

Primljen / Received: 23.7.2023.

Ispravljen / Corrected: 15.1.2024.

Prihvaćen / Accepted: 25.2.2024.

Dostupno online / Available online: 10.2.2025.

Ponašanje pri savijanju održive armiranobetonske grede s velikim udjelom letećeg pepela

Autori:

Doc.dr.sc. **Ram Ganesh Natarajan**

AR Sveučilište inženjerstva i tehnologije, Indija

Odjel za građevinarstvo

ramganeshme@gmail.com

Autor za korespondenciju

Prof.dr.sc. **Senthilkumar Shanmugamoorthy**

Tehničko sveučilište KSR, Indija

Odjel za građevinarstvo

senthil.env@gmail.comProf.dr.sc. **Senthilkumar Veerasamy**

Tehničko sveučilište M. Kumarasamy, Indija

Odjel za građevinarstvo

civilvsk@gmail.com**Amirtharaj John**, dipl.ing.grad.

Sveučilište Anna, Chennai, Indija

Odjel za građevinarstvo

amirthavijay1@gmail.com

Prethodno priopćenje

Ram Ganesh Natarajan, Senthilkumar Shanmugamoorthy, Senthilkumar Veerasamy, Amirtharaj John

Ponašanje pri savijanju održive armiranobetonske grede s velikim udjelom letećeg pepela

Šira upotreba velikih količina letećeg pepela kao zamjene za cement u betonu nije uobičajena zbog manjeg povećanja razine čvrstoće u ranoj starosti. Leteći pepeo u stopi zamjene od 50 % korišten je u betonu kvalitete C25/30 za razvoj održivog betona s velikim udjelom letećeg pepela. Dodatak od 50 % letećeg pepela u betonu smanjuje povećanje topline hidratacije i ugrađenu energiju uz poboljšana mehanička svojstva i strukturno ponašanje. Nosivost grede povećana je za 57 % nakon sedam dana, uz smanjenje krajnjeg otklona od 53 % uz dodatak samo 2,5 % akceleratora.

Ključne riječi:

leteći pepeo, održivi beton, visoka rana čvrstoća, smanjena emisija CO₂, ponašanje pri savijanju

Research Paper

Ram Ganesh Natarajan, Senthilkumar Shanmugamoorthy, Senthilkumar Veerasamy, Amirtharaj John

Flexural behavior of sustainable high volume fly ash in (HVFA) reinforced concrete beam

Utilizing a high volume of fly ash as a replacement to cement in concrete is not widely practiced because of less strength gain in the earlier days. The fly ash at a replacement rate of 50 % was used in the C25/30 grade concrete to develop the sustainable HVFA concrete. The addition of 50 % of fly ash in the concrete reduces the heat increase and embodied energy with enhanced mechanical properties and structural behavior. The load carrying capacity of the beam was increased by 57 % at 7 days, along with 53 % reduction in ultimate deflection with the addition of only 2.5 % of accelerator.

Key words:

fly ash, sustainable concrete, high early strength, reduced CO₂ emission, flexural behavior

1. Uvod

S razvojem građevinarstva beton je postao najrasprostranjeniji materijal u graditeljstvu, što zahtijeva visoku stopu proizvodnje cementa [1]. Danas cementna industrija troši brojne prirodne resurse i emitira velike količine stakleničkih plinova [2]. Milijarda tona opsega proizvodnje cementa uzrokuje onečišćenje atmosfere emisijom CO₂ jednake količine [3]. To unapređuje upotrebu materijala kao što su GGBS (mljevena granulirana zgura visokih peći, engl. *Ground Granulated Blast-furnace Slag* - GGBS), leteći pepeo i drugi kao dodatnih materijala za cement, posebno u proizvodnji betona [4-7], koji su općenito poznati kao dodaci betonu (engl. *Supplementary Cementitious Materials* - SCM). Učinci na okoliš i financijski troškovi cementne industrije mogu se ublažiti i donekle nadoknaditi korištenjem letećeg pepela, GGBS-a, rižine ljuske, silicij-dioksida i drugih materijala kao mineralnih dodataka [8, 9]. U posljednje je vrijeme razvoj održivog betona kao koncept uštede energije, očuvanja prirodnih resursa i zaštite okoliša privukao veliku pozornost. Korištenje GGBS-a, letećeg pepela i silicij-dioksida doprinijelo je razvoju održivog betona. Udio Al₂O₃ i SiO₂ u tim materijalima posjeduje pucolanska svojstva kada su u reakciji s kalcijevim hidroksidom (CH) tijekom hidratacije i stvaraju dodatni kalcijev silikat-hidrat (CSH) i kalcijev aluminat-hidrat (CAH), što pridonosi stvaranju gušće matrice i omogućuje bolju trajnost i višu razinu čvrstoće [10]. Gledajući iz praktične perspektive, leteći pepeo, GGBS i silicij-dioksid mogu se dodati betonu umjesto cementa u omjeru od 20 do 30 %, 40 do 50 % i 5 do 10 % [11]. Svake godine diljem svijeta proizvede se ogromna količina letećeg pepela [12, 13]. Iskoristi se samo njegova mala količina, to jest oko 20 do 30 %, a ostatak se deponira, što postaje potencijalna opasnost za ekološku kontaminaciju [14, 15]. Leteći pepeo obično je sferičnog oblika i veličine mu se kreću od 1 do 100 μm. Specifična težina i površina su u rasponu od 1,9 do 2,8, odnosno 300 do 500 m²/kg. Leteći pepeo klasificira se na temelju graničnog udjela kao klasa C i klasa F. Njegov je glavni element amorfni silicij, koji u cementu stupa u interakciju s Ca(OH)₂. Potiče razvoj kalcijevih silikata i pridonosi čvrstoći cementne matrice. Budući da portlandski cement (PC) ima udio od oko 65 % vapna, a dio ostaje slobodan nakon hidratacije, neophodno je u beton unijeti pucolanski aditiv za neutralizaciju vapna i time poboljšati njegova svojstva. Primjenom letećeg pepela u proizvodnji betona smanjuje se trošak cementa i povećava otpornost na korozivno agresivne uvjete [16]. Lye i sur. [17] pokazali su da relativna stopa karbonizacije letećeg pepela ostaje ista kao kod OPC-a pod ubrzanom i prirodnom izloženosti ugljikovu dioksidu. Jee i Pradhan [18] otkrili su da cement zamijenjen s 20 % letećeg pepela u armiranome betonu može poboljšati zaštitu grede od korozije čelične armature.

Zbog vrijednih učinaka letećeg pepela na svojstva betona u zadnje su vrijeme brojna ispitivanja usmjerena na primjenu njegovih velikih udjela u betonu kao dodatka cementu, što se naziva beton s visokim volumenom letećeg pepela (engl. *High-Volume Fly Ash* - HVFA). Rani razvoj čvrstoće betona uglavnom je povezan s omjerom vode i cementa (w/c). Nizak omjer w/c u

betonu pridonosi porastu čvrstoće brže nego visok omjer w/c u betonskoj mješavini. To je zato što su zrnca cementa bliža jedno drugome i brže se formira kontinuirani sustav gela [19]. Beton HVFA nije primjenjiv za brzu gradnju. Glavna je mana betona HVFA naglo smanjenje njegove čvrstoće, posebno u ranijoj starosti, što se može zaključiti iz spore reakcije letećeg pepela koji ima velik udio CaO. Zabilježeno je da CaO u normalnim uvjetima stvrdnjavanja nije reagirao tijekom rane starosti [20]. U kasnijoj starosti čvrstoća betona HVFA može se izjednačiti ili premašiti konvencionalnu čvrstoću betona ovisno o količini, finoći letećeg pepela, brzini reakcije letećeg pepela, w/c omjeru i uvjetima njege.

Ranije postizanje čvrstoće velik je problem kod HVFA betona. To ograničava njegovu upotrebu tamo gdje je važna rana čvrstoća. Kako bi se taj problem prevladao, razni su znanstvenici predložili trostruku mješavinu OPC-a, silicij-dioksida i letećeg pepela [21-24]. Silicij poboljšava ranije postizanje čvrstoće betona stvaranjem sekundarnog C-S-H gela u ranim fazama zbog brze pucolanske reakcije. Provedena su mnoga istraživanja o određivanju svojstava betona uz zamjenu OPC-a letećim pepelom i silicijskom prašinom u razini od 20 do 30 %. Bouzoubaa i sur. [25] izvijestili su da nije bilo znatnog poboljšanja u ranijemu povećanju čvrstoće betona koji je imao udio od 8 % silicij-dioksida nakon što je cement zamijenjen s 40 % letećeg pepela. Zato upotreba letećeg pepela s drugim SCM-om za postizanje ranijeg povećanja čvrstoće zahtijeva intenzivno istraživanje. S druge strane, nekoliko je istraživanja [26-28] preporučilo da dodatak ubrzivača može povećati ranije svojstvo povećanja čvrstoće betona.

Kesharwani i sur. [29] zaključili su da je cement zamijenjen letećim pepelom prikladan samo za beton niske kvalitete kao što je to M20. Također su zaključili da cement zamijenjen s 25 % letećeg pepela ima samo impresivan porast čvrstoće. Ananyachandran i Vasugi [30] ispitali su rano povećanje čvrstoće betona zamiješanog s 30 do 50 % letećeg pepela pomiješanog s ubrzivačima poput Ca(NO₃)₂ u kombinaciji s trietanolaminom (C₆H₁₅NO₃). Mješavina ima udio od 30 % letećeg pepela s 1 % Ca(NO₃)₂ i 0,05 % C₆H₁₅NO₃, što daje maksimalan porast čvrstoće od 18,23 % i 54,29 % nakon jednog i tri dana starosti. Salain i sur. [31] ispitali su utjecaj ubrzivača na ranije postizanje čvrstoće betona zamiješanog s 10 % letećeg pepela klase F. Dodavanjem 2,5 %, 5 %, 7,5 % i 10 % ubrzivača u beton s letećim pepelom tlačna se čvrstoća povećava za 31,8 %, 31,1 %, 27,1 % i 24,1 %. Sounthararajan i Sivakumar [32] proveli su istraživanje na betonu visoke čvrstoće zamiješanome s 50 % letećeg pepela s metalnim vlaknima te su dobili visoku čvrstoću od oko 50,7 MPa nakon samo sedam dana njege. Lee i sur. [33] upotrijebili su CSA kako bi poboljšali rani porast čvrstoće, a također su istražili utjecaj ubrzivača kako bi pokazali prikladnost betonske mješavine. Uočeno je da je optimalan udio CSA za postizanje ranog porasta čvrstoće iznosio 17 % veziva s omjerom CaO/SO₃ 1,9 i omjerom SO₃/Al₂O₃ 1,25. Bilo je jasno da CSA pomiješan s Na₂SO₄ potiče rani porast čvrstoće. Sharma i sur. [34] bili su usredotočeni ponajprije na ubrzivače koji se miješaju u betonsku smjesu različitom brzinom kako bi se dobila vrlo učinkovita

mješavina. Mješavina s ubrzivačem tipa C (Plastol Ultra 209) imala je od 4 % do 5 % veću čvrstoću od mješavine s ubrzivačima tipa B (Sika Viscocrete HDP20) i D (Masterset AC 100).

Murtiadi i sur. [35] istraživali su učinak kemijskog ubrzivača i normalne njege na obični beton i visoku čvrstoću. Na temelju rezultata zaključili su da kemijski ubrzivači i stvrdnjavanje vodenom parom uvelike pridonose ranom porastu čvrstoće. Naqash i sur. [36] koristili su smjesu ubrzivača natrijeva nitrata u omjeru od 1 %, 1,5 %, 2 %, 2,5 % i 3 % mase cementa. Ispitan je optimalan udio ubrzivača koji bi se mogao koristiti bez utjecaja na svojstva betona. Rezultati su pokazali da je korištenje natrijeva nitrata kao ubrzivača prihvatljivo do 2,5 % te da povećava tlačnu čvrstoću, čvrstoću na savijanje i vlačnu čvrstoću nakon tri i sedam dana stvrdnjavanja. Suto i Niwase [37] proveli su istraživanje kako bi poboljšali rani razvoj čvrstoće upotrebom mješavine raznih kemijskih dodataka. Upotrijebili su kemijske dodatke *Master Ease* (ME), koji se koriste kao dodatak za uvlačenje zraka, i *Master X Seed* (MXS), koji se koristi kao ubrzivač. Utvrđeno je da je čvrstoća betona LPC-ME-MXS veća od OPC-ME-a nakon tri dana njege.

Iz pregleda literature uočeno je da je dan velik doprinos primjeni letećeg pepela kao dodatka te ubrzivača za ranije postizanje čvrstoće betona s letećim pepelom. Većina je istraživanja zaključila da je primjena do 30 % letećeg pepela optimalna. Više od 30 % letećeg pepela negativno utječe na svojstva betona. Hashmi i sur. [38] zaključili su da beton izrađen s 40 % letećeg pepela može postići samo 78 % cementa koji OPC beton postiže u 28 dana. Sounthararajan i Sivakumar [32] otkrili su da je ranija čvrstoća betona umiješanog s 50 % letećeg pepela bila manja u usporedbi s betonom umiješanog s 25 % letećeg pepela. Upotreba velike količine letećeg pepela vodi u održivu i bolju budućnost. Zbog urbanizacije i ogromnog rasta stanovništva prirodni se resursi iscrpljuju puno brže, što predstavlja brojne izazove za znanost, razvoj i industriju. U građevinarstvu potražnja za građevnim materijalima poput betona eksponencijalno raste. Dakle, veći opseg upotrebe letećeg pepela u građevinskim projektima ne samo da će riješiti probleme odlaganja letećeg pepela, već će pomoći u sve iscrpljenijoj potrošnji prirodnih resursa, čime će se potaknuti održivi razvoj. Zato se u ovom istraživanju za proizvodnju betona boljih svojstava ranijeg postizanja čvrstoće primjenjuje velik udio letećeg pepela (50 %) i analizira utjecaj na odgovarajuću upotrebu ubrzivača za ranije postizanje čvrstoće. Koliko nam je poznato, ovo je ispitivanje prvi pokušaj istraživanja utjecaja ubrzivača na betonsku gredu od HVFA-e.

2. Materijali

U ovom radu predstavljeno je istraživanje utjecaja ubrzivača na mehanička svojstva i performanse savijanja betona s velikim udjelom letećeg pepela (HVFA). Dodatno je razmotreno miješanje betonske mješavine za postizanje visoke čvrstoće primjenom konceptualne strategije proporcije, uzimajući u obzir omjer veziva i ukupnog agregata te omjer finog i grubog

agregata. Sveobuhvatna eksperimentalna ispitivanja koja su uključivala konus slijeganja te tlačnu i vlačnu čvrstoću dovela su do ispitivanja performansi betona s velikim udjelom letećeg pepela.

Cement: Korišten je cement Coromandel King OPC 53. Gubitak žarenja iznosio je 0,98 %, specifična težina 3,15, a njegov kemijski sastav vidljiv je u tablici 1.

Tablica 1. Kemijski sastav cementa

Sastav	Količina [%]
SiO ₂	20,81
Al ₂ O ₃	4,79
Fe ₂ O ₃	3,2
CaO	63,9
MgO	2,61
SO ₃	1,39
Na ₂ O	0,18
K ₂ O	0,79
Cl ⁻	0,002

Fini agregati: Korišten je lokalno dostupan riječni pijesak s granulometrijskim sastavom manjim od 4,75 mm, u skladu sa zonom ocjenjivanja-II IS: 383–1970 [39]. Modul finoće iznosio je 2,57, specifična težina 2,71, a apsorpcija voda 0,67 %. Ispitan je pod standardnim uvjetima.

Krupni agregati: Korišten je dobro sortirani uglati granitni kamen maksimalne veličine od 20 mm, u skladu s IS: 383–1970 [39]. Specifična težina iznosila je 2,7, modul finoće 7,2, a upijanje vode 0,62 %.

Leteći pepeo: U ovome ispitivanju korišten je leteći pepeo klase F dobiven iz termoelektrane Ennore. Gubitak žarenja iznosio je 1,9 %, specifična težina 2,2, udio vlage 0,73 %, a njegov kemijski sastav prikazan je u tablici 2.

Tablica 2. Kemijski sastav letećeg pepela

Sastav	Količina [%]
SiO ₂	59,3
Al ₂ O ₃	34,6
Fe ₂ O ₃	5,87
CaO	1,02
MgO	0,38
SO ₃	0,1
Na ₂ O	1,28
K ₂ O	0,01
Cl ⁻	0,49

Kemijski dodatak: Korišten je CERAPLAST-ACL, ubrzivač na bazi kalcijeva nitrata, specifične težine 1,82 i udjela krutine od 25 %, koji se upotrebljava kao dodatak za ubrzavanje pucolanske reakcije u betonu.

Tablica 3. Omjer miješanja

Ubrzivač [%]	Oznaka uzorka	Cement [kg/m ³]	Leteći pepeo [kg/m ³]	Sitni agregat [kg/m ³]	Krupni agregat [kg/m ³]	Ubrzivač [kg/m ³]	Voda [kg/m ³]
0	CC	270,87	270,87	601	924,59	0	197
0,5 %	A0,5 %	270,87	270,87	601	924,59	2,7	197
1 %	A1 %	270,87	270,87	601	924,59	5,14	197
1,5 %	A1,5 %	270,87	270,87	601	924,59	8,124	197
2 %	A2 %	270,87	270,87	601	924,59	10,832	197
2,5 %	A2,5 %	270,87	270,87	601	924,59	13,54	197
3 %	A3 %	270,87	270,87	601	924,59	16,248	197
3,5 %	A3,5 %	270,87	270,87	601	924,59	18,956	197
4 %	A4 %	270,87	270,87	601	924,59	21,664	197
4,5 %	A4,5 %	270,87	270,87	601	924,59	24,372	197
5 %	A5 %	270,87	270,87	601	924,59	27,08	197

Tablica 4. Ugrađena energija (*embodied energy* - EE) betona s letećim pepelom i OPC betona

Sastojci	OPC beton		Beton s letećim pepelom		Beton s letećim pepelom i ubrzivačem	
	Količine [kg/m ³]	EE [MJ/m ³]	Količine [kg/m ³]	EE [MJ/m ³]	Količine [kg/m ³]	EE [MJ/m ³]
Cement	541,74	2599,26	270,87	1299,63	270,87	1299,63
Leteći pepeo	0	0	270,87	27,08	270,87	27,08
Sitni agregat	601	52,287	601	52,287	601	52,287
Krupni agregat	924,59	76,74	924,59	76,74	924,59	76,74
Voda	197	39,4	197	39,4	197	39,4
Ubrzivač	0	0	0	0	27,08	310,71
Ukupno		2767,68		1495,13		1805,84

3. Eksperiment

Pripremljeno je deset različitih tipova betona razreda čvrstoće C 25/30 s dodatkom od 0 do 5 % ubrzivača u intervalu od 0,5 % na masu cementnog materijala, raspoređenog prema IS:10262-2009 [40]. Beton je ispitan na slijeganje i mehanička svojstva kao što su tlačna čvrstoća, vlačna čvrstoća cijepanjem, čvrstoća na savijanje i ponašanje grede pri savijanju. Mješavina koja nema ubrzivač (0 %) smatra se kontrolnim betonom (CC). U tablici 3. prikazan je omjer miješanja betona s ubrzivačem u različitim udjelima. Na početku su krupni agregat i fini agregat ubačeni u miješalicu i miješani dvije minute, a zatim je potrebna količina cementa umiješana u smjesu i miješana dvije minute u suhome stanju. S druge strane dodan je odgovarajući udio ubrzivača (0 %, 0,5 %, 1 %, 1,5 %, 2 %, 2,5 %, 3 %, 3,5 %, 4 %, 4,5 % i 5 %) s potrebnim količinama vode. Mješavina vode i ubrzivača dodana je u miješalicu u kojoj su bili cement te krupni i sitni agregat te je miješana četiri minute. Pomoću konusa slijeganja ispitana su svojstva obradivosti zamiješanoga svježeg betona te je izmjerena njegova vrijednost slijeganja. Za ispitivanje tlačne čvrstoće izrađen je kockasti uzorak od 100 mm prema IS: 516-1959 [41]. Uzorak cilindra veličine 100 mm promjera × 200 mm visine izrađen je za ispitivanje cijepane vlačne čvrstoće prema

IS:5816-1959 [42]. Izrađen je uzorak prizme veličine 100 x 100 x 500 mm za ispitivanje čvrstoće na savijanje ili modula loma prema ASTM C293/C293M [43]. Svi su uzorci izvađeni iz kalupa nakon 24 sata vlažne njege i potom ubačeni u spremnik za vodu na njegu. Nakon sedam, 14 i 28 dana njege ispitana su svojstva uzoraka.

3.1. Ugrađena energija letećeg pepela

U građevinskoj industriji vlada velika potreba za energijom. Energija koja se koristi za proizvodnju, transport, stvarnu upotrebu u izgradnji i nakon nje naziva se ugrađena energija (engl. *Embodied energy* - EE). Ugrađena energija jest zbroj svih energija potrebnih za proizvodnju bilo kojeg dobra ili usluge. Smatra se da je ona ugrađena u sam proizvod ili utjelovljena u njemu. Koncept ugrađene energije pomogao je u određivanju učinkovitosti uređaja za proizvodnju ili uštedu energije ili stvarnih troškova zgrade, jer ugrađena energija uključuje emisije stakleničkih plinova. Jedan od ključnih razloga za procjenu te količine jest usporedba količine energije proizvedene ili uštedene tim proizvodom s količinom energije potrošene za njegovu proizvodnju. Također pomaže u izračunu ukupne količine energije potrebne za cijeli životni ciklus proizvoda. Energija u

Tablica 5. Detalji uzorka grede

Oznaka uzorka	Ubrzivač [%]	$\rho = A_{st}/bd$ [%]	Područje elastičnog čelika (A_{st}) [mm ²]
CC	0	0,75	226,19
A2,5 %	2,5		

građevinarstvu može se promatrati iz dviju perspektiva. Prvo, energija ulazi u izgradnju zgrade upotrebom različitih materijala poput cementa, čelika ili agregata. Drugo, energija se koristi za stvaranje ugodnog okruženja unutar zgrade tijekom njezina cijeloga životnog vijeka [44]. Brojni su znanstvenici tijekom nekoliko godina proučavali ugrađenu energiju u građevnim materijalima u odnosu između građevnih materijala, procesa gradnje i njihovih učinaka na okoliš. U posljednje vrijeme ti ugrađeni energetske čimbenici dobivaju sve veću ulogu zbog povećanja energetske učinkovitosti zgrada [45]. Utvrđeno je da je ugrađena energija OPC-a 54 % veća nego ona betona s letećim pepelom. Dakle, zamjena cementa s 50 % letećeg pepela u betonu smanjit će ugrađenu energiju za 54 %. U skladu s time zamjena cementa s 50 % letećeg pepela s dodatkom ubrzivača u betonu smanjuje ugrađenu energiju za 34 % kao što je to prikazano u tablici 4.

3.2. Određivanje tlačne čvrstoće betona

Ispitivanje tlačne čvrstoće provedeno je prema IS: 516-1959 [41] na uzorku kocke veličine 150 x 150 x 150 mm. Ispitni uzorak postavljen je u UTM i opterećen do sloma uzorka. Tlačna čvrstoća određena je pomoću izraza (1).

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

gdje je σ je tlačna čvrstoća betona [MPa], F opterećenje pri slomu [N], a A površina betona [mm²].

3.3. Određivanje vlačne čvrstoće betona na cijepanje

Vlačno ispitivanje cijepanjem provedeno je prema IS: 5816-1959 [42] pomoću cilindričnog uzorka veličine 150 x 300 mm. Ispitni uzorak uzdužno je postavljen u UTM i opterećen do sloma koji se dogodio duž vertikalnog promjera uzorka. Vlačna čvrstoća uzorka određena je pomoću izraza (2).

$$\sigma = \frac{2P}{\pi DL} \quad (2)$$

gdje je σ vlačna čvrstoća betona cijepanjem [MPa], P opterećenje kvara [N], D promjer uzorka [mm], a L visina uzorka [mm].

3.4. Određivanje čvrstoće na savijanje betona

Čvrstoća na savijanje određena je na uzorku prizme veličine 500 x 100 x 100 mm prema specifikacijama IS 516-1959 [41]. Modul loma uzorka određen je pomoću izraza (3).

$$\sigma = \frac{FL}{bd^2} \quad (3)$$

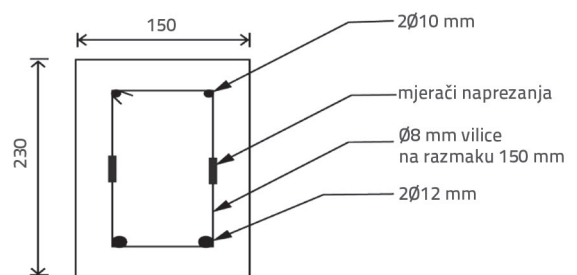
gdje je σ modul loma uzorka [MPa], F opterećenje slomom [N], L duljina uzorka [mm], b širina uzorka [mm], a d visina uzorka [mm].

3.5. Određivanje ponašanja grede pri savijanju

Primarni cilj bio je istražiti savijanje HVFC-a (A2,5 %) s dodatkom ubrzivača podvrgnutog savijanju opterećenjima pod različitim parametrima, uključujući nosivost opterećenja, moment u odnosu na progib, duktilnost, pucanje, naprezanje – deformaciju i usporedbu s OPC (CC) gredom.

3.5.1. Izrada grede

Greda veličine 150 x 230 x 3000 mm projektirana je prema standardima IS:456-2000 [48] i korištena je za određivanje ponašanja pri savijanju. Sve su grede projektirane kao pojedinačne armirane grede i imaju dvije šipke promjera 12 mm u vlačnoj zoni i dvije šipke promjera 10 mm u tlačnoj zoni. Na gredu dodan je betonski pokrovni blok debljine 25 mm. Kako bi se postigao čisti slom savijanjem u središtu grede, uzorak grede dizajniran je tako da se odupre slomu smicanja kada uzdužna vlačna armatura popusti. Zbog toga su dvokrake papučice promjera 8 mm postavljene u gredu na razmaku od 150 mm. Na slici 1. prikazan je poprečni presjek uzorka grede. U tablici 5. dan je detaljan opis pojedinosti armature uzorka grede.



Slika 1. Poprečni presjek grede

3.5.2. Izrada grede

Kalup je izrađen od zavarene čelične ploče prema projektiranoj dimenziji grede. Mjerač naprezanja TML-10MM s otporom od 120 Ohma ljepljivom je zalijepljen za sredinu raspona zatezne šipke. Prije lijepljenja mjerača naprezanja površinu zatezne šipke trebalo je glatko izbrusiti finim brusnim papirom. Na vodonepropusnoj platformi izmiješan je beton i izliven u kalup za gredu. Cement, sitni agregat, prvo je izvagan i pomiješan, a zatim mu je dodan krupni agregat i izmiješan. Toj je smjesi



Slika 2. Ispitni postav

dodan ubrzivač pomiješan s vodom. Uzorak je izvađen iz kalupa njegovan sedam dana pomoću jutenih vrećica, a nakon što je 24 sata bio uronjen u vodu.

3.5.3. Ispitivanje AB grede

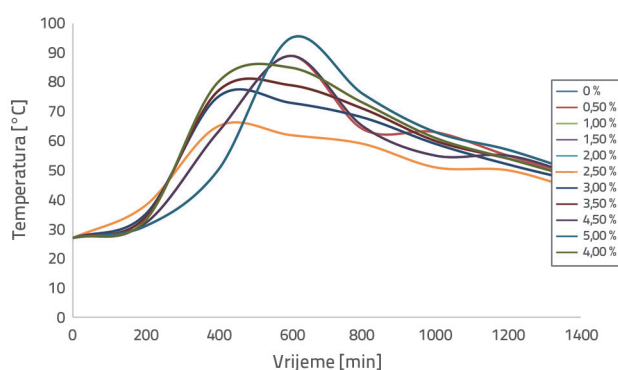
Prije ispitivanja uzorak grede u cijelosti je izbijeljen, a točno su naznačene središnje linije, neutralna os i mjesto za lijepljenje mjerača napreznja. Na udaljenosti od $d/2$ od prednje strane grede fiksiran je mjerač napreznja za mjerenje tlačne deformacije. Pristup polumosta primijenjen je za spajanje vodećih žica mjerača napreznja na 10-kanalni prenosnik napreznja i zapisivač podataka. Za mjerenje otklona pretvarač linearnoga promjenjivog pomaka (LVDT) postavljen je na sredinu raspona. Uzorak grede je nakon sedam dana njege ispitivan na savijanje pri opterećenju u dvije točke pomoću okvira za opterećenje kapaciteta 1000 kN kao što je to prikazano na slici 2. Uzorak grede prvo je opterećen u četiri točke, u koracima od 1 N, a nakon što je osigurana sigurnost osoblja, opreme i instrumenata. Za procjenu širine pukotine korišten je ručni mikroskop s optičkim povećanjem od 40 i osjetljivošću od 0,01 mm.

4. Rezultati i diskusija

4.1. Utjecaj ubrzivača na toplinu hidratacije cementa

Krivulje egzotermne temperature pomažu u praćenju procesa hidratacije cementa. Za proučavanje reaktivnosti cementnih materijala uobičajeno se primjenjuje metoda korištenja izotermalnoga kalorimetra. Budući da je hidratacija cementa egzotermna reakcija, mjerenje količine topline koju su ti materijali oslobodili tijekom hidratacije pokazuje količinu materijala koji su reagirali. Tipična kumulativna toplota CC i HVFC betona prikazana je na slici 3., gdje je ucrtana kao komponenta vremena. Uočeno je da u CC mješavini induksijski period traje čak tri sata, a kada se u smjesu doda 1 % ubrzivača, induksijski period skraćuje se na dva sata. S betonskom mješavinom s 2 % ubrzivača vrijeme indukcije skraćuje se na jedan sat. Nije utvrđeno induksijsko razdoblje za 2,5-postotnu mješavinu ubrzivača. Temperatura

počinje rasti odmah po početku mjerenja, tj. oko 10 minuta nakon miješanja paste. Za CC mješavinu primijećeno je usporavanje početne reakcije hidratacije cementa zbog razrjeđivanja i interakcije s česticama letećeg pepela [46]. Dokazano je da povećanje udjela letećeg pepela rezultira smanjenom reakcijom hidratacije i odgođenim vremenom stvrdnjavanja u ranoj dobi. Taj trend uočen je kod mješavine CC [47]. Dodavanje ubrzivača ubrzava reakciju hidratacije i skraćuje vrijeme očvršćivanja. Taj trend uočen je kod mješavine A0,5 % do A5 %.



Slika 3. Toplina hidratacije

Na slici 3. uočeno je da dodavanje ubrzivača smanjuje maksimalnu temperaturu. CC mješavina postiže maksimalnu temperaturu od 95 °C. Utvrđeno je da s većim udjelom ubrzivača (2,5 %) pada temperatura betonske mješavine tijekom hidratacije. To pokazuje da hidratacija počinje čim je udio ubrzivača veći. Što je veća doza ubrzivača, to je kraće vrijeme za postizanje maksimalne temperature. Dodavanjem 0,5 %, 1 %, 1,5 %, 2 %, 2,5 %, 3 %, 3,5 %, 4 %, 4,5 % i 5 % ubrzivača u HVFA temperatura hidratacije pada na 89 °C, 85 °C, 79 °C, 73 °C, 62 °C, 73 °C, 79 °C, 85 °C, 89 °C i 95 °C. Više temperature pogoršavaju razne vrste nepogoda poput oluja, poplava ili suša te ozbiljno ugrožavaju okoliš. Zato će snižena temperatura podržati održivi razvoj i poboljšati okoliš.

4.2. Učinak ubrzivača na vrijeme vezivanja cementa

U tablici 6. prikazano je početno i konačno vrijeme vezivanja HVFA betona s dodatkom ubrzivača. Kako se povećava količina ubrzivača u HVFA mješavini, tako se početak i kraj vremena vezivanja betonske mješavine skraćuju. To je zbog koncentracije kationa kalcija u akceleratoru koji povećava nizak udio kalcija u letećem pepelu, čime se poboljšava učinak povećanja čvrstoće. Ca^{2+} dominira u okruženju, dok NO_3 također može imati utjecaja, ovisno o vrsti cementa.

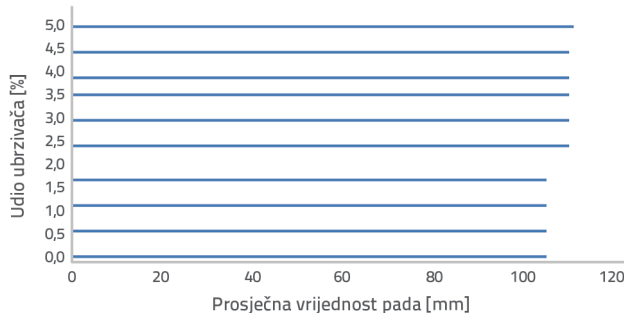
Tablica 6. Vrijeme vezivanja

Mješavina	Početak vremena vezivanja [min]	Kraj vremena vezivanja [min]
CC	330	500
A0,5 %	285	470
A1 %	245	420
A1,5 %	190	380
A2 %	165	290
A2,5 %	145	210
A3 %	140	190
A3,5 %	135	180
A4 %	135	170
A4,5 %	130	150
A5 %	125	140

Dakle, dodavanje ubrzivača HVFA skraćuje indukcijsko razdoblje, podiže početnu temperaturu i ubrzava vrijeme maksimalne temperature, no smanjuje maksimalnu temperaturu hidratacije.

4.3. Utjecaj ubrzivača na obradivost betona

Vrijednost slijeganja različitih betonskih mješavina s različitim udjelima ubrzivača prikazana je na slici 4. Željena vrijednost slijeganja od 75 do 100 mm postignuta je za kontrolne mješavine uz upotrebu letećeg pepela. Također, dodavanje ubrzivača povećava obradivost betona za oko 4 %.



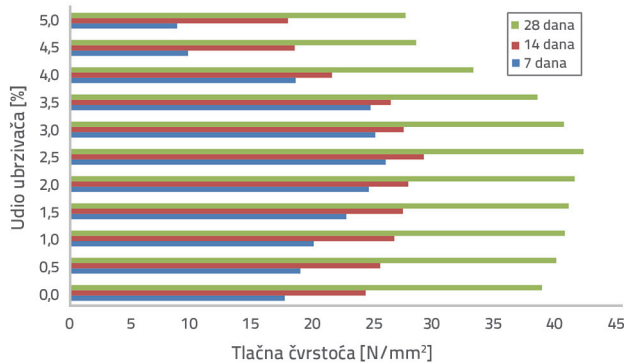
Slika 4. Varijacije vrijednosti konzistencije s različitim udjelima ubrzivača

4.4. Utjecaj ubrzivača na tlačnu čvrstoću betona

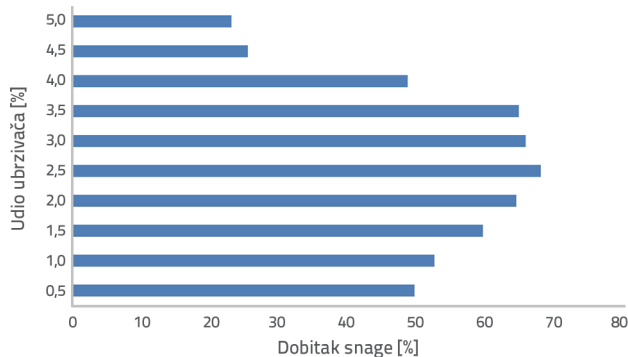
Na slici 5. prikazana je tlačna čvrstoća betona s letećim pepelom i s različitim udjelima ubrzivača. Dodatak ubrzivača povećao je tlačnu čvrstoću, osobito u ranoj starosti. Rezultat podupiru Neville i Brooks [49], što znači da dodavanje primjese može povećati udio vapna u vulkanskome pepelu. Kapacitet povećanja čvrstoće različitih mješavina nakon sedam dana grafički je prikazan na slici 6. Uz dodatak ubrzivača od 0,5 %, 1 %, 1,5 %, 2 %, 2,5 %, 3 %, 3,5 %, 4 %, 4,5 % i 5 % HVFA beton postiže 49,9 %, 52,8 %, 59,86 %, 64,73 %, 68,3 %, 66,1 %, 65,09 %, 48,89 %, 25,6 % i 23,2 % svoje ciljne čvrstoće uz period njege od samo sedam dana. C₂S i C₃S igraju važniju ulogu u razvoju

čvrstoće cementne paste od ostalih proizvoda za hidrataciju kao što su C₂S, C₃S, C₃A i C₄AF [50, 51]. C₂S pomaže u razvoju čvrstoće u kasnijoj starosti, dok C₃S pomaže u razvoju čvrstoće u ranijim starostima. Prisutnost kalcijeva nitrata u ubrzivaču osigurava kalcijeve ione koji pospješuju hidrataciju i potiču stvaranje proizvoda hidratacije. Uz ubrzanu hidrataciju C₃S i C₂S portlandskog cementa i stvaranja C-S-H i Ca(OH)₂ faza pucolanska reakcija koja se dogodila između aluminijeva oksida i silicijeva dioksida reaktivnog na leteći pepeo i Ca(OH)₂ također je bila brža za proizvodnju dodatnoga vezivnog spoja, C-A-H i C-S-H, koji pridonosi povećanju tlačne čvrstoće. To se pripisuje velikoj dostupnosti slobodne vode tijekom rane hidratacije koja olakšava ionizaciju mineralnog portland cementa i letećeg pepela. Hidratacija se pokazuje bržom, kao i stvrdnjavanje, s razvojem čvrstoće betona. Utvrđeno je da je tlačna čvrstoća HVFA betona s dodatkom ubrzivača u udjelu od 4,6 do 8,8 % veća od kontrolnog betona nakon 28 dana.

Sharma i sur. [34] postigli su 17 % veću čvrstoću betona s dodatkom 5 % ubrzivača nakon sedam dana. Usporedbom postignutih rezultata tlačne čvrstoće s rezultatima iz literature [32, 34, 44] zaključeno je da se upotrebom letećeg pepela većeg volumena u betonu uz odgovarajući udio ubrzivača postiže maksimalno poboljšanje tlačne čvrstoće. Zato potiče održive građevinske prakse s manjim utjecajem na okoliš i energiju te sa smanjenom emisijom CO₂. Uočeno je da dodatak ubrzivača veći od 2,5 % smanjuje čvrstoću, što je povezano s udjelom vode u ubrzivaču. Velik udio ubrzivača imat će više vode, što ima tendenciju smanjenja čvrstoće.



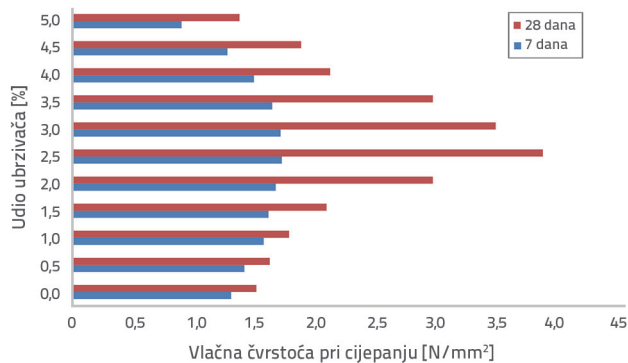
Slika 5. Varijacija tlačne čvrstoće s različitim udjelima ubrzivača



Slika 6. Dobitak na čvrstoći mješavine s različitim udjelima ubrzivača

4.5. Utjecaj ubrzivača na vlačnu čvrstoću betona cijepanjem

Do pucanja u ranijoj starosti može doći zbog promjena volumena uslijed toplinske kontrakcije i skupljanja. Učinci topline i skupljanja izazivaju vlačna naprezanja u betonu. Ako su ta naprezanja veća od vlačne čvrstoće betona, koja je donekle niska u ranoj starosti, mogu nastati pukotine u betonu. Zato je važno procijeniti vlačnu čvrstoću betona pri kojoj može doći do pucanja betona. Cilindrični je uzorak ispitan prema IS: 5816-1959 [42] kako bi se odredila vlačna čvrstoća betona nakon sedam i 28 dana. Iz rezultata je uočeno da beton zamiješan s dodatkom ubrzivača postiže veću čvrstoću u ranijim starostima. Utvrđeno je da je vlačna čvrstoća HVFA betona uz dodatak ubrzivača akceleratora od 8,39 % do 32 % i od 7,2 % do 155 % veća od kontrolnog betona starosti sedam i 28 dana. Sounthararajan i Sivakumar [32] postigli su maksimalnu vlačnu čvrstoću cijepanja od 3,58 N/mm² za 25 % letećeg pepela i 1,5 % čeličnih vlakana s 1 % akceleratora. U ovome istraživanju maksimalna vlačna čvrstoća na cijepanje od 3,89 N/mm² postignuta je uz upotrebu veće količine letećeg pepela od 50 % s 2,5 % akceleratora. To pokazuje da upotreba velike količine letećeg pepela u betonu ne utječe na učinak povećanja čvrstoće uz upotrebu velike količine ubrzivača. Međutim, važan je pravilan udio ubrzivača jer je utvrđeno da dodavanje ubrzivača u postotku većem od 2,5 % pokazuje smanjenje vlačne čvrstoće betona dobivene za tlačnu čvrstoću kao što je to prikazano na slici 7.



Slika 7. Varijacija vlačne čvrstoće cijepanjem s različitim udjelima ubrzivača

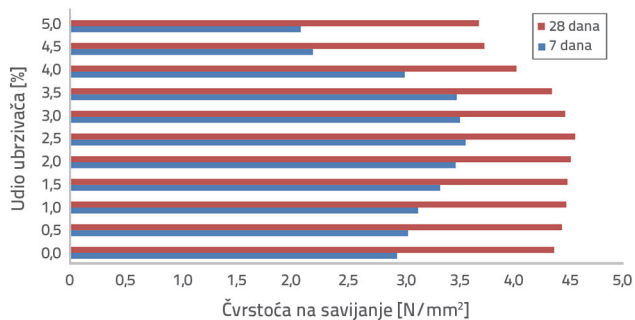
4.6. Utjecaj ubrzivača na čvrstoću betona na savijanje

Čvrstoća na savijanje jedno je od važnijih mehaničkih svojstava koje treba uzeti u obzir pri proučavanju HVFA, posebno pri

Tablica 7. Rezultati ponašanja grede pri savijanju

Greda	Opterećenje pri pojavi prve pukotine [kN]	Najveće opterećenje [kN]	Najveći moment [kNm]	Najveća defleksija [mm]
CC	20	35	34,3	0,66
A2,5 %	35	55	53,9	0,31

izradi greda i ploča. Općenito, čvrstoća na savijanje raste s vremenom njege i smanjuje se s povećanjem udjela letećeg pepela. Sounthararajan i Sivakumar [52] izvijestili su o tome da mješavina HVFA betona s niskom omjerom vode i cementa može postići čvrstoću na savijanje na temelju ciljane tlačne čvrstoće nakon 28 dana. U skladu s time, uz niski omjer w/c od 0,36 postignuta je čvrstoća na savijanje temeljena na ciljanoj tlačnoj čvrstoći nakon 28 dana. Učinak ubrzivača na čvrstoću HVFA-e na savijanje prikazan je na slici 8. Čvrstoća na savijanje HVFA betona s ubrzivačem bila je 2,3 do 21,01 % i 0,2 do 4,34 % viša od kontrolnog betona nakon sedam i 28 dana. Utvrđeno je da se povećanje razine čvrstoće na savijanje smanjuje povećanjem udjela ubrzivača iznad 2,5 %. HVFA betonska mješavina s 2,5 % ubrzivača ima najveći učinak ubrzavanja, čime se čvrstoća na savijanje poboljšava za 21,01 % u ranijoj starosti (sedam dana). Uočeno je da dodatak ubrzivača poboljšava svojstvo povećanja čvrstoće betona s letećim pepelom u ranijim i kasnijim godinama. Međutim, utvrđeno je da je učinak povećanja čvrstoće HVFA betona s ubrzivačem veći u ranijoj fazi (sedam dana). Rezultati ispitivanja pokazuju da je čvrstoća na savijanje, posebno u ranijoj starosti HVFA betona, znatno poboljšana zbog izvrsne ekscitacije ubrzivača na pucolansku reakciju letećeg pepela. To je od vitalne važnosti za beton, gdje će niz tehničkih problema kao što su visoka toplina hidratacije, visoko autogeno skupljanje i velika krutost biti riješen velikim smanjenjem udjela cementa.



Slika 8. Varijacije čvrstoće betona na savijanje s različitim udjelima ubrzivača

4.7. Učinak ubrzivača na savijanje AB grede

Različiti rezultati kao što su nosivost, moment u odnosu na progib, duktilnost, pucanje i naprezanje-deformacija grede, ispitani pod opterećenjem savijanjem, prikazani su u tablici 7.

Tablica 8. Eksperimentalni i teorijski moment kapaciteta nosivosti grede

ID grede	Eksperimentalni moment [kNm]	Teorijski moment [kNm]	
		EC2	BS-8110
CC	34,3	39,65	46,30
A2,5 %	53,9	43,14	50,03

4.7.1. Kapacitet opterećenja i momenta nosivosti grede

Utvrđeno je da je nosivost AB greda bez letećeg pepela (CC) manja od nosivosti AB grede s letećim pepelom (A2,5 %), koja ima udjele od 270,87 kg/m³ cementa, 270,87 kg/m³ letećeg pepela, 601 kg/m³ sitnog agregata, 924,59 kg/m³ krupnoga agregata, 197 kg/m³ vode i 13,54 kg/m³ ubrzivača. Najveća nosivost CC grede bila je 57 % manja u odnosu na nosivost grede A2,5 % nakon sedam dana. To pokazuje da se kapacitet nosivosti uzorka s velikom količinom letećeg pepela može poboljšati dodavanjem ubrzivača u ranijim starostima. Općenito, beton s letećim pepelom ima manju čvrstoću u ranijim starostima zbog spore pucolanske reakcije letećeg pepela nego CC. Thangaraj i Thenmozhi [53] ispitali su ponašanje pri savijanju OPC i HVFA greda izrađenih s 50 do 60 % letećeg pepela klase F i objavili da je nosivost HVFA grede bila 25 % manja od one OPC grede. Hashmi i sur. [54] izvijestili su da je nosivost grede smanjena za 25 %, 46 % i 60 % zamjenom cementa s 20 %, 40 % i 60 % letećeg pepela. Međutim, u ovom istraživanju konačni kapacitet nosivosti betona s letećim pepelom bio je veći nego CC-ov u ranijim starostima. Taj ishod pokazuje da primjena ubrzivača unaprijeđuje hidrataciju reaktivnih hauyne minerala, čime se također povećala početna proizvodnja etringita.

Konkretno, sulfatni ubrzivači Na₂SO₄ i Al₂(SO₄)₃ bili su učinkoviti za povećanje čvrstoće zbog svoje brzine ionizacije, a također su početno eluirani ioni SO₄²⁻ korisni za nukleaciju etringit-hidrata [33]. Ishod ovog istraživanja poduprt je mnogim izvorima literature [55-57]. Soman i Sobha [55] postigli su poboljšanje nosivosti grede od 25,9 % uz zamjenu letećeg pepela u udjelu od 50 %. Raj i Rao [56] postigli su poboljšanje nosivosti grede od 40 % uz zamjenu letećeg pepela u udjelu od 30 % i s maksimalnim otklonom od 9,93 mm. Madan i sur. [57] poboljšali su nosivost ploče za 53 % uz zamjenu letećeg pepela u udjelu od 60 % uz korištenje triju slojeva GFRP ploča. Usporedbom dobivenih rezultata s postojećom literaturom [55-57] utvrđeno je da su dobiveni rezultati bolji. Soman i Sobha [55] povećali su nosivost grede za samo 25,9 % uz zamjenu letećeg pepela u udjelu od 50 %, Raj i Rao [56] povećali su nosivost grede za samo 40 % uz zamjenu letećeg pepela u udjelu od 30 %, Madan i sur. [57] povećali su nosivost grede za 53 % uz zamjenu letećeg pepela u udjelu od 60 % i uz upotrebu triju slojeva GFRP ploča nakon 28 dana. Međutim, u ovom istraživanju nosivost grede povećana je za 57 % zamjenom cementa s 50 % letećeg pepela i uz dodatak samo 2,5 % ubrzivača u sedam dana. CC greda pokazuje manju nosivost od grede A2,5 %, što bi moglo biti posljedica niske tlačne čvrstoće [58]. Utvrđeno je da je kapacitet konačnog momenta grede A2,5 % veći od onog CC grede 57 %.

Za izračun teorijskoga krajnjeg momenta grede primijenjeni su Europski kodeks prakse (EC2) [59] i Britanski standardni kodeks prakse (BS 8110) [60]. Krajnji moment grede izračunan je na temelju Europskoga kodeksa prakse (EC2) [59] pomoću izraza (4):

$$M_u = 0,167f_{ck}bd^2 \quad (4)$$

Krajnji moment grede izračunan je prema Britanskome standardnom kodeksu prakse (BS 8110) [60] uz primjenu izraza (5):

$$M_u = 0,156f_{cu}bd^2 \quad (5)$$

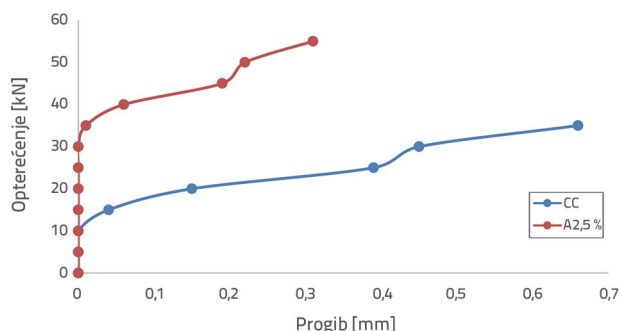
gdje je b širina grede, d efektivna dubina stupa, f_{ck} tlačna čvrstoća cilindra, a f_{cu} tlačna čvrstoća kocke.

Teorijski dobivena nosivost momenta grede primjenom EC2 i BS 8110 uspoređena je s eksperimentalno određenom nosivosti momenta grede onako kako je to prikazano u tablici 8. Uočeno je da BS-8110 točno određuje nosivost momenta grede s prosječnom varijacijom od 7,17 do 34,9 %.

4.7.2. Opterećenje u odnosu na progib

Opterećenje u odnosu na progib grede CC i grede A2,5 % testirano nakon sedam dana starosti prikazano je na slici 9. Nakon primjene opterećenja progib na sredini raspona grede je u početku bio minimalan. Nakon što su se pojavile pukotine u gredi popraćene popuštanjem čelika, progib se drastično povećao. CC greda počela je pucati pri 20 kN, dok je greda A2,5 % počela pucati pri 35 kN. To pokazuje da je prvo opterećenje pucanja grede A2,5 % bilo 75 % veće od onog CC grede. Prema IS: 456-2000 [48], progib svih vodoravnih elemenata ne smije biti veći od raspona/250. U skladu s time progib ispitivanih greda bio je unutar navedenih granica. Najveće opterećenje CC grede iznosilo je 35 kN, s maksimalnim otklonom od 0,66 mm, a najveće opterećenje A2,5 % grede iznosilo je 55 kN, s najvećim otklonom od 0,31 mm. Procijenjeno je da je maksimalni otklon snopa smanjen za 53 % dodavanjem ubrzivača. To pokazuje da se kapacitet nosivosti velike količine letećeg pepela može poboljšati zajedno sa smanjenim otklonom dodavanjem ubrzivača u ranijim starostima. Raj i Rao [56] poboljšali su nosivost grede za 40 % uz zamjenu letećeg pepela u udjelu od 30 %, s maksimalnim otklonom od 9,93 mm. Hashmi i sur. [54] izvijestio je da je progib grede u sredini raspona smanjen s 21,8 do 14,5 mm zamjenom letećeg pepela cementom u udjelu od 0 do 60 %. U usporedbi s rezultatima Hashmija i sur. [54] i Raj i Rao [56], otklon grede

smanjen je za više od 100 % zamjenom cementa s 50 % letećeg pepela uz dodavanje samo 2,5 % ubrzivača u starosti od sedam dana. Plastično područje u ponašanju opterećenja i otklona grede A2,5 % bilo je više od grede CC, odnosno onako kako je to prikazano na slici 9.



Slika 9. Opterećenje u odnosu na progib

4.7.3. Duktilnost

Duktilnost grede procjenjena je primjenom vrijednosti progiba u popuštanju i konačnoj fazi. ACI odbor-363 definirao je omjer duktilnosti kao omjer konačnog progiba i popuštanja. Duktilnost se definira kao sposobnost materijala da pretrpi veliku deformaciju prije sloma. Greda s većim omjerom duktilnosti definira da greda može izdržati veći otklon od grede s niskom vrijednosti duktilnosti. Ashour i sur. [61] tvrde da je omjer duktilnosti veći od 3 važan za dovoljnu duktilnost i raspodjelu momenta grede. U skladu s time sve ispitane grede imaju omjer duktilnosti veći od 3. Omjer duktilnosti CC grede iznosio je 7, a omjer duktilnosti grede A2,5 % 13. Krivulja CC grede nastavlja se sve dok opterećenje naglo ne padne na progib od oko 0,6 mm kao što je to prikazano na slici 9. Taj brzi pad označava točku sloma za CC uzorak. Krivulja uzorka A2,5 % nalazi se na platou nakon što dostigne svoje vršno opterećenje oko otklona od 0,35 mm. Taj je plato znatna plastična deformacija prije sloma. Krivulja se nastavlja sve dok naglo ne padne na progib od oko 0,55 mm. Uzorak grede A2,5 % pokazuje veću duktilnost u usporedbi s uzorkom CC, što je naznačeno njegovim duljim platoom i nešto većim konačnim progibom. To sugerira da dodatak od 2,5 %

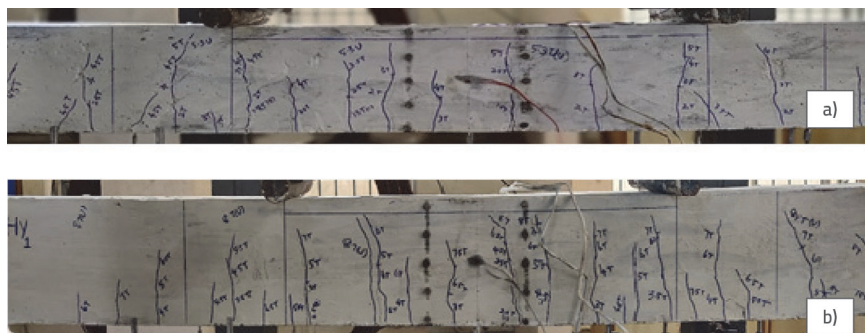
ubrzivača poboljšava sposobnost materijala da se podvrgne plastičnoj deformaciji prije sloma unutar sedam dana.

4.7.4. Karakteristike pukotine

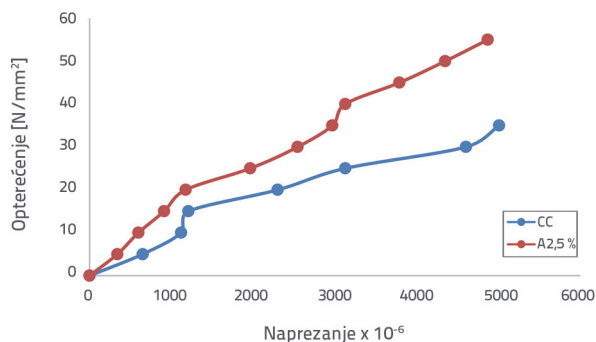
Savojne pukotine uočene su u zoni čistog momenta savijanja jer je vlačna deformacija betona dosegla maksimalne vrijednosti deformacije. Nakon što su pukotine započele u CC gredi na dnu srednjeg raspona kao što je to prikazano na slici 10., vidljive su pukotine savijanja koje su rasle okomito prema gore. Savijanjem je nastalo nekoliko nagnutih posmičnih pukotina, ali nisu primijećene vidljive pukotine na području oslonca za gredu A2,5 %. Na rasponu smicanja nisu nastale dijagonalne pukotine. Konačno, greda je propala zbog proširenja pukotina i drobljenja betona. I CC i A2,5 % greda pokazale su isti razvoj pukotina, no broj pukotina u gredi A2,5 % bio je veći nego u gredi CC. Naime, u CC gredi primijećeno je 18 pukotina, a u gredi A2,5 % primijećene su 22. Iako je broj pukotina u gredi A2,5 % bio veći, njihova je širina bila manja nego u CC gredi. Širina pukotine u gredi A2,5 % u radnoj i krajnjoj fazi iznosila je 0,05 mm i 8,5 mm, dok je širina pukotine u CC gredi u radnoj i krajnjoj fazi iznosila 0,06 mm i 6,8 mm. Šire pukotine u gredi bitno su smanjile krutost i pospešile prodiranje štetnih tvari u greda. Širina pukotine u gredi A2,5 % bila je 20 % manja od njezine širine u CC gredi. To je zbog niske topline hidratacije koja bi mogla olakšati kapilarno naprezanje i unutarnje pukotine, čime bi se pozitivno utjecalo na razvoj čvrstoće betona [62]. Međutim, za sve ispitivane serije greda širina pukotine u fazi eksploatacije bila je unutar dopuštene granice prema IS 456:2000 [48]. Zbog tlačne čvrstoće betona s letećim pepelom primijećen je iznenadni slom CC grede u usporedbi s gredom A2,5 %.

4.7.5. Raspodjela napreznja

Tlačna deformacija na gornjoj površini grede zabilježena je pri svakome povećanju opterećenja. Distribucija deformacije grede u odnosu na opterećenje za beton nakon sedam dana starosti prikazana je na slici 11. U fazi rada tlačna deformacija CC grede iznosila je 1253×10^{-6} . Tlačna deformacija u krajnjoj fazi za HVFA gredu iznosila je 5010×10^{-6} . U fazi rada tlačna deformacija grede A2,5 % iznosila je 825×10^{-6} . Tlačna deformacija u krajnjoj fazi za gredu A2,5 % iznosila je 4870×10^{-6} . To pokazuje da HVFA beton može postići svoj puni kapacitet napreznja pod opterećenjem na savijanje. Veće naprezanje primijećeno je u CC gredi zbog nižeg modula elastičnosti i vlačne čvrstoće cijepanja u odnosu na gredu A2,5 %. U gredi A2,5 % bilo je više plastičnih napreznja, jer je beton vrlo čvrst i ima veliko krajnje opterećenje, koje može izdržati veliki moment savijanja prije sloma, pri čemu CC pokazuje kruti slom.



Slika 10. Karakteristike pukotina: a) CC grede, b) grede A2,5 %



Slika 11. Opterećenje u odnosu na naprezanje

5. Zaključak

U posljednje je vrijeme razvoj održivog betona, iza kojeg stoji ideja o uštedi energije te očuvanju okoliša i neobnovljivih izvora, izazvao veliku pozornost među znanstvenicima. Učinkovit način održivog razvoja podrazumijeva smanjenje velike potrošnje prirodnih resursa. Ovo istraživanje pokazalo je mogućnost zamjene cementa s 50 % letećeg pepela kako bi se dobio održivi beton poboljšanih svojstava. Zaključci istraživanja su sljedeći:

- Cement zamijenjen s 50 % letećeg pepela s dodatkom ubrzivača drastično smanjuje ugrađenu energiju za 34 % uz poboljšana svojstva betona, tj. mehaničko i konstrukcijsko ponašanje.

- Upotreba letećeg pepela i ubrzivača smanjuje toplinu hidratacije i skraćuje vrijeme vezivanja betona u ranoj starosti. Koncentracija kationa kalcija u ubrzivaču povećava nizak udio kalcija u letećemu pepelu.
- Dodatak ubrzivača u betonu s letećim pepelom pomaže postići više od 45 % ciljne čvrstoće unutar sedam dana njegovanja uzorka. Dodatak ubrzivača povećava tlačnu čvrstoću, vlačnu čvrstoću na cijepanje i čvrstoću na savijanje betona s letećim pepelom za 68,3 %, 155 % i 21 % za 2,5 % ubrzivača. Zato je optimalna doza ubrzivača za HVFC iznosila 2,5 %.
- Konačna nosivost grede povećana je za 57 % nakon što je cement zamijenjen s 50 % letećeg pepela uz dodatak samo 2,5 % ubrzivača nakon sedam dana. Korištenje ubrzivača pospješuje hidrataciju reaktivnih *haayne* minerala, čime se povećava početna proizvodnja etringita.
- Maksimalni progib grede smanjen je za 53 % nakon što je cement zamijenjen s 50 % letećeg pepela uz dodatak samo 2,5 % ubrzivača.
- U gredi A2,5 % izbjegnuto je stvaranje širih pukotina i odgođeno pojavljivanje sloma, čime je poboljšano ponašanje duktilnosti grede. Širina pukotine u gredi A2,5 % bila je 20 % manja od širine pukotine u CC gredi. Pukotina manje širine nastala je zbog niske topline hidratacije.
- BS-8110 točno predviđa kapacitet nosivosti momenta greda CC i A2,5 % s prosječnom varijacijom od 7,17 do 34,9 %.

LITERATURA

- [1] Monteiro, P.: Concrete: microstructure, properties, and materials, McGraw-Hill Publishing, 2006.
- [2] Huisman, S., Weise, F., Meng, B., Schneider, U.: Influence of polypropylene fibres on the thermal strain of high strength concrete at high temperatures, Journal of structural fire engineering, 2 (2011) 3, pp. 173-180.
- [3] Mushtaq, F., Zahid, M., Bhatti, I.A., Nasir, S., Hussain, T.: Possible applications of coal fly ash in wastewater treatment, Journal of environmental management, 240 (2019), pp. 27-46.
- [4] Grubor, M., Carevic, I., Serdar, M., Stirmer, N.: Shrinkage of mortar with the addition of wood biomass ash and recycled tyre polymer fibers. Građevinar, 75 (2023) 4, pp. 367-378, <https://doi.org/10.14256/JCE.3642.2022>
- [5] Stojanovic, M., Radonjanin, V., Malesev, M., Milovic, T., Furgan, S.: Compressive strength of cement stabilizations containing recycled and waste materials, Građevinar, 73 (2021) 8, pp. 791-804, <https://doi.org/10.14256/JCE.3161.2021>
- [6] Jurić, K.K., Carevic, I., Serdar, M., Stirmer, N.: Feasibility of using pozzolanicity tests to assess reactivity of wood biomass fly ashes, Građevinar, 72 (2020) 12, pp. 1145-1153, <https://doi.org/10.14256/JCE.2950.2020>
- [7] Kaya, M., Uysal, M., Yilmaz, K., Karahan, O., Atis, C.D.: Mechanical properties of class C and F fly ash geopolymer mortars, Građevinar, 72 (2020) 4, pp. 297-309, <https://doi.org/10.14256/JCE.2421.2018>
- [8] Pachamuthu, S., Thangaraju, P.: Effect of incinerated paper sludge ash on fly ash-based geopolymer concrete, Građevinar, 69 (2017) 9, pp. 851-859, <https://doi.org/10.14256/JCE.1864.2016>
- [9] Malesev, M., Radonjanin, V., Draganic, S., Supic, S., Laban, M.: Influence of fly ash and decreasing water-powder ratio on performance of recycled aggregate concrete, Građevinar, 69 (2017) 9, pp. 811-820, <https://doi.org/10.14256/JCE.1379.2015>
- [10] Malvar, L.J., Lenke, L.R.: Efficiency of fly ash in mitigating alkali-silica reaction based on chemical composition, ACI materials journal, 103 (2006) 5, pp. 319-329
- [11] Bendapadi, S.C.K., Saha, P.: Contribution of fly ash to the properties of mortar and concrete, International Journal of Earth Sciences and Engineering, 4 (2011) 6, pp. 1017-1023.
- [12] Dembovska, L., Bajare, D., Pundiene, I., Vitola.: Effect of pozzolanic additives on the strength development of high-performance concrete. Procedia Engineering, 172 (2017), pp. 202-210.
- [13] Nguyen, T.B.T., Chatchawan, R., Saengsoy, W., Tangtermsirikul, S., Sugiyama, T.: Influences of different types of fly ash and confinement on performances of expansive mortars and concretes, Construction and Building Materials, 209 (2019), pp.176-186.
- [14] Minnu, S.N., Bahurudeen, A., Athira, G.: Comparison of sugarcane bagasse ash with fly ash and slag: An approach towards industrial acceptance of sugar industry waste in cleaner production of cement, Journal of Cleaner Production, 285 (2021), pp. 124836.

- [15] Hemalatha, T., Ramaswamy, A.: A review on fly ash characteristics – Towards promoting high volume utilization in developing sustainable concrete, *Journal of cleaner production*, 147 (2017), pp. 546-559.
- [16] Wang, J., Qin, Q., Hu, S., Wu, K.: A concrete material with waste coal gangue and fly ash used for farmland drainage in high groundwater level areas, *Journal of Cleaner Production*, 112 (2016), pp. 631-638.
- [17] Lye, C.Q., Dhir, R.K., Ghataora, G.S.: Carbonation resistance of fly ash concrete, *Magazine of Concrete Research*, 67 (2015) 21, pp. 1150-1178.
- [18] Jee, A.A., Pradhan, B.: Durability of Fly Ash Added Reinforced Concrete in Chloride and Composite Chloride–Sulfate Environment, In *Recent Advances in Structural Engineering*, Select Proceedings of SEC, 1 (2016), pp. 773-785
- [19] Chidara, R., Nagulagama, R., Yadav, S.: Achievement of early compressive strength in concrete using *Sporosarcina pasteurii* bacteria as an admixture, *Advances in Civil Engineering*, 12 (2014), pp. 1-7.
- [20] Mussa, M.H., Abdulhadi, A.M., Abbood, I.S., Mutalib, A. A., Yaseen, Z.M.: Late age dynamic strength of high-volume fly ash concrete with nano-silica and polypropylene fibres, *Crystals*, 10(2020) 4, pp. 243-251.
- [21] Carette, G., Malhotra, V.M.: Early-age strength development of concrete incorporating fly ash and condensed silica fume, *Special Publication*, 79 (1983), pp. 765-784.
- [22] Amudhavalli, N.K., Mathew, J.: Effect of silica fume on strength and durability parameters of concrete, *International journal of engineering sciences & emerging technologies*, 3(2012) 1, pp. 28-35.
- [23] Radlinski, M., Olek, J.: Investigation into the synergistic effects in ternary cementitious systems containing portland cement, fly ash and silica fume, *Cement and Concrete Composites*, 34 (2012) 4, pp. 451-459.
- [24] Wang, D., Zhou, X., Meng, Y., Chen, Z.: Durability of concrete containing fly ash and silica fume against combined freezing-thawing and sulfate attack, *Construction and Building Materials*, 147 (2017), pp. 398-406.
- [25] Bouzoubaa, N., Bilodeau, A., Sivasundaram, V., Fournier, B., Golden, D.M.: Development of ternary blends for high-performance concrete, *Materials Journal*, 101 (2004) 1, pp. 19-29.
- [26] Fadillah, Y.: The influence of using accelerator addition on High strength self-compacting concrete (HSSCC) in case of enhancement early compressive strength and filling ability parameters, In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 333 (2018) 1, pp. 012094.
- [27] Mansell, B., Thomas, P., Li, Y., Tapas, M.J., Holt, C.: The impact of accelerating admixtures on blended cement hydration for early age strength enhancement, In *Concrete Institute of Australia's Biennial National Conference*, 2021.
- [28] Reddy, P.N., Naqash, J.A.: Development of high early strength in concrete incorporating alccofine and non-chloride accelerator, *SN Applied Sciences*, 1 (2019), pp. 1-11.
- [29] Kesharwani, K.C., Biswas, A.K., Chaurasiya, A., Rabbani, A.: Experimental study on use of fly ash in concrete, *Int. Res. J. Eng. Technol*, 4 (2017) 9, pp. 1527-1530.
- [30] Ananyachandran, P., Vasugi, V.: Influence of Accelerators on cement replacement by large volumes of Fly ash to achieve early strength, *Electronic Journal of Structural Engineering*, 18 (2018) 2, pp. 24-36.
- [31] Salain, I., Made, A.: Effect of Accelerator on Compressive Strength Development of Class F Fly Ash Concrete, *International Journal of Engineering and Technology*, 9 (2017), pp. 3954-3957.
- [31] Sounthararajan, V.M., Sivakumar, A.: The Effect of Accelerators and Mix Constituents on the High Early Strength Concrete Properties, *International Scholarly Research Notices*, (2012), pp. 1-7.
- [32] Lee, T., Lee, J., Choi, H.: Effects of accelerators and retarders in early strength development of concrete based on low-temperature-cured ordinary Portland and calcium sulfoaluminate cement blends, *Materials*, 13 (2020) 7, pp. 1505.
- [33] Sharma, A., Duraimurugan, S., Vasugi, V.: Influence of different chemical admixtures in achieving high early strength concrete, In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 431(2018) 4, pp. 042009.
- [34] Murtiadi, S., Akmaluddin, A., Anshari, B., Suparjo, S.: Experimental study of accelerating early age concrete strength under elevated temperature, steaming, and chemical admixture addition of normal and high strength concrete, In *The 4th International Conference on Rehabilitation and Maintenance in Civil Engineering*, 1 (2018), pp. 1-10.
- [35] Naqash, J.A., Bhat, Z.B., Malik, M.I., Ahmad, S., Kumar, D.: Effect of accelerating admixture on properties of concrete, *IOSR Journal of Engineering*, 4 (2014) 3, pp. 48-55.
- [36] Suto, S., Niwase, K.: Study on Improvement of Early Strength of Highly Durable Concrete by Combined Use of Chemical Admixtures, (2020), pp. 1-9.
- [37] Hashmi, A.F., Shariq, M., Baqi, A.: Experimental and analytical investigation on the age-dependent tensile strength of low-calcium fly ash-based concrete, *Innovative Infrastructure Solutions*, 6 (2021), pp. 1-16.
- [38] IS: 383-1970: Specification for Coarse and Fine Aggregates from Natural Sources for Concrete.
- [39] IS: 10262-2009: Concrete mix proportioning.
- [40] IS: 516-1959: Methods of test for strength of concrete.
- [41] IS: 5816-1959: Splitting Tensile Strength of Concrete - Method of Test
- [42] ASTM C293/C293M-16: Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete
- [43] Deshmukh, R., More, A.: Low energy green materials by embodied energy analysis, *International journal of civil and structural engineering research*, 2 (2014) 1, pp. 58-65.
- [44] Canadian Architects.: *Life-Cycle Energy Use in Office Buildings, Measures of Sustainability*, (2010).
- [45] Ferraris, C.F., Snyder, K.A.: *Best Practices Guide for High-Volume Fly Ash Concretes*, National Institute of Standards and Technology: Gaithersburg, MD, USA (2013).
- [46] Kicaite, A., Skripkiunas, G., Pundiene, I.: The effect of calcium nitrate on the properties of portland cement pastes and concrete hardening at low temperatures, *Ceramics-Silikáty*, 64 (2020) 3, pp. 263-270.
- [47] IS 456:2000.: *Plain and Reinforced Concrete - Code of Practice*.
- [48] Neville, A.M., Brooks, J.J.: *Concrete technology England: Longman Scientific & Technical*, 1987.
- [49] Mehta, P.K.: *Concrete Structure Properties, and Materials*, Englewood Cliffs, New Jersey, 1986.
- [50] Neville, M., Brooks, J.J.: *Concrete Technology*, Longman, Singapore, 1998.

- [51] Sounthararajan, V.M., Sivakumar, A.: Performance evaluation of metallic fibres on the low and high volume class F flyash based cement concrete, *International Journal of Engineering and Technology*, 5(2013) 2, pp. 606-619.
- [52] Thangaraj, R., Thenmozhi, R.: Experimental study on RC beams using high volume fly ash, *IRA-International Journal of Technology & Engineering*, 3 (2016) 2, pp. 71-85.
- [53] Hashmi, A.F., Shariq, M., Baqi, A.: Flexural performance of high volume fly ash reinforced concrete beams and slabs, *In Structures*, 25 (2020), pp. 868-880.
- [54] Soman, M., Sobha, K.: Strength and behaviour of high volume fly ash concrete. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 3 (2014) 5, pp.12416-12424.
- [55] Raj, B.S., Rao, M.K.: Flexural Performance of Sustainable Fly Ash Based Concrete Beams, *In IOP Conference Series, Earth and Environmental Science*, 1130 (2023) 1, pp.012021.
- [56] Madan, C.S., Panchapakesan, K., Anil Reddy, P. V., Joanna, P.S., Rooby, J., Gurupatham, B.G.A., Roy, K.: Influence on the flexural behaviour of high-volume fly-ash-based concrete slab reinforced with sustainable glass-fibre-reinforced polymer sheets, *Journal of Composites Science*, 6 (2022) 6, pp. 169-182.
- [57] Oktaviani, W.N., Tambusay, A., Komara, I., Sutrisno, W., Faimun, F., Suprobo, P.: Flexural behaviour of a reinforced concrete beam blended with fly ash as supplementary material, *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 506 (2020) 1, pp. 012042.
- [58] Eurocode 2.: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings.
- [59] Standard, B.: Structural use of concrete. BS8110, 1996.
- [60] Ashour, S.A.: Effect of compressive strength and tensile reinforcement ratio on flexural behavior of high-strength concrete beams, *Engineering structures*, 22 (2000) 5, pp. 413-423.
- [61] Dang, Y., Shi, X., Mery, S., Xie, N., Benson, A., Yang, Z.: Influence of surface sealers on the properties of internally cured cement mortars containing saturated fine lightweight aggregate, *Journal of materials in civil engineering*, 27 (2015) 2, pp. 04015037.