

TEHNIČKO REŠENJE

M85 – Novo tehničko rešenje u fazi realizacije, testirano u ovlašćenoj instituciji

TEHNOLOŠKI POSTUPAK PROIZVODNJE ZELENIH BETONA SA VISOKIM SADRŽAJEM LETEĆEG PEPELA ZA PRIMENU U ARMIRANOBETONSKIM KONSTRUKCIJAMA

AUTORI:

Doc.dr Jelena Dragaš, master inž.građ., Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet,
Bulevar kralja Aleksandra 73, Beograd

Prof.dr Snežana Marinković, dipl.građ.inž., Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet,
Bulevar kralja Aleksandra 73, Beograd

V.prof.dr Ivan Ignjatović, dipl.građ.inž., Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet,
Bulevar kralja Aleksandra 73, Beograd

Asist. Vedran Carević, master inž.građ., Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet,
Bulevar kralja Aleksandra 73, Beograd

Beograd, april 2020. godine

1) AUTORI TEHNIČKOG REŠENJA:

Doc.dr Jelena Dragaš, master inž.građ., Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet,
Bulevar kralja Aleksandra 73, Beograd

Prof.dr Snežana Marinković, dipl.građ.inž., Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet,
Bulevar kralja Aleksandra 73, Beograd

V.prof.dr Ivan Ignjatović, dipl.građ.inž., Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet,
Bulevar kralja Aleksandra 73, Beograd

Asist. Vedran Carević, master inž.građ., Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet,
Bulevar kralja Aleksandra 73, Beograd

2) NAZIV TEHNIČKOG REŠENJA:

Tehnološki postupak proizvodnje zelenih betona sa visokim sadržajem letećeg pepela za primenu u armiranobetonskim konstrukcijama

3) KLJUČNE REČI:

Leteći pepeo, konstrukcijski beton, cement, armiranobetonske konstrukcije, čvrstoća pri pritisku, čvrstoća pri zatezanju, modul elastičnosti, karbonatizacija, nosivost pri savijanju, nosivost pri smicanju, ugibi, prsline

4) ZA KOGA JE REŠENJE RAĐENO:

Martini gradnja d.o.o. Indija, Vojvode putnika bb, Indija, Srbija 22320

5) GODINU KADA JE REŠENJE KOMPLETIRANO:

2020. godina

6) GODINU KADA JE POČELO DA SE PRIMENJUJE I OD KOGA:

**Planirana primena – 2020. godina, Martini gradnja d.o.o.
(tehničko rešenje u realizaciji)**

7) OBLAST I NAUČNU DISCIPLINU NA KOJU SE TEHNIČKO REŠENJE ODNOSI:

Građevinarstvo, uža oblast betonske konstrukcije

8) PROBLEM KOJI SE TEHNIČKIM REŠENJEM REŠAVA

Tokom poslednje decenije, primarni motiv istraživanja mnogih naučnih disciplina predstavlja težnja ka uspostavljanju principa održivog razvoja i cirkularne ekonomije. Ovi principi podrazumevaju korišćenje lokalno dostupnih resursa uz svest o ekološkim i ekonomskim posledicama našeg delovanja. Građevinska industrija predstavlja jedan od najvećih zagađivača životne sredine sa potrošnjom velikih količina prirodnih sirovina (u najvećoj meri neobnovljivih), emisijom velikih količina čestica koje zagađuju vazduh, zemlju i vodu, kao i generisanjem ogromnih količina inertnog toksičnog otpada. Industrija betona je vodeća grana građevinarstva kada je u pitanju negativni uticaj na životnu sredinu. Proces proizvodnje betona nije sam po sebi na vrhu lestvice štetnih procesa, međutim, ogromne količine betona koje se proizvedu u svetu svake godine dovele su ovu granu industrije na čelo zagađivača. Beton je materijal dobrih fizičko-mehaničkih karakteristika, velike mogućnosti oblikovanja i relativno niske cene pa ne čudi činjenica da se u svetu godišnje proizvede 25 milijardi tona betona, odnosno oko 3.8 tona po jednom stanovniku godišnje [1].

Proizvodnja i upotreba betona ima višestruke negativne posledice na životnu sredinu: upotreba velikih količina prirodnih resursa, proizvodnja cementa i značajne količine otpada koje nastaju tokom izgradnje i rušenja objekata (Slika 1). Tokom procesa proizvodnje betona glavni zagađivač predstavlja cementna industrija koja je odgovorna za 10% od ukupne količine ugljen-dioksida (CO_2) koja se emituje u atmosferu [2]. Do ovog procesa dolazi usled hemijske reakcije dobijanja oksida kalcijuma iz krečnjaka (oko 60% emitovanog CO_2) i usled visokih temperatura potrebnih za odvijanje tog procesa (oko 40% emitovanog CO_2). Jasno je da se ovaj negativni uticaj može značajno umanjiti samo smanjenjem količina cementa koje se koriste u proizvodnji betona i njegovom zamenom materijalom koji ima značajno manji štetan uticaj na životnu srednu.



Slika 1. Negativan uticaj proizvodnje betona na životnu sredinu

Potreba za cementom se može smanjiti njegovom delimičnom zamenom različitim otpadnim materijalima koji poseduju hidraulička ili pucolanska svojstva. Nus proizvodi raznih industrija koji se karakterišu kao pucolanski materijali a najčešće se koriste u betonu su: granulirana zgrna visokih peći,

leteći pepeo, silikatna prašina, metakaolin, crveno blato itd. Analizom procesa aktivnih industrijskih grana u Republici Srbiji (RS) i količine otpada koji nastaje tokom proizvodnje određenih dobara i usluga zaključeno je da fokus istraživanja treba usmeriti ka energetske industriji.

Najveći deo električne energije u RS, preko 70%, proizvode se u okviru šest termoelektrana: Nikola Tesla-A, Nikola Tesla-B, Kolubara, Kostolac-A, Kostolac-B i Morava. To za posledicu ima godišnju proizvodnju od oko sedam miliona tona letećeg pepela, koji se u najvećoj meri proizvodi u termoelektranama Nikola Tesla A - TENT A i Nikola Tesla B - TENT B u Obrenovcu. Leteći pepeo predstavlja nus proizvod tokom sagorevanja uglja u termoelektranama i u RS se odlaže na deponije koje se nalaze u blizini termoelektrana (Slika 2). U RS je do sada, na površini od preko 1500 hektara obradivog zemljišta, deponovano više od 300 miliona tona letećeg pepela koji štetno utiče na vazduh, zemljište, podzemne vode i zdravlje ljudi.



Slika 2. Termoelektrane i deponije pepela u RS

Leteći pepeo je otpadni materijal čije fizičke, hemijske i mineraloške karakteristike umnogome zavise od vrste uglja, procesa sagorevanja uglja u termoelektranama i načina prikupljanja i skladištenja letećeg pepela nakon sagorevanja. Shodno tome, ove karakteristike letećeg pepela mogu značajno varirati ne samo među različitim termoelektranama nego i u istom postrojenju u različitim vremenskim intervalima. Heterogenost i promenljivost sastava i kvaliteta letećeg pepela je svakako jedna od najvećih prepreka široj primeni ovog nusprodukta u betonima kao zamenjujućeg cementnog materijala. Tokom proizvodnje električne energije u termoelektranama u RS najčešće se koristi ugalj slabijeg kvaliteta, odnosno lignit. Leteći pepeo koji nastaje sagorevanjem ove vrste uglja takođe je lošijeg kvaliteta i primena u proizvodnji betona predstavlja priličan izazov. Ovaj pepeo pripada klasi pepela F koji imaju malu količinu oksida kalcijuma (obično manju od 12%) [3]. U RS leteći pepeo ima relativno nisku cenu i njegova proizvodnja kao nusprodukta nema značajnog utroška energije niti emisije CO₂, a značajnija upotreba u betonima bi smanjila i površine deponija.

U RS se još uvek koriste jako male količine letećeg pepela (oko 3%), i to u najvećoj meri u cementnoj industriji koja ga koristi kao dodatak cementu. Imajući sve ovo u vidu, potencijal za primenu velikih količina letećeg pepela u proizvodnji betona u RS je značajan. Očekivani konačni rezultat ovog istraživanja je beton sa velikim sadržajem letećeg pepela koji će imati više od 50% letećeg pepela u ukupnoj količini praškastih vezivnih materijala i koji će moći da se primenjuje u proizvodnji armiranobetonskih (AB) konstrukcija. Ovakvo rešenje će doprineti rešavanju (1) globalnog problema velike emisije CO₂ uzrokovane proizvodnjom cementa i (2) smanjenju količine deponovanog letećeg pepela u RS.

9) STANJE REŠENOSTI PROBLEMA U SVETU

Motivacija za početak primene letećeg pepela u betonima, još od tridesetih godina prošlog veka, bila je smanjenje toplote hidratacije koje se ostvaruje kada se deo cementa zameni leteći pepeo. Velike količine letećeg pepela korišćene su u proizvodnji brana, temelja, betonskih vijadukta, potpornih zidova itd. Primena letećeg pepela u betonima se znatno povećala od tog vremena do danas.

U zavisnosti od vrste i količine upotrebljenog letećeg pepela u betonima, njegov uticaj na karakteristike betona može biti bitno drugačiji. Leteći pepeo se uglavnom sastoji od oksida silicijuma, aluminijuma, gvožđa i kalcijuma koji imaju amorfni i inertni deo. Količine amorfni oksida u letećeg pepela utiču na njegovu reaktivnost u betonu. Pored toga, veličina i oblik zrna letećeg pepela bitno utiču na ugradljivost betona, njegovu upakovanost i mehaničke karakteristike. Leteći pepeo poboljšava karakteristike betona fizičkim i hemijskim dejstvom. Prvo, fine čestice letećeg pepela efektom filera povećavaju upakovanost i gustinu betona, popunjavajući sitne šupljine između čestica cement. Pored toga, leteći pepeo pomaže odvijanju reakcije hidratacije cementa i postaje sastavni deo cementne paste [4]. Konačno, leteći pepeo poboljšava fizičke i mehaničke karakteristike betona formiranjem CSH gela kao produkta pucolanske reakcije. Pri ranoj starosti betona dominantan je efekat filera [5], [6], dok se efekti pucolanske reakcije primećuju posle starosti od 14 dana i doprinose prirastu čvrstoće godinama nakon ugrađivanja betona [7], [8]. U manjim količinama leteći pepeo se koristi kao mineralni dodatak (filer) u samougrađujućim betonima radi poboljšanja njihove ugradljivosti [9]. U većim količinama se koristi kao delimična zamena cementa sa masom i do 70% od ukupne mase vezivnih materijala tj. cementa i letećeg pepela. Kao deo vezivnog materijala, leteći pepeo se može koristiti kao zamena cementa u betonskoj mešavini ili u sklopu cementa sa dodacima. U slučaju kada se koristi kao deo cementa sa dodacima, kvalitet leteći pepeo je bolji zbog usitnjavanja koje se događa zajedno sa cementom. Pored toga, cement sa dodacima sadrži i određenu količinu gipsa koji utiče na vreme vezivanja. Na tržištu postoje cementi sa dodacima koji sadrže i do 55% letećeg pepela ali se ne preporučuje njihova primena u konstrukcijskim betonima.

Upotreba letećeg pepela u betonima definisana je standardom EN 206-1 [10]. Ovim standardom nije eksplicitno definisana maksimalna količina letećeg pepela koja se može upotrebiti u betonu ali su data ograničenja za količinu letećeg pepela koji se može smatrati vezivnim materijal. Standard EN 206-1 uvodi koncept *k*-vrednosti (*k-value concept*) koji definiše maksimalnu količinu letećeg pepela u odnosu na masu cementa koja se može uzeti u obzir ako se trajnost betona ne dokazuje eksperimentalno. Ovim konceptom je količina letećeg pepela koji se može uzeti kao vezivni materijal u betonu ograničena na vrednost $\text{leteći pepeo/cement}=0.33$. Veća količina letećeg pepela se može upotrebiti kao filer (inertni materijal) u betonu. Koncept *k*-vrednosti se zasniva na poređenju trajnosti betona sa i bez letećeg pepela na osnovu njegove klase (tj. čvrstoće pri pritisku), za odgovarajuće uslove izloženosti sredine tj. klasu izloženosti betona. On definiše potencijal letećeg pepela kao vezivnog materijala u odnosu na količinu i vrstu cementa. Korišćenje većih količina letećeg pepela u betonima je moguće uz dokazivanje da su karakteristike tih betona iste kao karakteristike referentnog cementnog betona tj. primenom ekvivalentnog koncepta betonskih performansi (*equivalent concrete performance concept*) i kombinovanog koncepta ekvivalentnih performansi (*equivalent performance of combinations concept*) za potrebnu klasu izloženosti betona.

Betoni napravljeni sa letećim pepelom koji odgovara standardu EN 450-1 [12], u količinama koje su dozvoljene konceptom *k*-vrednosti, bili su tema brojnih istraživanja tokom prethodnih par decenija [13, 14, 15]. Rezultati ovih ispitivanja su pokazali da ovi betoni imaju bolju ugradljivost, manje izdvajanje vode i segregaciju, manju toplotu hidratacije, duže vreme vezivanja i iste ili nešto manje čvrstoće pri pritisku u poređenju sa betonima bez letećeg pepela.

Tendencija upotrebe sve većih količina ovog otpadnog materijala u betonima podstakla je razvoj betona sa velikim sadržajem letećeg pepela - HVFAC (*high-volume fly ash concrete*), koji su prvi put ispitivani u CANMET-u (*Canada Centre for Mineral and Energy Technology*) osamdesetih godina prošlog veka [16, 17]. Betoni sa velikim sadržajem letećeg pepela (Slika 3) imaju više od 50% letećeg pepela u ukupnoj količini vezivnog materijala. I pored toga što upotreba ovih betona nije u skladu sa konceptom k-vrednosti koje propisuje EN 206-1 [10], pravilnim projektovanjem mešavine betona mogu se dobiti betoni dobrih mehaničkih karakteristika. Značajan broj radova i disertacija koje se bave ispitivanjem fizičkih i mehaničkih karakteristika HVFAC može se pronaći u dostupnoj literaturi. Uprkos tome, opšti zaključci koji se odnose na karakteristike HVFAC kao konstrukcijskog betona nedostaju.



Slika 3. Cementni betoni i betoni sa velikim sadržajem letećeg pepela

Kako bi se postigle dobre mehaničke karakteristike ovih betona koriste se niski vodovezivni faktori a često i superplastifikator za postizanje potrebne ugradljivosti. Kod HVFAC ne dolazi do izdvajanja vode na površini ni segregacije betona uz bitno manji razvoj toplote hidratacije i sadržaj uvučenog vazduha. Sa druge strane, vreme vezivanja HVFAC je duže nego kod cementnih betona uz sporiji prirast čvrstoće pri ranim starostima. U zavisnosti od količine i vrste letećeg pepela i cementa, dobijaju se betoni sa nešto nižim čvrstoćama nakon 28 dana ali sa znatnim prirastom i nakon ovog vremena.

Ispitivanja pokazuju da ovi betoni imaju nešto niže čvrstoće pri zatezanju i module elastičnosti nego cementni betoni, shodno padu čvrstoće pri pritisku. Smanjena količina cementa na račun veće količine letećeg pepela utiče na smanjenje skupljanja i tečenja HVFAC u odnosu na cementne betone. Mnogobrojna istraživanja iz literature su pokazala da je poznavanjem karakteristika letećeg pepela i pravilnim projektovanjem betonskih mešavina moguće dobiti HVFAC dobrih fizičko-mehaničkih karakteristika pogodnih za konstruktivnu primenu.

Primena većih količina letećeg pepela u betonima utiče i na trajnost HVFAC. Generalno, HVFAC pokazuje povećanu otpornost na prodor hlorida u poređenju sa cementnim betonima [18] i nižu otpornost na dejstvo mraza i soli [19]. Rezultati takođe pokazuju manju karbonatizacionu otpornost HVFAC u poređenju sa cementnim betonima [20].

Kako bi mogli da se donesu konkretni zaključci i preporuke za primenu HVFAC kao konstrukcijskog betona potrebno je sprovesti opsežna eksperimentalna ispitivanja koja prevazilaze nivo ponašanja samog materijala i bavi se ispitivanjem ponašanja AB elemenata napravljenih od HVFAC. Nekolicina radova koji se bave mogućnošću primene HVFAC kao konstrukcijskog betona može se pronaći u literaturi. Dostupni radovi su se fokusirali na ispitivanje čvrstoće prijanjanja HVFAC i armature [21-23], nosivosti pri savijanju [24-28] i smicanju [29-36] betona napravljenih sa letećim pepelom.

Ispitivanje čvrstoće pri savijanju i smicanju HVFAC greda izvršeno je na gredama različitih dimenzija najčešće u testu savijanja sa silom u sredini ili u trećinama raspona. Različite količine letećeg pepela su korišćene u različitim testovima i ukupno 12 greda sa više od 50% letećeg pepela u ukupnoj količini cementnih materijala je ispitano. Ovaj broj uzoraka nije dovoljan za donošenje opštih zaključaka ali dostupni rezultati ukazuju da se nosivost pri savijanju greda napravljenih sa HVFAC ne

razlikuje bitno od običnih cementnih greda. Ovaj zaključak je značajan podstrek za dalje ispitivanje ponašanja greda od HVFAC pri savijanju u smislu razvoja prslina i njihove širine, krutosi greda nakon pojave prslina i ugiba.

Ispitivanje granične nosivosti greda od HVFAC pri smicanju ispitano je u dostupnoj literaturi na 21 gredi bez uzengija i 16 greda sa uzengijama, najčešće napravljenih sa letećim pepelom klase C. Ovi rezultati su pokazali da je granična nosivost pri smicanju greda od HVFAC slična graničnoj nosivosti greda od običnih cementnih betona. Ove rezultate treba dopuniti rezultatima ispitivanja graničnih dilatacija i ponašanja greda prilikom smicanja nakon pojave kosih prslina.

Kako bi se doneli jednoznačni zaključci, potrebno je sprovesti sopstvena eksperimentalna ispitivanja, sistematizaciju i analizu dostupnih rezultata i definisanje preporuka za projektovanje mešavina, tehnologiju proizvodnje i proceduru testiranja HVFAC napravljenih sa letećim pepelom iz RS.

10) OPIS TEHNIČKOG REŠENJA

Kako bi se omogućila konstrukcijska primena HVFAC napravljenog sa letećim pepelom iz RS, neophodno je sprovesti sveobuhvatno eksperimentalno ispitivanje od ispitivanja komponentnih materijala do opsežnog ispitivanja AB grednih elemenata (Slika 4).



Slika 4. Faze ispitivanja mogućnosti primene letećeg pepela u betonima

10.1 Eksperimentalno ispitivanje fizičkih, mehaničkih i karakteristika trajnosti HVFAC

Izvršena je detaljna analiza fizičkih i hemijskih karakteristika svih vrsta letećih pepela dostupnih u RS i odabran je pepeo iz TE Nikola Tesla B sa najsitnijim česticama za dalju analizu mogućnosti primene u konstrukcijskim betonima. Ovaj deo eksperimentalnog ispitivanja obuhvatilo je ispitivanje komponentnih materijala (cementa, agregata, letećeg pepela), fizičkih, mehaničkih i karakteristika trajnosti HVFAC.

10.1.1 Komponentalni materijali i ispitivanje

Ispitivanja komponentalnih materijala sprovedena su u Laboratoriji za materijale Građevinskog fakulteta u Beogradu, u Institutu IMS i u Laboratoriji Instituta tehničkih nauka SANU. Ova ispitivanja su bila neophodna za sastavljanje receptura betonskih mešavina. U okviru ispitivanja komponentalnih materijala, sprovedena su ispitivanja letećeg pepela, agregata i cementa.

10.1.1.1 Leteći pepeo

Tokom eksperimentalne analize HVFAC korišćen je leteći pepeo iz TE Nikola Tesla B iz Obrenovca. Tokom remonta termoelektrane 2009/2010. godine, uspostavljen je novi sistem sakupljanja, transporta i odlaganja letećeg pepela. Primenom nove tehnologije omogućeno je sakupljanje suvog pepela u silosima, spremnog za njegovu isporuku za potrebe industrije. Radi lakšeg transporta pepela, prvo se vrši gravitaciono odvajanje peska iz pepela, a ostatak se tokom transporta razdvaja na četiri grupe prema veličini zrna. Za potrebe eksperimenta, prikupljeno je 1500 kg sa mesta (Slika 5a) gde je veličina njegovih čestica najmanja (poslednji otvor pre sakupljanja letećeg pepela u silosu).



Slika 5. a) Mesto sa kog je sakupljen leteći pepeo u TE Nikola Tesla B u Obrenovcu, b,c) uzorak letećeg pepela

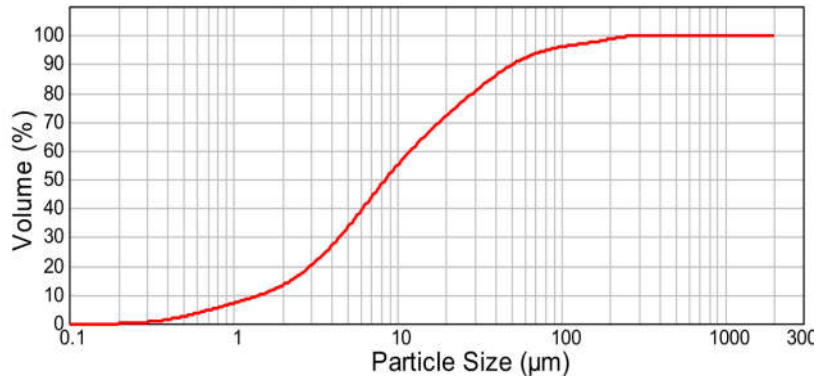
Na uzorku pepela (Slika 5b,c) izvršena je analiza hemijskog i granulometrijskog sastava pepela, kao i njegova zapreminska masa. Hemijska analiza izvršena je *XRF metodom* u Institutu za ispitivanje materijala IMS u Beogradu. Rezultati ispitivanja su prikazani u Tabeli 1.

Tabela 1. Rezultati hemijske analize uzorka pepela iz TE Nikola Tesla B *XRF metodom* (maseni %)

Parametar	Jedinica	Cement	Leteći pepeo	EN 450-1:2012
Gubitak žarenjem	%	3.53	1.64	Max 5
SiO ₂	%	21.04	58.24	-
Al ₂ O ₃	%	5.33	20.23	-
Fe ₂ O ₃	%	2.37	5.33	-
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	%	-	83.80	Min 70
CaO	%	60.43	7.62	-
MgO	%	2.43	2.01	Max 4
SO ₃	%	3.55	2.21	Max 3
Na ₂ O	%	0.22	0.52	Max 5
K ₂ O	%	0.70	1.51	-

Hemijska analiza uzorka je pokazala da leteći pepeo iz TE Nikola Tesla B pripada klasi F prema klasifikaciji iz standarda [3]. Maseni udeo oksida silicijuma, aluminijuma i gvožđa je veći od 70%, količina nesagorelog uglja je manja od 6% a udeo oksida sumpora manji od 5%. Sadržaj kalcijuma je u okviru preporučenih granica za pepele iz ove klase, odnosno manji od 12%. Granulometrijska raspodela čestica pepela određena je na uređaju *Malvern Instruments Mastersizer 2000* u Institutu tehničkih nauka SANU u Beogradu. Na Slici 6 prikazana je kumulativna raspodela veličine čestica

uzorka pepela i vidi se da je više od 90% čestica prečnika manjeg od 45 μ m, dok je srednje zrno uzorka pepela 8.53 μ m. Procenat čestica manjih od 45 μ m je veći od 66%, što je još jedan od uslova za klasu F letećeg pepela.



Slika 6. Kumulativna raspodela veličine čestica uzorka letećeg pepela

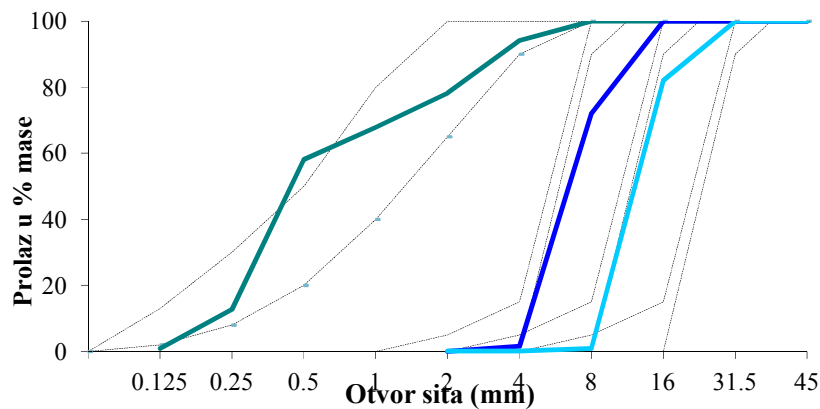
Zapreminska masa pepela je određena u Institutu za ispitivanje materijala IMS i Laboratoriji za kolovozne konstrukcije Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu prema standardu za pepepo EN 450-1 [12] i prosečna vrednost 6 uzoraka iznosi 2075 kg/m³.

10.1.1.2 Agregat

Tokom ispitivanja korišćen je rečni agregat dobavljača Gradient d.o.o. iz Beograda. U Tabeli 2 prikazana su osnovna fizička svojstva agregata, a na Slici 7, granulometrijska raspodela po frakcijama za tri korišćene frakcije rečnog agregata (0/4, 4/8 i 8/16).

Tabela 2. Osnovna fizička svojstva agregata

Agregat	Frakcija	Zapremisnak masa [kg/m ³]	Upijanje vode [mas. %]
Rečni agregat	0/4	2573	1.20
	4/8	2548	1.24
	8/16	2591	1.04



Slika 7. Granulometrijska raspodela rečnog agregata po frakcijama

10.1.1.3 Cement i dodaci

Tokom svih faza eksperimenta korišćen je cement CEM II 42.5R S-L proizvođača Lafarge d.o.o. Specifična masa cementa je 3040 kg/m³. Hemijski sastav cementa prikazan je u Tabeli 1. Kako bi se postigla odgovarajuća konzistencija betona, korišćeni su plastifikatori proizvođača BASF d.o.o., Glenium ACE. Specifična masa plastifikatora je 1070 kg/m³.

10.1.2 Procedure pravljenja uzoraka i njihova nega

Projektovanje betonske mešavine i određivanje količina komponentnih materijala urađeno je pomoću zapreminske jednačine betonske mešavine koristeći specifične mase svih materijala uz usvojenu zapreminu pora od $v_p=1\%$. Usvojene su oznake za masu cementa - m_c , masu letećeg pepela - m_{lp} , masu vode - m_v , masu agregata po frakcijama - $m_{0/4}$, $m_{4/8}$, $m_{8/16}$ i masu plastifikatora - m_{pl} . U **Error! Reference source not found.** prikazana je zapreminska jednačina mešavine betona sa letećim pepelom i rečnim agregatom:

Jednačina 1. Zapreminska jednačina HVFAC

$$\frac{m_c}{3040} + \frac{m_v}{1000} + \frac{m_{lp}}{2075} + \frac{m_{0/4}}{2573} + \frac{m_{4/8}}{2548} + \frac{m_{8/16}}{2591} + \frac{m_{pl}}{1070} + v_p = 1$$

Ispitivanje betonskih mešavina je sprovedeno u Laboratoriji za ispitivanje materijala i konstrukcija Građevinskog fakulteta u Beogradu. Uzorci betona su napravljeni u mešalicama zapremine 11 litara i u rotacionoj mešalici sa vertikalnom osom (*Controls d.o.o.*, Italija). Procedura mešanja komponentnih materijala trajala je ukupno 5.0 minuta, a sastojala se iz nekoliko koraka: (1) mešanje svih frakcija agregata “u suvo” u trajanju od 60 sec, (2) dodavanje cementa i letećeg pepela i mešanje “u suvo” još 60 sec, (3) tokom narednih 30 sekundi dodaje se voda, (4) mešanje 2.5 minuta. Nakon spravljanja betona konzistencija je ispitana metodom sleganja pomoću Abramsovog konusa (Slika 8a) ili metodom rasprostiranja pomoću Grafovog stola (Slika 8b).



Slika 8. a) Metoda sleganja Abramsovim konusom (levo), b) Metoda rasprostiranjem (desno)

Betonske mešavine su napravljene i ugrađene u odgovarajuće kalupe pri temperaturi prostorije od $22\pm 2^\circ\text{C}$ i vlažnosti od $60\pm 5\%$. Veličine kalupa za odgovarajuća ispitivanja date su u Tabeli 3.

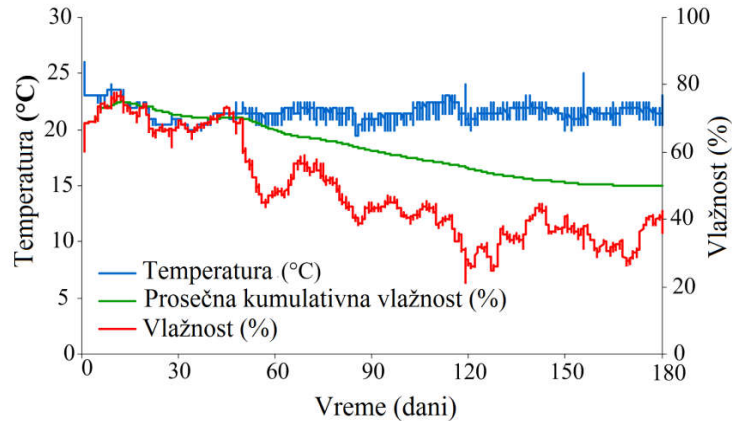
Tabela 3. Kalupi za ispitivanja mehaničkih karakteristika betona

Vrsta ispitivanja	Vrsta kalupa	Dimenzije kalupa (mm)
Čvrstoća pri pritisku	Kocka	100x100x100
Čvrstoća pri zatezanju cepanjem	Cilindar	Ø150x150
Modul elastičnosti	Cilindar	Ø150x300
Skupljanje i tečenje	Prizma	120x120x360

Nakon ugrađivanja svežeg betona, kalupi su prekrivani vlažnim jutanim tkaninama. Uzorci su izvađeni iz kalupa nakon 24 časa, a zatim negovani u vodi temperature $20\pm 2\%$ do dana ispitivanja. Ispitivanje čvrstoće pri pritisku, čvrstoće pri zatezanju cepanjem i modula elastičnosti sprovedeno je na Građevinskom fakultetu u Beogradu u Laboratoriji za materijale, pomoću prese (*Amsler&Sohn*) kapaciteta 2500kN. Prikazani rezultati ispitivanja predstavljaju srednje vrednosti tri ispitana uzorka.

Ispitivanje skupljanja i tečenja je obavljeno tokom perioda od 180 dana na odabranoj mešavini. Uzorci za merenje skupljanja su tokom merenja imali dva senzora za merenje dilatacija (*vibrating wire strain gauges*) na suprotnim stranicama prizme, dok su uzorci za merenje tečenja imali po četiri senzora sa svake strane prizme. Uzorci za merenje skupljanja su tokom merenja bili postavljeni u vertikalnom položaju. Tokom merenja tečenja uzorci su opterećeni u ramu prikazanom na Slici 9a.

Uzorcima su opterećeni nakon 7 dana opterećenjem koje uzrokuje napon koji odgovara vrednosti od 50% čvrstoće na 7 dana. Izabrana je ova starost kao karakteristično vreme skidanja oplata u praksi. Intenzitet opterećenja je izabran kao relativno visok zbog većeg očekivanog prirasta čvrstoće HVFAC, pa bi ovo opterećenje predstavljalo 34% nosivosti na 28 dana, 26% na 90 dana i 22% na 180 dana. Tokom ovog ispitivanja, temperatura u laboratoriji je bila relativno konstantna i iznosila 21°C, dok se vlažnost menjala u opsegu od 25% do 75% (Slika 9).



Slika 9. a) Ram sa uzorcima za ispitivanje tečenja (levo), b) temperatura i vlažnost sredine prilikom ispitivanja tečenja i skupljanja (desno)

10.1.3 Ispitivanje fizičkih i mehaničkih karakteristika HVFAC

Nakon ispitivanja komponentnih materijala definisan je dalji plan ispitivanja sa ciljem da se odredi uticaj količine letećeg pepela na fizičko-mehaničke karakteristike HVFAC. Ova faza ispitivanja imala je za zadatak ispitivanje promene čvrstoće pri pritisku i modula elastičnosti kroz vreme, određivanje čvrstoće pri zatezanju cepanjem, skupljanja i tečenja ispitanih HVFAC. Za realizaciju planiranog ispitivanja napravljene su dve serije betona sa pet različitih masa pepela. Prva serija betona napravljena je sa 200 kg/m³ a druga sa 150 kg/m³ cementa, dok se masa pepela kreće u granicama od 200 kg/m³ do 400 kg/m³ za prvu seriju i od 150 kg/m³ do 350 kg/m³ za drugu seriju betona. Količina plastifikatora za svaku mešavinu određena je iz uslova dobre ugradljivosti betona, ali zbog velike osetljivosti mešavine na promenu količine plastifikatora postignuta konzistencija mešavina varira u većem opsegu. Usvojene recepture mešavina su date u Tabelama 4 i 5. Usvojena je sledeća notacija:

$$\text{masa cementa_masa letećeg pepela_vodovezivni faktor}$$

Tabela 4. Recepture mešavina betona sa 200 kg/m³ cementa

Komponentni materijal	200_200_0.488	200_250_0.433	200_300_0.390	200_350_0.355	200_400_0.325
Agregat	811	749	687	625	563
	486	486	486	486	486
	324	324	324	324	324
Cement	200	200	200	200	200
Leteći pepeo	200	250	300	350	400
Voda	195	195	195	195	195
Dodatak	0	1,0	1,2	2,2	2,4
v/ve	0.488	0.433	0.390	0.355	0.325
lp/ve	50	50	50	50	50

v/ve - maseni odnos vode i vezivnog materijala (cement + leteći pepeo)

lp/ve - maseni odnos letećeg pepela i vezivnog materijala (cement + leteći pepeo)

Tabela 5. Receptura mešavina betona sa 150 kg/m³ cementa

Komponentni materijal	150_150_0.610	150_200_0.523	150_250_0.458	150_300_0.407	150_350_0.366
Agregat	879	817	755	693	631
	527	527	527	527	527
	351	351	351	351	351
Cement	150	150	150	150	150
Leteći pepeo	150	200	250	300	350
Voda	183	183	183	183	183
Dodatak	0	0	0	0,3	1,1
v/ve	0.610	0.523	0.458	0.407	0.366
lp/ve	50	50	50	50	50

v/ve - maseni odnos vode i vezivnog materijala (cement + leteći pepeo)

lp/ve - maseni odnos letećeg pepela i vezivnog materijala (cement + leteći pepeo)

10.1.3.1 Ispitivanje konzistencije i zapreminske mase HVFAC

Rezultati ispitivanja konzistencije betona su dati kao sleganje i rasprostiranje betona u Tabelama 6 i 7. Tokom projektovanja mešavina betona korišćena je određena količina plastifikatora *Glenium ACE* kako bi se postigla konzistencija betona koja omogućava dobru ugradljivost. Potvrđeno je da se potrebna količina plastifikatora povećava sa povećanjem količine letećeg pepela u betonu. Izmerene vrednosti sleganja i rasprostiranja betona se kreću u širokim granicama od 2.8cm za sleganje do Ø70cm za rasprostiranje betona. Mešavine betona sa velikim količinama letećeg pepela zahtevaju veće količine plastifikatora i vrlo su osetljive na malu promenu mase plastifikatora u betonu. Pre dodatka plastifikatora ove mešavine su nehomogene i suve, a nakon dodavanja male količine plastifikatora lako prelaze u tečnu konzistenciju. Naime, mešavina se ponaša vrlo tečno tokom mešanja ali postaje jako kruta i teško obradljiva nakon prestanka rada mešalice (osobina tiksotropije).

Tabela 6. Fizičke karakteristike HVFAC sa 200 kg/m³ cementa

Svojstva betona	200_200_0.488	200_250_0.433	200_300_0.390	200_350_0.355	200_400_0.325
Sleganje, [cm]	12.7	14.8	2.8	3.3	70.0*
Zapreminska masa u svežem stanju, [kg/m ³]	2285	2278	2230	2245	2237
Zapreminska masa u očvrsлом stanju, [kg/m ³]	2303	2295	2244	2268	2255

* Rasprostiranje

Tabela 7. Fizičke karakteristike HVFAC sa 150 kg/m³ cementa

Svojstva betona	150_150_0.610	150_200_0.523	150_250_0.458	150_300_0.407	150_350_0.366
Sleganje, [cm]	8.2	5.8	8.3	4.0	58.5*
Zapreminska masa u svežem stanju, [kg/m ³]	2355	2309	2311	2281	2268
Zapreminska masa u očvrsлом stanju, [kg/m ³]	2352	2313	2316	2291	2283

Zapreminska masa betona u svežem stanju se kreće u granicama od 2230 kg/m³ do 2355 kg/m³ uz primećeno smanjenje sa povećanjem količine pepela koji menja pesak. Zapreminska masa u očvrslom stanju se kreće u granicama od 2244 kg/m³ do 2352 kg/m³. Nije primećeno izdvajanje vode na površini niti segregacija kod ispitanih mešavina betona.

10.1.3.2 Ispitivanje mehaničkih karakteristika HVFAC

Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku, zatezanju cepanjem i modula elastičnosti u različitim starostima prikazani su u Tabelama 8 i 9 za betone sa 200 kg/m³ i 150 kg/m³ cementa, respektivno.

Tabela 8. Mehaničke karakteristike HVFAC sa 200 kg/m³ cementa

Svojstva betona	Starost (dani)	200_200 0.488	200_250 0.433	200_300 0.390	200_350 0.355	200_400 0.325
Čvrstoća pri pritisku, [MPa]	3	11.1	16.3	15.5	17.6	14.8
	7	22.7	22.9	22.2	27.1	23.3
	14	30.4	32.0	32.2	36.2	37.2
	28	34.2	38.2	36.7	42.0	40.2
	90	44.2	42.3	42.8	47.9	54.2
	180	53.1	49.7	42.9	59.5	60.6
Čvrstoća pri zatezanju cepanjem, [MPa]	28	2.9	2.7	2.9	3.7	2.0
	3	26.7	-	-	29.6	-
Statički modul elastičnosti, [GPa]	7	30.5	-	-	31.1	-
	14	32.1	-	-	33.7	-
	28	31.3	32.1	31.8	33.2	32.7
	90	34.8	33.7	32.5	35.1	33.3
	180	37.1	37.4	36.8	34.7	34.9

Tabela 9. Mehaničke karakteristike HVFAC sa 150 kg/m³ cementa

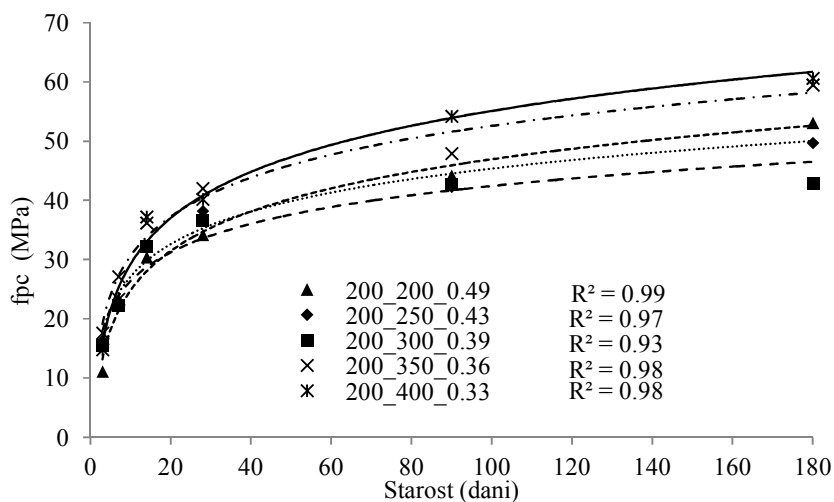
Svojstva betona	Starost (dani)	150_150 0.610	150_200 0.523	150_250 0.458	150_300 0.407	150_350 0.366
Čvrstoća pri pritisku, [MPa]	3	8.5	11.5	10.0	9.9	8.2
	7	15.6	14.2	16.1	16.0	12.9
	14	20.2	22.0	25.3	25.0	19.3
	28	25.7	24.5	26.8	29.8	24.3
	90	32.8	33.8	38.0	39.3	28.5
	180	41.6	43.5	41.4	46.7	40.6
Čvrstoća pri zatezanju cepanjem, [MPa]	2.5	2.3	3.1	2.9	3.2	2.5
	-	-	-	-	-	-
Statički modul elastičnosti, [GPa]	-	-	-	-	-	-
	29.0	31.9	30.0	30.1	30.2	29.0
	35.5	34.6	32.6	30.2	33.1	35.5
	38.1	38.0	36.2	29.6	32.5	38.1

Na Slikama 10 i 11 prikazan je prirast čvrstoće pri pritisku tokom vremena betona sa 200 kg/m³ i 150 kg/m³ cement, tim redom. U poređenju sa očekivanim prirastom čvrstoće pri pritisku cementnih betona bez letećeg pepela, rani prirast čvrstoće ispitanih HVFAC je sporiji ali se nastavlja i nakon 28

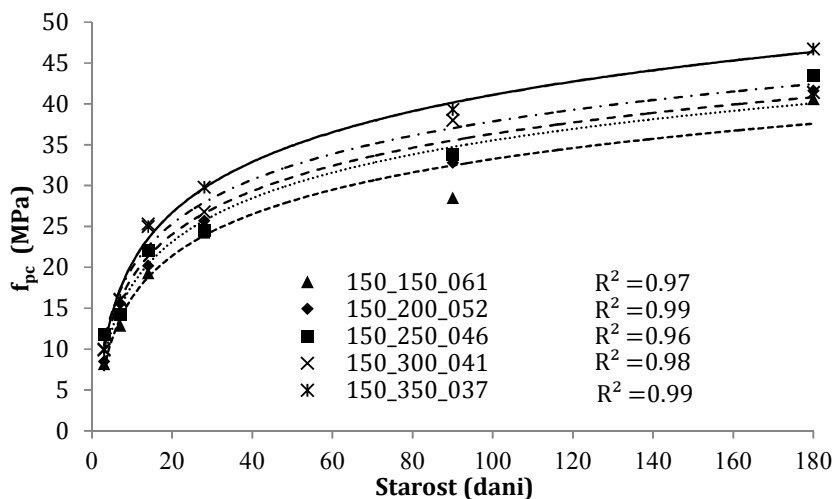
dana. Betoni sa 150 kg/m^3 (mešavine 6 do 10) imaju manje čvrstoće pri pritisku u poređenju sa betonima koji imaju 200 kg/m^3 cementa (mešavine 1 do 5).

Na osnovu prikazanih rezultata ispitivanja čvrstoća može se zaključiti da je odnos čvrstoće pri zatezanju cepanjem i čvrstoće pri pritisku sličan kao kod cementnih betona bez letećeg pepela. Čvrstoće se kreću u granicama od 2.0 MPa do 3.7 MPa sa relativno velikim rasipanjem rezultata pa se ne mogu doneti drugi zaključci o uticaju količine pepela na ovu veličinu.

Modul elastičnosti se kreće u granicama od 30 GPa do 33.2 GPa pri starosti od 28 dana a raste i do 38.1 GPa nakon 180 dana. Odnos između čvrstoće pri pritisku ispitanih uzoraka i modula elastičnosti na 28 dana je sličan kao kod cementnih betona bez letećeg pepela. Na osnovu prikazanih rezultata može se zaključiti da se modul elastičnosti povećava tokom vremena osim za mešavinu 150_300_0.41 kod koje je približno konstantan. Veći modul elastičnosti javlja se kod mešavina sa većom količinom cementa.



Slika 10. Prirast čvrstoće pri pritisku HVFAC sa 200 kg/m^3 cementa i različitim količinama letećeg pepela



Slika 11. Prirast čvrstoće pri pritisku HVFAC sa 150 kg/m^3 cementa i različitim količinama letećeg pepela

Za ispitivanje skupljanja i tečenja odabrana je mešavina 200_200_0.488. Očekuje se da će se javiti najveće skupljanje i tečenje kod ove mešavine obzirom na najveću količinu cementa i najmanju

količinu letećeg pepela. Eksperimentalne vrednosti skupljanja i tečenja (EXP) kao i predikcije koje daje standard EN1992-1-1[37] nakon 180 dana prikazane su na Slici 12 i 13, respektivno.

Skupljanje je predstavljeno u obliku dilatacije (%) a tečenje u formi funkcije tečenja ($10^{-9}/\text{Pa}$) kako bi se isključio uticaj skupljanja i nivoa naprezanja:

Jednačina 2. *Funkcija tečenja*

$$I(t, t_0) = [\varepsilon(t) - \varepsilon_{cs}(t, t_s)]/\sigma(t_0)$$

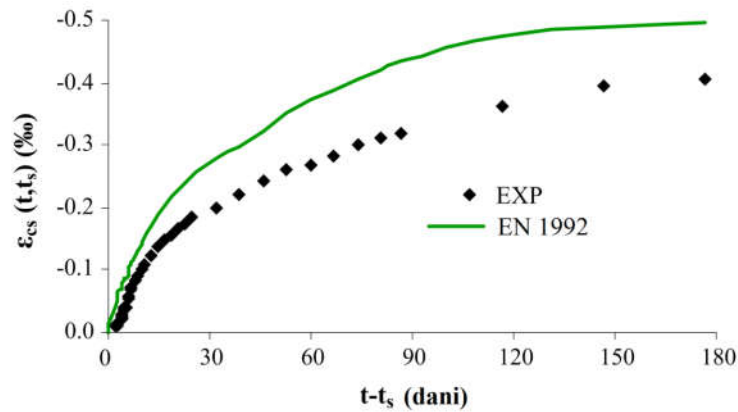
pri čemu je:

$I(t, t_0)$ - funkcija tečenja,

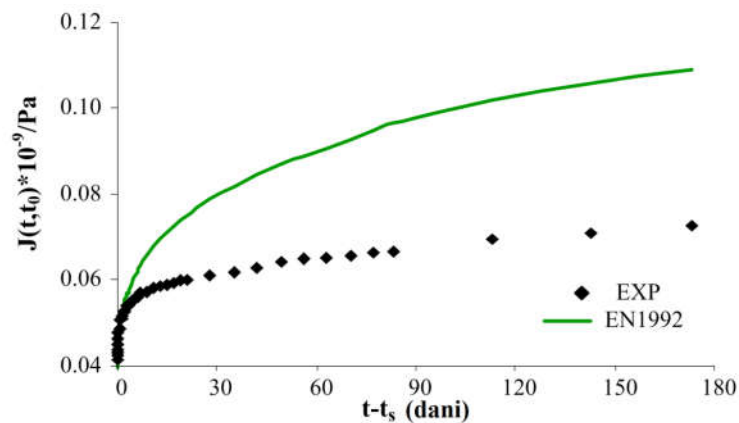
$\varepsilon(t)$ - ukupna dilatacija u vremenu t ,

$\varepsilon_{cs}(t, t_s)$ - skupljanje u vremenu t ,

$\sigma(t_0)$ - napon u trenutku t_0 .



Slika 12. Skupljanje mešavine HVFAC 200_200_0.488



Slika 13. Tečenje mešavine HVFAC 200_200_0.488

Za predikciju skupljanja cementnih betona, model dat u EN1992-1-1 [37] definiše ukupno skupljanje preko formule:

Jednačina 3. *Skupljanje CB definisano u EN1992-1-1 [37]*

$$\varepsilon_{cs}(t, t_s) = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca} = \beta_{ds}(t, t_s) \cdot k_h \cdot \varepsilon_{cd,0} + \beta_{as}(t) \cdot \varepsilon_{ca}(\infty)$$

pri čemu je:

ε_{cd} – dilatacija skupljanja,

ε_{ca} – dilatacija hidratacionog (autogenog) skupljanja,

$\beta_{ds}(t, t_s)$ – funkcija razvoja skupljanja usled sušenja tokom vremena,

k_h – koeficijent koji zavisi od nominalne veličine uzorka,

$\varepsilon_{cd,0}$ – nominalna dilatacija slobodnog skupljanja usled sušenja,

$\beta_{as}(t)$ – funkcija razvoja hidratacionog skupljanja tokom vremena,

$\varepsilon_{ca}(\infty)$ – konačna vrednost hidratacionog skupljanja.

Kao što se može videti sa **Error! Reference source not found.** 14, skupljanje HVFAC se odvija prema logaritamskom zakonu a model skupljanja definisan u EN1992-1-1 [37] značajno precenjuje vrednosti skupljanja HVFAC. Može se zaključiti da je skupljanje HVFAC značajno manje u odnosu na cementni beton koji ima istu čvrstoću na 28 dana.

U standardu EN1992-1-1 [37] funkcija tečenja je definisana izrazom:

Jednačina 4. *Funkcija tečenja definisana u EN1992-1-1 [37]*

$$I(t, t_0) = \frac{1}{E_{c(28)}} + \frac{\varphi(t, t_0)}{E_{c(t_0)}} = \frac{1}{E_{c(28)}} + \frac{\varphi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0) \cdot \beta_c(t, t_0)}{E_{c(t_0)}}$$

pri čemu je:

$E_{c(28)}$ – modul elastičnosti na 28 dana,

$\varphi(t, t_0)$ – koeficijent tečenja koji definiše tečenje između vremena t i t_0 , a odnosi se na elastičnu dilataciju na 28 dana,

$E_{c(t_0)}$ – modul elastičnosti u vremenu t ,

φ_{RH} – koeficijent koji zavisi od vlažnosti sredine,

$\beta(f_{cm})$ – koeficijent koji zavisi od čvrstoće betona,

$\beta(t_0)$ – koeficijent koji zavisi od starosti betona u trenutku nanošenja opterećenja,

$\beta_c(t, t_0)$ – koeficijent koji opisuje razvoj tečenja kroz vreme nakon opterećivanja.

Sa Slike 15 se može videti da je prirast tečenja betona najveća u prvih 10-20 dana, dok se intenzitet smanjuje nakon toga i teži približno konstantantnoj vrednosti. Objašnjenje ove pojave leži delimično u činjenici da je prirast čvrstoće u ranom periodu vrlo spor, dok je znatno izraženiji u kasnijem periodu. Sa Slike 15 se takođe može zaključiti da je tečenje HVFAC značajno precenjeno modelom za tečenje datim u EN1992-1-1 [37]. Ovaj zaključak je u skladu sa rezultatima ispitivanja iz literature [38]. Kod HVFAC koji imaju istu čvrstoću u trenutku nanošenja opterećenja kao cementni beton imaće manje tečenje zbog većeg prirasta čvrstoće pri pritisku HVFAC.

10.1.3.3 Ispitivanje karbonatizacije HVFAC

Kako bi se ispitala otpornost na dejstvo karbonatizacije, uzorci HVFAC su bili izloženi prirodnim uslovima od 0.0517% CO₂, pri vlažnosti od RH 52.5% i temperaturi od 24° C u laboratoriji tokom 40 meseci. Posle 24 i 40 meseci, izmerena je dubina karbonacije na ovim uzorcima primenom rastvora fenoftaleina na sveže razbijenoj površini betona [39], koristeći mernu skalu sa tačnošću od ±0.5 mm. Dubine karboniranja HVFAC uzoraka sa 150 kg/m³ cementa prilikom izlaganja CO₂ u prirodnim uslovima u periodu od 24 do 40 meseci prikazane su u Tabelama 10 i 11, kao i Slici 14.

Sa Slike 14 se vidi da povećanje sadržaja pepela u betonu sa 150 kg/m³ na 250 kg/m³ povećava dubinu karbonizacije. Međutim, daljim porastom letećeg pepela do 350 kg/m³, dubina karbonizacije se smanjila. Očigledno je da je u ovom konkretnom slučaju postojala maksimalna dubina karbonizacije u zavisnosti od količine letećeg pepela u betonu. Dubina karbonacije betona sa 350 kg/m³ letećeg pepela bila je još manja u poređenju sa betonom sa 150 kg/m³ letećeg pepela.

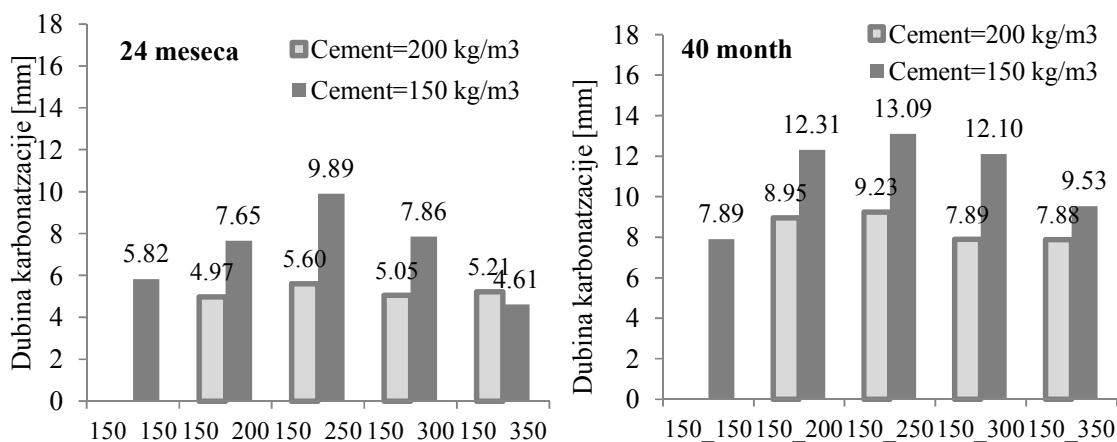
Tabela 10. Dubina karbonatizacije betona sa 150 kg/m³ cementa

	150_150 0.610	150_200 0.523	150_250 0.458	150_300 0.407	150_350 0.366
Dubina karbonatizacije 24m* (mm)	5.82	7.65	9.89	7.86	4.61
Koeficijent karbonatizacije 24m* (mm/god ^{0.5})	4.12	5.41	6.99	5.56	3.26
Dubina karbonatizacije 40m* (mm)	7.89	12.31	13.09	12.10	11.98
Koeficijent karbonatizacije 40m* (mm/god ^{0.5})	4.32	6.74	7.17	6.63	6.56

* broj meseci

Tabela 11. Dubina karbonatizacije betona sa 200 kg/m³ cementa

	200_200 0.488	200_250 0.433	200_300 0.390	200_350 0.355	200_400 0.325
Dubina karbonatizacije 24m* (mm)	-	4.97	5.60	5.05	5.21
Koeficijent karbonatizacije 24m* (mm/god ^{0.5})	-	3.51	3.96	3.57	3.68
Dubina karbonatizacije 40m* (mm)	-	8.95	9.23	7.89	7.88
Koeficijent karbonatizacije 40m* (mm/god ^{0.5})	-	4.90	5.06	4.32	4.32

**Slika 14.** Dubina karbonatizacije HVFAC betona u prirodnim uslovima nakon a) 24 meseca (levo) i b) 40 meseci (desno)

Sa povećanjem količine letećeg pepela u ovim betonskim mešavinama, količina Ca(OH)₂ opada zato što se troši u pucolanskoj reakciji. Minimalna vrednost Ca(OH)₂ dostignuta je sa 250 kg/m³ letećeg pepela, imajući u vidu da je u ovoj betonskoj smeši postignuta maksimalna dubina karbonizacije. Pošto je količina dostupnog Ca(OH)₂ ograničena zbog male količine cementa (150 kg/m³), količina Ca(OH)₂ ostaje konstantna bez obzira na dalje povećanje pepela. S druge strane, može se videti da s povećanjem količine letećeg pepela čvrstoća betona ostaje konstantna do vrednosti od 250 kg/m³ letećeg pepela, a nakon toga se čvrstoća betona lagano povećava sa daljim povećanjem količine pepela. Razlog može biti činjenica da kada se koristi velika količina letećeg pepela, a da celokupna količina ne može reagovati u pucolanskoj reakciji, zbog ranije pomenutog nedostatka Ca(OH)₂. Deo letećeg pepela postaje filer i na taj način povećava čvrstoću betona, smanjuje poroznost i samim tim povećava otpornost na karbonaciju [40]. Ovaj pozitivan efekat punila može nadoknaditi negativan efekat redukovano Ca(OH)₂, koji je osnovna alkalna komponenta betona. Kada se kombinuju ova dva suprotna efekta (smanjenje količine Ca(OH)₂ i povećanje čvrstoće betona), mogu se izvući sledeći zaključci: za betone do 250 kg/m³ letećeg pepela dubina karbonizacije se povećava sa

povećanje sadržaja letećeg pepela (smanjenje $\text{Ca}(\text{OH})_2$ i konstantna čvrstoća betona); s daljim povećanjem količine pepela smanjuje se dubina karbonizacije (konstantna količina $\text{Ca}(\text{OH})_2$ i neznatno povećanje čvrstoće betona). Nakon 40 meseci izloženosti prirodnim uslovima, beton sa 150 kg/m^3 cementa pokazao je sličan trend kao u slučaju 24 meseca (Slika 14b). Maksimalna vrednost dubine karbonizacije ponovo je određena za beton sa 250 kg/m^3 letećeg pepela. Nakon toga, dubina karbonizacije opada sa porastom letećeg pepela, ali taj je trend bio manje izražen nego posle 24 meseca izlaganja prirodnim uslovima.

Slika 14 pokazuje da kod betona sa 200 kg/m^3 cementa nije došlo do značajnog povećanja dubine karbonacije bez obzira na porast količine letećeg pepela u HVFAC. Najveća vrednost dubine karbonizacije u ovom slučaju nije bila očigledna. Iako vrednosti izmerene dubine karbonizacije izgledaju kvantitativno različito u grupama sa 150 kg/m^3 i 200 kg/m^3 cementa, gore navedeno objašnjenje se može primeniti za obe grupe HVFAC. Može se videti da, kako se povećava količina pepela, povećava se i čvrstoća betona zbog dvostrukog efekta: pucolanske reakcije i efekta letećeg pepela kao filera. Ovo povećanje je bilo još izraženije u grupi HVFAC sa 200 kg/m^3 cementa u poređenju sa betonima sa manjom količinom cementa. Sa druge strane, količina $\text{Ca}(\text{OH})_2$ konstantno opada zbog pucolanske reakcije. U ovom slučaju, smanjenje količine $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dostiže minimalnu vrednost na 300 kg/m^3 letećeg pepela, zbog veće količine korišćenog cementa. Kada se ova dva suprotna efekta kombinuju, beton će dostići približno konstantnu vrednost dubine karbonizacije, bez obzira na količinu letećeg pepela. Isti trend zadržao se i nakon 40 meseci izloženosti prirodnim uslovima (slika 17). Dubina karbonacije lagano se smanjuje s porastom letećeg pepela za više od 300 kg/m^3 zbog neznatnog povećanja čvrstoće na pritisak u ovoj grupi HVFAC. Može se primetiti da grupa HVFAC sa 200 kg/m^3 ima niži koeficijent karbonacije, dok grupa HVFAC sa 150 kg/m^3 ima veći koeficijent karbonacije u poređenju sa usvojenom graničnom vrednošću od $6 \text{ mm/god}^{0.5}$. Očigledno je da je testirani HVFAC sa 150 kg/m^3 cementa imao nisku otpornost na karbonizaciju bez obzira na korišćenu količinu cementa ili letećeg pepela. Na osnovu sprovedenih merenja karbonacionih karakteristika HVFAC može se zaključiti da dubina karbonacije je funkcija kako količine $\text{Ca}(\text{OH})_2$, tako i čvrstoće na pritisak pritiska. Povećavanje količine letećeg pepela (uz konstantnu količinu cementa) može rezultirati većom ili manjom dubinom karbonizacije u zavisnosti od toga koja od ova dva suprotna efekta preovlađuju.

Sračunati koeficijenti karbonizacije za grupu HVFAC sa 200 kg/m^3 cementa zadovoljavaju preporučenu maksimalnu vrednost od $6 \text{ mm/god}^{0.5}$. Sa druge strane, grupa testiranih HVFAC-a sa 150 kg/m^3 cementa ima manju otpornost na karbonatizaciju (veći koeficijenti karbonizacije) u odnosu na preporučenu vrednost bez obzira na korišćenu količinu cementa ili letećeg pepela.

10.2 Eksperimentalno ispitivanje ponašanja armiranobetonskih greda pri savijanju pod kratkotrajnim opterećenjem

Nakon ispitivanja fizičkih, mehaničkih i karakteristika trajnosti HVFAC, definisan je plan ispitivanja AB greda. U prvom delu, izvršeno je ispitivanje ponašanja AB greda prilikom savijanja na uzorcima AB greda statičkog sistema proste grede napravljenih od HVFAC i cementnog betona. Napravljen su i ispitane četiri AB grede u testu savijanja silama u trećinama raspona. Usvojena su dva procenta armiranja greda podužnom armaturom a sve grede su opremljene instrumentima za merenje pomeranja i dilatacija u karakterističnim presecima duž grede.

10.2.1 Materijali, priprema uzoraka i merni instrumenti

Eksperimentalno ispitivanje ponašanja greda prilikom savijanja sprovedeno je na dve grupe greda projektovanih sa istom čvrstoćom betona pri pritisku nakon 90 dana. Odabrane recepture HVFAC mešavine betona (200_350_0.355) i mešavine uporednog cementnog betona (OPC_F) prikazane su u Tabeli 12.

Nakon mešanja, beton je ugrađen u oplatu greda i u kalupe za ispitivanje čvrstoće pri pritisku (kocka stranice 10 cm), čvrstoće pri zatezanju savijanjem (prizma dimenzija 12x12x36 cm), čvrstoće pri zatezanju cepanjem (cilindar dimenzija Ø15x15 cm) i modula elastičnosti (cilindar dimenzija Ø15x30 cm). Sve grede bile su pravougaonog poprečnog preseka širine 20 cm i visine 30 cm. Ukupna dužina svih greda bila je 350 cm a raspon 300 cm. Sa obe strane greda je prepuštena preko oslonaca u dužini 25 cm kako bi se obezbedilo adekvatno sidrenje armature.

Tabela 12. Mešavine betona za ispitivanje savijanja

Komponentni materijali	Vrsta	C200_F350	OPC_F
Agregat (kg/m ³)	Rečni 0/4	624	821
	Rečni 4/8	486	547
	Rečni 8/16	324	456
Cement (kg/m ³)	CEM II 42.5 R	200	300
Leteći pepeo (kg/m ³)	Klasa F	350	0
Voda (kg/m ³)	Voda sa česme	195	175
Dodatak (kg/m ³)	Superplastifikator	2.2	0
W/CM*		0.355	0.583

*vodovezivni faktor - maseni odnos vode i ukupnih cementnih materijala

Nakon ugrađivanja betona svi uzorci su vibrirani na potresnom stolu dok je kompaktiranje betona u gredama obezbedeno upotrebom vibratorke igle. Uzorci pripremljeni za ispitivanje mehaničkih karakteristika betona negovani su na dva načina: (1) 24 časa nakon ugradnje negovani su u laboratoriji (temperatura 22±2°C i relativna vlažnost 46±5%) pokriveni vlažnom jutom a nakon 24 časa negovani su u vodi do ispitivanja, (2) nega ista kao nega greda koja podrazumeva kvašenje uzoraka i greda koji su pokriveni vlažnom jutom i plastičnom folijom tri puta dnevno prva tri dana nakon ugradnje; kvašenje uzoraka dva puta dnevno tokom naredna četiri dana pri čemu je jedna strana oplata skinuta; kvašenje jednom dnevno još sedam dana pri čemu je kompletna oplata skinuta sa uzoraka i greda.

Rezultati ispitivanja zapreminske mase betona u svežem i očvrslom stanju kao i sleganja tj. rasprostiranja betona dati su u Tabeli 13 u nastavku.

Tabela 13. Fizičke karakteristike betona za ispitivanje savijanja

	Zapreminska masa u svežem stanju (kg/m ³)		Zapreminska masa u očvrslom stanju (kg/m ³)		Sleganje / Rasprostiranje (mm)	
	μ	CoV	μ	CoV	μ	CoV
200_350_0.355	2236.6	3.4	2240.0	1.2	568	14.8
OPC_F	2410.3	1.7	2372.0	2.4	113	14.9

Ugradljivost mešavine 200_350_0.355 je tečna i pripada klasi F5 (rasprostiranje između 560 mm i 620 mm) prema klasifikaciji datoj u EN 206 [10]. Kruća konzistencija betona izmerena je kod običnog cementnog betona OPC_F i pripada klasi S3 (sleganje između 100 mm i 150 mm). Zapreminska masa u svežem i očvrslom stanju je 7.5% veća kod mešavine OPC u poređenju sa HVFAC. Mehaničke karakteristike ispitanih betona prikazane su u Tabeli 14. Čvrstoća pri pritisku betona negovanih u vodi (1) nakon 90 dana razlikuje se za 3%, dok je ta razlika veća pri nezi (2). Grede napravljene sa OPC_F mešavinom imale su do 20% veću čvrstoću pri pritisku nakon 90 dana nege (2) kao što se vidi u Tabeli 15.

Čvrstoća betona pri zatezanju cepanjem kod obe vrste betona imala je slične vrednosti za uzorke negovane na oba načina, dok je čvrstoća pri zatezanju savijanjem bila do 24% veća kod betona

C200_F350. Modul elastičnosti je bio veći kod uzoraka OPC_F pri svim merenim starostima, a posebno kod uzoraka negovanih negom (2) gde je razlika i do 16%. Manji modul elastičnosti je posledica manje količine agregata u mešavini 200_350_0.355 koja je usvojena iz zapreminske jednačine. Na osnovu prikazanih rezultata može se zaključiti da je uticaj različite vrste nege izraženiji kod HVFAC u poređenju sa OPC.

Tabela 14. Mehaničke karakteristike betona negovanih u vodi - nega (1)

	Starost (dani)	Čvrstoća pri pritisku (MPa)					Čvrstoća pri zat. cep. (MPa)	Modul elastičnosti (GPa)	
		3	7	14	28	90	28	28	90
200_350_0.355	μ	18.8	31.9	39.0	42.0	53.5	3.6	31.3	33.6
	CoV (%)	3.8	2.8	4.7	14.8	5.5	4.6	8.7	8.9
OPC_F	μ	29.5	37.3	42.7	44.7	52.4	3.4	35.1	39.4
	CoV (%)	6.2	5.5	9.8	8.5	4.8	13.7	11.7	7.6

Tabela 15. Mehaničke karakteristike betona negovanih kao grede - nega (2)

	Starost (dani)	Čvrstoća pri pritisku (MPa)		Čvrstoća pri zat. cep. (MPa)	Čvrstoća pri zat. sav. (MPa)	Modul elastičnosti (GPa)
		92 (79)*	87 (83)*	90	90	90
200_350_0.355	μ	47.6	53.1	2.8	4.90	27.6
	CoV (%)	9.68	1.52	3.84	1.70	4.35
OPC_F	μ	58.5	62.4	2.8	6.4	33.0
	CoV (%)	5.34	1.20	21.11	6.18	2.15

* Starost greda OPC_F

Napravljene su i ispitane po dve AB grede napravljene od mešavine OPC_F (OPC-1 i OPC-2) i mešavine 200_350_0.355 (HVFAC-1 i HVFAC-2). Usvojena podužna i poprečna armatura u gredama prikazana je u Tabeli 16. Sve grede su armirane podužnom zategnutom armaturom klase B500B prečnika Ø18 mm i pritisnutom armaturom B500B prečnika Ø8 mm. Osiguranje od loma smicanjem obezbeđeno je korišćenjem uzengija prečnika Ø8 mm i Ø10 mm. Armatura koja je ugrađena u grede je ispitana kako bi se analiza ponašanja greda izvršila sa tačnim vrednostima granice razvlačenja ($\sigma_{0.2\%}$), modula elastičnosti (E) i dilatacije pri lomu (ϵ_{lom}). Rezultatai merenja su prikazani u Tabeli 17. Dobijeni rezultati ispitivanja pokazuju manju granicu razvlačenja i modul elastičnosti kod podužne armaturene šipke prečnika Ø18 mm u odnosu na armaturu korišćenu za uzengije. Ova armatura je pokazala izraženije duktilno ponašanje i najveću dilataciju kidanja.

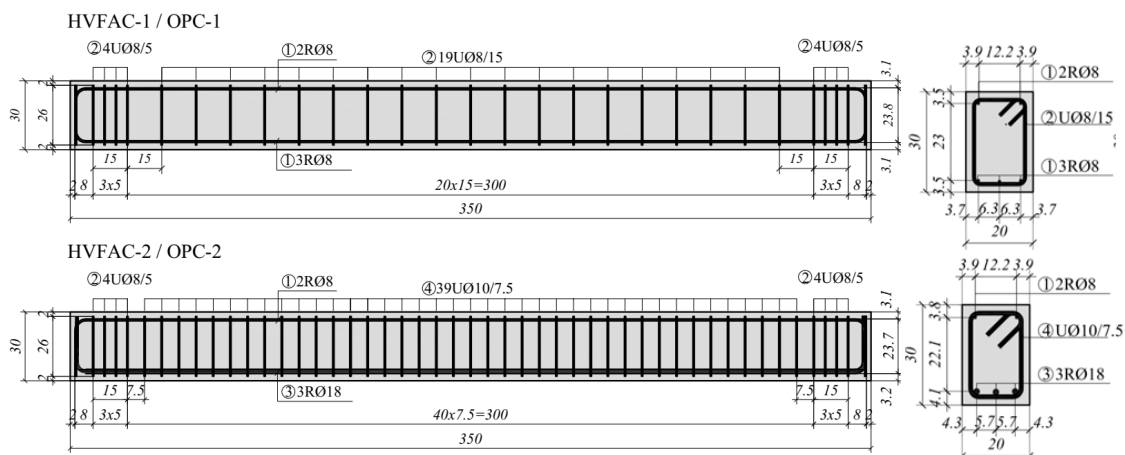
Tabela 16. Usvojena armatura u gredama za savijanje

Oznaka	Beton	Podužna armatura	Poprečna armatura
OPC-1	OPC_F	3 Ø 8 mm	Ø8/150 mm
OPC-2		3 Ø 18 mm	Ø10/75 mm
HVFAC-1	C200_F350	3 Ø 8 mm	Ø8/150 mm
HVFAC-2		3 Ø 18 mm	Ø10/75 mm

Tabela 17. Rezultati ispitivanja armature korišćene za ispitivanje savijanja

\varnothing (mm)	$\sigma_{0.2\%}$ (MPa)	σ_m (MPa)	E (GPa)	ϵ_{lom} (%)
8	623.7	732.9	202.0	21.3
10	626.8	749.4	210.0	24.7
18	560.4	645.6	200.0	33.6

Prva grupa greda je armirana minimalnim procentom armiranja (0.28%) a druga procentom armiranja od 1.46%. Osiguranje od loma smicanjem obezbeđeno je korišćenjem uzengija čija je nosivost značajno veća od nosivosti na savijanje obe grupe greda. Šema armiranja obe grupe greda prikazana je na Slici 15.



Slika 15. Šema armiranja greda za ispitivanje savijanja

Nanošenje sile vršeno je hidrauličkom preskom kapaciteta 400 kN koja deluje u sredini raspona grede i preko čeličnog grednog profila prenosi silu podjednako u trećine raspona grede. Opterećenje je nanošeno u koracima od 5, 10 i 20 kN. Sve grede su ispitane do loma i tokom procesa nanošenja opterećenja vršeno je merenje sledećih parametara: vertikalni ugib grede, dilatacije u pritisnutom betonu i dilatacije u zategnutoj podužnoj armaturi.

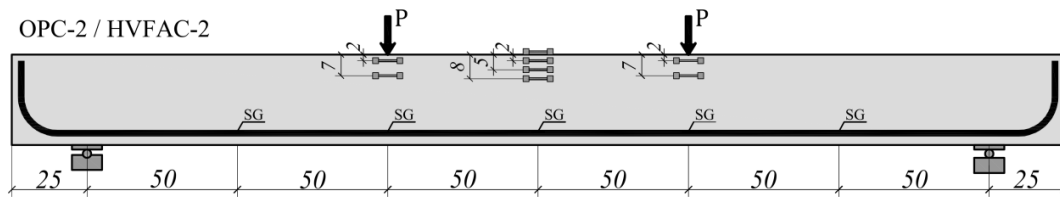
Merenje vertikalnog ugiba vršeno je korišćenjem elektronskog (Linear Variable Displacement Transducers-LVDT) i mehaničkog ugibomera (MDG) u pet preseka grede na svakih 50 cm. Položaj i izgled korišćenih ugibomera prikazani su na Slici 16a,b. Merenje ugiba vršeno je sa obe strane grede a dva mehanička ugibomera su postavljena iznad oslonaca kako bi se pratilo sleganje oslonaca grede.



Slika 16. a) Elektronski ugibomer, b) mehanički ugibomer, c) senzori sa vibrirajućom žicom

Kako bi se u potpunosti pratilo ponašanje grede opterećene poprečnim opterećenjem, vršeno je kontinualno merenje dilatacija u betonu i armaturi. Merenje dilatacija u pritisnutom betonu vršeno je korišćenjem senzora sa vibrirajućom žicom (VWSG) prikazanih na Slici 16c. Merenje dilatacija u betonu sprovedeno je u tri preseka, preseku u sredini grede i presecima udaljenim 50 cm od sredine grede. Postavljeno je više senzora po visini preseka grede kako bi se izmerila raspodela dilatacija po

visini preseka. Dilatacije u podužnoj armaturi kontinualno su merene korišćenjem mernih traka (SG) koje su postavljene na svaku od 3 podužne zategnute armaturne šipke. Dispozicija mernih uređaja prikazana je na Slici 17.



Slika 17. Dispozicija mernih uređaja na gredama za ispitivanja savijanja

10.2.2 Rezultati ispitivanja

Sve grede su ispitane do loma i, kao što je bilo očekivano, kod svih je došlo do loma usled prekoračenja nosivosti na savijanje. U Tabeli 18 su prikazani svi bitni parametri koji opisuju ponašanje greda prilikom savijanja: oznake greda, podužna armatura, opterećenje prilikom pojave prvih prslina ($2P_n$), opterećenje prilikom početka tečenja greda ($2P_y$), opterećenje pri lomu ($2P_u$), ugib u sredini greda pri eksploatacionom opterećenju (a_{ser}), u trenutku početka tečenja (a_y), u trenutku loma (a_u), maksimalna dilatacija u betonu (ϵ_c) i maksimalna dilatacija u podužnoj armaturi (ϵ_s). Kao eksploataciono opterećenje usvojena je vrednost od 40% granične nosivosti greda.

Sve grede su pokazale slično ponašanje do loma. Prve prsline pojavile su se u srednjoj trećini raspona i kao što se može videti iz Tabele 18, javile su pri nižim vrednostima opterećenja kod obe grupe greda napravljenih sa HVFAC. Kod greda sa minimalnim procentom armiranja, prve prsline su se javile pri 25% a kod greda sa većim procentom armiranja pri 16% manjim opterećenjem kod HVFAC greda nego kod OPC greda. Pri daljem povećanju opterećenja broj prslina, njihova dužina i širina se povećavala u srednjoj trećini raspona. Pri opterećenju većem od 50% granične nosivosti greda pojavile su se i kose prsline kao nastavak vertikalnih prslina u zonama blizu oslonaca kao posledica smicanja. Kod svih ispitanih greda došlo je do tečenja armature pokazujući duktilno ponašanje greda do loma.

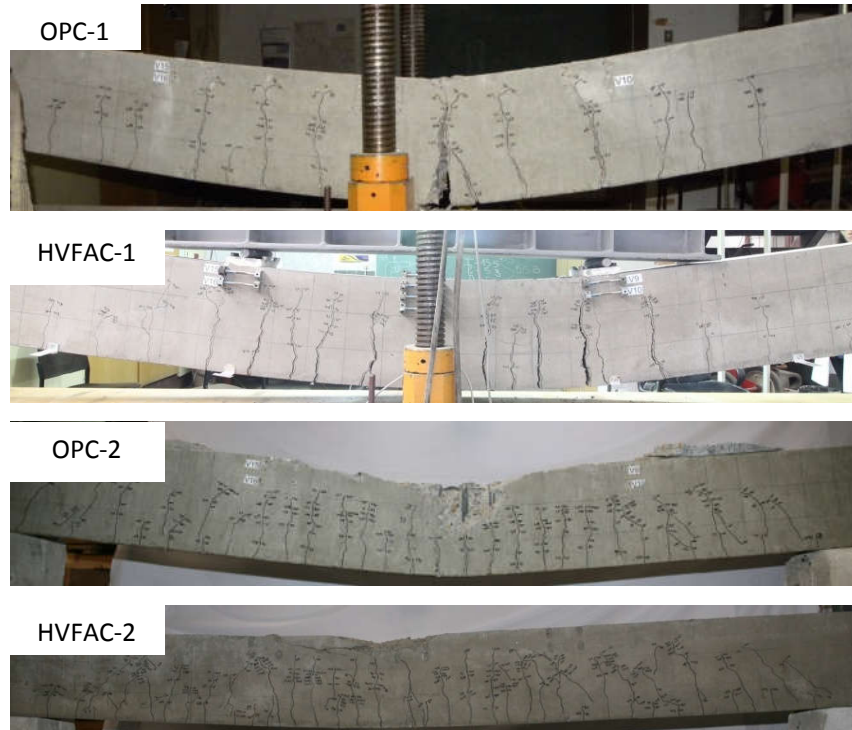
Tabela 18. Rezultati eksperimentalnog ispitivanja greda prilikom savijanja

	Armatura	$2P_n$ (kN)	$2P_y$ (kN)	$2P_u$ (kN)	a_{ser} (mm)	a_y (mm)	a_u (mm)	ϵ_c (‰)	ϵ_s (‰)
OPC-1	3Ø8	20	40	51.3	2.2	11.5	127.5	4.3	51.6
HVFAC-1	3Ø8	15	35	55.1	4.3	17.8	122.0	4.7	66
OPC-2	3Ø18	30	210	224.1	7.1	22.7	45.2	4.6	5.7
HVFAC-2	3Ø18	20	210	225.3	7.4	23.6	57.6	4.9	21.0

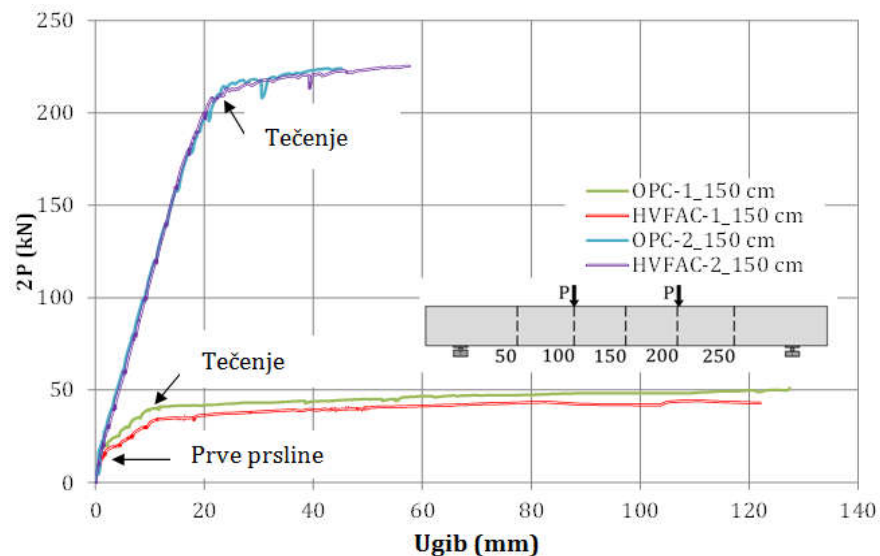
Kod greda sa minimalnim procentom armiranja, do loma greda došlo je nakon loma betona u zoni maksimalnog pritiska u betonu i kidanja armature u istom preseku (Slika 21). Kod greda sa većim procentom armiranja, do loma obe grede je došlo na sličan način, lomom pritisnutog betona u preseku u srednjoj zoni greda (Slika 18).

Na Slici 19 su prikazani dijagrami sila-pomeranje koji pokazuju slično ponašanje OPC i HVFAC greda iz grupe sa istom armaturom. Veza sile i pomeranja je linearna do pojave prvih prslina nastalih usled savijanja. Krutost greda sa istim procentom armiranja je do te tačke praktično ista. Kod greda sa minimalnim procentom armiranja, nakon pojave prvih prslina, krutost greda HVFAC-1 je do 10% manja u odnosu na krutosti greda OPC-1. Kod greda sa većim procentom armiranja krutost greda

OPC-2 i HVFAC-2 ostala je praktično ista do loma greda. Granična sila loma HVFAC i OPC greda sa istim procentom armiranja razlikovala se za manje od 10% u obe grupe greda. Ako se duktilnost greda predstavi odnosom ugiba pri lomu i ugiba u trenutku pojave tečenja (a_u/a_y) vidi se 40% veća duktilnost grede OPC-1 u odnosu na gredu HVFAC-1 dok je u drugoj grupi duktilnost grede HVFAC-2 bila 20% u odnosu na gredu OPC-2.



Slika 18. Lom greda sa minimalnim i sa većim od minimalnog procenta armiranja

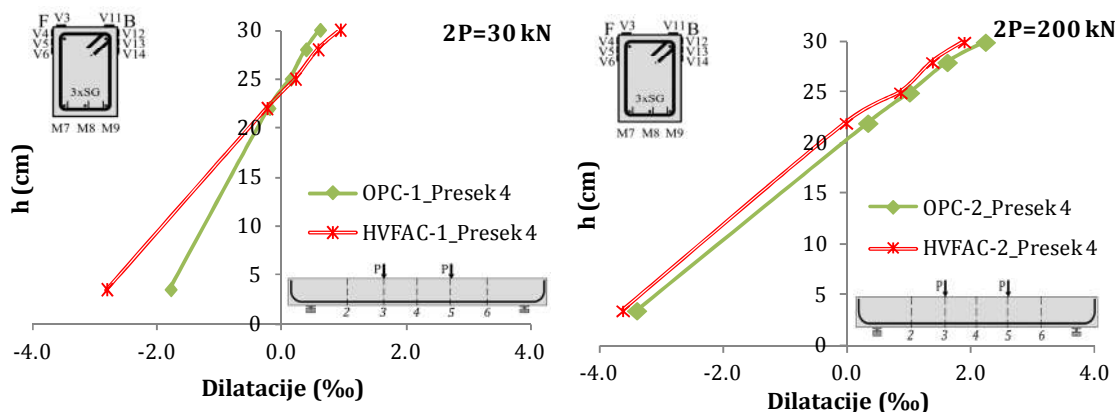


Slika 19. Dijagram sila-pomeranje za ispitane grede

Generalno veći ugibi usled kratkotrajnog opterećenja javili se kod HVFAC greda u odnosu na OPC grede pri stanju eksploatacije i loma. Ova razlika je značajno izražena kod greda sa minimalnim procentom armiranja gde je eksploatacioni ugib HVFAC-1 grede 48% veći u odnosu na uporednu

OPC-1 gredu. Ova razlika se smanjuje sa povećanjem opterećenja pa se ugibi pri lomu ne razlikuju bitno. Kod greda sa većim procentom armiranja razlika ugiba greda HVFAC-2 i OPC-2 je manja od 5% pri eksploatacionom opterećenju ali nešto veća u trenutku loma (22%).

Rezultati merenja dilatacija u betonu i armaturi pokauju sličan trend kod OPC i HVFAC greda. Veće vrednosti dilatacija zatezanja u podužnoj armaturi izmerene su kod HVFAC greda i to do 35% u prvoj i do 70% u drugoj grupi greda. Ova merenja zavise od rasporeda prslina i blizine prslina i mernog mesta pa se ne mogu direktno porediti. Maksimalne dilatacije u pritisnutom betonu su veće kod HVFAC greda ali je ta razlika maksimalno 7%. Raspodela dilatacija po visini poprečnog preseka u trenutku bliskom lomu prikazana je na Slici 20. Kod oba tipa greda i oba procenta armiranja raspored dilatacija je linearan po visini. Visina pritisnute zone je 2% i 13% veća kod greda OPC-1 i OPC-2 u odnosu na uporedne HVFAC grede.



Slika 20. Raspodela dilatacija po visini preseka za grede sa minimalnim (levo) i većim procentom armiranja (desno)

10.3 Eksperimentalno ispitivanje ponašanja AB greda pri smicanju pod kratkotrajnim opterećenjem

Drugi deo eksperimentalnog ispitivanja AB greda osmišljen je sa ciljem da omogući komparativnu analizu ponašanja AB greda na uzorcima istog statičkog sistema i dimenzija kao u slučaju greda ispitanih na savijanje. Napravljene su dve grupe greda: tri grede od HVFAC (200_200_0.488) i tri grede od uporednog OPC (OPC_S). Po jedna greda iz svake grupe napravljena je bez poprečne armature dok su druge dve napravljene sa dva različita procenta armiranja poprečnom armaturom.

10.3.1 Materijali, priprema uzoraka i merni instrumenti

Grede napravljene sa HVFAC mešavinom i uporedne cemente grede napravljene su tako da imaju iste geometrijske karakteristike i projektovanu čvrstoću pri pritisku nakon 90 dana. Količine komponentnih materijala u obe mešavine betona prikazane su u Tabeli 19.

Procedura mešanja, ugradnje i negovanja betona u kalupima za ispitivanje mehaničkih karakteristika kao i u slučaju greda bila je ista kao u prvom delu ispitivanja greda prilikom savijanja. Rezultati ispitivanja zapreminske mase betona u svežem i očvrslom stanju kao i sleganja tj. rasprostiranja betona dati su u Tabeli 20 u nastavku.

Zapreminske mase betona 200_200_0.488 i OPC_S u svežem i očvrslom stanju razlikovale su se za maksimalno 6% pri čemu je mešavina sa letećim pepelom imala manju zapremisnaku masu. Ugradljivost betona je takođe bila slična i odgovara klasi S3 prema klasifikaciji datoj u EN 1992-1-1.

Tabela 19. Vrsta i količina komponentnih materijala u mešavinama betona za ispitivanje smicanja

Komponentni materijali	Vrsta		200_200_0.488	OPC_S
Agregat (kg/m ³)	Rečni	0/4	804.5	826.5
	Rečni	4/8	482.7	551.0
	Rečni	8/16	321.8	459.2
Cement (kg/m ³)	CEM II 42.5 R		200.0	284.6
Leteći pepeo (kg/m ³)	Klasa F		200.0	0
Voda (kg/m ³)	Voda sa česme		195.0	175.0
Dodatak (kg/m ³)	Superplastifikator		0	0
W/CM*			0.488	0.615

*vodovezivni faktor - maseni odnos vode i ukupnih cementnih materijala

Tabela 20. Fizičke karakteristike betona za ispitivanje smicanja

	Zapreminska masa u svežem stanju (kg/m ³)		Zapreminska masa u očvrslom stanju (kg/m ³)		Sleganje / Rasprostiranje (mm)	
	μ	CoV	μ	CoV	μ	CoV
200_200_0.488	2308.6	1.1	2273.3	1.9	103.0	25.3
OPC_S	2423.0	1.3	2396.8	0.9	112.0	39.3

Mehaničke karakteristike betona ispitane su na istim uzorcima tokom istih procedura kao i u slučaju uzoraka u prvom delu ispitivanja greda. Rezultati ispitivanja uzoraka negovanih u vodi (1) i negovanih na isti način kao grede (2) prikazani su u Tabelama 21 i 22.

Tabela 21. Mehaničke karakteristike betona negovanih u vodi - nega (1)

	Starost (dani)	Čvrstoća pri pritisku (MPa)					Čvrstoća pri zat. cep. (MPa)	Modul elastičnosti (GPa)	
		3	7	14	28	90		28	28
200_200_0.488	μ	13.1	19.3	25.9	32.4	41.3	2.7	33.4	40.4
	CoV (%)	1.8	3.8	2.4	0.5	0.9	4.6	5.6	11.4
OPC_S	μ	27.3	31.0	38.2	42.7	45.9	2.8	37.2	46.0
	CoV (%)	1.5	11.8	5.4	2.2	2.2	12.3	0.5	7.2

Tabela 22. Mehaničke karakteristike betona negovanih kao grede - nega (2)

	Starost (dani)	Čvrstoća pri pritisku (MPa)			Čvrstoća pri zat. cep. (MPa)	Čvrstoća pri zat. sav. (MPa)	Modul elastičnosti (GPa)
		90 (85)*	92 (90)*	97 (92)*			
200_200_0.488	μ	40.1	43.6	41.9	90	4.3	31.3
	CoV (%)	2.5	20.6	3.4	10.9	7.7	8.6
OPC_S	μ	49.2	46.7	53.8	3.9	7.5	41.6
	CoV (%)	4.0	11.0	3.6	21.0	6.2	2.4

* Starost greda OPC_S

Kao što se može videti iz Tabela 21 i 22, čvrstoća pri pritisku betona nakon 90 dana razlikovala se za 10% kada je ispitivanje vršeno na uzorcima negovanim u vodi a 22% na uzorcima negovanim isto kao grede. Slično tako, i čvrstoća pri zatezanju cepanjem je manja kod uzoraka napravljenim od betona 200_200_0.488 i to 4% za negu (1) i 30% za negu (2). Čvrstoća pri zatezanju savijanjem je takođe manja kod mešavine sa letećim pepelom za čak 42%. Imajući u vidu da je čvrstoća pri pritisku tj. zatezanju bitan parametar koji utiče na nosivost AB greda pri smicanju, ova razlika nije prihvatljiva pa je izvršena normalizacija smičućeg napona na sledeći način:

Jednačina 5. *Normalizovani smičući napon*

$$v_u = \frac{P_u}{0.9 \cdot d \cdot b_w \cdot \sqrt[3]{f_c}}$$

gde je:

P_u granična smičuća sila koja deluje na gredu (jedna polovina ukupne sile koja se nanosi na gredu);

b_w širina rebra grede ($b_w=200$ mm);

d statička visina grede ($d=240$ mm);

f_c čvrstoća pri pritisku betona (vrednost dobijena ispitivanjem kocke stranice 100 mm).

Normalizovana vrednost smičućeg napona je korišćena tokom poređenja uporednih greda napravljenih sa različitim betonima. Module elastičnosti uzoraka napravljenih od 200_200_0.488 mešavine manji je od uzoraka OPC_S za obe vrste nege. Razlika je veća kod uzoraka koji su negovani kao grede i iznosi 24%.

Grede koje su ispitane na smicanje armirane su nesimetrično po dužini grede kako bi se projektovao lom u jednom smičućem rasponu i oprema za ispitivanje koncentrisala na odabranom delu. Šema armiranja greda prikazana je na Slici 21.

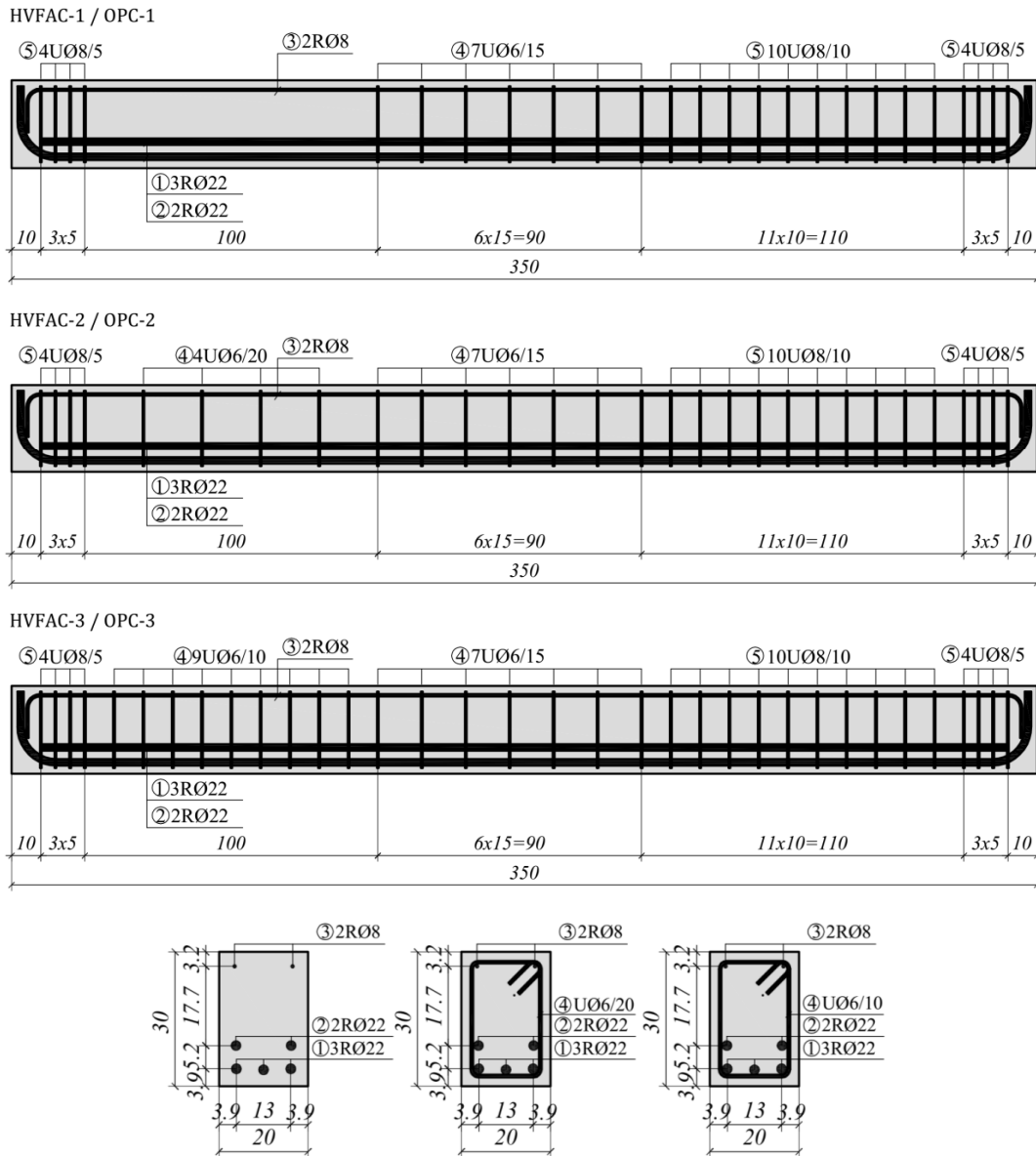
Usvojena podužna i poprečna armatura u svim gredama prikazana je u Tabeli 23. Sve grede su armirane podužnom zategnutom rebrastom armaturom klase B500B prečnika Ø22 mm i sa dve šipke pritisnute armature B500B prečnika Ø8 mm. Kod svih greda je odnos smičućeg raspona (rastojanje od mesta delovanja koncentrisane sile i težišta oslonca) i statičke visine grede bio 4.17.

Tabela 23. *Usvojena armatura u gredama za smicanje*

Oznaka	Beton	Podužna armatura	Poprečna armatura
HVFAC-1		5 Ø 22 mm	Bez uzengija
HVFAC-2	OPC_S	5 Ø 22 mm	Ø6/200 mm
HVFAC-3		5 Ø 22 mm	Ø6/100 mm
OPC-1		5 Ø 22 mm	Bez uzengija
OPC-2	C200_F250	5 Ø 22 mm	Ø6/200 mm
OPC-3		5 Ø 22 mm	Ø6/100 mm

Podužna armatura određena je iz uslova da do loma grede ne dođe prekoračenjem nosivosti na savijanje. Za uzengije u smičućem rasponu gde se projektuje lom korišćena je glatka armatura B500B prečnika Ø6 mm. Drugi smičući raspon armiran je većom poprečnom glatkom armaturom (Ø8 na rastojanju od 100 mm).

Armatura koja je ugrađena u grede za smicanje je takođe ispitana kako bi se analiza ponašanja grede izvršila sa tačnim vrednostima granice razvlačenja ($\sigma_{0,2\%}$), modula elastičnosti (E) i dilatacije pri lomu (ϵ_{lom}). Rezultati merenja su prikazani u Tabeli 24.



Slika 21. Šema armiranja grede za ispitivanje smicanja

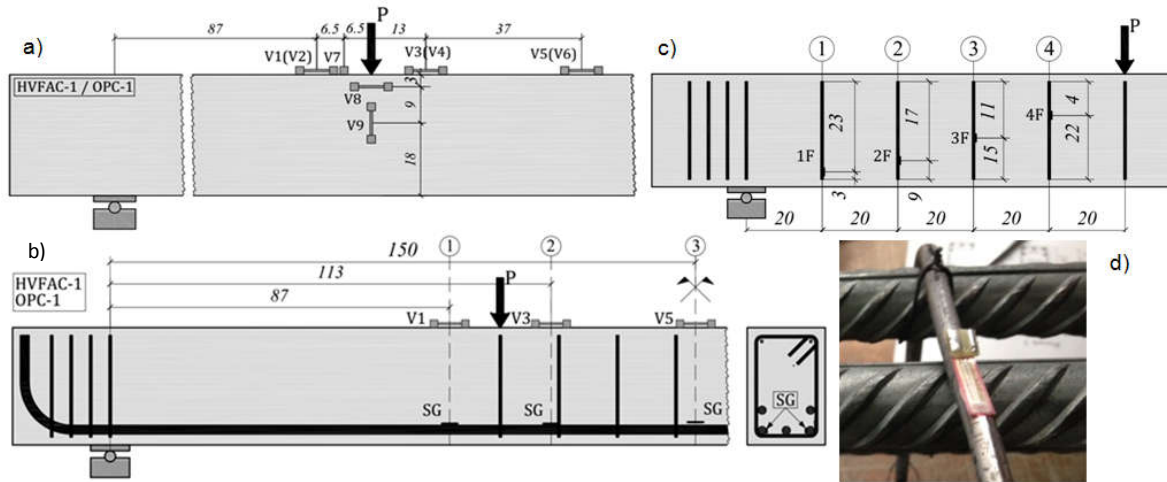
Tabela 24. Rezultati ispitivanja armature korišćene za ispitivanje smicanja

\varnothing (mm)	$\sigma_{0,2\%}$ (MPa)	σ_m (MPa)	E (GPa)	ϵ_{lom} (%)
6	Glatka	362.5	444.0	206.7
8	Glatka	335.7	421.4	221.6
8	Rebrasta	532.4	605.2	180.2
22	Rebrasta	531.3	601.8	203.9

Nanošenje sile i merenje ugiba i dilatacija u betonu i armaturi izvršeno je na isti način i sa istim mernim uređajima kao i u slučaju grede ispitanih na savijanje. Preseci i raspored uređaja za ispitivanje dilatacija u betonu (VWSG) i dilatacija u armaturi (SG) odabran je u zavisnosti od položaja očekivane

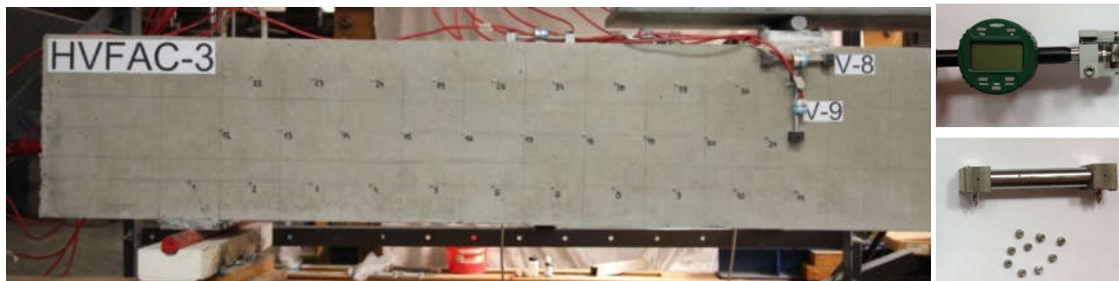
kose prsline. Raspored mernih mesta VWSG za grede bez poprečne armature prikazan je na Slici 22a a raspored preseka u kojima su merene dilatacije u armaturi sa SG ma Slici 22b.

Pored merenja dilatacija zatezanja u podužnoj armaturi, vršeno je i merenje dilatacija u uzengijama duž smičućeg raspona primenom mernih traka. Merne trake su raspoređene po visini svih uzengija prateći očekivani nagib kose prsline koja će se javiti u različito armiranim gredama. Raspored mernih mesta sa prednje strane greda OPC-2 i HVFAC-2 prikazan je na Slici 22c. Izgled merne trake prikazan je na Slici 22d.



Slika 22. Šema VWSG i SG na gredama OPC-1 i HVFAC-1 ispitanim na smicanje

Kako si se u potpunosti ispitalo ponašanje greda pri smicanju vršeno je merenje dilatacija u betonu po celoj površini rebra u smičućem rasponu u kom se očekuje lom. Merenje je vršeno korišćenjem mehaničkog deformetra (*Insize*). Čelične kružne bazice postavljene su u rasporedu prikazanom na Slici 23 (levo) u mrežu jednakostraničnih trouglova stranice 10 cm u tri reda po visini rebra grede (Slika 23 desno). Na ovaj način vršeno je merenje dilatacija u tri pravca: pod uglom od 0° , 60° i 120° što je dalje omogućilo određivanje pravaca i veličina glavnih dilatacija u betonu usled smicanja. Merenje je vršeno pri određenim koracima nanošenja sile.

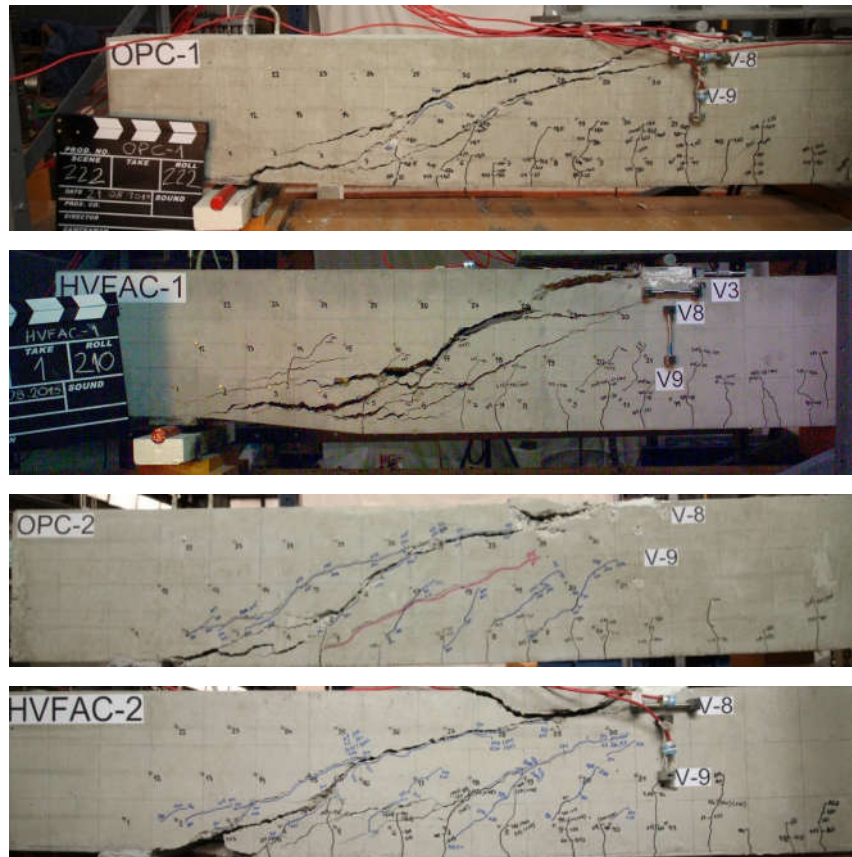


Slika 23. Raspored bazica za merenje dilatacija u rebro greda (levo) i mehanički deformetar sa bazicama za merenje (desno)

10.3.2 Rezultati ispitivanja

Kod svih greda ispitanih na smicanje došlo je do smičućeg loma, osim kod grede OPC-3 kod koje je do loma došlo prekoračenjem nosivosti na savijanje u preseku u sredini grede. Do loma savijanjem kod grede OPC-3 je došlo usled manje ostvarene čvrstoće pri pritisku u odnosu na projektovanu čvrstoću i merenja dobijenih na uzorcima kocki. Oblici loma greda bez poprečne armature (OPC-1 i

HVFAC-1) i greda sa minimalnom poprečnom armaturom (OPC-2 i HVFAC-2) prikazani su na Slici 24.



Slika 24. Lom greda bez poprečne armature i sa minimalnom poprečnom armaturom

Prilikom nanošenja opterećenja prve prslina koje su se javile kod svih greda bile su prsline nastale usled savijanja u srednjoj trećini raspona grede. Sa daljim povećanjem opterećenja dolazi do povećanja broja prslina usled savijanja i do pojave kosih prslina u smičućem rasponu grede. Ponašanje greda sa i bez poprečne armature bilo je praktično isto linearno-elastično do trenutka pojave prvih kosih prslina, pri opterećenju od 50-60% od graničnog.

U Tabeli 25 su prikazani svi bitni parametri koji opisuju ponašanje greda prilikom smicanje: oznake greda, poprečna armatura, opterećenje prilikom pojave prvih prslina ($2P_n$), opterećenje prilikom početka tečenja greda ($2P_y$), opterećenje pri lomu ($2P_u$), normalizovani smičući napon ($v_u/\sqrt{f_c}$), ugib u sredini grede pri eksploatacionom opterećenju (a_{ser}) i u trenutku loma (a_u), i izmereni nagib kose prslina koja je dovela do loma grede (θ). Kao eksploataciono opterećenje usvojena je vrednost od 40% granične nosivosti greda. Veze normalizovanog napona i pomeranja preseka u sredini greda prikazano je na Slici 28 za grede bez poprečne armature i na Slici 29 za grede sa poprečnom armaturom u smičućem rasponu.

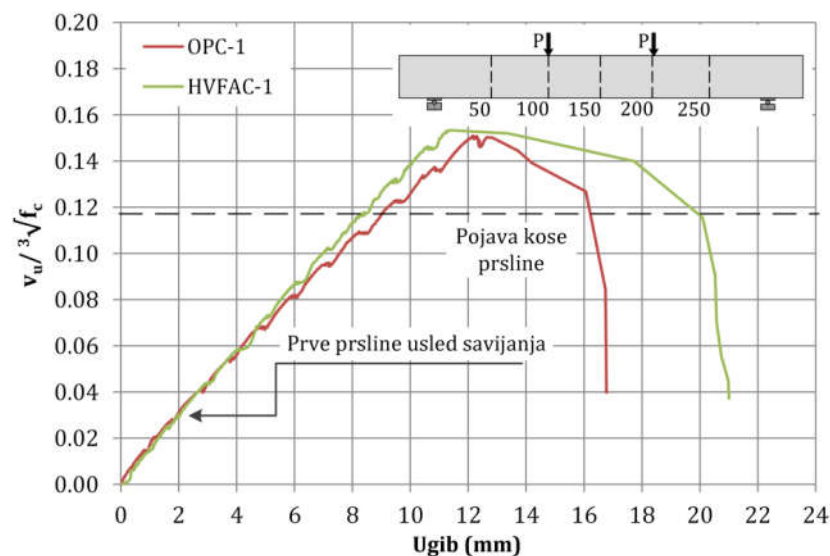
Kod greda bez poprečne armature došlo je do krto g loma nakon propagacije kose prslina do mesta delovanja sile. Ugao nagiba dominantne kose prslina koja je dovela do loma je isti kod obe grede bez poprečne armature. Kao što se može videti sa Slike 25 obe grede su pokazale lineatno-elastično ponašanje do dostizanja maksimalnog smičućeg napona. Promena nagiba krive sila-pomeranje javila se nakon formiranja prvih prslina usled savijanja i nakon pojave prve kose prslina. Krutost grede

HVFAC-1 bila je veća nakon pojave prvih kosih prslina usled savijanja. Granična normalizovana nosivost gređa je veća kod HVFAC gređa u odnosu na uporedne OPC gređe za 2%.

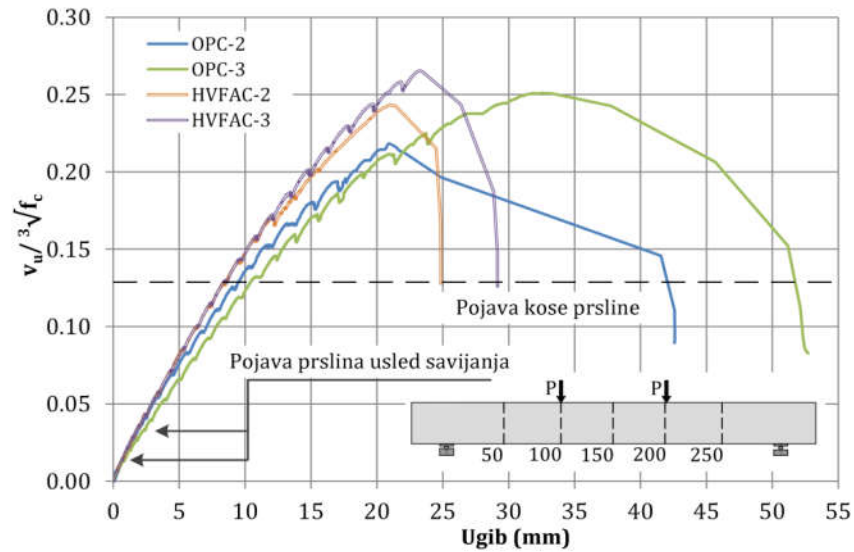
Tabela 25. Rezultati eksperimentalnog ispitivanja gređa prilikom smicanja

	Armatura	$2P_n$ (kN)	$2P_y$ (kN)	$2P_u$ (kN)	$v_u / \sqrt[3]{f_c}$	a_{set} (mm)	a_u (mm)	θ (°)
OPC-1	Bez uzengija	40	160	221.1	0.150	4.4	12.7	27
HVFAC-1		20	160	210.7	0.153	4.3	11.4	27
OPC-2	Ø6/200	60	180	315.0	0.218	6.0	21.0	32
HVFAC-2		50	180	343.6	0.243	6.0	21.0	33
OPC-3	Ø6/100	50	180	380.2	0.251	7.9	34.0	34
HVFAC-3		20	180	370.2	0.265	6.8	23.3	36

Kod druge i treće grupe gređa sa poprečnom armaturom prve prsline usled opterećenja su se takođe pojavile pri nižim vrednostima opterećenja kod HVFAC gređa u odnosu na OPC gređe. Pri daljem povećanju opterećenja broj prslina se povećava i u sednjoj trećini raspona gređe i u smičućem rasponu. Prve uočene kose prsline javile su se pri istom opterećenju kod OPC i HVFAC gređa u obe grupe. Ponašanje gređa sa poprečnom armaturom bilo je vrlo slično ponašanju gređa bez poprečne armature do ovog trenutka (Slika 26). Sa daljim povećanjem opterećenja vertikalne prsline nastale usled savijanja počinu da se krive u smičućem rasponu i nove kose prsline u rebru gređe počinju da se pojavljuju. Mreža formiranih prslina u smičućem rasponu slična je kod uporednih gređa u svakoj grupi (Slika 24). Dominantne kose prsline javile su pod sličnim uglovima kod obe grupe gređa (Tabela 25). Više kosih prslina javilo se kod gređa sa poprečnom armaturom formirajući pritisnute dijagonale u rebru gređa. Do krtoq loma gređa OPC-2, HVFAC-2 i HVFAC-3 došlo je mrvljenjem pritisnutog betona na vrhu pritisnutih dijagonala. Granična normalizovana nosivost gređa je veća kod HVFAC gređa u odnosu na uporedne OPC gređe za 11% i 6% za grupe gređa 2 i 3, respektivno.

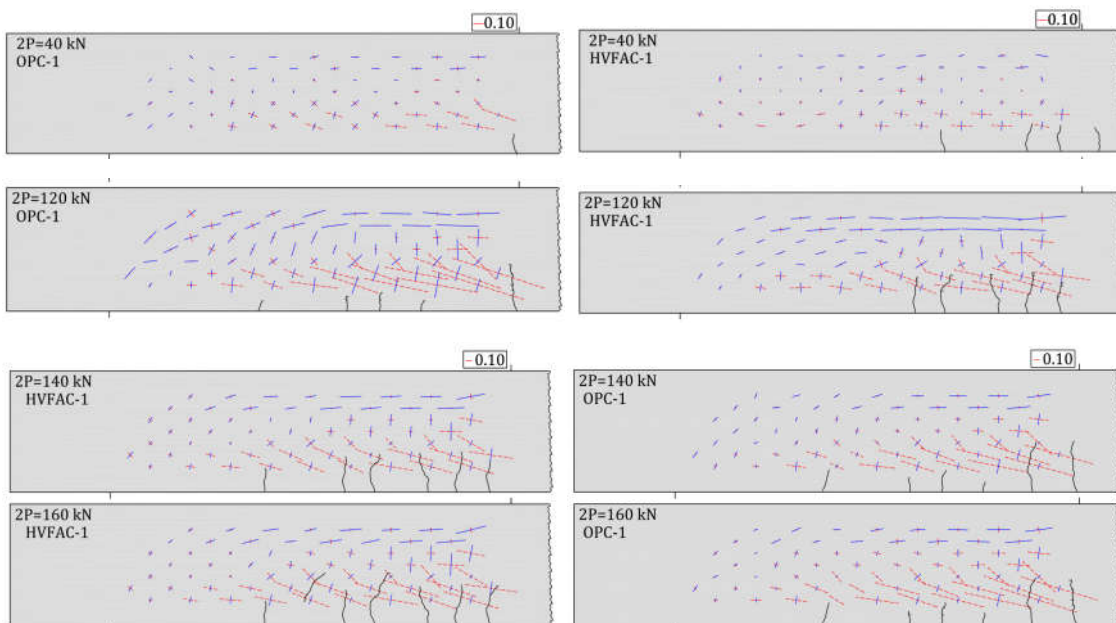


Slika 25. Dijagram sila-pomeranje za gređe bez poprečne armature u smičućem rasponu



Slika 26. Dijagram sila-pomeranje za grede sa poprečnom armaturom u smičućem rasponu

Prve kose prsline pojavile su se pri sličnom nivou normalizovanog napona smicanja kod uporednih OPC i HVFAC greda. Proračun glavnih dilatacija zatezanja je sproveden na osnovu dobijenih merenja dilatacija u pravcima od 0° , 60° i 120° i pretpostavke da se pravci glavnih napona i dilatacija poklapaju. Rezultati merenja pokazali su da je do formiranja prvih kosih prsline došlo pri nivou opterećenja između 120 kN i 140 kN. Grafički prikaz rezultata merenja i proračuna za grede bez poprečne armature dat je na Slici 27. Glavni cilj ovog merenja bilo je utvrđivanje glavnih napona zatezanja u trenutku formiranja prve kose prsline koja će dovesti do loma grede. Vrednost glavne dilatacije zatezanja sračunata je korišćenjem izmerenih vrednosti modula elastičnosti i čvrstoće pri zatezanju cepanjem za obe vrste betona $\epsilon_{\max}^{\text{exp}}=0.08\%$ - 0.09% pa je usvojena vrednost od 0.10% koja odgovara i preporuci *fib* Model Code 2010 [40].



Slika 27. Prikaz glavnih dilatacija zatezanja (crvena boja) i pritiska (plava boja) u rebru greda OPC-1 (levo) i HVFAC-1 (desno)

Prilikom grafičkog prikaza glavnih dilatacija u betonu crvenom bojom su označene dilatacije zatezanja a plavom bojom dilatacije pritiska. Isprekidanom crvenom linijom prikazane su vrednosti nakon pojave prslina (kada je izmerena dilatacija zatezanja veća od 0.10‰) koje predstavljaju zbir glavne dilatacije betona na tom mestu i širine prsline. Rezultati ispitivanja su pokazali da do pojave prve kose prsline dolazi pri glavnim naponima zatezanja 3.0 MPa - 5.4 MPa kod OPC-1 grede i 1.8 MPa - 7.6 MPa kod HVFAC-1 grede. Pojava prsline usled smicanja javila se pri nižim vrednostima glavnih napona zatezanja kod HVFAC-1 grede koja je imala i niži modul elastičnosti. Rezultati ispitivanja su takođe pokazali da se veće širine kosih prslina razvijaju kod HVFAC-1 grede u odnosu na OPC-1.

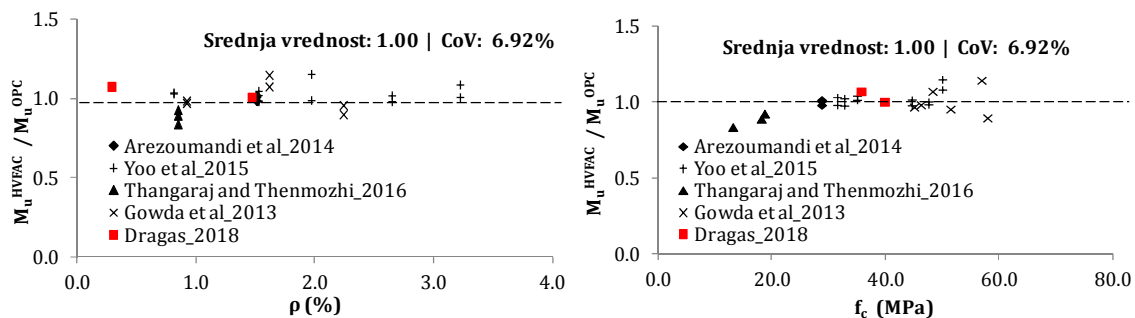
10.4 Analiza rezultata

Primena HVFAC za konstrukcijsku primenu podrazumeva sledeće korake:

- (1) Ispitivanje komponentnih materijala u skladu sa postojećim standardima: cement (EN 196 i EN 197 standardi), leteći pepeo (EN 450 standardi), agregat (EN 12620 standardi).
- (2) Projektovanje betonske mešavine i ispitivanje osnovnih fizičkih, mehaničkih i karakteristika trajnosti betona (EN 12390, EN 12350, EN 206 standardi). Formule koje definišu mehaničke karakteristike betona koje su definisane u EN 1992-1-1 [40] mogu se primeniti i kod HVFAC uz modifikacije, nekih od njih, koje su definisane u literaturi [41-44].
- (3) Projektovanje AB elemenata od HVFAC. Kako bi se izvršila analiza mogućnosti primene postojećih formula za određivanje nosivosti pri savijanju i smicanju AB nosača napravljena je baza svih dostupnih rezultata iz literature koji su analizirali zajedno sa sopstvenim rezultatima ispitivanja AB grednih elemenata. Glavni zaključci te analize dati su u nastavku.

10.4.1 Savijanje AB greda

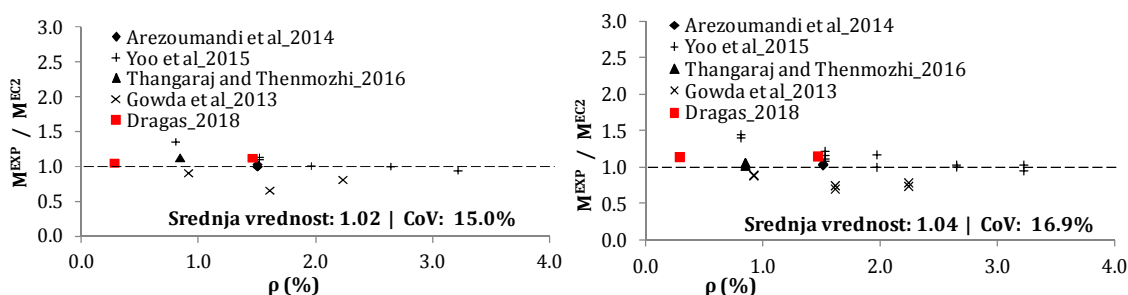
Poređenje nosivosti pri savijanju OPC i HVFAC greda izvršeno je na osnovu rezultata ispitivanja ponašanja AB greda iz dostupne literature savijanju [24-28]. Odnos eksperimentalno dobijenih momenta nosivosti HVFAC (M_u^{HVFAC}) i OPC (M_u^{OPC}) greda prikazan je u funkciji od procenta armiranja podužnom armaturom (ρ) na Slici 31 (levo) i čvrstoće pri pritisku (desno). Rezultati prikazani na Slici 28 pokazuju malo rasipanje rezultata sa koeficijentom varijacije 6.92% i vrednostima odnosa momenta nosivosti HVFAC i OPC greda između 0.84 i 1.15. Srednja vrednost ovog odnosa iznosi 1.00 i pokazuje da ne postoji razlika u momentima nosivosti između HVFAC i uporednih OPC greda.



Slika 28. Odnos eksperimentalno dobijenih momenata nosivosti HVFAC i OPC greda u funkciji od procenta armiranja podužnom armaturom (levo) i čvrstoće pri pritisku (desno)

Određivanje momenta nosivosti AB greda primenom formula datih u EN 1992-1-1 izvršeno je korišćenjem merenih vrednosti karakteristika betona i armature primenom radnog dijagrama betona oblika parabola-prava. Eksperimentalne vrednosti momenata savijanja koje su korišćene u ovoj

analizi uzele su u obzir i sopstvenu težinu greda i opreme. Rezultati analize prikazani su preko odnosa eksperimentalno dobijene nosivosti (M^{EXP}) i vrednosti momenata nosivosti sračunate primenom EN 1992-1-1 (M^{EC2}) i prikazane su u funkciji procenta armiranja podužnom armaturom na Slici 29 (levo) za OPC grede i na Slici 29 (desno) za HVFAC grede. Rezultati pokazuju vrlo slične vrednosti dobijene za OPC i HVFAC grede sa srednjim vrednostima koja se razlikuju za 2%. Pored toga odstupanje sračunatih vrednosti momenta nosivosti od eksperimentalno dobijenih je malo uz relativno malo rasipanje rezultata. Odnos momenta nosivosti OPC greda je u opsegu od 0.67 do 1.37 a HVFAC greda od 0.70 do 1.46.

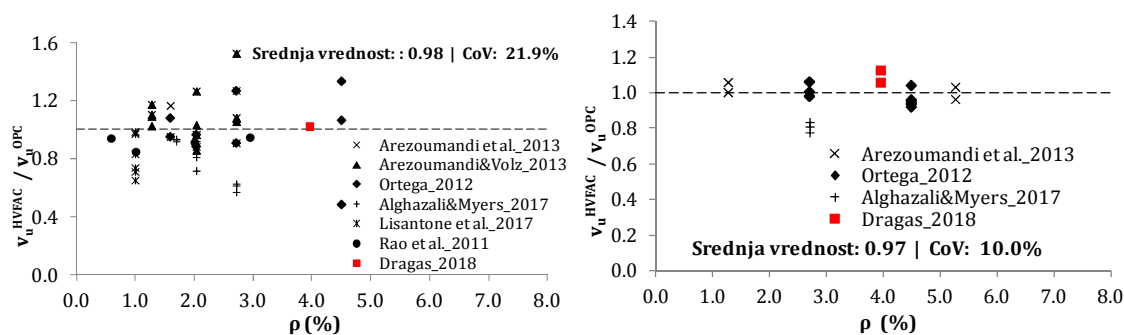


Slika 29. Odnos eksperimentalno dobijenih (levo) i sračunatih primenom standarda EN 1992-1-1 (desno) momenta nosivosti HVFAC i OPC greda u funkciji od procenta armiranja podužnom armaturom

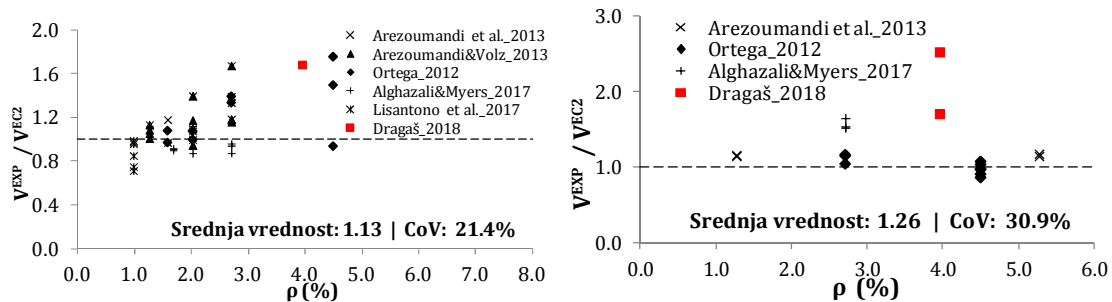
10.4.2 Smicanje AB greda

Poređenje nosivosti pri smicanju OPC i HVFAC greda izvršeno je na osnovu rezultata iz dostupne literature koji opisuju ponašanja AB greda sa i bez poprečne armature [29-36]. Odnos eksperimentalno dobijenih napona smicanja HVFAC (v_u^{HVFAC}) i OPC (v_u^{OPC}) greda prikazan je u funkciji od procenta armiranja podužnom armaturom (ρ) na Slici 30 (levo) za grede bez poprečne armature i na Slici 30 (desno) za grede sa poprečnom armaturom. Rezultati prikazani na Slici 33 pokazuju da ne postoji bitna razlika u dobijenim vrednostima napona smicanja kod OPC i HVFAC greda bez obzira da li postoji poprečna armatura ili ne. Manje rasipanja rezultata primećeno je kod greda koje imaju poprečnu armaturu.

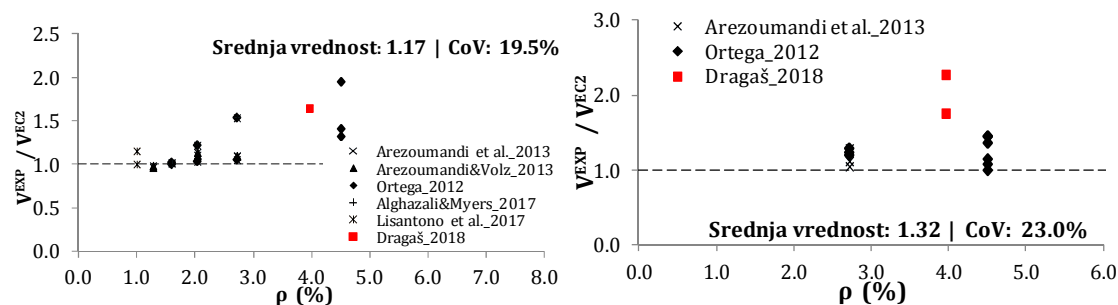
Određivanje momenta nosivosti AB greda primenom formula datih u EN 1992-1-1 izvršeno je korišćenjem merenih vrednosti karakteristika betona, ugla kose prsline i armature. Rezultati analize prikazani su preko odnosa eksperimentalno dobijene nosivosti na smicanje (V^{EXP}) i vrednosti smičuće sile sračunate primenom EN 1992-1-1 (V^{EC2}) i prikazane su u funkciji procenta armiranja podužnom armaturom na Slici 31 za HVFAC grede i Slici 32 za OPC grede.



Slika 30. Odnos eksperimentalno dobijenih napona smicanja HVFAC i OPC greda bez uzengija (levo) greda sa uzengijama (desno) u funkciji od procenta armiranja podužnom armaturom



Slika 31. Odnos eksperimentalnih i sračunatih nosivosti pri smicanju primenom standarda EN 1992-1-1 za HVFAC grede bez poprečne armature (levo) i sa poprečnom armaturom (desno)



Slika 32. Odnos eksperimentalnih i sračunatih nosivosti pri smicanju primenom standarda EN 1992-1-1 za OPC grede bez poprečne armature (levo) i sa poprečnom armaturom (desno)

Rezultati pokazuju slične srednje vrednosti i koeficijente varijacije za HVFAC i OPC sa i bez uzengija ali i da standard EN 1992-1-1 podcenjuje nosivost greda pri smicanju. Veće vrednosti eksperimentalnih sila javile su se kod greda sa poprečnom armaturom u odnosu na grede bez poprečne armature.

10.3 Zaključci i primena tehničkog rešenja

Globalne tendencije smanjenja štetnih uticaja koje beton ima na životnu sredinu dovele su do korišćenja sve većih količina letećeg pepela u betonima. Kvalitet letećeg pepela bitno zavisi od vrste uglja i procesa njegovog sagorevanja u termoelektranama. Usled česte promenljivosti ovih parametara, karakteristike letećeg pepela se mogu bitno razlikovati u različitim termoelektranama ali i u okviru iste, tokom određenog vremena. Obzirom na velike količine deponovanog letećeg pepela u Srbiji, izvršeno je eksperimentalno ispitivanje moguće primene u konstrukcijskim betonima.

U tom cilju, izvršeno je ispitivanje primene letećeg pepela iz termoelektrane "Nikola Tesla B" u Obrenovcu u betonima sa velikim sadržajem letećeg pepela–HVFAC i analiza fizičkih, mehaničkih i karakteristika trajnosti dobijenih betona i ponašanja AB elemenata napravljenih od njih. Na osnovu sopstvenih eksperimentalnih istraživanja definisan je tehnološki postupak proizvodnje betona sa najmanje 50% letećeg pepela u ukupnoj količini preškastog vezivnog materijala koji može da se koristi u konstruktivnim AB elementi.

Pregledom literature koja se odnosi na primenu većih količina letećeg pepela u betonima, izvedeni su sledeći zaključci:

- Leteći pepeo je otpadni materijal čije fizičke, hemijske i mineraloške karakteristike umnogome zavise od vrste uglja i procesa njegovog sagorevanja. U zavisnosti od vrste i količine upotrebljenog letećeg pepela u betonima, njegov uticaj na karakteristike betona može biti bitno drugačiji. Heterogenost i promenljivost sastava i kvaliteta letećeg pepela je svakako jedna od

najvećih prepreka široj primeni ovog nusprodukta u betonima kao zamenjujućeg cementnog materijala, pa je neophodno ispitati uticaj određene vrste letećeg pepela na karakteristike HVFAC za svaki pojedinačan slučaj.

- Dobri rezultati ispitivanja ugradljivosti, izdvajanja vode i segregacije, toplote hidratacije i mehaničkih karakteristika betona sa manjom količinom letećeg pepela poslužili su kao motiv za veću upotrebu letećeg pepela u betonima i ispitivanje i primenu HVFAC.
- HVFAC imaju generalno manje izdvajanja vode na površini, bitno manji razvoj toplote hidratacije i sadržaj uvučenog vazduha. Sa druge strane, vreme vezivanja HVFAC je duže nego kod cementnih betona uz sporiji prirast čvrstoće pri ranim starostima. U zavisnosti od količine i vrste letećeg pepela i cementa, dobijaju se betoni sa nešto nižim čvrstoćama nakon 28 dana ali sa znatnim prirastom i nakon ovog vremena.
- Ispitivanja pokazuju da ovi betoni imaju nešto niže čvrstoće pri zatezanju i module elastičnosti nego cementni betoni, shodno padu čvrstoće pri pritisku. Smanjena količina cementa na račun veće količine letećeg pepela utiče na smanjenje skupljanja i tečenja HVFAC u odnosu na cementne betone.
- HVFAC u poređenju sa cementnim betonima, generalno, pokazuje veću otpornost na prodor hlorida, manju otpornost na dejstvo mraza i soli i manju karbonatizacionu otpornost.
- Mnogobrojna istraživanja iz literature su pokazala da je poznavanjem karakteristika letećeg pepela i pravilnim projektovanjem betonskih mešavina moguće dobiti HVFAC dobrih fizičko-mehaničkih karakteristika pogodnih za konstruktivnu upotrebu.
- Nekolicina radova koji se bavi mogućnošću primene HVFAC kao konstrukcijskog betona može se pronaći u literaturi. Dostupni radovi su se fokusirali na ispitivanje čvrstoće prijanjanja HVFAC i armature, nosivosti pri savijanju i smicanju betona napravljenih sa letećim pepelom. Kako bi se doneli jednoznačni zaključci, potrebno je sprovesti sopstvena eksperimentalna ispitivanja, sistematizaciju i analizu dostupnih rezultata i definisanje preporuka za projektovanje mešavina, tehnologiju proizvodnje i proceduru testiranja HVFAC napravljenih sa letećim pepelom iz RS.

Na osnovu sopstvenih eksperimentalnih istraživanja primene lokalnog letećeg pepela u proizvodnji betona koji imaju najmanje 50% letećeg pepela u ukupnoj masi cementnih materijala, izvedeni su sledeći zaključci:

- Ispitivanja su pokazala da je moguće napraviti ugradljiv HVFAC koji ima čvrstoću pri pritisku na 3 dana veću od 15 MPa, na 28 dana veću od 40MPa i na 90 dana veću od 50 MPa.
- U poređenju sa očekivanim prirastom čvrstoće pri pritisku cementnih betona bez letećeg pepela, rani prirast čvrstoće ispitanih HVFAC je sporiji ali se nastavlja i nakon 28 dana.
- Odnos čvrstoće pri zatezanju cepanjem i čvrstoće pri pritisku sličan kao kod cementnih betona bez letećeg pepela. Čvrstoće se kreću u granicama od 2.0 MPa do 3.7 MPa.
- Modul elastičnosti se kreće u granicama od 30 GPa do 33.2 GPa pri starosti od 28 dana a raste i do 38.1 GPa nakon 180 dana. Odnos između čvrstoće pri pritisku ispitanih uzoraka i modula elastičnosti na 28 dana je sličan kao kod cementnih betona bez letećeg pepela.
- Skupljanje HVFAC se odvija prema logaritamskom zakonu a model skupljanja definisan u EN1992-1-1 značajno precenjuje vrednosti skupljanja HVFAC.
- Tečenje HVFAC je značajno precenjeno modelom za tečenje datim u EN1992-1-1.
- HVFAC uzorci napravljeni sa 150 kg/m³ cementa imali su veću dubinu karbonizacije u poređenju sa HVFAC uzorcima sa 200 kg/m³ cementa.
- Sračunati koeficijenti karbonizacije za grupu HVFAC sa 200 kg/m³ cementa zadovoljavaju preporučenu maksimalnu vrednost od 6 mm/god^{0.5}.
- Grupa testiranih HVFAC sa 150 kg/m³ cementa ima manju karbonatizacionu otpornost (veći koeficijenti karbonizacije) u odnosu na preporučenu vrednost bez obzira na korišćenu količinu cementa ili letećeg pepela.

Na osnovu sopstvenih eksperimentalnih ispitivanja ponašanja greda prilikom savijanja sledeći zaključci se mogu doneti:

- Prve prsline usled savijanja javljaju se pri nižim nivoima opterećenja kod greda napravljenih od HVFAC u poređenju sa uporednim OPC gredama.
- Prilikom testa savijanjem AB grede od HVFAC i OPC ispoljile su isto ponašanje do loma.
- Granična sila loma HVFAC i OPC greda sa istim procentom armiranja razlikovala se za manje od 10% bez obzira na procenat armiranja greda.
- Generalno veći ugibi usled kratkotrajnog opterećenja se javljaju kod HVFAC greda u odnosu na OPC grede zbog manjeg modula elastičnosti.
- Rezultati merenja dilatacija u betonu i armaturi pokauju sličan trend kod OPC i HVFAC greda.
- Kod HVFAC i OPC greda sa oba procenta armiranja raspored dilatacija je linearan po visini.
- Na osnovu sopstvenih i rezultata iz dostupne literature može se zaključiti da nosivost pri savijanju HVFAC i uporednih OPC greda ne razlikuje bitno i da je u proseku ista za rezultate prikazane na Slici 29.
- Formule koje definišu određivanje momenta nosivosti definisane u EN 1992-1-1 mogu se sa istom tačnošću i varijacijom rezultata primeniti kod HVFAC i OPC greda.

Na osnovu sopstvenih eksperimentalnih ispitivanja ponašanja greda prilikom smicanja sledeći zaključci se mogu doneti:

- Normalizovana vrednost graničnog smičućeg napona je veća kod HVFAC greda u odnosu na uporedne OPC grede bez i sa uzengijama za maksimalno 11%.
- Kose prsline javljaju se pod približno istim uglom kod HVFAC i uporednih OPC greda.
- Do pojave prve kose prsline usled smicanja dolazi pri nižim vrednostima glavnih napona zatezanja kod HVFAC greda u odnosu na OPC grede.
- Na osnovu sopstvenih i rezultata iz dostupne literature može se zaključiti da ne postoji bitna razlika u normalizovanim vrednostima graničnog napona smicanja kod OPC i HVFAC greda bez obzira da li postoji poprečna armatura ili ne.
- Formule koje definišu određivanje nosivosti pri smicanju definisane u EN 1992-1-1 mogu se sa istom tačnošću i varijacijom rezultata primeniti kod HVFAC i OPC greda.

Na osnovu sprovedene analize rezultata istraživanja zaključeno je da se postojeći standardi za projektovanje AB elemenata mogu primeniti na betone sa velikim sadržajem letećeg pepela sa istom preciznošću i varijacijom rezultata kao i kod tradicionalnih cementnih betona. Ovaj zaključak je posledica opsežnog ispitivanja fizičkih i mehaničkih karakteristika betona i ponašanja AB elemenata izloženih savijanju i smicanju do loma.

Dobijeni rezultati istraživanja pokazuju da se betoni sa većim količinama letećeg pepela mogu primeniti u izgradnji stambenih i poslovnih objekata srednjih raspona i visine konstrukcije. Takođe, rezultati rada daju smernice za projektovanje i praktičnu primenu ove vrste betona u građevinskoj industriji RS. Svi konstruktivni elementi AB konstrukcija (temelji, stubovi, zidovi, grede i ploče) mogu se projektovati i izvesti sa betonom koji ima određenu količinu letećeg pepela (30-70% od ukupne mase cementnih materijala).

Na ovaj način definisan je tehnološki postupak proizvodnje betona sa velikim sadržajem letećeg pepela napravljenih sa letećim pepelom iz termoelektrane Nikola Tesla B koji se mogu primeniti u konstrukcijskim elementima.

Literatura

- [1] WBCSD, "Recycling Concrete," The Cement Sustainability Initiative, 2009. [Online]. Available: <http://www.wbcscement.org/pdf/CSI-RecyclingConcrete-FullReport.pdf>.
- [2] UN Environment, Scrivener, K.L., Vanderley M. John, V.M., Gartner, E.M., Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement based materials industry, *Cem. Concr. Res.* 114, 2–26, 2018.
- [3] ASTM C618, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. West Conshohocken, Pennsylvania, 2015.
- [4] H. Moosberg-Bustnes, B. Lagerblad, and E. Forssberg, "The function of fillers in concrete," *Mater. Struct.*, vol. 37, no. 2, pp. 74–81, 2004.
- [5] K. Hwang, T. Noguchi, and F. Tomosawa, "Prediction model of compressive strength development of fly-ash concrete," *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, pp. 2269–2276, 2004.
- [6] K. Ogawa, H. Uchikawa, and K. Takemoto, "The mechanism of hydration in the system C3S-pozzolana," *Cem. Concr. Res.*, vol. 10, pp. 683–696, 1980.
- [7] V. G. Papadakis, "Effect of fly ash on Portland cement systems: Part I. Low-calcium," *Cem. Concr. Res.*, vol. 29, pp. 1727–1736, 1999.
- [8] L. Lam, Y. L. Wong, and C. S. Poon, "Degree of hydration and gel/space ratio of high-volume fly ash/cement systems," *Cem. Concr. Res.*, vol. 30, no. 5, pp. 747–756, May 2000.
- [9] K. Kuder, D. Lehman, J. Berman, G. Hannesson, and R. Shogren, "Mechanical properties of self consolidating concrete blended with high volumes of fly ash and slag," *Constr. Build. Mater.*, 2012.
- [10] CEN, *European Standard 206-1:2013: Concrete – Part 1: Specification performance, production and conformity*. European Committee for Standardization, 2011.
- [11] CEN, *Technical report 16639: Use of k-value concept, equivalent concrete performance concept and equivalent performance of combinations concept*. European Committee for Standardization, 2014.
- [12] CEN, *European Standard 450-1: Fly ash for concrete — Part 1: Definition, specifications and conformity criteria*. Brussels: European Committee for Standardization, 2012.
- [13] M. J. McCarthy and R. K. Dhir, "Development of high volume fly ash cements for use in concrete construction," *Fuel*, vol. 84, no. 11, pp. 1423–1432, 2005.
- [14] S. C. Kou and C. S. Poon, "Long-term mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete prepared with the incorporation of fly ash," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 37, pp. 12–19, 2013.
- [15] C. S. Poon, L. Lam, and Y. L. Wong, "A study on high strength concrete prepared with large volumes of low calcium fly ash," *Cem. Concr. Res.*, vol. 30, no. 3, pp. 447–455, Mar. 2000.
- [16] N. Bouzoubaa and V. M. Malhotra, "Performance of Lab-Produced High-Volume Fly Ash Cements in Concrete," *ACI Concr. Int.*, vol. 23, no. 4, pp. 31–35, 2001.
- [17] N. Bouzoubaa, M. H. Zhang, and V. M. Malhotra, "Mechanical properties and durability of concrete made with high-volume fly ash blended cements using a coarse fly ash," *Cem. Concr. Res.*, vol. 31, pp. 1393–1402, 2001.
- [18] Kumar, M. K., Rao, P. S., Swamy, B. L. P., and Chandra Mouli, C., Corrosion resistance performance of fly ash blended cement concrete, *Internatioanl Journal of Research in engineering and technologi*, 1(3), 448–454, 2012.
- [19] Van Den Heede, P., Furniere, J., and De Belie, N., Influence of air entraining agents on deicing salt scaling resistance and transport properties of high-volume fly ash concrete, *Cement and Concrete Composites*, 37(1), 293–303, 2013.
- [20] Khunthongkeaw, J., Tangtermsirikul, S., and Leelawat, T., A study on carbonation depth

- prediction for fly ash concrete.pdf.” *Construction and Building Materials*, 20, 744–753, 2006.
- [21] M. Arezoumandi, M. H. Wolfe, and J. S. Volz, “A comparative study of the bond strength of reinforcing steel in high-volume fly ash concrete and conventional concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 40, pp. 919–924, 2013.
- [22] M. H. Wolfe, “Bond strength of high-volume fly ash concrete,” Missouri University of science and technology, 2011.
- [23] J. Zhao, G. Cai, and J. Yang, “Bond-slip behavior and embedment length of reinforcement in high volume fly ash concrete,” *Mater. Struct.*, vol. 49, no. 6, pp. 2065–2082, 2016.
- [24] M. Arezoumandi, C. a. Ortega, and J. S. Volz, “Flexural Behavior of High-Volume Fly Ash Concrete Beams,” *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, vol. 2508, no. April 2016, pp. 22–30, 2015.
- [25] S. W. Yoo, G. S. Ryu, and J. F. Choo, “Evaluation of the effects of high-volume fly ash on the flexural behavior of reinforced concrete beams,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 93, pp. 1132–1144, 2015.
- [26] R. Thangaraj and R. Thenmozhi, “Experimental Study on RC Beams Using High Volume Fly Ash,” *Int. J. Technol. Eng.*, vol. 03, no. 02, pp. 71–85, 2016.
- [27] T. Srinivas and R. Rao, “A Study on Flexural Behaviour of RCC Beams Containing High Volume Fly Ash,” *J. Mech. Civ. Eng.*, vol. 12, no. 4, pp. 2278–1684, 2015.
- [28] P. Gowda, M. Aswath, and K. Muthu, “Experimental investigation on flexure behaviour of fly ash concrete beams,” *Int. J. Adv. Sci. Tech. Res.*, vol. 2, no. 3, pp. 184–199, 2013.
- [29] C. A. Ortega, “Shear and fracture behavior of high-volume fly ash reinforced concrete for sustainable construction,” Missouri University of science and technology, 2012.
- [30] M. Arezoumandi and J. S. Volz, “Effect of fly ash replacement level on the fracture behavior of concrete,” *Front. Struct. Civ. Eng.*, vol. 7, no. 4, pp. 411–418, 2013.
- [31] M. Arezoumandi, J. Volz, C. Ortega, and J. J. Myers, “Shear Behavior of High-Volume Fly Ash Concrete versus Conventional Concrete : Experimental Study,” *J. Struct. Eng.*, vol. 141, no. 3, pp. 1–11, 2015.
- [32] M. Arezoumandi, J. S. Volz, C. A. Ortega, and J. J. Myers, “Effect of total cementitious content on shear strength of high-volume fly ash concrete beams,” *Mater. Des.*, vol. 46, pp. 301–309, 2013.
- [33] H. H. Alghazali and J. J. Myers, “Shear behavior of full-scale high volume fly ash-self consolidating concrete (HVFA-SCC) beams,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 157, pp. 161–171, 2017.
- [34] S. Sadati, M. Arezoumandi, K. H. Khayat, and J. S. Volz, “Shear performance of reinforced concrete beams incorporating recycled concrete aggregate and high-volume fly ash,” *J. Clean. Prod.*, vol. 115, pp. 284–293, 2016.
- [35] A. Lisantono, H. Y. Wigroho, and R. A. Purba, “Shear Behavior of High-volume Fly Ash Concrete as Replacement of Portland Cement in RC Beam,” *Procedia Eng.*, vol. 171, pp. 80–87, 2017.
- [36] R. M. Rao, S. Mohan, and S. K. Sekar, “Shear resistance of high volume fly ash reinforced concrete beams without web reinforcement,” vol. 1, no. 4, pp. 986–993, 2011.
- [37] CEN, *EN 1992-1-1: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*. Brussels: European Committee for Standardization, 2004.
- [38] R. O. Lane and J. F. Best, “Properties and use of fly ash in Portland cement concrete,” *Concr. Int.*, vol. 4, no. 7, pp. 81–92, 1982.
- [39] EN12390-10. (2008). “Testing hardened concrete — Part 10: Determination of the relative carbonation resistance of concrete.” CEN/TS, Brussels, Belgium.

- [40] Papadakis, V. G. (2000). "Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress." *Cement and Concrete Research*, 30, 291–299.
- [41] fib, *fib-Model Code*. Lausanne, Switzerland: FIB (Fédération Internationale du Béton), 2010.
- [42] J. Dragaš, Ultimate capacity of high volume fly ash reinforced concrete beams, PhD Thesis University of Belgrade, 2018.
- [43] Yoon, S., Monteiro, P.J.M., Macpheec, D.E., Glasser, F.P., Imbabi, M.S.-E., 2014. Statistical evaluation of the mechanical properties of high-volume class F fly ash concretes. *Constr. Build. Mater.* 54, 431–442.
- [44] Chen, J., Kuder, K.G., Lehman, D., Roeder, C.W., 2017. Creep modeling of concretes with high volumes of supplementary cementitious materials and its application to concrete-filled tubes. *Mater. Struct.* 50, 1–20. <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0955-9>
- [45] Bhaskara, G.S.V., Rao, K.B., Anoop, M.B., 2018. Model for compressive strength development of OPC concrete and fly ash concrete with time. *Mag. Concr. Res.* 70, 541–557.

Rezultati istraživanja iz problematike kojom se bavi prikazano tehničko rešenje objavljeni su u sledećim publikacijama:

Vedran Carević, Ivan Ignjatović, Jelena Dragaš (2019) Model for Practical Carbonation Depth Prediction for High Volume Fly Ash Concrete and Recycled Aggregate Concrete. *Construction and Building Materials*. 213 (), pp.194-208. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.267 [M21a]

Marinković Snežana., Dragaš Jelena., Ignjatović Ivan, Tošić Nikola (2017) Environmental assessment of green concretes for structural use. *Journal of Cleaner Production*. (154), pp.633-649. [M21]

Tošić N., Marinković S., Pecić N., Ignjatović I., Dragaš J. (2018) Long-term behaviour of reinforced beams made with natural or recycled aggregate concrete and high-volume fly ash concrete. *Construction and Building Materials*. 176 (), pp.344-358. [M21a]

Dragaš J., Ignjatović I., Tošić N., Marinković S. (2016) Mechanical and time-dependent properties of high-volume fly ash concrete for structural use.. *Magazine of Concrete Research*. 68 (12), pp.632-645. [M22]

11) TEHNIČKA DOKUMENTACIJA

- Ugovor o poslovno-tehničkoj saradnji u prilogu.

- Lista tehničkih rešenja svih autora

Autori nemaju druga tehnička rešenja.

Autori rešenja:



doc.dr Jelena Dragaš, master inž.građ.



prof.dr Snežana Marinković, dipl.građ.inž.



v.prof. dr Ivan Ignjatović, dipl.građ.inž.



asist. Vedran Carević, master inž.građ.

На основу обострано изражене жеље, а у циљу преношења научних достигнућа и повезивања са радом у пракси, као и ради остваривања оптималних резултата пословања кроз заједнички рад:

Универзитет у Београду - Грађевински факултет, ПИБ 100251144, ул. Булевар краља Александра бр. 73 Београд, кога заступа декан проф. др Владан Кузмановић (у даљем тексту: **ГФБ**).

и

"МАРТИНИ ГРАДЊА" д.о.о, Војводе Путника бб, Инђија 22320, ПИБ 105092517, кога заступа директор Antonio Zanetti (у даљем тексту: **Партнер**)

Закључују

УГОВОР О ПОСЛОВНО-ТЕХНИЧКОЈ САРАДЊИ

Предмет Уговора

Члан 1.

Предмет овог Уговора је сарадња Уговорних страна у различитим стручним и научним областима грађевинарства од заједничког интереса, у циљу унапређења технологија производње бетонских композита, знања, вештина, компетенција и угледа уговорних страна.

Принципи и стандарди сарадње

Члан 2.

Уговорне стране су сагласне да ће се међусобна сарадња одвијати уз уважавање обостраних пословних интереса на принципу равноправности, савесности и поштења, као и уз обавезу поступања по стандарду доброг привредника, уз нужне толеранције које због промењених околности или тешкоћа у пословању могу бити изазване током трајања овог Уговора.

У реализацији овог Уговора, уговорне стране се обавезују да примењују позитивне домаће прописе, прописане техничко-технолошке стандарде, домаћа и инострана научна достигнућа, као и да међусобно уважавају сопствена општа акта и пословне одлуке органа управљања.

Уговорне стране се обавезују да максимално штите пословне, економске и моралне интересе партнера из овог Уговора и да обострано чувају и уздижу пословни углед који су стекли пре закључења овог Уговора.

Члан 3.

Сваки од потписника овог уговора може да одреди координатора задуженог за дефинисање заједничких активности, њиховог обима и динамике спровођења.

Заједничке активности

Члан 4.

Уговорне стране ће дефинисати заједничке активности у духу добрих односа и сарадње, и оне могу укључивати:

- истраживање савремених бетонских композита са малим количинама цемента и високим садржајем филера
- истраживање могућности примене отпадних и рециклираних материјала (рециклирани бетон, опека и сл.) у бетонским композитима и армиранобетонским конструкцијама
- развој, тестирање и верификација технологије производње бетона са високим садржајем летећег пепела
- развој, тестирање и верификација технологије производње слојевитих конвенционалних и зелених бетона
- оцену утицаја на животну средину горе поменутих врста бетонских композита

Обим и динамика појединих активности ће бити периодично договаран и усклађиван између Уговорних страна, преко координатора (члан 3), а све у циљу обезбеђења ефикасне и обострано корисне сарадње.

Поверљивост информација

Члан 7.

У складу са интерним актима Партнера и његовим посебним захтевима и добрим пословним обичајима, ГФБ је дужан да као пословну тајну чува сваки документ или информацију коју добије од Партнера, а које као такве одреди Партнер.

ГФБ је одговоран за свако неовлашћено давање информације и података у смислу претходног става, изузев и само оним лицима која су непосредно ангажована на реализацији активности по овом Уговору.

Партнер је одговоран за свако неовлашћено давање информација коју добије од ГФБ, до којих дође приликом реализације активности по овом Уговору, и одговоран је за евентуалне трошкове и/или штету коју услед тога претрпи ГФБ.

Трајање Уговора

Члан 3.

Уговор о пословно - техничкој сарадњи се закључује на неодређено време и сваки од потписника га може отказати.

Започети послови завршиће се у роковима предвиђеним планом активности које утврде координатори, односно прихваћеним писменим налозима, без обзира што би евентуално дошло до отказивања овог уговора.

Решавање спорова и раскид уговора

Члан 8.

Све евентуалне спорове који настану из овог Уговора уговорне стране ће покушати да реше Уговорно.

Уколико спорови између уговорних страна не буду решени, уговорне стране су сагласне да ће сваки такав спор бити решаван пред стварно надлежним судом у Београду.

Завршне одредбе

Члан 9.

Овај Уговор се може изменити само писаним анексом, потписаним од стране овлашћених заступника уговорних страна.

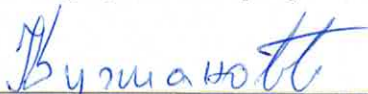
Члан 10.

Уговор се сматра закљученим и ступа на снагу када га потпишу оба овлашћена лица уговорних страна, а што ће се документовати датумом на заводном печату.

Овај Уговор је сачињен у 4 (четири) истоветна примерака, од којих по 2 (два) за сваку уговорну страну.

Уговорне стране сагласно изјављују да су овај Уговор прочитале, разумеле и да уговорне одредбе у свему представљају израз њихове стварне воље.

Универзитет у Београду
Грађевински факултет



Проф. др Владан Кузмановић, декан



"МАРТИНИ ГРАДЊА" д.о.о



Antonio Zanetti, директор

