJUČAK

Korištenje aditiva u građevinarstvu predstavlja izrazito veliki napredak. Od raznih aditiva koji su trenutno dostupni na tržištu, u ovom radu je obrađen aditiv superplastifikator Glenium ACE 430. Ispitivan je njegov utjecaj na svojstva morta sa kalcij – aluminatnim cementom. Budući da Portland cement razvija svoju čvrstoću tek nakon 28 dana, on nije bio prikladan za ovo ispitivanje. Kalcij – aluminatni cement zbog svojih svojstava da razvije istu čvrstoću u roku od 24 sata kao PC nakon 28 dana je bio izrazito povoljan.

Za potrebe ovog rada napravljene su četiri recepture. Da bi se mogla vidjeti i usporediti svojstva morta sa dodanim aditivom, napravljena je jedna receptura bez aditiva. Ta receptura je poslužila kao referentni uzorak na osnovu kojeg će se uspoređivati mortovi sa aditivom. Tijekom izrade mješavina, doza plastifikatora je povećavana počevši od 0,2% pa sve do 0,8% u zadnjoj recepturi. Bitno je naglasiti da tako mala količina aditiva ima jako veliki utjecaj na svojstva morta. Prema uputi proizvođača, korišteni aditiv Glenium Ace 430 se dozira u količini od 0,3 – 1%.

Ispitivanjem obradivosti svježeg morta bez aditiva dobiven je promjer „pogače“ na protresnom stolu u veličini od 170mm. Daljnim ispitivanjem morta sa aditivima promjer je se povećao izrazito puno do čak 300 mm u trećoj i četvrtoj recepturi, što iznosi povećanje od 76 % u odnosu na prvu recepturu. Bitno je uočiti da se smanjenjem vode, a dodavanjem superplastifikatora promjer morta povećao. Taj rezultat pokazuje da se dodatkom aditiva može povećati ili zadržati ista obradivost uz istodobno smanjenje količine vode. A to je jedna od primarnih zadaća superplastifikatora, smanjiti količinu potrebne vode, a zadržati istu obradivost.

Daljnim ispitivanjem očvrslog morta, došlo je se do zaključka da aditiv utječe na povećanje čvrstoće. Kao što se zna iz osnovnog postulata da količina vode utječe na čvrstoću morta, smanjenjem količine vode mort je dobio izrazitu čvrstoću. Promatrajući konzistenciju uzoraka sa aditivom, bilo je moguće još smanjiti udio vode te se pretpostavlja da bi se dobile veće čvrstoće. Količina vode je se postupno smanjivala, vodocementni omjer koji u prvoj recepturi iznosi 0,5 je postupno smanjen na 0,4 u krajnjoj recepturi (Graf 10.). U recepturi broj 4 tj. krajnjoj je dobivena maksimalna pojedinačna tlačna čvrstoća od čak 108,44 (Mpa), što iznosi povećanje čvrstoće od 11,89 % u odnosu na maksimalnu pojedinačnu čvrstoću početne recepture bez aditiva.

Pri ultrazvučnom ispitivanju došlo je se do rezultata brzine ultrazvučnog vala koja je za recepture 2 i 3 nešto manja u odnosu na prvu recepturu. Dok je se brzina ultrazvučnog vala kod četvrte recepture povećala u odnosu na prvu recepturu (Graf 23.). Može se primijetiti da srednja vrijednost dinamičkog modula elastičnosti postupno raste od prve do četvrte recepture (Graf 24.).

Te naposljetku, možemo zaključiti da se pravilnim doziranjem superplastifikatora u kombinaciji sa kalcij – aluminatnim cementom mogu postići jako dobra svojstva morta. Iz provedenog ispitivanja također je zaključeno da je korišteni superplastifikator Glenium Ace 430 kompatibilan sa kalcij – aluminatnim cementom. Ukoliko postoji potreba izrade morta sa kalcij – aluminatnim cementom, navedeni superplastifikator se može koristiti.

LITERATURA

- [1] Ukrainczyk V.: *Beton, struktura, svojstva, tehnologija*, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 1994
- [2] Krstulović P. : *Svojstva i tehnologija betona*, Sveučilište u Splitu, Split, 2000.
- [3] Prof. Juradin S., *prezentacija MORTOVI*, Sveučilište u Splitu, 2021
- [4] D. Vrkljan, M. Klanfar, *Tehnologija nemetalnih mineralnih sirovina, Zagreb, lipanj 2010.*
- [5] Vrbos N. : *Dodatci za cementne kompozite*, Nastavni materijal
- [6] Mustafic I.: *Utjecaj plastifikatora, superplastifikatora i mikrovlakana na svojstva betona*, Tehnički fakultet Bihać
- [7] Mihailo, Muravljev: *Građevinski materijali*, 1995. Beograd
- [8] Cvetkovic S. : *Završni rad, Čvrstoće brzovezujućih cementnih materijala*, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb 2015.
- [9] Đureković A. : *Cement, cementni kompozit i dodaci za beton*, IGH i Školska knjiga, Zagreb, 1996.
- [10] Kraljević M. : *Utjecaj aditiva na ranu hidrataciju portland cementa raznih proizvođača*, *Diplomski rad*, Zagreb 2017.
- [11] Telford T. ; *Cement chemistry 2nd edition*, , 1997
- [12] *Chemistry of Cement*, Volume I, 1960, Washington
- [13] Liska M., Hewlett C. P. : *Lea`s Chemistry of Cement and Concrete*, 2019

PRILOZI

U prilogama se nalaze detaljni rezultati ispitivanja morta.

Ispitivanje čvrstoće

Tablica 14, Rezultati recepture br. 1

RECEPTURA 1					
Ispitivanje na savijanje			Ispitivanje na pritisak		
br. elementa	Svojna čvrstoća f_{sav} (Mpa)	Sred. vrij. f_{sav}	br. uzorka	Tlačna čvrstoća f_{tlak} (Mpa)	Sred. vrij. f_{tlak}
1	11,12	12,69	1a	93,11	93,46
			1b	93,35	
2	13,58		2a	92,71	
			2b	93,04	
3	13,37		3a	91,61	
			3b	96,92	

Tablica 15, Rezultati recepture br. 2

RECEPTURA 2					
Ispitivanje na savijanje			Ispitivanje na pritisak		
br. elementa	Svojna čvrstoća f_{sav} (Mpa)	Sred. vrij. f_{sav}	br. uzorka	Tlačna čvrstoća f_{tlak} (Mpa)	Sred. vrij. f_{tlak}
1	11,52	11,58	1a	92,59	92,17
			1b	92,08	
2	12,46		2a	97,55	
			2b	95,94	
3	10,75		3a	85,95	
			3b	88,88	

Tablica 16, Rezultati recepture br. 3

RECEPTURA 3					
Ispitivanje na savijanje			Ispitivanje na pritisak		
br. elementa	Svojna čvrstoća f_{sav} (Mpa)	Sred. vrij. f_{sav}	br. uzorka	Tlačna čvrstoća f_{tlak} (Mpa)	Sred. vrij. f_{tlak}
1	11,64	12,3	1a	92,2	94,38
			1b	97,17	
2	12,32		2a	90,6	
			2b	91,56	
3	12,93		3a	93,87	
			3b	100,89	

Tablica 17, Rezultati recepture br. 4

RECEPTURA 4					
Ispitivanje na savijanje			Ispitivanje na pritisak		
br. elementa	Svojna čvrstoća f_{sav} (Mpa)	Sred. vrij. f_{sav}	br. uzorka	Tlačna čvrstoća f_{tlak} (Mpa)	Sred. vrij. f_{tlak}
1	12,9	13,33	1a	101,31	103,47
			1b	103,17	
2	13,07		2a	102,37	
			2b	105,38	
3	14,03		3a	100,13	
			3b	108,44	

Ispitivanje metodom ultrazvuka – dobiveni podatci :

Tablica 18, Rezultati recepture br. 1

RECEPTURA 1										
br. uzorka	masa	b	h	L	ρ	t_{uzv}	v	v_{sr}	Ed	Ed_{sr}
	(g)	(mm)	(mm)	(mm)	(kg/dm ³)	(μ s)	(m/s)	(m/s)	(Gpa)	(Gpa)
1	597,5	40	40	160	2,334	45	3555,6	3611,7	27,94	28,91
2	601,1	40	40	160	2,348	46,6	3433,5		26,22	
3	589,9	40	40	160	2,339	41,6	3846,2		32,78	

Tablica 19, Rezultati recepture br. 2

RECEPTURA 2										
br. uzorka	masa	b	h	L	ρ	t_{uzv}	v	v_{sr}	Ed	Ed_{sr}
	(g)	(mm)	(mm)	(mm)	(kg/dm ³)	(μ s)	(m/s)	(m/s)	(Gpa)	(Gpa)
1	620,9	40	40	160	2,425	43,5	3678,2	3555,1	31,08	29,01
2	620,7	40	40	160	2,425	46,1	3470,7		27,66	
3	619,7	40	40	160	2,421	45,5	3516,5		28,35	

Tablica 20, Rezultati recepture br. 3

RECEPTURA 3										
br. uzorka	masa	b	h	L	ρ	t_{uzv}	v	v_{sr}	Ed	Ed_{sr}
	(g)	(mm)	(mm)	(mm)	(kg/dm ³)	(μ s)	(m/s)	(m/s)	(Gpa)	(Gpa)
1	625,5	40	40	160	2,443	46,7	3426,1	3588,7	27,16	29,7
2	621,7	40	40	160	2,429	43,2	3703,7		31,55	
3	622,7	40	40	160	2,432	44	3636,4		30,46	

Tablica 21, Rezultati recepture br. 4

RECEPTURA 4										
br. uzorka	masa	b	h	L	ρ	t_{uzv}	v	v_{sr}	Ed	Ed _{sr}
	(g)	(mm)	(mm)	(mm)	(kg/dm ³)	(μ s)	(m/s)	(m/s)	(Gpa)	(Gpa)
1	625,2	40	40	160	2,443	43,9	3644,6	3647,6	30,74	30,85
2	626,2	40	40	160	2,446	44,2	3619,9		30,36	
3	628,5	40	40	160	2,455	43,5	3678,2		31,46	