



SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA,
ARHITEKTURE I GEODEZIJE

UNIVERSITY OF SPLIT
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING,
ARCHITECTURE AND GEODESY

KVALIFIKACIJSKI DOKTORSKI ISPIT

Nermin Redžić

**Ponašanje vlaknima ojačanih betona ultra visokih
performansi pod dugotrajnim opterećenjem**

Split, svibanj 2023.

MATICE HRVATSKE 15
21000 SPLIT - HRVATSKA /
CROATIA

www.gradst.hr

T: +385 (0)21 303 333
F: +385 (0)21 465 117

E: info@gradst.hr

IBAN:
HR3724070001100579623

OIB: 83615500218



**DOKTORSKI
STUDIJ**
VISOKE RAZINE
KVALITETE

1. Uvod

Beton ultra visokih performansi (eng. *Ultra-High Performance Concrete* – UHPC) predstavlja relativno novu generaciju cementnih materijala koji karakterizira veoma visoka čvrstoća, duktilnost i trajnost [1]. UHPC se može tretirati kao kombinacija tri tehnologije betona: samozbijajući beton (SCC), beton armiran vlaknima (FRC) i beton visokih performansi (HPC) [2].

Betoni ultra visokih performansi imaju povećan sadržaj veziva (cement i silikatna prašina), a zbog prisustva veoma finog kvarcnog pijeska i male vrijednosti vodocementnog faktora ovi betoni u pogledu konzistencije više sličje malterima [3]. Vrijednost vodocementnog faktora najčešće se kreće od 0,16 do 0,22. Betoni ovog tipa su kompaktni i homogeni, te imaju veoma gustu strukturu, a odlikuju se visokom tlačnom čvrstoćom nakon 28 dana (veća od 150 [MPa]) i visokom vlačnom čvrstoćom (veća od 7 [MPa] u slučaju betona bez dodatka čeličnih vlakana). Shah S. i Weiss W. [4] definirali su UHPC na sljedeći način: Beton ultra visokih performansi definira se kao poseban materijal izrazite trajnosti sa minimalnom tlačnom čvrstoćom u iznosu od 150 [MPa].

UHPC je veoma krt materijal zbog svoje izrazito visoke čvrstoće i homogenosti, a može se učiniti duktilnim armiranjem čeličnim vlaknima. Na taj način nastaje novi materijal izrazitih mehaničkih karakteristika pod nazivom vlaknima ojačani beton ultra visokih performansi (eng. *Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete* – UHPFRC) koji pripada skupini cementnih kompozita kod kojih se javlja deformacijsko očvršćavanje pri jednoosnom vlaku [5]. Zbog velikog sadržaja veziva betone ultra visokih performansi karakterizira kruti lom na eksplozivni način i sklone su pojavi mikropukotina, što je povezano sa izraženim autogenim skupljanjem. To je također razlog zašto se čelična vlakna dodaju u betonsku mješavinu. U usporedbi s betonima visokih performansi (*High Performance Concrete* – HPC), UHPFRC pokazuje bolje ponašanje pri tlaku i vlaku kao i veću trajnost [6]. Svojstvo izuzetne trajnosti reducira troškove održavanja konstrukcije i potencijalno smanjuje zaštitni sloj betona potreban da se osigura otpornost na vremenske utjecaje u usporedbi s normalnim betonima.

Izvršna svojstva UHPFRC betona uglavnom se postižu poboljšanjem homogenosti mješavine u usporedbi s normalnim betonima i odstranjivanjem krupnog agregata. Neophodno je izvršiti optimizaciju raspodjele veličine zrna cementa, silikatne prašine i pijeska kako bi se postigla gusta struktura matriksa s vrlo niskom propusnošću. Rasponi učešća pojedinih sastojaka u mješavini UHPFRC betona prikazani su u tablici 1.

Čelična vlakna, velika količina cementa, eliminacija krupnog agregata i korištenje posebnih materijala su faktori koji podižu cijenu koštanja UHPFRC betona. Relativno visoka početna cijena UHPC-a ograničava njegovu širu primjenu u građevinskoj industriji. Početna cijena koštanja UHPC-a daleko premašuje cijenu konvencionalnih betona, pa se trenutno u svijetu vrše stalna istraživanja kako bi se

minimizirali troškovi materijala a da se pri tome zadrže korisna svojstva ovih betona [7]. U svijetu se razvijaju nove recepture za UHPC betone od strane raznih istraživača, a u tom pogledu se mineralni dodaci cementu kao što su leteći pepeo, silikatna prašina, mljevena granulirana zgura visokih peći i pepeo od rižinih ljuski koriste za zamjenu dijela cementa u nastojanju da se proizvede održivi UHPC i reducira upotreba cementa.

Tablica 1. Rasponi učešća sastojaka u UHPFRC mješavini [8,9]

Komponenta	Tipični rasponi vrijednosti [kg/m ³]
Pijesak	490 – 1390
Cement	610 – 1080
Silikatna prašina	50 – 334
Mljeveni kvarc	0 – 410
Vlakna	40 – 250
Superplastifikator	9 – 71
Voda	126 – 261

Ukupni troškovi koji se odnose na konstrukciju građevine direktno su vezani za dimenzije poprečnih presjeka konstruktivnih elemenata. Primjenom betona ultra visokih performansi za izvedbu elemenata konstrukcije utiče se na smanjenje dimenzija poprečnih presjeka čime se oslobađa dodatni korisni prostor u zgradama [10]. Svojstva visoke čvrstoće ovih betona omogućavaju projektiranje vitkih konstrukcija, što vodi ka smanjenju vlastite težine elemenata zbog manje upotrebe materijala [7].

Prva konstrukcija koja je u cjelosti napravljena od ovog materijala jeste pješački most u Sherbrooke-u (Kanada), izgrađena 1997. godine (slika 1).



Slika 1. Pješački most u Sherbrooke-u, Kanada [2]

Ono što onemogućava širu primjenu UHPC-a jeste nedostatak propisa za projektiranje, ograničena znanja u pogledu ponašanja materijala i tehnologiji proizvodnje, kao i visoka cijena koštanja.

2. Puzanje betona ultra visokih performansi

Puzanje betona se definira kao vremensko povećanje deformacija usljed djelovanja dugotrajnog opterećenja. Trenutačno je zastupljeno više teorija koje objašnjavaju fenomen puzanja betona, kao što su teorija viskoelastičnosti, teorija procjeđivanja, teorija viskoznog tečenja, teorija plastičnog tečenja, teorija mikropukotina i teorija ravnoteže unutarnjih sila [11]. Deformacije puzanja betona nastaju pri dugotrajnom opterećenju radi istiskivanja i premještanja hemijski nevezane vode u cementnom kamenu. Ove deformacije značajno utiču na vijek trajanja građevinskih konstrukcija. Tu se prvenstveno misli na negativne učinke puzanja kao što su prekomjerni progibi nosača, pojava pukotina u betonu i gubitak sile prednapinjanja kod prednapetih betonskih elemenata.

Fenomen puzanja može se podijeliti na dvije komponente, i to na osnovno puzanje i na puzanje isušivanjem. Prvo se u elementu, sa homogenim rasporedom vlažnosti, događa bez razmjene vlažnosti sa okolinom, dok je drugo posljedica razmjene vlažnosti sa okolinom. Kako bi se postigla vrhunska mehanička i reološka svojstva, UHPC se obično spravlja primjenjujući veliku količinu cementa, niski vodocementni faktor, ultrafina čelična vlakna i superplastifikatore kao dodatke betonu. Ove karakteristike očigledno nas upućuju da se puzanje UHPC betona razlikuje od puzanja tradicionalnih betona [12]. Deformacije puzanja se smanjuju s nižim vrijednostima vodocementnog faktora. Razvoj funkcije puzanja ovisi o starosti materijala u trenutku nanošenja opterećenja. Na primjer, za UHPC betone pod nazivom Ductal (proizvođača Lafarge, Francuska) navodi se koeficijent puzanja od 0,2 do 0,8, pri čemu niža vrijednost odgovara toplinski obrađenim a viša vrijednost toplinski neobrađenim betonima. Prema tome, toplinskom obradom UHPC betona značajno se smanjuje njihovo puzanje [13]. U standardnim betonima koeficijent puzanja može dostići vrijednosti od 3 do 4. Niske vrijednosti koeficijenta puzanja su od posebnog interesa kod primjene prednapinjanja (smanjenje gubitaka sile prednapinjanja) [14,15].

Da bi se unaprijedio razvoj UHPC betona i uspostavili standardi za proračun konstrukcija od ovog materijala, potrebno je vršiti istraživanja svojstva puzanja kako bi u konačnici dobili model puzanja koji je primjenljiv za UHPC betone. Pri tome bi u eksperimentima trebalo razdvojiti osnovno i puzanje isušivanjem kako bi se bolje razumjeli temeljni mehanizmi ponašanja UHPC betona pod dugotrajnim opterećenjem. Jedno takvo istraživanje provedeno je u [16,17]. Rossi i dr. [18] su predložili teoriju mikropukotina kojom se osnovno puzanje betona može tretirati kao dodatno skupljanje pod djelovanjem naprezanja. Ova teorija povezuje skupljanje i puzanje betona, te daje razumno objašnjenje zašto je vlačno puzanje obično manje od tlačnog puzanja.

Treba naglasiti da je kod UHPC betona dominantna komponenta osnovnog puzanja i da su efekti isušivanja jako mali. S druge strane, za razliku od konvencionalnih betona koji imaju malo autogeno skupljanje i kod kojih u ukupnim deformacijama skupljanja prevladavaju deformacije skupljanja

isušivanjem, UHPC ima mnogo veće autogeno skupljanje a malo skupljanje isušivanjem. Razlog je u tome što UHPC posjeduje dobru strukturu pora i nizak sadržaj vode što u konačnici rezultira velikim kapilarnim naprezanjima.

2.1 Pregled istraživanja

U posljednjih desetak godina provedena su neka eksperimentalna istraživanja puzanja UHPC betona, koja su navedena u tablici 2.

Tablica 2. Eksperimentalna istraživanja puzanja UHPC betona

Referenca	Vodocementni faktor (w/c)	Čvrstoća [MPa]	Vrsta puzanja	Dimenzije uzoraka [mm]	Uslovi ispitivanja	Starost betona pri opterećenju
Xu i dr. [12]	0,16 0,22	104,0 – 128,7	Tlak	100x100x300	20±2 °C RH 60±5 %	28 dana
Zhu i dr. [19]	0,14	124,6 – 135,3	Tlak	70x70x240	16±1 °C RH 34±4 %	7 dana
Barbos [20]	0,20	172,6 – 190,3	Tlak	120x240	20±2 °C RH 60±5 %	6 dana
Mohebbi i dr. [21]	–	95 – 172	Tlak	φ102x203	23±2 °C RH 50±5 %	2, 3, 7, 8, 10, 14, 22, 30 dana
Rossi i dr. [22]	0,20	120,8	Tlak, vlak	φ100x200 φ160x1000	23±3 °C RH 50±5 %	7 dana
Graybeal [23]	–	126,0 – 193,0	Tlak	φ102x203	90 °C RH 95%	4 dana
Haber i dr. [24]	–	95,0 – 172,0	Tlak	φ102x204	23±2 °C RH 50±5 %	7 dana
Garas i dr. [25]	–	6,04 – 6,50 (vlačna)	Vlak	φ100x380	23±2 °C RH 50±3 %	7 dana
Garas i dr. [26]	–	116,0 – 169,0	Tlak, vlak	φ100x380 75x75x483	23±2 °C RH 50±3 %	7 dana
Mertol i dr. [27]	–	124,0	Tlak	φ100x300 75x75x290	22 °C RH 50%	1, 7, 28 dana
Flietstra [28]	0,20	96,5	Tlak	φ76,2x304,8	22±2 °C RH 50 %	7 dana
Ul Islam [29]	0,12	76,0 – 134,0	Vlak	75x80x500	23±2 °C RH 50±5 %	28 dana
Chen i dr. [30]	0,16, 0,18, 0,20, 0,22, 0,24	83,4 – 122,3	Tlak	100x100x400	20±1 °C RH 95±5 %	28 dana

Sun i dr. [16]	0,17	129,4 – 138,8	Tlak	φ75x150 φ100x200	25 °C RH 55 %	28 dana
Rogowski [31]	0,18	128,8	Tlak	122x914	23 °C RH 50 %	28 dana

U navedenim eksperimentima dužine trajanja opterećenja iznosile su 28, 90, 159, 180, 360 i 386 dana. Pri ovim ispitivanjima koristeći aparaturu za puzanje na uzorke se nanosi opterećenje u iznosu 20, 30, 40 i 50% od izmjerene tlačne čvrstoće f_c . Betonski uzorci se obično opterećavaju do razine od 50% izmjerene vrijednosti f_c , obzirom da na taj način osiguravamo da beton ostane u linearno-elastičnom području ponašanja. Za elemente na koje se apliciraju naprezanja ispod vrijednosti $0,5 \cdot f_c$ dopuštaju se izvjesna pojednostavljenja u proračunu (linearno puzanje betona).

U raznim standardima koji se trenutno koriste u svijetu kao npr. FIB Model Code 2010 [32], ACI 209-08 [33], GB 50010-2010 [34] i AS 3600:2018 [35] dati su modeli za procjenu deformacija puzanja tradicionalnih betona. Uz to često je u upotrebi B4 model [36] koji je usaglašen sa velikim brojem eksperimentalnih rezultata i mjerenja na stvarnim konstrukcijama i mostovima, a predložen je od strane RILEM (*Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux*) [37]. U usporedbi s prethodnim modelima ovi najnoviji modeli su razvijeni kako bi bili što prikladiji za suvremene betone visoke čvrstoće, dok opet s druge strane nisu u potpunosti primjenjivi za procjenu puzanja UHPC betona koje karakterizira ultra visoka tlačna čvrstoća i veoma niska vrijednost vodocementnog faktora.

Mohebbi A. i dr. [21] su svoje istraživanje usmjerili na definiranje jednačina za procjenu puzanja i skupljanja UHPC betona koje su izvedene iz postojećih modela za konvencionalne betone datih u AASHTO 2020 [38]. Uzimajući u obzir dostupne eksperimentalne podatke zaključeno je da se trenutnim AASHTO jednačinama ne mogu dovoljno tačno procijeniti koeficijent puzanja i deformacije skupljanja UHPC betona, te je stoga potrebna ponovna kalibracija pojedinih parametara. Parametri koji su analizirani u ovom istraživanju su tlačna čvrstoća, starost betona pri opterećenju i relativna vlažnost sredine. Ovim istraživanjem uloženi su dodatni napor kako bi se razvili modeli gubitka prednapinjanja i definirale smjernice za projektiranje prednapetih UHPC nosača.

Najveća prednost modela puzanja B4 u odnosu na druge modele jeste uključivanje efekta sadržaja pojedinih sastojaka u betonskoj mješavini i efekta toplinske obrade u procesu očvršćavanja betona. Ipak, i ovaj model ima određena ograničenja i potrebno ga je prilagoditi materijalu kao što je UHPC. Pribramsky [37] je u svom radu identificirao najvažnija ograničenja modela B4, te je na osnovu dostupnih eksperimentalnih podataka od strane drugih autora izvršio njegovu adaptaciju kako bi on u potpunosti bio primjenjiv za UHPC betone. Adaptirani i kalibrirani B4 model pokazao je dobru podudarnost sa eksperimentalnim rezultatima preuzetim iz [39] i [23], posebice s onima koji su

provedeni u SAD-u [23]. Podudarnost deformacija puzanja betona potvrđena je kako u smislu njihove konačne vrijednosti tako i u smislu vremenskog razvoja (povećanja) deformacija.

Mazloom M. [40] je predložio izraze kojima se mogu procijeniti dugotrajne deformacije puzanja i skupljanja betona visoke čvrstoće na osnovu svojih eksperimentalnih rezultata. Pan Z. i dr. [41] su izvršili procjenu modela CEB-FIP 90 [42] u smislu njegove primjene za određivanje puzanja i skupljanja betona normalnih i visokih čvrstoća, poredeći ga pri tome s opsežnom bazom podataka koja je dostupna u literaturi. Na temelju statističke regresijske analize prikupljenih podataka prilikom ispitivanja puzanja i skupljanja, model CEB-FIP 90 je revidiran tako što je izvršena modifikacija utjecajnih koeficijenata koji se tiču tlačne čvrstoće betona i funkcija vremenskog razvoja puzanja i skupljanja. Predloženi modificirani model pokazao je bolje rezultate od CEB-FIP 90 modela posebno kada je riječ o betonima visoke čvrstoće.

Prema Xu Y. i dr. [12], Sun M. i dr. [16] i Zhu L. i dr. [19] modelom datim u FIB Model Code 2010 najbliže se mogu predvidjeti deformacije puzanja UHPC betona, ali da bi bio u potpunosti primjenjiv potrebno ga je modificirati u određenoj mjeri.

3. Modeli puzanja

3.1 Model puzanja prema FIB Model Code 2010

Model Code 2010 donosi određene izmjene u pogledu puzanja u odnosu na prethodne CEB-FIP modele. Ovaj model puzanja je kalibriran na temelju postojećih eksperimentalnih podataka i novih laboratorijskih ispitivanja uzimajući u obzir trajanje opterećenja od 30 godina [43]. Procijenjeno je da model pruža relativno dobru aproksimaciju vrijednosti puzanja za starosti betona do 50 godina pri određenim uvjetima. Za duže periode trajanja opterećenja od 50 pa do 150 godina jednačine za proračun koeficijenta puzanja daju povećanje od oko 10%. Međutim, praktična opažanja pokazuju veće vrijednosti deformacija puzanja nakon trajanja opterećenja od 30 do 50 godina [44].

Izrazi za puzanje koji će biti prikazani u nastavku vrijede za obične konstrukcijske betone ($20 \text{ [MPa]} \leq f_{cm} \leq 130 \text{ [MPa]}$) podvrgnute tlačnim naprezanjima $|\sigma_c| \leq 0.4 \cdot f_{cm}(t_0)$ u trenutku nanošenja opterećenja t_0 , koji se nalaze u sredini relativne vlažnosti u rasponu od 40% do 100% pri čemu se srednja temperatura kreće od $5 \text{ }^\circ\text{C}$ do $30 \text{ }^\circ\text{C}$. Starost betona pri opterećenju treba biti barem 1 dan [32].

Kod linearnog puzanja betona deformacije puzanja $\varepsilon_{cc}(t, t_0)$ mogu se izračunati na sljedeći način:

$$\varepsilon_{cc}(t, t_0) = \frac{\sigma_c(t_0)}{E_{ci}} \cdot \varphi(t, t_0) \quad (1)$$

gdje je $\varphi(t, t_0)$ koeficijent puzanja a E_{ci} modul elastičnosti pri starosti betona od 28 dana.

Koeficijent puzanja se definira kao odnos deformacije puzanja i elastične deformacije betona starosti 28 dana pri istom naprežanju. Određuje se prema sljedećem izrazu:

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_{bc}(t, t_0) + \varphi_{dc}(t, t_0) \quad (2)$$

pri čemu je $\varphi_{bc}(t, t_0)$ koeficijent osnovnog puzanja, $\varphi_{dc}(t, t_0)$ koeficijent puzanja isušivanjem, t starost betona u danima do razmatranog trenutka i t_0 starost betona u danima u trenutku nanošenja opterećenja. Izrazi za proračun koeficijenta puzanja su empirijski i kalibrirani su na osnovu laboratorijskih testova (puzanje u tlaku) vršenih na konstrukcijskim betonima.

Koeficijent osnovnog puzanja $\varphi_{bc}(t, t_0)$ može se dobiti iz izraza:

$$\varphi_{bc}(t, t_0) = \beta_{bc}(f_{cm}) \cdot \beta_{bc}(t, t_0) \quad (3)$$

gdje se utjecaj srednje tlačne čvrstoće nakon 28 dana f_{cm} obuhvata faktorom:

$$\beta_{bc}(f_{cm}) = \frac{1,8}{(f_{cm})^{\alpha_1}} \quad (4)$$

pri čemu je $\alpha_1 = 0,7$ za betone normalne čvrstoće, dok je funkcija vremenskog razvoja puzanja:

$$\beta_{bc}(t, t_0) = \ln \left(\left(\frac{30}{t_{0,adj}} + \gamma \right)^2 \cdot (t - t_0) + 1 \right) \quad (5)$$

$t_{0,adj}$ predstavlja modificiranu starost betona pri nanošenju opterećenja u danima, dok koeficijent γ ima vrijednost 0,035. Koeficijent puzanja isušivanjem $\varphi_{dc}(t, t_0)$ može se dobiti iz izraza:

$$\varphi_{dc}(t, t_0) = \beta_{dc}(f_{cm}) \cdot \beta(RH) \cdot \beta_{dc}(t_0) \cdot \beta_{dc}(t, t_0) \quad (6)$$

pri čemu je:

$$\beta_{dc}(f_{cm}) = \frac{412}{(f_{cm})^{\alpha_2}} \quad (7)$$

$$\beta(RH) = \frac{1 - \frac{RH}{100}}{\sqrt[3]{0,1 \cdot \frac{h}{100}}} \quad (8)$$

$$\beta_{dc}(t_0) = \frac{1}{0,1 + t_{0,adj}^{0,2}} \quad (9)$$

gdje je $\alpha_2 = 1,4$ za betone normalne čvrstoće. Vremenski razvoj puzanja isušivanjem opisan je sljedećim izrazom:

$$\beta_{dc}(t, t_0) = \left[\frac{(t - t_0)}{\beta_h + (t - t_0)} \right]^{\gamma(t_0)} \quad (10)$$

gdje je:

$$\gamma(t_0) = \frac{1}{2,3 + \frac{3,5}{\sqrt{t_{0,adj}}}} \quad (11)$$

$$\beta_h = 1,5 \cdot h + 250 \cdot \alpha_{f_{cm}} \leq 1500 \cdot \alpha_{f_{cm}} \quad (12)$$

$$\alpha_{f_{cm}} = \left(\frac{35}{f_{cm}} \right)^{0,5} \quad (13)$$

U navedenim izrazima RH predstavlja relativnu vlažnost sredine u %, dok je $h = 2 \cdot A_c / u$ nazivna dimenzija elementa u [mm] koja mjeri brzinu i intenzitet procesa njegovog isušivanja.

Dosad nije poznato da li deformacije puzanja dostižu svoju konačnu vrijednost ili ne. Međutim, u ovom temeljnom pristupu razvoj osnovnog puzanja predviđa se logaritamskom funkcijom koja nema konačnu vrijednost, dok je za puzanje isušivanjem odabrana hiperbolička funkcija koja se približava asimptotskoj vrijednosti za $t \rightarrow \infty$.

3.2 Modificirani modeli puzanja za UHPC betone

Xu Y. i dr. [12] vršili su eksperimentalna istraživanja 4 grupe uzoraka pod nazivima C16SF0, C16SF1, C16SF2 i C22SF2, gdje 16 i 22 označavaju korištene vodocementne faktore u iznosima 0,16 i 0,22, dok SF0, SF1 i SF2 predstavljaju sadržaj čeličnih vlakana od 0, 1 i 2%, respektivno. Nakon 180 dana od nanošenja opterećenja, uzorak C22SF2 imao je za 42,2% veći koeficijent puzanja od C16SF1.

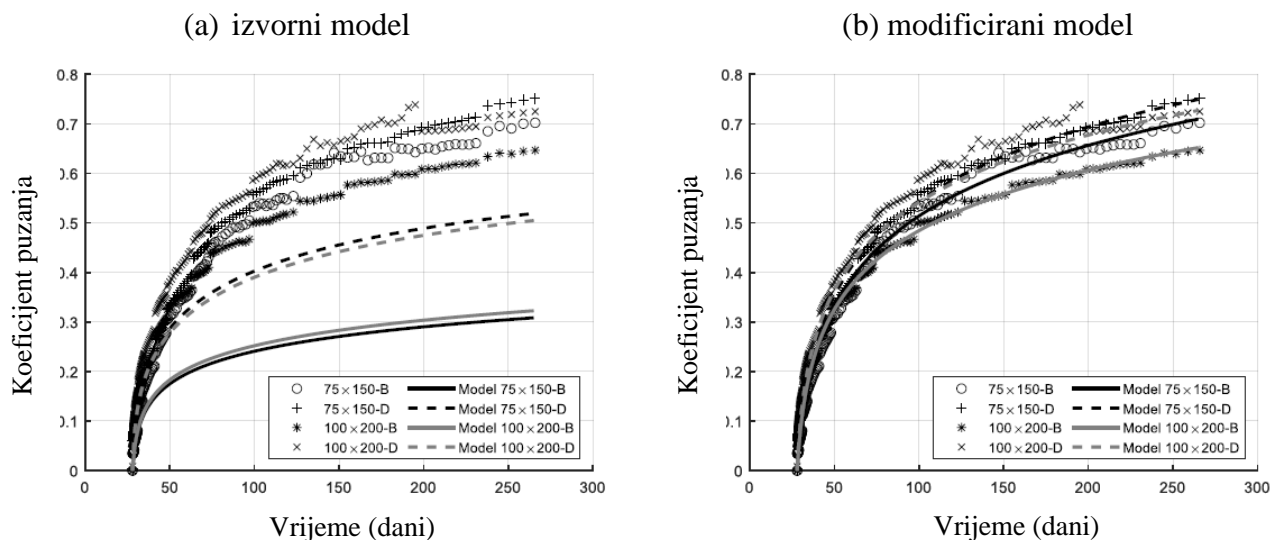
Autori su zaključili da deformacije UHPC betona pod dugotrajnim opterećenjem ne ovise samo od njegove čvrstoće, već je potrebno obuhvatiti više utjecajnih faktora uključujući sastav mješavine kako bi se što preciznije izvršila analiza puzanja. Uočeno je da modul elastičnosti značajno utiče na deformacije puzanja UHPC betona. Prema tome, utjecaj interakcije tlačne čvrstoće i modula elastičnosti betona na puzanje UHPC betona mora se uzeti u obzir.

Izvršena je modifikacija modela puzanja datog u FIB Model Code 2010 da bi se on mogao primijeniti za UHPC betone, a izraz za koeficijent puzanja sada glasi [12]:

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_{bc}(t, t_0) + \varphi_{dc}(t, t_0) - 0,30 \quad (14)$$

Sun M. i dr. [16] su razdvojili osnovno puzanje od puzanja isušivanjem pri ispitivanju UHPC uzoraka napregnutih dvjema različitim razinama opterećenja s ukupnim trajanjem od jedne godine, pri čemu su korištene dvije različite veličine uzoraka (cilindri $\phi 75 \times 150$ [mm] i $\phi 100 \times 200$ [mm]). Uzorci potrebni za određivanje osnovnog puzanja zapečaćeni su pomoću aluminijske trake i na taj način je spriječena razmjena vlažnosti s okolinom. Pri ispitivanju na cilindrične uzorke aplicirana su opterećenja u iznosu 20% i 40% od izmjerene tlačne čvrstoće betona nakon 28 dana. Analiziran je utjecaj razine opterećenja i veličine uzoraka na deformacije puzanja razdvajajući pri tome osnovno od puzanja isušivanjem.

S obzirom da FIB MC 2010 podcjenjuje vrijednosti osnovnog puzanja a precjenjuje puzanje isušivanjem UHPC betona, autori su u izrazima (4) i (7) uveli nove vrijednosti za koeficijente α_1 i α_2 koji se odnose na tlačnu čvrstoću betona, dok je u izrazu (5) koeficijent γ također poprimio nove vrijednosti da bi se osigurao ispravan oblik vremenske krivulje. Vrijednosti kalibriranih parametara mogu se naći u [17], dok je prikaz krivulja puzanja prema izvornom FIB MC 2010 i modificiranom modelu dat na slici 2.



Slika 2. Usporedba eksperimentalnih rezultata s rezultatima dobijenim prema standardu:

(a) izvorni FIB MC 2010; (b) modificirani FIB MC 2010 (B-Basic/osnovno, D-Drying/isušivanje)

Da bi ovaj model našao primjenu u širem rasponu čvrstoća potrebno je više podataka o puzanju betona visokih čvrstoća.

Zhu L. i dr. [19] su svoja ispitivanja puzanja u tlaku izvršili na šest prizmatičnih uzoraka dimenzija $70 \times 70 \times 240$ [mm], pri čemu su u betonskoj mješavini korištena čelična vlakna s volumenskim postotkom učešća od 2%. Razmatrane su tri razine opterećenja u iznosu 20%, 30% i 40% od izmjerene tlačne čvrstoće betona, a ukupna dužina trajanja opterećenja iznosila je 160 dana. Autori su predložili pojednostavljenu formulu za proračun koeficijenta puzanja UHPC betona koja glasi:

$$\varphi(t, t_0) = 0,4983 \cdot \frac{(t - t_0)^{0,74}}{73,076^{0,74} + (t - t_0)^{0,74}} = \frac{0,4983}{1 + \frac{23,9438}{(t - t_0)^{0,74}}} \quad (15)$$

pri čemu je $t \geq t_0$. Izraz (15) može se dodatno pojednostaviti tako što će biti predstavljen kao umnožak konačnog koeficijenta puzanja φ_∞ i faktora $\beta_c(t, t_0)$ kojim se uzima u obzir vremenski razvoj puzanja:

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_\infty \cdot \beta_c(t, t_0) = 0,46 \cdot \sqrt{\frac{t - t_0}{100 + t - t_0}} \quad (16)$$

gdje konačna vrijednost koeficijenta puzanja iznosi $\varphi_\infty = 0,46$, dok drugi član izraza (korijen) čini faktor $\beta_c(t, t_0)$.

Konačna vrijednost koeficijenta puzanja u ovom istraživanju kreće se u rasponu od 0,26 do 0,30, pri čemu treba naglasiti da su uzorci očvršćavali na visokim temperaturama od 75 °C u komori za zaparivanje betona. Radi usporedbe, u radu [12] su eksperimentalnim putem dobijene vrijednosti koeficijenta puzanja u rasponu od 0,49 do 0,70, gdje su uzorci očvršćavali u prostoriji s temperaturom od 20 °C. Jasno je da raznim toplinskim tretmanima betona možemo značajno uticati na vrijednosti konačnog koeficijenta puzanja.

3.3 Usporedba modificiranih modela puzanja

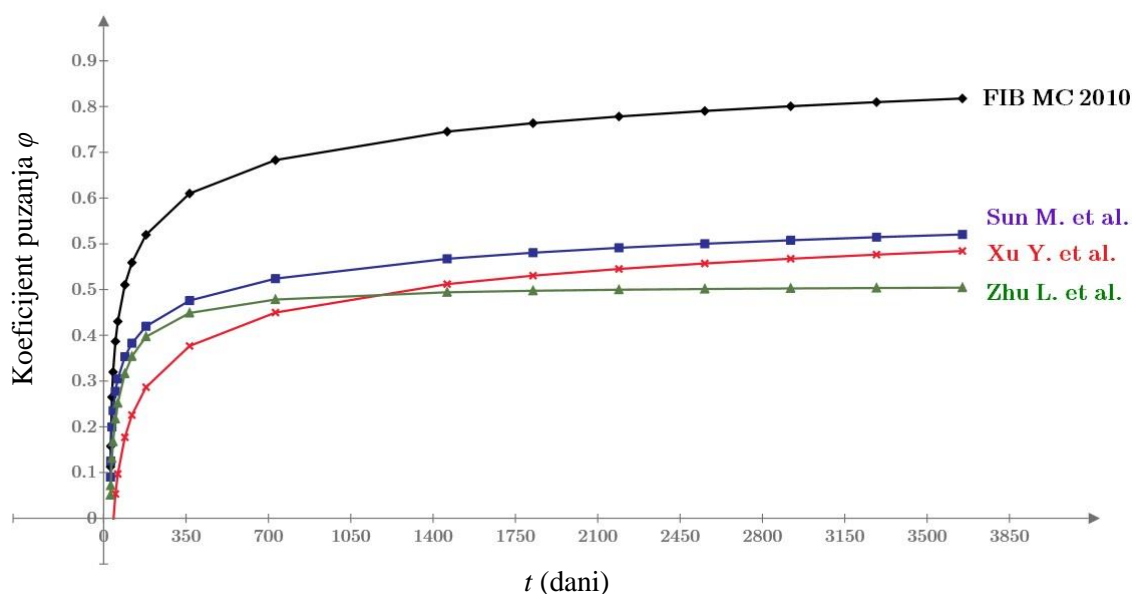
Ovdje će biti izvršena komparativna analiza spomenuta tri modificirana modela puzanja, i to u pogledu vremenskog razvoja puzanja i konačne vrijednosti koeficijenta puzanja. Kao primjer uzet je UHPC uzorak dimenzija 100x100x300 [mm] s tlačnom čvrstoćom od 125 [MPa]. Opterećenje se nanosi pri starosti betona od $t_0 = 28$ dana, a u tom periodu sazrijevanja betonski uzorak je u prostoriji s temperaturom od 20 °C. Za relativnu vlažnost usvojena je vrijednost $RH = 50\%$, nazivna dimenzija elementa iznosi $h = 50$ [mm], dok se za spravljanje betona koristi cement razreda N (cementi normalne rane čvrstoće). Analiziran je razvoj puzanja pri dužini trajanja opterećenja od 10 godina (3650 dana). U tablici 3 su date vrijednosti koeficijenata puzanja za sva tri predložena modela puzanja UHPC betona, a radi usporedbe također su prikazane vrijednosti φ dobijene primjenom izvornog FIB MC 2010.

Slika 3 prikazuje razvoj koeficijenta puzanja φ u vremenu t za razmatrani uzorak prema tri modificirana modela puzanja i prema modelu datom u FIB MC 2010. U odnosu na FIB MC 2010, dijagrami puzanja dobijeni prema Xu Y. i dr., Sun M. i dr. i Zhu L. i dr. dobro opisuju ponašanje UHPC betona pod dugotrajnim opterećenjem i ordinate su znatno manje.

Tablica 3. Vrijednosti koeficijenta puzanja prema predloženim modelima puzanja UHPC betona

Vrijeme (dani)	Koeficijent puzanja ϕ			
	FIB MC 2010	Xu Y. i dr.	Sun M. i dr.	Zhu L. i dr.
29	0,101	–	0,081	0,046
30	0,142	–	0,112	0,064
35	0,238	–	0,180	0,118
40	0,288	–	0,212	0,151
50	0,348	0,048	0,250	0,195
60	0,387	0,087	0,274	0,226
90	0,459	0,159	0,318	0,285
120	0,503	0,203	0,344	0,318
180	0,558	0,258	0,378	0,357
365	0,639	0,339	0,428	0,404
730	0,705	0,405	0,472	0,430
1460	0,761	0,461	0,511	0,445
1825	0,777	0,477	0,523	0,448
2190	0,791	0,491	0,532	0,450
2555	0,801	0,501	0,540	0,451
2920	0,811	0,511	0,547	0,452
3285	0,819	0,519	0,553	0,453
3650	0,826	0,526	0,558	0,454

Ukoliko se posmatra vrijednost koeficijenta puzanja nakon 10 godina, prema FIB MC 2010 njegova vrijednost je 0,826 dok prema modelu Zhu L. i dr. on iznosi 0,454, što predstavlja povećanje od 82%.

Slika 3. Dijagrami ϕ - t za sve modele puzanja UHPC betona

Model Zhu L. i dr. je najjednostavniji od svih i zasnovan je samo na dvije promjenjive (t i t_0). Model predložen od strane Sun M. i dr. ima dobru podudarnost s preostala dva modificirana modela ukoliko se za sljedeće parametre usvoje vrijednosti $\alpha_1 = 0,75$, $\alpha_2 = 1,6$ i $\gamma = 0,53$. Kod modela Xu Y. i dr. postoji izvjesna razlika u obliku krivulje u odnosu na druge modele ali u pogledu konačne vrijednosti koeficijenta puzanja razlike su jako male.

Međutim, variranjem parametara kao što su srednja tlačna čvrstoća (f_{cm}), relativna vlažnost sredine (RH), dimenzije elementa (h) i temperatura (T) razlike među modelima mogu postati značajnije, što znači da ih je potrebno na određeni način unaprijediti. Da bi ovi modeli bili primjenjivi za šire raspone vrijednosti spomenutih parametara potrebna su dodatna eksperimentalna istraživanja kako bi se izvršila njihova kalibracija. Cilj je da se u nekom budućem periodu dođe do jedinstvenog modela puzanja za UHPC koji bi ušao u propise za projektovanje konstrukcija. Na taj način bi se zasigurno još više potaknulo na primjenu ovog suvremenog materijala.

4. Analiza utjecajnih parametara na puzanje UHPC betona

Tipična čelična vlakna koja se najčešće koriste u UHPC mješavinama su: ravna vlakna s dužinama od 10 do 13 [mm], promjera od približno 0,2 [mm] i vlačne čvrstoće veće od 2070 [MPa], te čelična vlakna s kukama na krajevima s dužinama od 25 do 30 [mm], promjera od približno 0,5 [mm] i vlačne čvrstoće veće od 1030 [MPa]. Rezultati ispitivanja UHPC uzoraka na savijanje i centričnu vlačnu silu pokazali su vrlo izražen utjecaj dimenzija i oblika čeličnih vlakana [45].

Dosadašnjim istraživanjima uočeno je da se dodavanjem čeličnih vlakana mijenja vrsta loma uzoraka od UHPC betona, i to od potpunog oštećenja ili iznenadnog loma do pomalo duktilnog ponašanja gdje uzorci mogu ostati netaknuti bez usitnjavanja i odvajanja dijelova [46]. Osim toga, za sada je poznato da na tlačnu čvrstoću ne utiče dodavanje velikih količina čeličnih vlakana [47]. Detaljna analiza utjecaja sadržaja, vrste i kombinacije različitih tipova vlakana na tlačnu i vlačnu čvrstoću UHPC betona data je u [48]. Kada je riječ o modulu elastičnosti UHPC betona, uočeno je da se dodavanjem vlakana ne utiče značajno na njegovu vrijednost. Na primjer, pri dodatku čeličnih vlakana u iznosu 2% od volumena mješavine dobije se povećanje modula elastičnosti od samo 7% u usporedbi s kontrolnim UHPC uzorkom bez vlakana [49].

Chern i Young [50] su istraživali utjecaj čeličnih vlakana na puzanje i skupljanje betonskih uzoraka, pri čemu su kod ispitivanja puzanja uzorci opterećivani pri različitim starostima. Rezultati su pokazali da ojačanje čeličnim vlaknima vodi ka značajnom smanjenju puzanja betona, tj. puzanje se postepeno smanjuje s povećanjem sadržaja vlakana. Osim toga, uočeno je da je smanjenje deformacija puzanja veće pri povećanju volumenskog postotka vlakana od 0% do 1% nego pri povećanju od 1% do 2%.

Rezultati su također pokazali da čelična vlakna postaju još učinkovitija u obuzdavanju puzanja s povećanjem dužine trajanja opterećenja.

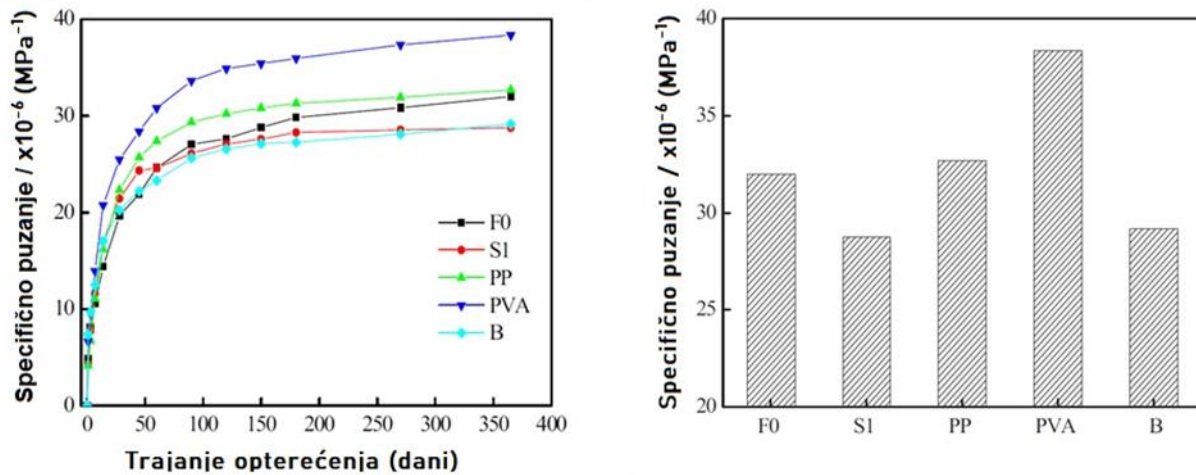
Barbos G. [20] je istraživao ponašanje četiri savijene UHPC grede I poprečnog presjeka pod dugotrajnim opterećenjem. Za ove gredne nosače s različitim sadržajem vlakana (0, 0,5, 1,5 i 2,55 %) analizirano je ponašanje u smislu vremenskog povećanja deformacija i progiba. Pri tome je dužina trajanja opterećenja iznosila 360 dana. Maksimalna vrijednost koeficijenta puzanja posmatrajući tlačnu zonu grede, nakon 360 dana, u slučaju grede bez dodatka čeličnih vlakana iznosi 0,32 dok kod grede s postotkom vlakana od 2,55% iznosi 0,097, što znači smanjenje od 70%. Zaključeno je da se ukupne deformacije tlačne zone armiranobetonske grede smanjuju s povećanjem postotka čeličnih vlakana.

Općenito, preporučuje se korištenje volumenskog postotka od 0,5% čeličnih vlakana za praktičnu primjenu u konstrukcijama od UHPC betona [20]. Dakle, čelična vlakna utiču na smanjenje puzanja betona ali prekomjerno dodavanje vlakana (od 2 do 3 %) može nekad prouzrokovati uvećanje deformacija puzanja. To je vjerojatno zato što veći sadržaj ultra finih čeličnih vlakana smanjuje sposobnost tečenja svježeg betona kada je vrijednost vodocementnog faktora UHPC betona jako niska, što rezultira relativno slabom kontaktnom prijelaznom zonom (*Interfacial Transition Zone* - ITZ) između čeličnog vlakna i matriksa, a uz to dolazi i do pojave unutarnjih defekata u betonu [12].

Istraživanjima [48,51,52] je pokazano da orijentacija i raspodjela vlakana unutar UHPC-a mogu imati značajnog uticaja na mehanička svojstva betona. Ovaj efekat se mora uzeti u obzir u praktičnim primjenama jer razlika u raspodjeli vlakana unutar većih poprečnih presjeka može dovesti do značajnih varijacija u pogledu mehaničkog ponašanja betona. Smjer izlivanja svježeg UHPC-a može utjecati na orijentaciju vlakana, a kada je obradivost betona jako visoka ili ako postoji više vibracija na uzorcima prilikom izlivanja, može doći do slijeganja vlakana što vodi ka poremećenoj orijentaciji i disperziji vlakana.

Zhao Q. i dr. [53] su istraživali dugotrajne deformacije puzanja betona s uporabom četiri različite vrste vlakana, gdje je trajanje opterećenja iznosilo 365 dana. Pri tome su korištena čelična (S), polipropilenska (PP), polivinil alkohol (PVA) i bazaltna (B) vlakna. Za analizu puzanja korišteni su uzorci dimenzija 100x100x400 [mm] koji su opterećeni pri starosti betona od 28 dana. Na slici 4 prikazani su dijagrami specifičnog puzanja betona ojačanog različitim vrstama vlakana. Konstatovano je da kada je modul elastičnosti vlakana E_f mnogo veći od modula elastičnosti običnog betona (F_0), specifično puzanje betona s tim vlaknima (čelična i bazaltna) je manje nego kod običnih i sposobnost odupiranja dugotrajnim deformacijama se povećava. S druge strane, kada je modul elastičnosti

vlakana E_f manji ili jednak modulu elastičnosti običnog betona, dodavanjem vlakana (PP i PVA) zapravo umanjujemo sposobnost betona da se odupre puzanju.



Slika 4. Specifično puzanje običnog betona (F0) i betona s dodacima različitih vrsta vlakana [53]

Chen Y. i dr. [30] su analizirali uticaj vrste i sadržaja vlakana, vodocementnog faktora i sadržaja cementnih materijala na skupljanje i puzanje UHPC betona. U svom eksperimentalnom dijelu prilikom spravljanja uzoraka koristili su karbonska, PVA, PP i čelična vlakna. Rezultati su pokazali da se specifično puzanje postepeno smanjuje kada sadržaj čeličnih vlakana nije veći od 2%. Karbonska vlakna imaju izvrstan učinak u pogledu smanjenja specifičnog puzanja kada njihov volumenski postotak iznosi 0,1%. Međutim, do povećanja puzanja UHPC betona došlo je kada se sadržaj karbonskih vlakana povećao na 0,3%. Količina PVA vlakana imala je jako mali uticaj na veličinu puzanja, a sa sadržajem ovih vlakana od 0,3% došlo je do povećanja specifičnog puzanja. Dodavanjem PP vlakana u mješavinu značajno se uvećava specifično puzanje.

Dosadašnjim studijama je potvrđeno da se primjenom toplinske obrade na temperaturi od 90 °C tijekom 48 sati značajno poboljšavaju gotovo sva svojstva UHPC-a [13]. Nadalje, neke studije su pokazale da primjena toplinske obrade na betonu, a posebno na UHPC-u, može aktivirati silikatnu prašinu (a možda i druge materijale) što rezultira smanjenjem veličine pora čime se poboljšavaju struktura i svojstva cementnog matriksa [54].

Garas V. i dr. [25] su istraživali vlačne deformacije puzanja UHPC betona pod djelovanjem kratkotrajnog opterećenja kako bi se procijenili uticaji razine opterećenja (odnos naprezanje/čvrstoća), ojačanja čeličnim vlaknima i toplinske obrade. Toplinskom obradom UHPC-a u komori na 90 °C tijekom 48 sati, nakon 7 dana trajanja opterećenja, došlo je do smanjenja koeficijenta vlačnog puzanja i specifičnog vlačnog puzanja za 73% i 77% u usporedbi s betonom koji nije bio podvrgnut toplinskoj obradi (temperatura prostorije 23 °C). Još jedno slično istraživanje provedeno je u [26] gdje su razmatrani učinci tri različita režima toplinske obrade na vlačno i tlačno puzanje UHPC-a.

Eksperimentalni rezultati su pokazali da je vlačno puzanje UHPC-a osjetljivije na efekat toplinske obrade u usporedbi s vlačnom čvrstoćom. Osim toga, rezultati ovih istraživanja sugeriraju da se fenomen vlačnog puzanja u UHPC-u javlja drugačije od tlačnog puzanja UHPC-a.

Flietstra [28] je proveo ispitivanja tlačnog puzanja i skupljanja mladog UHPC betona pri višestrukim režimima toplinske obrade (očvršćavanja) kako bi simulirao trenutne postupke unutar proizvodnih montažnih pogona u SAD-u. Rezultati ispitivanja su pokazali da odgađanje toplinskog tretmana za UHPC uzorke pod djelovanjem tlačnog opterećenja nema značajnog uticaja na vrijednost konačnog koeficijenta puzanja.

Materijali kao UHPC imaju velike trenutne i vremenski ovisne deformacije pod tlačnim i vlačnim opterećenjem kada su opterećeni u ranoj dobi. Ovo ponašanje se može pripisati relativno maloj krutosti materijala u ranoj dobi kao i sastojcima materijala (visok sadržaj silikatne prašine i velik volumen paste). Kamen A. i dr. [55,56] zaključuju da se deformacije puzanja uglavnom dešavaju u cementnoj pasti, te stoga velik volumen paste u materijalu kao što je UHPC uzrokuje povećanje puzanja tijekom ranog doba. U eksperimentima koje su proveli Mohebbi A. i dr. [21] pokazalo se da je konačno puzanje UHPC uzoraka opterećenih u zreloj dobi bilo otprilike jednako polovini konačnog puzanja uzoraka opterećenih u ranoj dobi. Rezultati su pokazali da je 50% krajnjeg puzanja uzoraka opterećenih u ranoj dobi, pri uslovima ambijentalne vlažnosti od 50%, dostignuto između 1 i 7 dana nakon opterećivanja, dok je 90% krajnjeg puzanja dostignuto između 27 i 156 dana. Ovo otkriće ukazuje na to da odgađanjem nanošenja konstantnog tlačnog opterećenja na UHPC dok on ne postigne svoja konačna mehanička svojstva, možemo značajno reducirati efekte puzanja na našim betonskim elementima.

5. Planirani tijek istraživanja

Veoma ograničen broj studija o puzanju UHPC betona koje se mogu naći u literaturi ukazuje na potrebu za daljnim istraživanjima iz ove oblasti. Istraživanje u okviru doktorske disertacije bazirat će se na ispitivanju UHPC uzoraka i nosača pod dugotrajnim opterećenjem, promatrajući pri tome razvoj deformacija kako na razini materijala tako i na razini konstrukcije. Za betonske uzorke je potrebno odrediti i njihova mehanička svojstva, i to tlačnu čvrstoću, vlačnu čvrstoću i modul elastičnosti. Ispitivanja UHPC uzoraka planiraju se provoditi u Laboratoriju za materijale na Fakultetu građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu, dok će se ispitivanja UHPC nosača vršiti u Laboratoriju za potresna ispitivanja u Žrnovnici.

Za apliciranje konstantnog opterećenja (tlaka) na betonske uzorke koristiće se 8 uređaja za ispitivanje puzanja koji su prikazani na slici 5. Unutar svakog od ovih uređaja mogu se postaviti po 4 uzorka jedan preko drugog.



Slika 5. Aparatura za puzanje u Laboratoriju za materijale (FGAG Split)

S obzirom na ograničeni broj postojećih istraživanja o puzanju UHPC betona, u okviru disertacije će se izvršiti variranje većeg broja parametara koji značajno utiču na vremenski ovisne deformacije armiranobetonskih nosača. Tu se prije svega misli na razinu opterećenja kojom se opterećuju uzorci (npr. 30% i 50% od tlačne čvrstoće betona), starost betona pri nanošenju opterećenja, dimenzije i oblik uzoraka (cilindrični i prizmatični) te dimenzije poprečnog presjeka armiranobetonske grede. Osim toga, analizirat će se uticaj količine i vrste vlakana u betonskoj mješavini na dugotrajne deformacije UHPC uzoraka i nosača. Dužina trajanja opterećenja iznosit će od 180 do 360 dana koliko je potrebno da se dobiju relevantni rezultati ispitivanja. Svi dobiveni rezultati moći će se uporediti s onima koji se odnose na betone normalne čvrstoće i na taj način će se uspostaviti jasna razlika u ponašanju između UHPC-a i konvencionalnog betona pod djelovanjem dugotrajnog opterećenja.

Cilj ove disertacije je da se proširi baza podataka o puzanju UHPC betona i da se identificiraju svi parametri koji mogu imati utjecaja na dugotrajne deformacije nosača. Planirano je da se na temelju rezultata eksperimentalnih ispitivanja izvrši kalibracija postojećih modela puzanja ovih betona.

Zahvala

Provođenje eksperimenata planira se na Fakultetu građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu u okviru Laboratorija za materijale, te u Laboratoriju za potresna ispitivanja u Žrnovnici.

Literatura

- [1] Richard, P., Cheyrezy, M.: Composition of Reactive Powder Concretes, *Cement and Concrete Research*, 25(7), pp. 1501-1511, 1995.
- [2] Azmee, N.M., Shafiq, N.: *Ultra-High Performance Concrete: From Fundamental to Applications, Case Studies in Construction Materials*, 2018.
- [3] Shaheen, E., Shrive, N.J.: Optimization of Mechanical Properties and Durability of Reactive Powder Concrete, *ACI Materials Journal*, 103(6), pp. 444-451, 2006.
- [4] Shah, S.P., Weiss, W.J.: *Ultra high performance concrete: a look to the future*, *International Journal of Civil and Structural Engineering*, 1998.
- [5] Habel, K.: *Structural Behaviour of Elements Combining Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concretes (UHPFRC) and Reinforced Concrete*, PhD thesis, Federal Institute of Technology, Lausanne, Switzerland, 2004.
- [6] Parra-Montesinos, G.J., Peterfreund, S.W., Chao, S.H.: Highly damage-tolerant beam-column joints through use of high-performance fiber-reinforced cement composites, *ACI Structural Journal*, 102(3), pp. 487-495, 2005.
- [7] Abbas, S., Nehdi, M.L., Saleem, M.A.: *Ultra-High Performance Concrete: Mechanical Performance, Durability, Sustainability and Implementation Challenges*, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 10, pp. 271-295, 2016.
- [8] Bassam, A.T., Ayad, S.A., Nahla, N.H., Abu Bakar, B.H., Al-Tayeb, M.M., Mansour, W.N.: *Properties of Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete (UHPFRC)-A Review Paper*, *AIP Conference Proceedings: International Symposium on Green and Sustainable Technology*, 2157, 2019.
- [9] Graybeal, B.A.: *Compressive behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete*, *ACI Materials Journal*, 104(2), pp. 146-152, 2007.
- [10] Hajek, P., Fiala, C.: *Environmentally optimized floor slabs using UHPC-contribution to sustainable building*, *Proceedings of the 2nd International Symposium on Ultra-High Performance Concrete*, Kassel, Germany, pp. 879-886, 2008.
- [11] Liu, G.J.: *Research on mechanism of concrete creep*, *Applied Mechanics and Materials*, 670-671, pp. 441-444. 2014.
- [12] Xu, Y., Liu, J., Liu, J., Zhang, P., Zhang, Q., Jiang, L.: *Experimental studies and modeling of creep of UHPC*, *Construction and Building Materials*, 175, pp. 643-652, 2018.
- [13] Graybeal, B.: *Characterization of the behaviour of ultra-high performance concrete*, PhD Thesis, Faculty of the Graduate School of the University of Maryland, SUA, 2008.
- [14] Acker, P., Behloul, M.: *Ductal Technology: a Large Spectrum of Properties, a Wide Range of Applications*, *Proceedings of the International Symposium on Ultra-High Performance Concrete*, Kassel, Germany, pp. 11-23, 2004.

- [15] Spasojević, A.: Structural Implications of Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete in Bridge Design, PhD Thesis, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Lausanne, Switzerland, 2008.
- [16] Sun, M., Visintin, P., Bennett, T.: Basic and drying creep of Ultra-high performance concrete, 2022. Available at SSRN 4124965.
- [17] Sun, M.: Time-dependent deformation of Ultra-high performance concrete, PhD Thesis, University of Adelaide, Adelaide, Australia, 2022.
- [18] Rossi, P., Tailhan, J.L., Le Maou, F., Gaillet, L., Martin, E.: Basic creep behavior of concretes investigation of the physical mechanisms by using acoustic emission, *Cement and Concrete Research*, 42(1), pp. 61-73, 2012.
- [19] Zhu, L., Wang, J.J., Li, X., Zhao, G.Y., Huo, X.J.: Experimental and numerical study on creep and shrinkage effects of ultra high performance concrete beam, *Composites Part B: Engineering*, 184, 107713, 2020.
- [20] Barbos, G.A.: Long-term behavior of ultra-high performance concrete (UHPC) bended beams, *Procedia Technology*, 22, pp. 203-210, 2016.
- [21] Mohebbi, A., Graybeal, B.A., Haber, Z.B.: Time-dependent properties of ultrahigh-performance concrete: compressive creep and shrinkage, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 34(6): 04022096, 2022.
- [22] Rossi, P., Charron, J.P., Bastien-Masse, M., Tailhan, J.L., Le Maou, F., Ramanich, S.: Tensile basic creep versus compressive basic creep at early ages: comparison between normal strength concrete and a very high strength fibre reinforced concrete, *Materials and Structures*, 47 (10), pp. 1773-1785, 2014.
- [23] Graybeal, B.A.: Material property characterization of ultra-high performance concrete, Rep. No. FHWA-HRT-06-103, Federal Highway Administration, Washington DC, 2006.
- [24] Haber, Z.B., De la Varga, I., Graybeal, B.A., Nakashoji, B., El-Helou, R.: Properties and behavior of UHPC-class materials, Rep. No. FHWA-HRT-18-036, Federal Highway Administration, Washington DC, 2018.
- [25] Garas, V.Y., Kahn, L.F., Kurtis, K.E.: Short-term tensile creep and shrinkage of ultra-high performance concrete, *Cement & Concrete Composites*, 31(3), pp. 147–152, 2009.
- [26] Garas, V.Y., Kurtis, K.E., Kahn, L.F.: Creep of UHPC in tension and compression: effect of thermal treatment, *Cement & Concrete Composites*, 34(4), pp. 493–502, 2012.
- [27] Mertol, H.C., Rizkalla, S., Zia, P., Mirmiran, A.: Creep and shrinkage behavior of high-strength concrete and minimum reinforcement ratio for bridge columns, *PCI Journal*, 55 (3), pp. 138-154, 2010.
- [28] Flietstra, J.C.: Creep and shrinkage behaviour of ultra-high-performance concrete under compressive loading with varying curing regimes, Master's Thesis, Michigan Technological University, 2011.
- [29] Ul Islam, M.M.: Investigation of tensile creep for Ultra-High-Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPRC) for the long-term, *Construction and Building Materials*, 305, 124752, 2021.

- [30] Chen, Y., Liu, P., Sha, F., Yu, Z., He, S., Xu, W., Lv, M.: Effects of type and content of fibers, water-to-cement Ratio and cementitious materials on the shrinkage and creep of ultra-high performance concrete, *Polymers*, 14(10):1956, 2022.
- [31] Rogowski, R.: Time dependent creep response of ultra-high performance concrete without fiber reinforcing, Master's Thesis, Kansas State University, 2022.
- [32] Fib Model Code for Concrete Structures 2010, Fédération international du béton, Ernst & Sohn, 2013.
- [33] ACI Committee 209: Guide for Modeling and Calculating Shrinkage and Creep in Hardened Concrete, American Concrete Institute, 2008.
- [34] GB 50010-2010: The National Standard of the People's Republic of China, Code for Design of Concrete Structures, Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, 2010.
- [35] AS 3600:2018, Concrete structures, Standards Australia, 2018.
- [36] RILEM Technical Committee TC-242-MDC (Zdeněk P. Bažant, chair). RILEM draft recommendation: TC-242-MDC multi-decade creep and shrinkage of concrete: material model and structural analysis, *Materials and Structures*, 48, pp. 753–770, 2015.
- [37] Pribramsky, V.: B4 model adaptation for prediction of UHPC strains from creep and shrinkage, *Solid State Phenomena*, 292, pp. 210–216, 2019.
- [38] AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials, LRFD bridge design specification, 9th ed. Washington DC, 2020.
- [39] Flietstra, J.C., Ahlborn, T.M., Harris, D.K., De Melo e Silva, H.: Creep behaviour of UHPC under compressive loading with varying curing regimes. In 3rd International Symposium on UHPC, Kassel, Germany, pp. 333-340, 2012.
- [40] Mazloom, M.: Estimating long-term creep and shrinkage of high-strength concrete, *Cement and Concrete Composites*, 30(4), pp. 316–326, 2008.
- [41] Pan, Z., Li, B., Lu, Z.: Re-evaluation of CEB-FIP 90 prediction models for creep and shrinkage with experimental database, *Construction and Building Materials*, 38(2), pp. 1022–1030, 2013.
- [42] CEB-FIP Model Code for Concrete Structures, Comité Euro-International du Béton (CEB), Lausanne, Switzerland, 1990.
- [43] Code-type models for concrete behaviour. Background of MC2012, fib Bulletin No.70, Fédération international du béton (FIB), Lausanne, 2013.
- [44] Holowaty, J.: New formula for creep of concrete in fib Model Code 2010, *American Journal of Materials Science and Application*, 3(5), pp. 59-66, 2015.
- [45] Rezakhani, R., Scott, D. A., Bousikhane, F., Pathirage, M., Moser, R. D., Green, B. H., Cusatis, G.: Influence of steel fiber size, shape, and strength on the quasi-static properties of ultra-high performance concrete: Experimental investigation and numerical modeling, *Construction and Building Materials*, 296, 123532, 2021.

- [46] El-Dieb, A.: Mechanical, durability and microstructural characteristics of ultra-high-strength self-compacting concrete incorporating steel fibers, *Materials & Design*, 30 (10), pp. 4286-4292, 2009.
- [47] Schmidt, M., Fehling, E., Teichmann, T., Bunje, K., Bornemann, R.: Ultra-high performance concrete: perspective for the precast concrete industry, *Concrete Precasting Plant and Technology*, 69(3), pp. 16-29, 2003.
- [48] Larsen, I.L., Thorstensen, R.T.: The influence of steel fibres on compressive and tensile strength of ultra high performance concrete: A review, *Construction and Building Materials*, 256, 119459, 2020.
- [49] Bonneau, O., Poulin, C., Dugat, J., Richard, P., Aitcin, P.: Reactive Powder Concretes: From Theory to Practice, *Concrete International*, 18(4), pp. 47-49, 1996.
- [50] Chern, J.C.; Young, C.H.: Compressive creep and shrinkage of steel fibre reinforced concrete, *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 11(4), pp. 205-214, 1989.
- [51] Nezhentseva, A., Sørensen, E.V., Andersen, L.V., Schuler, F.: Distribution and orientation of steel fibers in UHPFRC, DCE Technical Report No. 151, Aalborg University, Department of Civil Engineering, Division for Structures, Materials and Geotechnics, 2013.
- [52] Barnett, S.J., Lataste, J.F., Parry, T., Millard, S.G., Soutsos, M.N.: Assessment of fiber orientation in ultra-high performance fibre reinforced concrete and its effect on flexural strength, *Materials and Structures*, 43, pp. 1009-1023, 2010.
- [53] Zhao, Q., Yu, J., Geng, G., Jiang, J., Liu, X.: Effect of fiber types on creep behavior of concrete, *Construction and Building Materials*, 105, pp. 416-422, 2016.
- [54] Richard, P., Cheyrezy, M.H.: Reactive powder concretes with high ductility and 200-800 MPa compressive strength, *Special Publication*, 144, pp. 507-518, 1994.
- [55] Kamen, A., Denarić, E., Brühwiler, E.: Viscoelastic behavior of a strain hardening Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete, *Advances in Construction Materials*, pp. 157-164, Springer, Berlin, 2007.
- [56] Kamen, A., Denarić, E., Sadouki, H., Brühwiler, E.: UHPFRC tensile creep at early age, *Materials and Structures*, 42, pp. 113-122, 2009.