



УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
ГРАЂЕВИНСКИ ФАКУЛТЕТ

Бр. 132217/3-20

03 JUL 2020

201. год.

БЕОГРАД
Булевар краља Александра 73

IZVEŠTAJ - br. 190/2020

O ISPITIVANJU FIZIČKO-MEHANIČKIH SVOJSTAVA I PARAMETARA TRAJNOSTI BETONA VISOKIH PERFORMANSI OJAČANIH ČELIČNIM VLAKNIMA ForteCrete150 (UHPSFRC)

Naručilac ispitivanja/ Investitor	Spajić d.o.o. Koroglaska br. 13 19300 NEGOTIN
Predmet ispitivanja	Ispitivanje fizičko-mehaničkih svojstava i parametara trajnosti betona visokih performansi ojačanih čeličnim vlaknima, u vidu „premixa“ pod komercijalnim nazivom ForteCrete150 (UHPSFRC- beton ultra visokih performansi sa dodatkom čeličnih vlakana visoke čvrstoće)
Broj ugovora / ponude	Ponuda br. 132217/2-20 od 22.06.2020. godine (broj Građevinskog fakulteta u Beogradu)

Izveštaj odobrio

Tehnički rukovodilac Laboratorije:

V. prof. dr Dimitrije Zakić, dipl.građ.inž.

UPRAVNIK INSTITUTA

Prof. dr Zlatko Marković, dipl.građ.inž.



DEKAN GRAĐEVINSKOG FAKULTETA

Prof. dr Vladan Kuzmanović, dipl.građ.inž.



SADRŽAJ

NASLOVNA STRANA	1
SADRŽAJ	2
POTVRDA	3
IZVEŠTAJ	4
1. Uvod	4
2. Osnovne fizičko-mehaničke karakteristike	4
3. Rezultati “Pull off” test	6
4. Rezultati ispitivanja vodonepropustljivosti	6
5. Rezultati ispitivanja na dejstvo mraza i soli	7
6. Dodatni parametri trajnosti	7
7. Zaključak	8

SPISAK PRILOGA

<i>Prilog 1: Izrada i nega uzoraka</i>	9
<i>Prilog 2: Ispitivanje osnovnih fizičko-mehaničkih karakteristika</i>	10
<i>Prilog 3: “Pull off” test</i>	12
<i>Prilog 4: Ispitivanje vodonepropustljivosti</i>	13
<i>Prilog 5: Ispitivanje na dejstvo mraza i soli</i>	14
<i>Prilog 6: Ispitivanje otpornosti na karbonatizaciju</i>	15
<i>Prilog 7: Ispitivanje otpornosti na penetraciju hloridnih jona</i>	16



Na osnovu Zakona o planiranju i izgradnji ("Službeni glasnik Republike Srbije", br. 72/09, 81/09, 64/10 US, 24/11, 121/12, 42/13 US, 50/13 US, 54/13, 98/13 US, 132/14, 145/14 i 83/18) izdaje se

P O T V R D A

Da su saradnici Instituta za materijale i konstrukcije, zaposleni na Građevinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu

Odgovorni nosilac

zadatka: V. prof. dr Dimitrije Zakić, dipl.građ.inž.




Izvršio

ispitivanja: Savo Stavnjak, laborant

Analiza i

zaključak: V. prof. dr Dimitrije Zakić, dipl.građ.inž.

Asistent Stefan Mitrović, mast.inž.građ

izradili TEHNIČKU DOKUMENTACIJU pod nazivom:

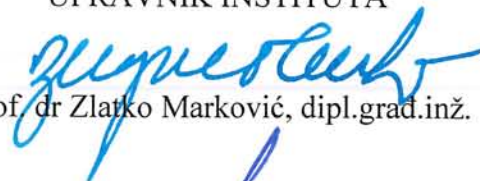
IZVEŠTAJ - br. 190/2020

O ISPITIVANJU FIZIČKO-MEHANIČKIH SVOJSTAVA I PARAMETARA TRAJNOSTI BETONA VISOKIH PERFORMANSI OJAČANIH ČELIČNIM VLAKNIMA ForteCrete150 (UHPSFRC)

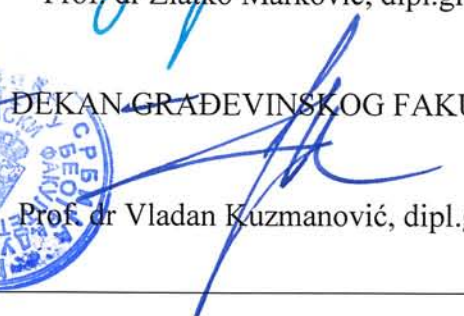
Navedena dokumentacija je izrađena u skladu sa zahtevom Naručioca i odredbama pomenutog Zakona.

Beograd, jun 2020.

UPRAVNIK INSTITUTA


Prof. dr Zlatko Marković, dipl.građ.inž.

DEKAN GRAĐEVINSKOG FAKULTETA


Prof. dr Vladan Kuzmanović, dipl.građ.inž.





I Z V E Š T A J

1. UVOD

Institut za materijale i konstrukcije Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu je u skladu sa Ponudom br. 132217/2-20 od 22.06.2020. godine poslatoj firmi Spajić d.o.o. (u nastavku: Naručilac ispitivanja), sproveo ispitivanje fizičko-mehaničkih karakteristika i parametara trajnosti na uzorcima betona visokih performansi izrađenim po recepturi Naručioca ispitivanja i izradio odgovarajući izveštaj na osnovu dobijenih rezultata ispitivanja.

Naručilac ispitivanja je dostavio materijal i recepturu za izradu uzoraka. Dostavljen je spremljen "premiks" pod komercijalnim nazivom ForteCrete 150 u kome su u suvom stanju pomešani cement, silikatna prašina i kvarcni pesak (slika 1.1 Prilog 1). Po recepturi, premiks je pomešan sa vodom i aditivom i mešan u određenom vremenskom trajanju, po preporukama Naručioca. Za potrebe izrade uzoraka, spravljene su mešavine sa i bez čeličnih vlakana (slika 1.2 Prilog 1), tj. sa određenim zapreminskim procentom učešća mikroarmature (0,1 i 2%).

Izrađeni su uzorci oblika kocki, prizmi, cilindara i ploča za različite vrste ispitivanja koja su sprovedena. Ispitivanja su vršena pri različitim starostima (1, 3 i 28 dana), a prema standardima koji su navedeni u daljem tekstu. Ispitivanjima su obuhvaćeni sledeći parametri: zapreminska masa, čvrstoća pri pritisku, čvrstoća pri savijanju, "Pull-off" metoda, vodonepropustljivost, otpornost na dejstvo mraza i soli, otpornost na karbonatizaciju i otpornost na penetraciju hloridnih jona. Na osnovu rezultata ovih ispitivanja, izrađen je izveštaj u kome su prikazani ovi rezultati, kao i fotografije uzoraka i opreme za ispitivanje - u okviru priloga na kraju izveštaja.

2. OSNOVNE FIZIČKO-MEHANIČKE KARAKTERISTIKE

Osnovne fizičko-mehaničke karakteristike ispitivanog materijala (zapreminska masa, čvrstoća pri pritisku i čvrstoća pri savijanju) dobijene su na standardan način - ispitivanjem propisanih uzoraka oblika kocki i prizmi dimenzija 10x10x10 cm i 4x4x16 cm. Broj uzoraka za predmetna ispitivanja bio je po 3 komada, pri čemu su oni u vreme ispitivanja imali starosti od 24 časa, 3 dana i 28 dana. Rezultati ispitivanja o kojima je reč prikazani su u tabeli 1.

Postupak određivanja zapreminske mase podrazumevao je određivanje zapremine uzorka, mase kalupa, mase kalupa i izlivena sveže betonske mešavine zajedno, na osnovu čega se dobijala masa svežeg betona koja deljenjem sa zapreminom daje zapreminsku masu u svežem stanju. Isti postupak je ponovljen i za očvrslu stanje, nakon provedenih 24 sata u vlažnom prostoru.

Čvrstoća pri pritisku ispitana je prema standardu SRPS EN 12390-3:2014 (*Ispitivanje očvrslag betona - Deo 3: Čvrstoća pri pritisku uzoraka za ispitivanje*). Sprovedeno je ispitivanje na uzorcima sa i bez dodatka čeličnih vlakana (1 i 2%) pri različitim starostima od 1, 3 i 28 dana. Ispitivanje je izvršeno na presi proizvođača Matest (kapaciteta 2000 kN), gde je kontrolisano nanošena sila pritiska sve do otkaza uzorka (slika 2.1 i 2.3 Prilog 2). Ispitivanje čvrstoće pri pritisku je sprovedeno kroz dve serije pri čemu su rezultati prikazani u tabelama 1 i 2 ovoga poglavlja. Treba napomenuti da je serija 2 predstavljala probnu seriju koja je ispitana ranije nego serija 1, i koja je obuhvatala samo ispitivanje čvrstoće pri pritisku uzoraka oblika kocki sa dodatkom čeličnih vlakana u iznosu od 2% od ukupne zapremine pri starosti od 4, 14 i 28 dana.



Čvrstoća pri savijanju je ispitana prema standardu SRPS EN 1015-11:2008 (*Metode ispitivanja maltera za zidanje - Deo 11: Određivanje čvrstoće pri savijanju i čvrstoće pri pritisku očvrslog maltera*). Sprovedeno je ispitivanje na uzorcima sa i bez dodatka mikroarmature (1 i 2%), na prizmama dimenzija 4x4x16 cm. Ispitivanja su vršena na presi proizvođača *Amsler* (slika 2.2 Prilog 2), gde je kontrolisano nanošena sila sve do otkaza uzorka (slika 2.2 i 2.4 Prilog 2).

Tabela 1. Osnovne fizičko-mehaničke karakteristike ispitanog materijala serija 1

Broj uzorka	Čvrstoća pri savijanju (MPa) 0%	Čvrstoća pri savijanju (MPa) 1%	Čvrstoća pri savijanju (MPa) 2%	Čvrstoća pri pritisku (MPa) 0%	Čvrstoća pri pritisku (MPa) 1%	Čvrstoća pri pritisku (MPa) 2%
	f_{zs}			f_p		
	Starost uzoraka 24 časa					
1	6.8	12.5	13.0	82.4	91.6	82.8
2	7.3	12.5	11.7	83.2	85.5	84.7
3	7.0	12.5	12.5	90.0	93.3	-
Srednje vrednosti	7.0	12.5	12.4	85.2	90.1	83.7
Starost uzoraka 3 dana						
1	14.5	19.8	18.8	91.2	93.2	96.2
2	17.8	18.3	17.0	87.7	-	94.4
3	14.3	16.3	20.5	85.7	94.6	103.2
Srednje vrednosti	15.5	18.1	18.7	88.2	93.9	99.7
Starost uzoraka 28 dana						
1	21.8	19.5	23.5	-	123.9	130.0
2	22.8	17.5	25.5	115.9	114.4	-
3	23.0	19.0	24.5	112.1	113.5	129.7
Srednje vrednosti	22.5	18.6	24.5	114.0	117.3	129.9



Tabela 2. Osnovne fizičko-mehaničke karakteristike ispitanog materijala serija 2

Broj uzorka	Čvrstoća pri pritisku (MPa) 2% starost 4 dana	Čvrstoća pri pritisku (MPa) 2% starost 14 dana	Čvrstoća pri pritisku (MPa) 2% starost 28 dana
	f_p		
1	110.3	133.2	151.2
2	114.0	132.1	-
3	-	-	-
Srednje vrednosti	112.2	132.7	151.2

Srednje vrednosti zapreminske mase u svežem i u suvom stanju se mogu videti u tabeli 2.1 u prilogu 2. Takođe, može se videti da čvrstoće prikazane u tabeli 1 rastu tokom vremena kao i sa povećanjem količine čeličnih vlakana u mešavini. **Na osnovu rezultata iz tabela 1 i 2 može se videti da je srednja vrednost čvrstoće pri pritisku na 28 danu iznosi 140.6 MPa, a pri zaparivanju u trajanju od 24h dobija se srednja vrednost čvrstoće od 144.4 MPa. Maksimalna vrednost čvrstoće pri savijanju koja je dobijena iznosi 25.5 MPa, a srednja vrednost 24.5 MPa pri starosti od 28 dana.**

3. REZULTATI "Pull off" TESTA

Ispitivanje putem "Pull off" testa je primenjeno iz razloga da se definiše čvrstoća na zatezanje metodom "čupanja". U vezi sa tim, u okviru ispitivanja korišćene su betonske ploče i kocke dimenzija 15x15x5 cm i 10x10x10 cm, respektivno, sa i bez dodatka čeličnih vlakana (0, 1 i 2%), pri čemu su "otkidanja" zalepljenih metalnih pečata prečnika 50 mm (slika 3.1 Prilog 3) sprovedena nakon 28 dana od trenutka izrade uzoraka. Napominje se da su ispitivanja sprovedena primenom aparature *Controls* (slika 3.2 Prilog 3) i da su za svaku starost ispitana po 3 (tri) uzorka, pri čemu su dobijeni rezultati prikazani u tabeli 3.

Tabela 3. Rezultati "Pull off" testa

Broj uzorka	0% vlakana	1% vlakana	2% vlakana
Starost uzoraka 28 dana			
1	5.7	6.6	6.7
2	5.5	6.9	6.5
3	6.2	6.8	-
Srednja vrednost	5.8	6.8	6.6



Kao što se vidi iz tabele 2, srednje vrednosti čvrstoće pri zatezanju čupanjem, **sila čupanja je znatno veća nego kod običnih cementnih betona. Takođe, ova sila je veća kod uzoraka sa dodatkom čeličnih vlakana (1 i 2%), nego kod etalona (0% vlakana).**

4. REZULTATI ISPITIVANJA VODONEPROPUSTLJIVOSTI

Ispitivanje uzoraka na prodor vode, tj. vodonepropustljivosti, je izvršeno prema standardu *SRPS EN 12390-8:2010 (Ispitivanje očvrslog betona - Deo 8: Dubina penetracije vode pod pritiskom)*. Ispitivanja su se sprovodila na uzorcima oblika ploče (dimenzija 15x15x5 cm) bez dodatka vlakana (0%), pri starosti od 28 dana. U okviru standardom propisane aparature, uzorci su postavljeni i izloženi pritisku vode od 5 bara u trajanju od 72 časa (slika 4.1 Prilog 4). Nakon cepanja uzoraka po sredini, izmeren je maksimalan prodor vode na svakom uzorku (slike 4.1 i 4.2, Prilog 4). Rezultati ispitivanja sa izmerenim maksimalnim vrednostima prodora su prikazane u tabeli 4:

Tabela 4. Rezultati ispitivanja vodonepropustljivosti

Uzorak	V1		V2		V3	
Strana	Levo	Desno	Levo	Desno	Levo	Desno
Dubina prodora vode[mm]	5.5	5.0	4.4	4.3	8.9	9.5

Srednja vrednost dubine prodora vode iznosi **6.3 mm**, na osnovu čega se može izvesti sledeći zaključak: **ispitani beton po pitanju vodonepropustljivosti spada u najvišu klasu V-III prema standardu SRPS U.M1.203: 2013.**

5. REZULTATI ISPITIVANJA NA DEJSTVO MRAZA I SOLI

Ispitivanje otpornosti uzoraka na dejstvo mraza i soli je ispitano prema standardu *SRPS U.M1.055:1984 (Beton - Ispitivanje otpornosti površine betona na dejstvo mraza i soli za odmrzavanje)*. Ispitivanja su se sprovodila na uzorcima oblika ploče, dimenzija 15x15x5 cm bez dodatka vlakana (0%) pri starosti od 28 dana u komori sa regulisanjem temperature (slika 5.1 Prilog 5). Uzorci čija je gornja površina tretirana 3%-nim rastvorom NaCl, su izloženi naizmeničnom smrzavanju u trajanju od 16-18h na temperaturi od -20°C i odmrzavanju na sobnoj temperaturi od 6-8 °C. Nakon isteka 25 ciklusa, izvršena je vizuelna inspekcija svih uzoraka (slika 5.2 Prilog 5). Na osnovu vizuelno-makroskopskog pregleda ispitanih uzoraka, može se zaključiti sledeće: **na površini uzoraka nisu uočena nikakva oštećenja, što ispitani beton svrstava u najvišu klasu - MS0 (bez ljuštenja) po pitanju otpornosti na simultano dejstvo mraza i soli.**



6. DODATNI PARAMETRI TRAJNOSTI

Dodatni parametri trajnosti (pored vodonepropustljivosti i otpornosti na niskim temperaturama), su definisani kroz ispitivanje otpornosti uzoraka na karbonatizaciju i penetraciju hloridnih jona.

6.1 Otpornost na karbonatizaciju

Ispitivanje otpornosti na karbonatizaciju je izvršeno ubrzanim testom prema standardu *fib Bulletin No. 34: Model Code for Service Life Design (2006)*. Uzorci koji su korišćeni za sprovođenje ovog testa su bile prizme bez dodatka vlakana (0 %), polomljene na savijanje pri starosti od 28 dana. Uzorci su, pri pomenutoj starosti, stavljeni u komoru (slika 6.1 Prilog 6), u kojoj su tokom narednih 28 dana bili izloženi koncentraciji CO₂ od 2%, pri temperaturi od 20°C i vlažnosti 65%. Nakon tog perioda, uzorci su polomljeni po sredini, a zatim tretirani rastvorom fenolftaleina C₂₀H₁₄O₄ i ostavljeni da se osuše tokom 30 min. Nakon propisanog vremena, tretirana površina bila je u celosti roze boje (slika 6.2 Prilog 6), što indikuje sledeći rezultat testa: **nema smanjenja alkalnosti betona, tj. dubina karbonatizacije je iznosila 0.00 mm, što ispitivani beton svrstava u najvišu klasu otpornosti betona na karbonatizaciju, koja odgovara klasi izloženosti XC4 –kako je to definisano standardom SRPS EN 206.**

6.2 Otpornost na penetraciju hloridnih jona

Ispitivanje otpornosti na penetraciju hlorida je izvršeno na uzorcima betona bez dodatka vlakana (0 %), oblika cilindra dimenzija: prečnik 100 mm i visina 100 mm, pri njihovoj starosti od 28 dana. Test je sproveden prema standardu *NT Build 42 (Non-Steady State Chloride Migration, 1999)*. Za ispitivanje su korišćeni cilindri visine 50 mm dobijeni isecanjem uzoraka negovanih 28 dana u vodi. Uzorci su, nakon provedenih 24h u posudi sa vodom od kojih su 3h bili samo u vakuumu, stavljeni u aparaturu za ispitivanje (slika 7.1 Prilog 7). U aparaturi za ispitivanje uzorci su proveli 120h, pri čemu je pre i posle ispitivanja merena temperatura, a tokom ispitivanja i početni otpor na osnovu koga je određeno vreme trajanja testa i napon struje kojom je izložen uzorak tokom ispitivanja. Nakon propisanog vremena, uzorci su izvađeni i polomljeni po sredini, a zatim su njihove unutrašnje površine tretirane rastvorom srebra nitrata AgNO₃ i ostavljene da se osuše 30 min. Na tretiranoj površini se jasno mogao uočiti prodor hlorida u vidu sloja srebrne boje na površini uzorka (slika 7.2 Prilog 7).

Prodor hlorida je meren na sedam mernih mesta, izuzimajući ivična mesta, gde su se dobijene vrednosti koristile za određivanje koeficijenta migracije hlorida. Rezultati testa su prikazani u tabeli 5:

Tabela 5. Rezultati testa otpornosti na penetraciju hlorida

Broj uzorka	Napon [V]	L1[mm]	I ₃₀	t _p	t _k	t[h]	x _{av} [mm]	D _{nssm} [m ² /s]
1	60	51.0	1.82	18.60	19.10	120	2.57	10.002*10 ⁻¹⁴
2	60	51.5	1.73	18.30	19.10	120	1.79	6.888*10 ⁻¹⁴



Srednja vrednost koeficijenta migracije hlorida iznosi $D_{nssm} = 8.454 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$. Na osnovu toga se može izvesti sledeći zaključak: **otpornost ispitivanog betona na penetraciju hlorida je 8-10 puta veća nego kod običnih cementnih betona, što ga prema klasifikaciji iz pomenutog standarda svrstava u grupu "vrlo dobar", odnosno u najvišu klasu izloženosti betona u konstrukciji po pitanju penetracije hloridnih jona XD4 – kako je to definisano standardom SRPS EN 206.**

7. ZAKLJUČAK

Kao što se na osnovu rezultata sprovedenih ispitivanja može zaključiti, ispitani kompozit se može svrstati u betone ultra visokih čvrstoća (UHPC), koji su pri tome ojačani čeličnim vlaknima (mikroarmirani beton - FRC). Pri ugradnji, registrovana je tekuća konzistencija svežeg betona, koja omogućuje ugradnju bez vibriranja ili uz kratkotrajno kompaktiranje mešavine, što ovaj beton svrstava u grupu samougrađujućih (SCC) betona.

Pokazalo se da se srednja vrednost čvrstoće pri pritisku na 28 dana iznosi **140.6 MPa**, a nakon zaparivanja **144.4 MPa**, što odgovara betonu ultra visoke čvrstoće. Takođe, čvrstoća pri savijanju je znatno veća (**4-6 puta**) nego kod običnih betona i iznosi u proseku **24.5 MPa**. Rezultati ispitivanja pokazuju da ispitivani beton poseduje najvišu klasu vodonepropustljivosti **V-III**, kao i najvišu klasu **MS0 (bez ljuštenja)** na simultano dejstvo mraza i soli za odmrzavanje. Ispitivanja dodatnih parametara trajnosti pokazala su da predmetni beton zadovoljava uslove za najviše klase **XC4** i **XD4** u smislu izloženosti betona u konstrukciji dejstvu karbonatizacije, odnosno penetraciji hloridnih jona.

SASTAVILI:


V. prof. dr Dimitrije Zakić, dipl.građ.inž.


Asistent Stefan Mitrović, mast.inž.građ.

- KRAJ IZVEŠTAJA -

IZVEŠTAJ sadrži 7 priloga

Izveštaj se može umnožavati samo u celosti, a pojedini delovi samo uz odobrenje Laboratorije za materijale Instituta za materijale i konstrukcije Građevinskog fakulteta

PRILOG 1

Izrada i nega uzoraka



Slika 1.1. Priprema komponenti za izradu mešavine i precizno odmeravanje mase



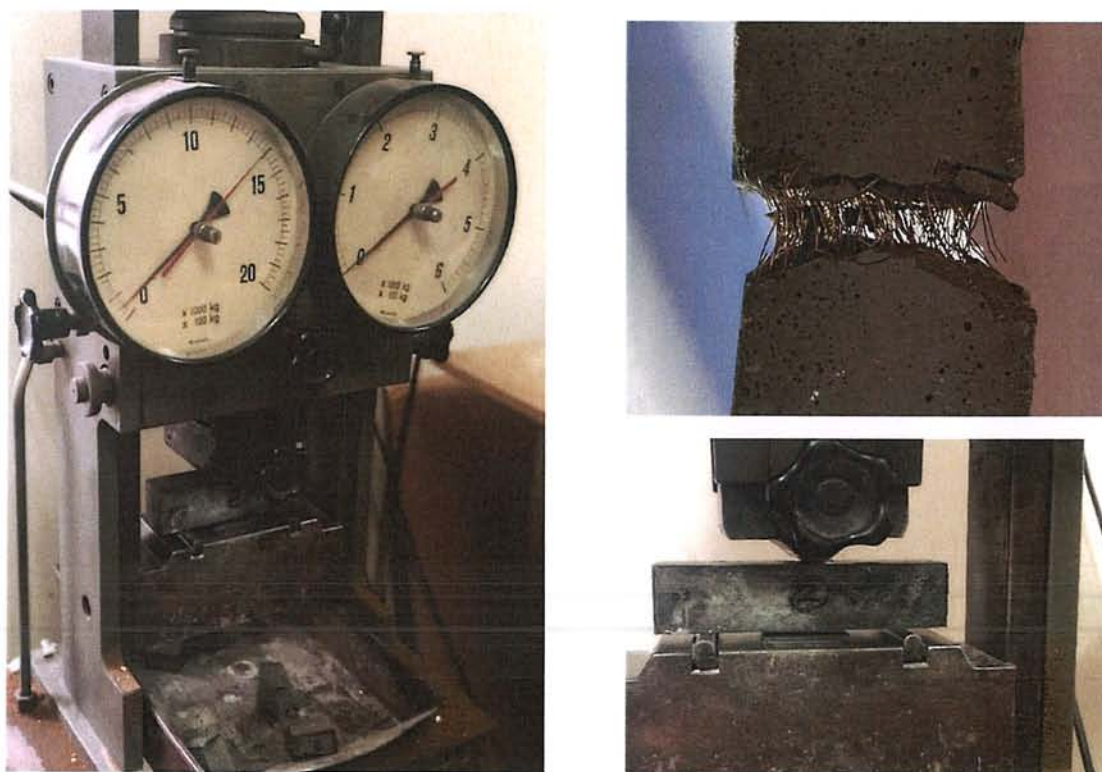
Slika 1.2. Mešavina sa sadržajem vlakana u toku rada mešalice i izliveni uzorci

PRILOG 2

Ispitivanje osnovnih fizičko-mehaničkih karakteristika



Slika 2.1. Aparatura za ispitivanje čvrstoće pri pritisku marke Matest



Slika 2.2. Aparatura za ispitivanje čvrstoće pri savijanju betona i polomljeni uzorci sa dodatkom čeličnih vlakana (2%) nakon ispitivanja

Tabela 2.1. Zapreminska masa betona sa i bez mikroarmature u svežem/očvrsлом stanju (kg/m^3)

Stanje	0% vlakana	1% vlakana	2% vlakana
Sveže	2281.9	2339.3	2529.2
Očvrslo (nakon 24h)	2270.2	2329.1	2489.6



Slika 2.3. Postavljanje uzorka u aparaturu za ispitivanje čvrstoće pri pritisku i lom uzorka pri ispitivanju



Slika 2.4. Izgled uzoraka sa dodatkom čeličnih vlakana nakon ispitivanja čvrstoće pri savijanju

PRILOG 3

“Pull off” test



Slika 3.1. Otkinuti komad betona sa površine uzorka



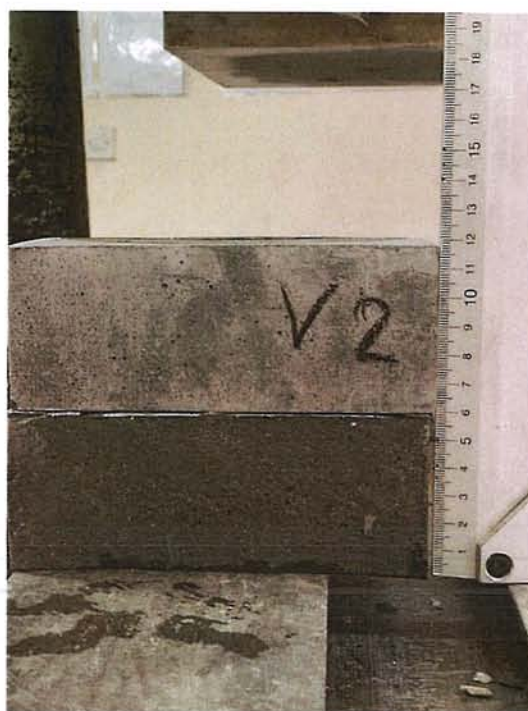
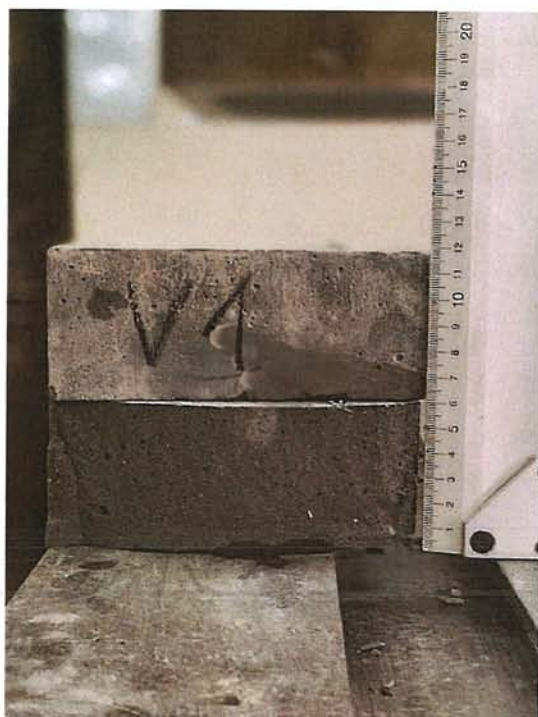
Slika 3.2. Uređaj za sprovođenje „Pull off“ testa

PRILOG 4

Ispitivanje vodonepropustljivosti



Slika 4.1. Aparatura za izlaganje uzoraka pritisku vode i unutrašnjost uzorka V3 nakon ispitivanja



Slika 4.2. Merenje dubine prodora vode na uzorcima V1 i V2

PRILOG 5

Ispitivanje na simultano dejstvo mraza i soli



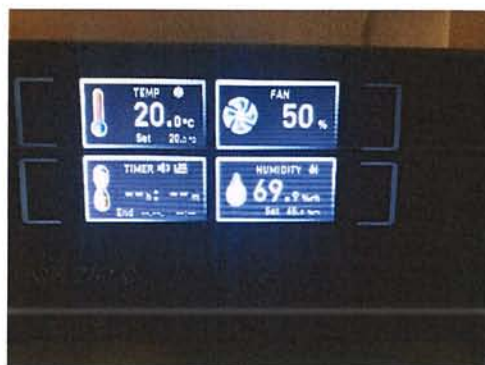
Slika 5.1. Komora za ispitivanje i pripremljeni uzorci pre početka ciklusa smrzavanja i odmrzavanje u komori



Slika 5.2. Uzorci nakon provedenih 25 ciklusa u komori za ispitivanje

PRILOG 6

Ispitivanje otpornosti na karbonatizaciju



Slika 6.1. Komora za ispitivanje otpornosti na karbonatizaciju sa podešenim parametrima (koncentracija CO_2 , temperatura i vlažnost)



Slika 6.2 Izgled površine uzoraka nakon tretiranja rastvorom fenolftaleina

PRILOG 7

Ispitivanje otpornosti na penetraciju hloridnih jona



Slika 7.1. Aparatura za ispitivanje i pripremljeni uzorci za ispitivanje



Slika 7.2. Izgled površine uzoraka nakon tretiranja rastvorom srebra nitrata