





Gradbeni vestnik • GLASILO ZVEZE DRUŠTEV GRADBENIH INŽENIRJEV IN TEHNIKOV SLOVENIJE in MATIČNE SEKCIJE GRADBENIH INŽENIRJEV INŽENIRSKO ZBORNICE SLOVENIJE

UDK-UDC 05 : 625; tiskana izdaja ISSN 0017-2774;

spletna izdaja ISSN 2536-4332.

Ljubljana, junij 2021, letnik 70, str. 113-136

Izdajatelj:

Zveza društev gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije (ZDGITS), Karlovška cesta 3, 1000 Ljubljana, telefon 01 52 40 200
v sodelovanju z **Matično sekcijo gradbenih inženirjev Inženirske zbornice Slovenije (MSG IZS)**, ob podpori **Javne agencije za raziskovalno dejavnost RS, Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani, Fakultete za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo Univerze v Mariboru in Zavoda za gradbeništvo Slovenije**

Izdajateljski svet:

ZDGITS: **izr. prof. dr. Andrej Kryžanowski**
Dušan Jukić
prof. dr. Matjaž Mikoš
IZS MSG: **Jernej Mazij**
mag. Jernej Nučič
mag. Mojca Ravnikar Turk
UL FGG: **doc. dr. Matija Gams**
UM FGPA: **doc. dr. Milan Kuhta**
ZAG: **doc. dr. Aleš Žnidarič**

Glavni in odgovorni urednik:

izr. prof. dr. Sebastjan Bratina

Lektor:

Jan Grabnar

Lektorica angleških povzetkov:

Romana Hudin

Tajnica:

Eva Okorn

Oblikovalska zasnova:

Mateja Goršič

Tehnično urejanje, prelom in tisk:

Kočeovski tisk

Naklada:

450 tiskanih izvodov
3000 naročnikov elektronske verzije

Podatki o objavah v reviji so navedeni v bibliografskih bazah COBISS in ICONDA (The Int. Construction Database) ter na

<http://www.zveza-dgits.si>

Letno izide 12 števil. Letna naročnina za individualne naročnike znaša 23,16 EUR; za študente in upokojence 9,27 EUR; za družbe, ustanove in samostojne podjetnike 171,36 EUR za en izvod revije; za naročnike iz tujine 80,00 EUR. V ceni je všteti DDV.

Poslovni račun ZDGITS pri NLB Ljubljana:
SI56 0201 7001 5398 955

Navodila avtorjem za pripravo člankov in drugih prispevkov

1. Uredništvo sprejema v objavo znanstvene in strokovne članke s področja gradbeništva in druge prispevke, pomembne in zanimive za gradbeno stroko.
2. Znanstvene in strokovne članke pred objavo pregleda najmanj en anonimen recenzent, ki ga določi glavni in odgovorni urednik.
3. Članki (razen angleških povzetkov) in prispevki morajo biti napisani v slovenščini.
4. Besedilo mora biti zapisano z znaki velikosti 12 točk in z dvojnimi presledki med vrsticami.
5. Prispevki morajo vsebovati naslov, imena in priimke avtorjev z nazivi in naslovi ter besedilo.
6. Članki morajo obvezno vsebovati: naslov članka v slovenščini (velike črke); naslov članka v angleščini (velike črke); znanstveni naziv, imena in priimke avtorjev, strokovni naziv, navadni in elektronski naslov; oznako, ali je članek strokoven ali znanstven; naslov POVZETEK in povzetek v slovenščini; ključne besede v slovenščini; naslov SUMMARY in povzetek v angleščini; ključne besede (key words) v angleščini; naslov UVOD in besedilo uvoda; naslov naslednjega poglavja (velike črke) in besedilo poglavja; naslov razdelka in besedilo razdelka (neobvezno); ... naslov SKLEP in besedilo sklepa; naslov ZAHVALA in besedilo zahvale (neobvezno); naslov LITERATURA in seznam literature; naslov DODATEK in besedilo dodatka (neobvezno). Če je dodatkov več, so ti označeni še z A, B, C itn.
7. Poglavlja in razdelki so lahko oštevilčeni. Poglavlja se oštevilčijo brez končnih pik. Denimo: 1 UVOD; 2 GRADNJA AVTOCESTNEGA ODSEKA; 2.1 Avtocestni odsek ... 3 ...; 3.1 ... itd.
8. Slike (risbe in fotografije s primerno ločljivostjo) in preglednice morajo biti razporejene in omenjene po vrstnem redu v besedilu prispevka, oštevilčene in opremljene s podnapisi, ki pojasnjujejo njihovo vsebino.
9. Enačbe morajo biti na desnem robu označene z zaporedno številko v okroglem oklepaju.
10. Kot decimalno ločilo je treba uporabljati vejico.
11. Uporabljena in citirana dela morajo biti navedena med besedilom prispevka z oznako v obliki oglatih oklepajev: (priimek prvega avtorja ali kratica ustanove, leto objave). V istem letu objavljena dela istega avtorja ali ustanove morajo biti označena še z oznakami a, b, c itn.
12. V poglavju LITERATURA so uporabljena in citirana dela razvrščena po abecednem redu priimkov prvih avtorjev ali kraticah ustanov in opisana z naslednjimi podatki: priimek ali kratica ustanove, začetnica imena prvega avtorja ali naziv ustanove, priimki in začetnice imen drugih avtorjev, naslov dela, način objave, leto objave.
13. Način objave je opisan s podatki: knjige: založba; revije: ime revije, založba, letnik, številka, strani od do; zborniki: naziv sestanka, organizator, kraj in datum sestanka, strani od do; raziskovalna poročila: vrsta poročila, naročnik, oznaka pogodbe; za druge vrste virov: kratek opis, npr. v zasebnem pogovoru.
14. Prispevke je treba poslati v elektronski obliki v formatu MS WORD glavnemu in odgovornemu uredniku na e-naslov: sebastjan.bratina@fgg.uni-lj.si. V sporočilu mora avtor napisati, kakšna je po njegovem mnenju vsebina članka (pretežno znanstvena, pretežno strokovna) oziroma za katero rubriko je po njegovem mnenju prispevek primeren.

Uredništvo

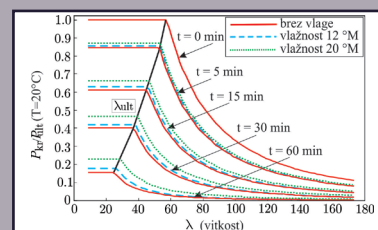
Vsebina • Contents

Članki • Papers

stran 114

izr. prof. dr. Simon Schnabl, univ. dipl. inž. grad.
dr. Bojan Čas, univ. dipl. inž. grad.

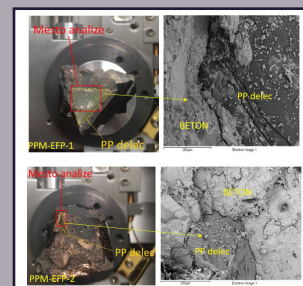
VPLIV POŽARA NA STABILNOST LESENIH STEBROV
INFLUENCE OF FIRE ON THE STABILITY OF TIMBER COLUMNS



stran 120

Jernej Karničnik, univ. dipl. inž. grad.
izr. prof. dr. Samo Lubej, univ. dipl. inž. grad.
izr. prof. dr. Andrej Ivanič, univ. dipl. inž. grad.
asist. dr. Gregor Kravanja, mag. inž. kem. tehn.

**EKSPERIMENTALNA ANALIZA BETONSKE MEŠANICE Z DODATKOM
ODPADNE PLASTIKE IN ELEKTROFILTRSKEGA PEPELA**
EXPERIMENTAL ANALYSIS OF CONCRETE WITH WASTE
PLASTIC AND FLY ASH ADMIXTURES



Poročilo s strokovnega spletnega srečanja

stran 131

Zavod za gradbeništvo Slovenije, d. o. o.
**2. MEDNARODNA KONFERENCA GRADBENI MATERIALI ZA
TRAJNOSTNO PRIHODNOST (CoMS 2020/21)**



stran 133

Miša Hrovat
**VPLIV TOPLOTNEGA OVOJA STAVBE NA OPTIMIZACIJO
STROŠKOV VZDRŽEVANJA BIVALNIH PROSTOROV**



Fotoreportaža z gradbišča

stran 135

Tomaž Goričan, mag. inž. grad.
doc. dr. Milan Kuhta, univ. dipl. inž. grad.
NOVA TRASA ŽELEZNIŠKE PROGE MARIBOR-ŠENTILJ, VIADUKT PESNICA



Novi diplomanti

Eva Okorn

Koledar prireditev

Eva Okorn

Slika na naslovnici: Gorvodno pobočje pregrade Vogršček s pristopnimi potmi k gradbeni jami
za odzemni objekt, foto Andrej Kryžanowski

VPLIV POŽARA NA STABILNOST LESENIH STEBROV

INFLUENCE OF FIRE ON THE STABILITY OF TIMBER COLUMNS

izr. prof. dr. Simon Schnabl, univ. dipl. inž. grad.

simon.schnabl@fkkf.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za kemijo in
kemijsko tehnologijo,

Večna pot 113, 1000 Ljubljana

dr. Bojan Čas, univ. dipl. inž. grad.

bojan.cas@fgg.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo
in geodezijo,

Jamova 2, 1000 Ljubljana

Znanstveni članek

UDK 614.841.3:624.011.1(078.9)

Povzetek | V članku je predstavljen matematični model in njegova semi-analitična rešitev za račun kritičnih uklonskih sil lesenih stebrov, ki, izpostavljeni požaru, oglenijo. Matematični model upošteva temperaturno odvisne termomehanske lastnosti lesa in oglja. Pri določitvi temperaturnega in vlažnostnega polja po prečnem prerezu lesenega stebra je upoštevan povezan prehod toplote in vlage. Z razvitim matematičnim modelom je bila izvedena parametrična analiza, s katero smo analizirali vpliv vitkosti, nivoja obtežbe in začetne vlažnosti na kritične uklonske sile lesenega stebra. Izkaže se, da se z naraščanjem vitkosti kritična uklonska sila lesenega stebra zmanjšuje, medtem ko se z višanjem začetne vlažnosti lesa ta povečuje. Kritični čas izpostavljenosti lesenega stebra požarni obtežbi se zmanjšuje z višanjem nivoja njegove začetne obtežbe.

Ključne besede: uklon, leseni steber, požar

Summary | A mathematical model for the structural behavior of timber columns under fire was proposed. A semi-analytical study was carried out to evaluate the load carrying capacity of timber columns under fire exposure. Special attention was paid to the critical buckling loads. For this purpose, a parametric study was conducted to investigate the effect of slenderness ratio, load level and water content on the critical buckling loads of timber columns. The results of this preliminary study showed that with increasing exposure time, slenderness ratio and load ratio significantly decrease the critical buckling load. On the other hand, the critical buckling load increases with the increase of the initial water content of timber. Moreover, the critical time decreases with the increase of load ratio.

Key words: buckling, timber column, fire

1 • UVOD

Les je zelo pogosto uporabljen konstrukcijski material. Uporablja se pri gradnji hiš, športnih objektov, mostov, zadnje čase pa se vse več uporablja tudi pri gradnji visokih stanovanjskih in poslovnih objektov. Zaradi majhnega ogljičnega odtisa lesenih elementov je priča-

kovati, da bo njegova uporaba v prihodnosti še naraščala. Ker pa je les gorljiv material, je s strani nekaterih investitorjev in projektantov njegova uporaba še vedno zapostavljena. V resnici pa se izkaže ravno nasprotno. Lesene konstrukcije so v pogledu požarne varnosti

v primerjavi z nekaterimi drugimi vrstami gradbenih konstrukcij razmeroma varne. To je v največji meri pogojeno z relativno slabo toplotno prevodnostjo lesa in nastankom oglja ob gorenju lesa. Poznavanje obnašanja lesa in oglja oziroma lesene konstrukcije pri visokih temperaturah je zato bistveno za zagotavljanje ustrezne požarne odpornosti lesenih konstrukcij.

Rezultate eksperimentalnih analiz požarne odpornosti lesenih konstrukcij so med številnimi drugimi avtorji predstavili Ali s sodelavci (Ali, 2005) in Lie (Lie, 1977). Uporaba naprednih računskih postopkov je predmet obsežnega seznama znanstvenih raziskav ((Benichou, 2000), (Cachim, 2009), (Fredlund, 1993), (Janssens, 2004), (König, 2005) in (Takeda 2009)). Ker so eksperimenti običajno izredno zahtevni in dragi, največkrat uporabljamo matematične modele za opis obnašanja konstrukcije med požarom. Matematično modeliranje pogosto poenostavimo tako, da ga v primeru, da poznamo časovno razporeditev temperature

in vlage po požarnem prostoru, razdelimo v dve ločeni fazi.

V prvi fazi izračunamo časovno razporeditev temperature in vlage po obravnavani konstrukciji, ki jo potem v drugi fazi uporabimo za določitev mehanskega odziva obravnavane konstrukcije na sočasen vpliv zunanje statične mehanske obtežbe in požara. Pri določitvi temperaturnega in vlažnostnega polja je treba upoštevati, da se toplota in vlaga med požarom prenašata na različne načine (konvekcija, kondukcija, radiacija). Poleg tega moramo upoštevati izhlapevanje, izparevanje in kondenziranje vode ter oglenenje lesa. Uspešnost analize odziva lesenih konstrukcij pri požaru

je v veliki meri odvisna od ustrezne izbire temperaturno odvisnih materialnih, reoloških in termičnih lastnosti lesa.

V članku se omejimo na lesene stebre. Pri teh vrstah elementov konstrukcij, ki so izpostavljeni požaru, ni nujno, da je za porušitev merodajna nosilnost prečnih prerezov lesenih elementov. Zaradi slabšanja materialnih lastnosti lesa med požarom, oglenjenja lesa in s tem manjšanja prečnega prereza lesenega elementa lahko nastopi porušitev lesenih stebrov kot posledica izgube njihove stabilnosti. Naveden je tudi poglobilni razlog, da v nadaljevanju obravnavamo uklon lesenih stebrov pri požaru.

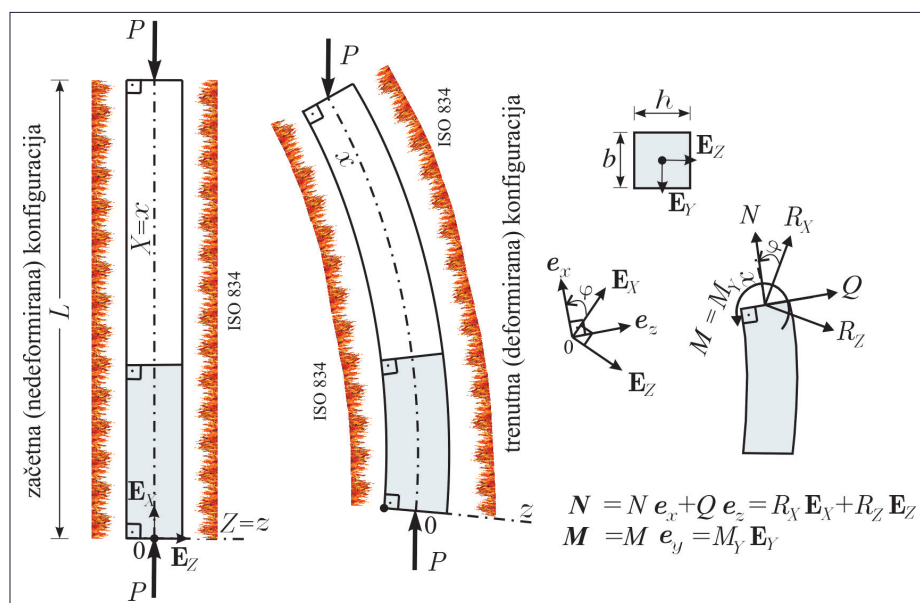
2 • POŽARNA ANALIZA LESENIH STEBROV

2.1 Teoretične osnove

Obravnavamo raven leseni stebel začetne dolžine L , ki ga prikazujemo na sliki 1. Stebel obravnavamo v ravnini X, Z kartezijskega koordinatnega sistema s prostorskimi koordinatami X, Y, Z in enotnimi baznimi vektorji \mathbf{E}_x , \mathbf{E}_y in $\mathbf{E}_z = \mathbf{E}_x \times \mathbf{E}_y$. Nedeformirana referenčna os stebra sovpada z njegovo težiščno osjo. Lokalni koordinatni sistem, ki ga opišemo s koordinatami x, y, z v nedeformirani legi sovpada s prostorskim koordinatnim sistemom X, Y, Z , ob deformiranju pa sledi obliki lesenega stebra. Stebel je obremenjen centrično s konservativno točkovno silo P . Poleg tega je stebel izpostavljen prostorsko enakomerno

porazdeljenemu požaru, ki so mu izpostavljene vse obodne površine stebra.

Analiza obnašanja lesenih stebrov med požarom je v splošnem sestavljena iz treh nepovezanih korakov. Prvi korak je določitev požarnega scenarija oziroma projektnega požara. Drugi korak je določitev temperaturno vlažnostnega stanja v obravnavanem stebri, tretji korak pa predstavlja določitev mehanskega stanja požaru izpostavljenega lesenega stebra. V prispevku upoštevamo projektni požar skladno s standardom ISO 834 (ISO 834-1, 1999), ki ga določa standardna požarna krivulja. Za izračun temperaturno vlažnostnega polja v stebri uporabimo matematični model,



Slika 1 • Geometrija in oznake ravnega lesenega stebra, ki je obremenjen s tlačno osno silo P ter izpostavljen standardnemu požaru ISO 834 (ISO 834-1, 1999).

ki sta ga predstavila Schnabl in Turk (Schnabl, 2019). Iz navedenega znanstvenega dela povzamemo rezultate temperaturno vlažnostne analize, ki jih uporabimo pri izračunu mehanskega odziva lesenega stebra med požarom. Slednje je sistematično predstavljeno v nadaljevanju pričujočega prispevka.

2.2 Mehanski model

Osnovne algebrsko diferencialne enačbe, ki opisujejo mehanski odziv lesenih stebrov pri hkratnem delovanju zunanje mehanske obtežbe in požara, so: (i) kinematične, (ii) ravnotežne in (iii) konstitutivne enačbe ter (iv) pripadajoči statični in kinematični robni pogoji. Omenjene enačbe temeljijo na lineariziranih enačbah Reissnerjevega modela ravninskega nosilca (Reissner, 1972) in ravni primarni legi lesenega stebra v celotnem obdobju izpostavljenosti požaru. Uklonske sile lesenih stebrov pri požaru izračunamo iterativno z linearno stabilnostno analizo. V ta namen celotni časovni interval, v katerem analiziramo mehanski odziv stebra $(0, t)$, razdelimo na časovne podintervale (t^{i-1}, t^i) . Napetostno deformacijsko stanje je tako v vsakem časovnem koraku t^i določeno iterativno z reševanjem naslednjih enačb:

$$\frac{du^i}{dx} - \varepsilon_0^i = 0, \quad (1)$$

$$\frac{dw^i}{dx} + (1 + \varepsilon_0^i)\varphi^i = 0, \quad (2)$$

$$\frac{d\varphi^i}{dx} - \kappa^i = 0, \quad (3)$$

$$\frac{dR_x^i}{dx} = 0, \quad (4)$$

$$\frac{dR_z^i}{dx} = 0, \quad (5)$$

$$\frac{dM_y^i}{dx} - (1 + \varepsilon_0^i)Q^i = 0, \quad (6)$$

$$N^i - R_x^i = 0, \tag{7}$$

$$Q^i - R_x^i \varphi^i - R_z^i = 0, \tag{8}$$

$$N^i - C_{11}^i \varepsilon_0^i - C_{12}^i \kappa^i = 0, \tag{9}$$

$$M^i - C_{21}^i \varepsilon_0^i - C_{22}^i \kappa^i = 0, \tag{10}$$

kjer smo z u^i, w^i in φ^i označili pomike in zasuke, medtem ko smo z ε_0^i in κ^i označili deformacijske količine referenčne osi stebra. Vse količine v enačbah (1)–(10), razen $C_{11}^i, C_{12}^i, C_{21}^i$ in C_{22}^i so funkcije samo vzdolžne koordinate x . Poleg tega smo z M_y^i označili upogibni moment v prečnem prerezu, ravnotežni sili v prečnem prerezu stebra pa z R_x^i in R_z^i, N^i in M^i predstavljata konstitutivno osno silo ter upogibni moment. Komponente konstitutivne matrike prečnega prereza stebra smo označili s $C_{11}^i, C_{12}^i, C_{21}^i$ in C_{22}^i . Te v primeru simetričnega prečnega prereza določimo na naslednji način:

$$C_{11}^i(\varepsilon_0^i, \kappa^i = 0, \varepsilon_T^i, T^i) = \int_A \frac{\partial \sigma_c^i}{\partial \varepsilon^i} dA, \tag{11}$$

$$C_{12}^i(\varepsilon_0^i, \kappa^i = 0, \varepsilon_T^i, T^i) = C_{21}^i(\varepsilon_0^i, \kappa^i = 0, \varepsilon_T^i, T^i) = \int_A z \frac{\partial \sigma_c^i}{\partial \varepsilon^i} dA = 0, \tag{12}$$

$$C_{22}^i(\varepsilon_0^i, \kappa^i = 0, \varepsilon_T^i, T^i) = \int_A z^2 \frac{\partial \sigma_c^i}{\partial \varepsilon^i} dA. \tag{13}$$

Pri tem ε^i označuje vzdolžno deformacijo poljubnega vlakna prečnega prereza stebra ter T^i temperaturo v i -tem časovnem koraku v izbrani točki prečnega prereza. σ_c^i predstavlja normalno napetost v izbrani točki prečnega prereza v i -tem časovnem koraku in je funkcija mehanske deformacije ε_M^i . Sistem linearnih algebrajsko diferencialnih enačb s konstantnimi koeficienti (1)–(10) sestavlja deset enačb za prav toliko neznanih funkcij, tj. $\varepsilon_0^i, \kappa^i, u^i, w^i, \varphi^i, R_x^i, R_z^i, M_y^i, N^i$ in M^i . Enačbe (1)–(10) rešimo s pomočjo pripadajočih statičnih in kinematičnih robnih pogojev pri $x=0$ in $x=L$.

$$x=0: u^i(0) = 0, \tag{14}$$

$$w^i(0) = 0, \tag{15}$$

$$r_5^0 M_y^i(0) + r_6^0 \varphi^i(0) = 0, \tag{16}$$

$$x=L: r_1^L R_x^i(L) + r_2^L u^i(L) = 0, \tag{17}$$

$$r_3^L R_z^i(L) + r_4^L w^i(L) = 0, \tag{18}$$

$$r_5^L M_y^i(L) + r_6^L \varphi^i(L) = 0, \tag{19}$$

kjer so $r_j \in (0,1)$ parametri, s katerimi opišemo različne kombinacije robnih pogojev Eulerjevih elastičnih stebrov, oznaki (0) in (L) določata količino pri $x=0$ oziroma $x=L$.

2.3 Mehanske lastnosti lesa pri visokih temperaturah

Mehanske lastnosti lesa, npr. njegova tlačna trdnost in elastični modul, so zelo odvisne od vsebnosti vlage ter temperature lesa. Te se z

višanjem vsebnosti vlage ter temperature v splošnem zmanjšujejo in so zelo odvisne od procesa izparevanja in kondenzacije vode, ki se pojavi pri približno 100 °C, od procesa pirolize lesa, ki se začne nad 200 °C, ter procesa ogljenja lesa, ki nastopi pri temperaturi okoli 300 °C. Običajno predpostavimo, da les izgubi vso svojo trdnost in togost na nivoju prečnega prereza, ko se spremeni v oglje. V pričujočih računskih analizah privzamemo, da se navedeno pojavi pri temperaturi 300 °C. Poznavanje zmanjševanja mehanskih lastnosti lesa je torej s stališča požarne analize lesenih stebrov ključnega pomena.

V mehanski analizi upoštevamo aditivnost vzdolžnih deformacij lesenega stebra. Vzdolžno deformacijo poljubnega vlakna prečnega prereza $\varepsilon^i = \varepsilon_0^i + z\kappa^i$ določimo z izrazom

$$\varepsilon^i = \varepsilon^{i-1} + \Delta \varepsilon^i. \tag{20}$$

$\Delta \varepsilon^i$ predstavlja prirastek celotne geometrijske deformacije pri času t^i in je sestavljen iz naslednjih dveh komponent:

$$\Delta \varepsilon^i = \Delta \varepsilon_M^i(\sigma_c^i, T^i) + \Delta \varepsilon_T^i(T^i), \tag{21}$$

kjer $\Delta \varepsilon_M^i$ označuje prirastek mehanske deformacije in $\Delta \varepsilon_T^i$ prirastek temperaturne deformacije.

2.4 Točna rešitev

Osnovni sistem algebrajsko diferencialnih enačb (1)–(10) je linearen, zato lahko določimo njegovo analitično oziroma točno rešitev. Poiščemo jo s postopno eliminacijo osnovnih neznank in delnim odvajanjem. Sistem enačb (1)–(10) tako nadomestimo s sistemom dveh

nepovezanih linearnih homogenih diferencialnih enačb višjega reda za u^i in w^i :

$$\frac{d^2 u^i}{dx^2} = 0, \tag{22}$$

$$\frac{d^4 w^i}{dx^4} + (k^i)^2 \frac{d^2 w^i}{dx^2} = 0, \tag{23}$$

kjer k^i označuje uklonski koeficient, definiran kot

$$(k^i)^2 = \frac{(1 + \varepsilon_0^i) P_{kr}^i}{C_{22}^i - \frac{C_{21}^i C_{12}^i}{C_{11}^i}}. \tag{24}$$

Splošna rešitev enačb (22)–(23) je

$$u^i = C_1^i x + C_2^i, \tag{25}$$

$$w^i = C_3^i \cos(k^i x) + C_4^i \sin(k^i x) + C_5^i x + C_6^i, \tag{26}$$

kjer so $C_1^i, C_2^i, C_3^i, C_4^i, C_5^i$ in C_6^i neznane integracijske konstante, ki jih določimo z vstavitvijo splošne rešitve (25)–(26) v izraze (14)–(19), ki predstavljajo robne pogoje lesenega stebra. Pri tem moramo rešiti homogeni sistem šestih linearnih algebrajskih enačb za neznane integracijske konstante. Pogoj ničelne determinante matrike koeficientov \mathbf{K}^i , ki določa netrivialno rešitev sistema, skupaj z enačbo za določitev konstitutivne osne sile sestavlja nelinearni sistem dveh enačb za dve neznani količini P_{kr} in $\varepsilon_{0,kr}^i$:

$$f_1^i(P_{kr}, \varepsilon_{0,kr}^i) = \det \mathbf{K}^i = 0, \tag{27}$$

$$f_2^i(P_{kr}, \varepsilon_{0,kr}^i) = N - P_{kr}^i = 0. \tag{28}$$

Nelinearni sistem enačb (27)–(28) rešimo numerično z uporabo Newton-Raphsonove iteracijske metode za reševanje nelinearnih sistemov enačb. Pri tem smo s P_{kr} označili

Oznaka stebra	P-P	C-F	C-P	C-C
Neničelne vrednosti parametrov r_j	$r_5^0 = r_4^L = 1$ $r_5^L = 1$ $r_6^0 = r_3^L = 0$ $r_6^L = 0$	$r_6^0 = r_3^L = 1$ $r_5^L = 1$ $r_5^0 = r_4^L = 0$ $r_6^L = 0$	$r_6^0 = r_4^L = 1$ $r_5^L = 1$ $r_5^0 = r_3^L = 0$ $r_6^L = 0$	$r_6^0 = r_4^L = 1$ $r_6^L = 1$ $r_5^0 = r_3^L = 0$ $r_5^L = 0$
Uklonska oblika				

C = vpeto; F = prosto; P = vrtljivo podprto

Preglednica 1 • Robni pogoji in pripadajoče uklonske oblike lesenih stebrov.

najmanjšo lastno vrednost, ki predstavlja tudi najmanjšo uklonsko silo stebra v časovnem koraku t . Eksplicitne izraze pogoja netrivialne

rešitve sistema enačb (27)–(28) in izraze za uklonske sile lesenih stebrov pri času t prikazujemo v preglednici 2. Te prikazujemo

skladno s preglednico 1, kjer predstavimo različne robne pogoje oziroma različne načine podpiranja lesenih stebrov.

Oznaka stebra	$\det \mathbf{K}^i = 0$	P_{kr}^i
P-P	$\frac{(C_{22}^i)^2 (k^i)^4 L \sin(k^i L)}{(1 + \varepsilon_0^i)^2} = 0$	$\frac{\pi^2 C_{22}^i}{(1 + \varepsilon_0^i) L^2}$
C-F	$\frac{(C_{22}^i)^2 (k^i)^5 \cos(k^i L)}{(1 + \varepsilon_0^i)^4} = 0$	$\frac{\pi^2 C_{22}^i}{(1 + \varepsilon_0^i) (2L)^2}$
C-P	$\frac{C_{22}^i (k^i)^2 (k^i L \cos(k^i L) - \sin(k^i L))}{(1 + \varepsilon_0^i)^2} = 0$	$\frac{\pi^2 C_{22}^i}{(1 + \varepsilon_0^i) (0.69915565L)^2}$
C-C	$\frac{k^i (k^i L \sin(k^i L) + 2 \cos(k^i L) - 2)}{(1 + \varepsilon_0^i)^2} = 0$	$\frac{\pi^2 C_{22}^i}{(1 + \varepsilon_0^i) (0.5L)^2}$

Preglednica 2 • Eksplicitni izrazi za pogoje ničelne vrednosti determinante matrike koeficientov \mathbf{K}^i in izrazi za kritično osno silo P_{kr}^i za različne načine podpiranja lesenega stebra.

3 • NUMERIČNI PRIMER

Z naslednjim računskim primerom prikažemo uporabnost predlaganega matematičnega modela za račun kritičnih uklonskih sil lesenih stebrov pri požaru. V ta namen obravnavamo leseni stebel z začetno temperaturo $T_0 = 20^\circ\text{C}$ in začetno vlažnostjo $W_0 = 13\%$. Steber je obremenjen s konservativno tlačno osno silo P in izpostavljen standardnemu požaru ISO 834 (ISO 834-1, 1999) po vseh obodnih površinah. Pri tem predpostavimo, da je temperaturno stanje nosilca in okolice vzdolž osi stebra konstantno. Nadalje, poleg mehanskih deformacij stebra upoštevamo tudi temperaturne deformacije. Geometrijski in materialni podatki ter podatki o obežbi lesenega stebra so podani na sliki 2.

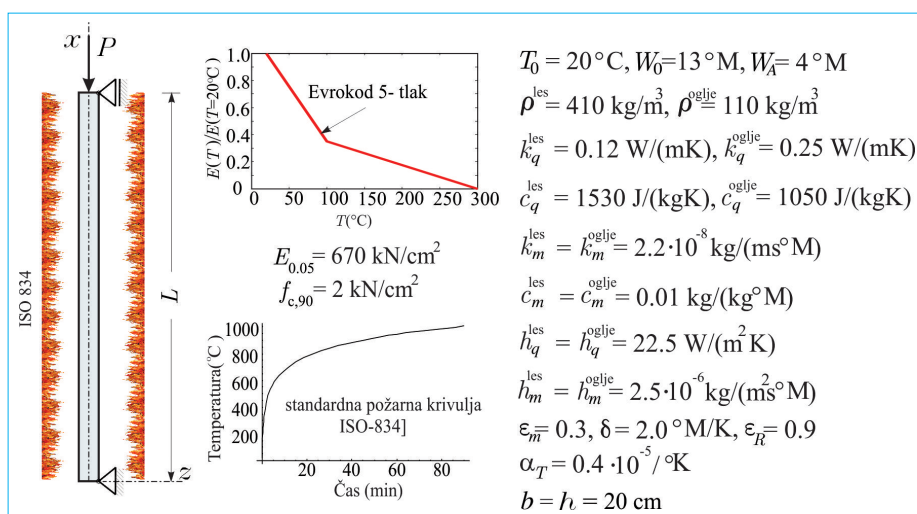
Pri računu uklonskih sil lesenega stebra pri požaru upoštevamo temperaturno polje, ki ga prikazujemo na sliki 3 in ga povzemamo po znanstvenem prispevku (Schnabl, 2019).

Celotno požarno analizo trajanja $t = 60$ min smo izvedli v časovnih korakih dolžine $\Delta t = 3$ s. Pri tem smo upoštevali zmanjšanje mehanskih lastnosti lesa, elastičnega modula in tlačne trdnosti, pri visokih temperaturah, kot je to predvideno v prispevku avtorja König (König, 2005).

Kritične uklonske sile lesenega stebra, vitkosti $\lambda = \frac{L\sqrt{A}}{\sqrt{J}} = 62$, prikazujemo v preglednici 3

za različne načine podpiranja in pri različnih

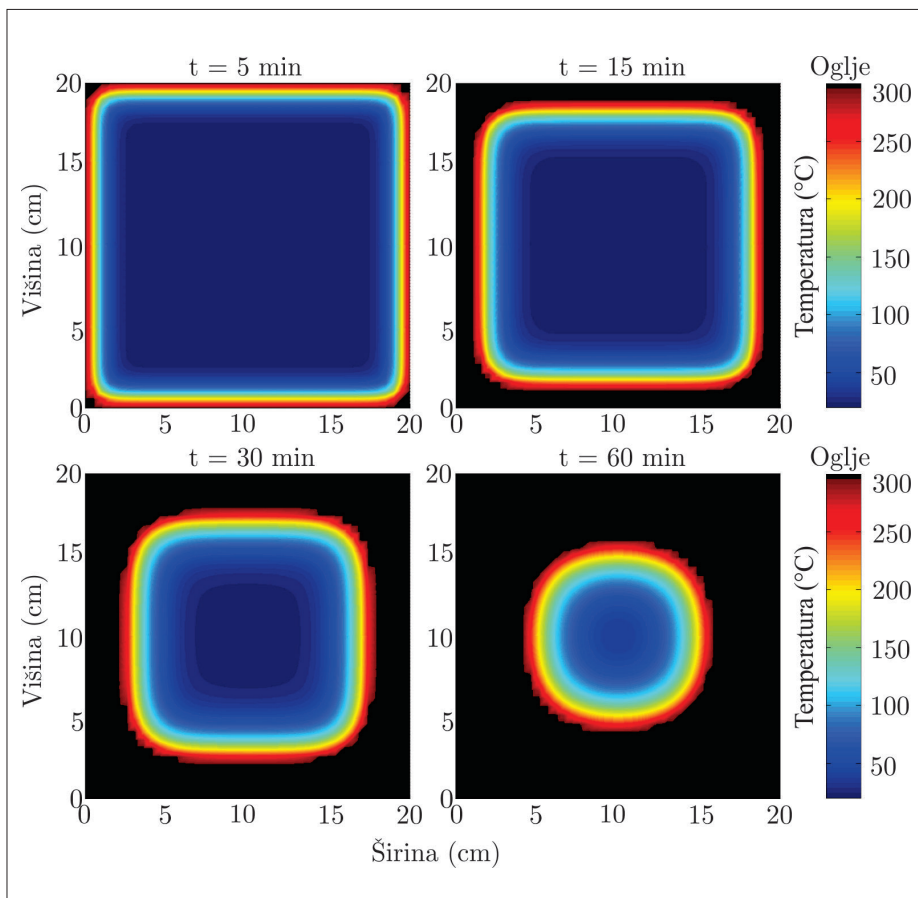
časih. Ker lahko pri tlačni obremenitvi vitkih stebrov pride do prekoračitve tlačne nosilnosti prečnega prereza stebra, preden pride do



Slika 2 • Geometrijski in materialni podatki lesenega stebra in oglja ter podatki o obežbi lesenega stebra.

$\lambda = 62$	$P_{kr} [\text{kN}]$			
Oznaka stebra	P-P	C-F	C-P	C-C
$P_{ult} (T=20^\circ\text{C})$	806,9	201,4	1000,0*	1000,0*
$t = 1 \text{ min}$	771,6	192,6	977,3*	977,3*
$t = 5 \text{ min}$	577,2	144,1	842,5*	842,5*
$t = 15 \text{ min}$	307,3	76,73	611,2*	611,2*
$t = 30 \text{ min}$	134,8	33,69	275,5	398,9*
$t = 60 \text{ min}$	23,56	5,889	48,11	94,39

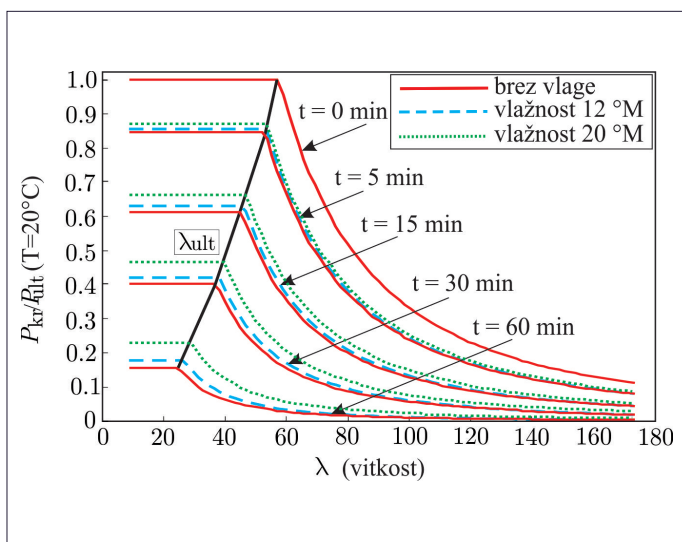
Preglednica 3 • Mejna tlačna nosilnost (bodisi porušitev prečnega prereza bodisi uklonska nosilnost) lesenega stebra za različne načine podpiranja in različne čase izpostavljenosti standardnemu požaru.



Slika 3 • Porazdelitev temperature in območja oglečenja po prečnem prerezu lesenega stebra pri $t = 5, 15, 30$ in 60 minut.

izgube njegove stabilnosti oziroma njegovega uklona, smo primere, kjer je merodajna tlačna nosilnost prečnega prereza, vrednosti v preglednici 3, označili z nadpisanim in-

deksom – zvezdico. Vidimo, da uklonska nosilnost stebra pri požaru pada relativno hitro v odvisnosti od trajanja požara. Tako znaša uklonska nosilnost obojestransko vrtljivo



Slika 4 • Normirana uklonska in tlačna nosilnost prečnega prereza lesenega stebra pri $t = 0, 5, 15, 30$ in 60 minut za različne vitkosti lesenega stebra in različne začetne vlažnosti lesa, to je $W_0 = 0, 12$ in $20^\circ M$.

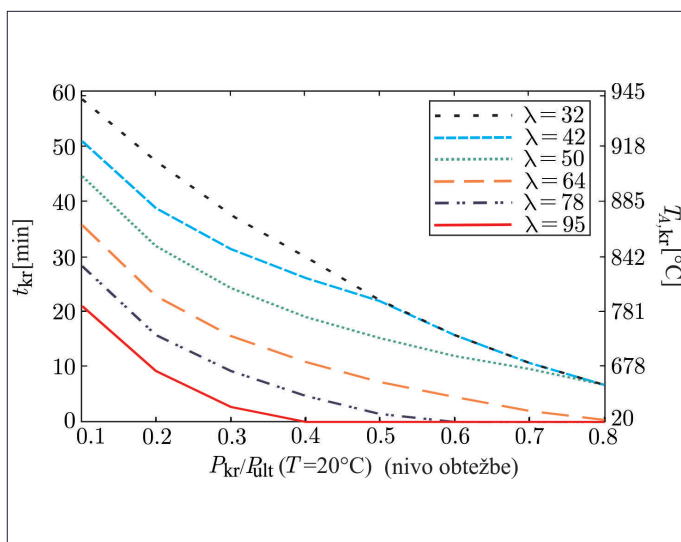
podprtega lesenega stebra po 30 minutah požara le še približno 16% začetne nosilnosti stebra.

Kritične uklonske sile lesenega stebra, izpostavljenega požaru, lahko prikažemo tudi z normirano brezdimenzijsko krivuljo, ki prikazuje kritično uklonsko ali mejno tlačno silo za primere različnih vitkosti. V ta namen je kritična uklonska sila P_{kr} normirana z mejno osno tlačno nosilnostjo stebra pri sobni temperaturi P_{ult} ($T=20^\circ C$). Rezultati za različne čase izpostavljenosti standardnemu požaru ISO 834 (ISO 834-1, 1999) in različne začetne vlažnosti so prikazani na sliki 4.

K sliki 4 podajamo tudi pomembno ugotovitev, da je normirana uklonska sila neodvisna od načina podpiranja. Poleg tega opazimo, da se z večanjem časa izpostavljenosti požaru in manjšanjem začetne vlažnosti lesa normirana kritična uklonska sila zmanjšuje.

V nadaljevanju za različne vitkosti λ lesenega stebra obravnavamo tudi vpliv nivoja obtežbe P_{kr}/P_{ult} ($T=20^\circ C$) na kritični čas t_{kr} , pri katerem nastopi porušitev lesenega stebra, in na kritično temperaturo plinov $T_{a,kr}$ v okolici obravnavanega lesenega stebra. Rezultate prikazujemo na sliki 5.

S slike 5 je razvidno, da se z višanjem nivoja obtežbe požarna odpornost lesenega stebra hitro zmanjšuje. Podobno se z višanjem nivoja obtežbe zmanjšuje kritični čas oziroma kritična temperatura plinov v okolici lesenega stebra, kar je pričakovano.



Slika 5 • Kritični čas t_{kr} in kritična temperatura $T_{a,kr}$ v odvisnosti od nivoja obtežbe za različne vitkosti lesenega stebra.

4 • SKLEP

V članku smo predstavili nov semi-analitični matematični model za izračun kritične uklonske sile lesenega stebra, ki je izpostavljen požaru. Na osnovi razvitega matematičnega modela smo opravili parametrično študijo, s katero smo analizirali vpliv različnih parametrov na kritično uklonsko silo lesenega stebra. Prišli smo do naslednjih zaključkov:

1. Kritična uklonska sila lesenega stebra se zmanjšuje z večanjem časa njegove izpostavljenosti požaru.
2. Leseni stebri se porušijo bodisi zaradi tlačne porušitve prečnega prereza bodisi zaradi uklona lesenega stebra.
3. Začetna vlažnost lesa pomembno vpliva na kritično uklonsko silo lesenega stebra.

Z višanjem začetne vlažnosti lesa se povečuje tudi kritična uklonska sila lesenega stebra med požarom.

4. Nivo obtežbe lesenega stebra pomembno vpliva na kritični čas izpostavljenosti požaru pred porušitvijo oziroma izgubo stabilnosti lesenega stebra. Z višanjem nivoja obtežbe se kritični čas do porušitve lesenega stebra zmanjšuje, prav tako se zmanjšuje kritična temperatura okolnih plinov, ki jim je izpostavljen leseni steber v pogojih požara.

5 • ZAHVALA

Predstavljeni rezultati so pridobljeni v sklopu dela programske skupine Mehanika konstrukcij (P2-0260), ki jo financira Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije. Za finančno pomoč se ji iskreno zahvaljujemo.

6 • LITERATURA

- Ali F., Kavanagh S., Fire resistance of timber columns, *Journal of the Institute of Wood Science*, 17(2), 85–93, 2005/06.
- Benichou N., Sultan M. A., Fire resistance performance of lightweight wood-framed assemblies, *Fire Technology*, 36(3), 184–219, 2000.
- Cachim P. B., Assessment of Eurocode 5 for fire design of timber columns, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Construction Materials*, 162, 151–156, 2009.
- Fredlund B., Modelling of heat and mass transfer in wood structures during fire, *Fire Safety Journal*, 20, 39–69, 1993.
- ISO 834-1, Fire-resistance Tests – Elements of Building Constructions – Part 1: General Requirements, 1999.
- Janssens M. L., Modelling of thermal degradation of structural wood members exposed to fire, *Fire and Materials*, 28, 199–207, 2004.
- König J., Structural fire design according to Eurocode 5 – design rules and their background, *Fire and Materials*, 29, 147–163, 2005.
- Lie T. T., A method for assessing the fire resistance of laminated timber beams and columns, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 4(2), 161–169, 1977.
- Reissner E., On one-dimensional finite-strain beam theory: The plane problem, *Journal of Applied Mechanics and Physics*, 23, 795–804, 1972.
- Schnabl S., Turk G., Temperaturno-vlažnostna požarna analiza lesenih prečnih prerezov z upoštevanjem oglenjenja – Temperature-moisture fire analysis of timber cross-sections exposed to fire, *Gradbeni vestnik*, 68, 78–85, marec 2019.
- Takeda H., An integrated model to predict fire resistance of wood floor assemblies, *Journal of Fire Protection Engineering*, 19, 133–150, 2009.

EKSPERIMENTALNA ANALIZA BETONSKE MEŠANICE Z DODATKOM ODPADNE PLASTIKE IN ELEKTROFILTRSKEGA PEPELA

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF CONCRETE WITH WASTE PLASTIC AND FLY ASH ADDMIXTURES

Jernej Karničnik, univ. dipl. inž. grad.

jernej.karnicnik@sgdstrdin.si
SGD Strdin, d. o. o., Spodnji trg 53,
2344 Lovrenc na Pohorju

izr. prof. dr. Samo Lubej, univ. dipl. inž. grad.

samo.lubej@um.si

izr. prof. dr. Andrej Ivanič, univ. dipl. inž. grad.

andrej.ivanic@um.si

asist. dr. Gregor Kravanja, mag. inž. kem. tehn.

gregor.kravanja@um.si
Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo,
prometno inženirstvo in arhitekturo,
Smatanova 17, 2000 Maribor

Znanstveni članek

UDK 539.411:691.32(047.31)

Povzetek | Recikliranje plastike predstavlja v svetu zmeraj večji problem. Prav tako velik problem predstavlja odlaganje elektrofiltrskega pepela. V članku smo preiskali možnost uporabe polipropilenskih mlevcev kot zamenjavo deleža mineralnega agregata in možnost uporabe elektrofiltrskega pepela kot zamenjavo deleža cementa. Cilj je dobiti betonsko mešanico, ki bo primerna za uporabo v nekonstrukcijskih in enostavnih konstrukcijskih elementih. Narejeni so bili preizkusi tlačne in upogibne natezne trdnosti. S preiskavami lastnosti betona v svežem stanju smo kontrolirali izvedene betonske mešanice. Mikrostrukturo in mikrokemijske analize smo proučevali z uporabo vrstične elektronske mikroskopije (SEM) in energijsko disperzivne spektrometrije (EDS). Dobljeni rezultati kažejo, da lahko z dodajanjem polipropilenskih delcev in elektrofiltrskega pepela proizvedemo beton, ki ustreza trdnostnemu razredu C 25/30.

Ključne besede: beton, polipropilen, elektrofiltrski pepel, mehanske preiskave, SEM – SEI, EDS

Summary | Recycling of plastic is a growing problem in the world. Another major problem is the disposal of fly ash. In this paper we investigated the possibility of using polypropylene grinders as a substitute for part of mineral aggregate and the possibility of using fly ash as a substitute for part of cement. The goal is to get a concrete mixture that will be suitable for the use in non-structural and simple construction elements. Compressive and flexural tensile strength were investigated. By examining the fresh state properties, we controlled the executed concrete mixtures. Finally, the microchemical structure of concrete was investigated in detail using scanning electron microscopy (SEM) and electron dispersive spectrometry (EDS). The results show that with the addition of polypropylene grinders and fly ash we can obtain concrete corresponding to strength class C 25/30.

Key words: concrete, polypropylene, fly ash, mechanical tests, SEM – SEI, EDS

1 • UVOD

V zadnjih letih po vsem svetu opažamo znatno rast porabe plastike, kar je povzročilo velike količine odpadkov, povezanih s plastiko. Recikliranje plastičnih odpadkov za pridobivanje novih materialov, kot sta beton ali malta, je zaradi ekonomskih in ekoloških prednosti ena izmed najboljših rešitev za odstranjevanje plastičnih odpadkov (Saikia, 2012). Vsakodnevna poraba plastike je ogromna. Polimera, ki se kot surovini pri proizvodnji plastike v Evropi največ uporabljata, sta polietilen (PE) in polipropilen (PP). Prvi v različnih oblikah (PE nizke gostote, PE srednje gostote, PE visoke gostote) predstavlja 29,7-% delež, drugi pa 19,3-% delež v proizvodnji (Plastics – the facts, 2019). Skoraj 91 % proizvedene plastike do sedaj ni bilo reciklirane (Meys, 2020). Če se bo sedanji trend proizvodnje in odlaganja plastike nadaljeval, bo leta 2050 kumulativno proizvedenih več kot 25.000 milijonov ton plastike, od tega bo v naravo odvržene kumulativno cca 12.000 milijonov ton plastike (Geyer, 2017).

Poleg nujne razbremenitve okolja z odpadnim materialom raste tudi potreba po zamenjavi kamenega mineralnega agregata, saj je nahajališč, predvsem fistih s kvalitivnim agregatom, vse manj. Potreba po materialih, ki bi lahko delno nadomestili kameni mineralni agregat v betonu, je zelo velika. V članku smo proučevali možnost uporabe odpadnih plastičnih mlevcev za zamenjavo deleža finega agregata. Cement je najdražja in ključna komponenta betona ter najpogosteje uporabljen gradbeni material na svetu, ki pomembno prispeva k podnebnim spremembam. Proizvodni proces pridobivanja cementa predstavlja

zelo velik vir emisij ogljikovega dioksida (CO₂). Vsako leto se proizvede več kot 4 milijarde ton cementa, kar predstavlja približno 8 % celotne svetovne emisije CO₂ (Lehne, 2018). Delež cementa v betonu smo zamenjali z elektrofiltrskim pepelom (EFP). V zadnjih desetletjih se pri proizvodnji betonov povečuje uporaba EFP kot delno nadomestilo za cement. Razlogi za to so številne ekonomske, okoljske in tehnične prednosti. EFP je bistveno cenejši od cementa in v proizvodnji betonov predstavlja vsaj dve okoljski prednosti, ki sta: več EFP, kot se porabi pri proizvodnji betonov, manj EFP je na odlagališčih, kar predstavlja polucijo, hkrati pa še manjšo porabo cementa, kar pomeni manjšo proizvodnjo cementa in manj emisij CO₂ (Case, 2012). EFP se lahko v betonski mešanici uporabi kot delna zamenjava cementa, ki znaša od 15 % do 25 % na maso veziva (Herath, 2020). Tehnične prednosti dodajanja EFP v betonske mešanice so predvsem to, da dodajanje ugodno vpliva na povečanje trajnosti betona in izboljšuje trdnostne lastnosti (Jelušič, 2013). Timu in Barbuta (Timu, 2018) sta preučevala možnost uporabe sekancev iz PE v betonih, ki je bil pridobljen pri recikliranju plastenk (PET) kot zamenjava deleža kamenega mineralnega agregata frakcije 0–4 mm. Ugotovljeno je bilo, da 10 % zamenjava mineralnega agregata s plastičnimi delci betonu zmanjša tlačno trdnost. Avtorja sta takšen beton uvrstila med konstrukcijske betone. V znanstvenem članku avtorja Ersana in sodelavcev (Ersan, 2020) je prikazana raziskava možnosti uporabe delcev PE kot zamenjavo deleža mineralnega agregata in EFP razreda F po ASTM C 618, ki izvira

iz atrancita kot zamenjava deleža cementa. Uporabili so delce PE velikosti 4–8 mm, s katerimi so nadomestili 30 % mineralnega agregata iste frakcije. Delež cementa, ki je bil zamenjan z EFP, je znašal 20 %.

V svetovni literaturi najdemo kar nekaj raziskav o uporabi odpadne plastike v betonu ((Zhang, 2012), (Karahan, 2010), (Wang, 2020)). V njih so raziskane lastnosti betona z dodanimi delci plastike v svežem in strjenem stanju. Raziskav, ki bi obravnavale hkratno zamenjavo deleža mineralnega agregata s plastičnimi delci in zamenjavo deleža cementa z EFP, je v svetovnem merilu zelo malo. V Sloveniji pa takšne raziskave ne najdemo.

V sklopu raziskav betonske mešanice z dodatki odpadne plastike (PP) in EFP so predstavljene meritve betonskih mešanic v svežem stanju, 28-dnevne vrednosti tlačne in upogibne natezne trdnosti ter podrobna mikrokemijska analiza stičnega območja med cementno matrico in PP-delci. Uporabljeni PP-delci so pridobljeni s postopkom reciklaže v obliki mlevcev. Delež mineralnega agregata frakcije 4–8 mm je nadomeščen z 2 vol. % PP-mlevcev. V obravnavani betonski mešanici, kjer smo s PP-mlevci nadomestili kameni mineralni agregat, smo zamenjali tudi delež veziva iz čistega cementa s 30 vol. % deležem dveh različnih tipov EFP, ki sta bila pridobljena iz lignita in antracita.

Namen tega dela je raziskati možnosti uporabe odpadne plastike ob souporabi EFP pri proizvodnji betonov, s čimer želimo zmanjšati obremenitev okolja z odpadki in zmanjšati odvisnost zaradi proizvodnje cementa. Cilj raziskave je, da se pripravi optimalna betonska receptura, ki bo zadostila pogojem uporabe betona za vgradnjo v nekonstrukcijske in enostavne konstrukcijske elemente.

pridobljen iz lignita (EFP 1), in drugi, pridobljen iz antracita (EFP 2). Preiskave komponent obeh vrst EFP so poznane iz predhodnih raziskav in so podane v preglednici 1 (Ivanovski, 2016).

2.1.3 Voda in kemijski dodatki

Za pripravo betonskih mešanic smo uporabili pitno vodo iz mariborskega vodovoda. Za izboljšanje vgradljivosti smo dodali hiperplastifikator proizvajalca Ha-Be z oznako Pantarhit RC277 v količini 3,60 kg/m³. V mešanico smo dodali tudi aerant z oznako Pantapor 66 v količini 0,36 kg/m³. Ta dodatek smo dodali z namenom, da zmanjšamo možnost čezmerne krvavenja in segregacije svežega betona.

2 • EKSPERIMENTALNI DEL

2.1 Uporabljeni materiali

2.1.1 Agregat

Pri izdelavi vzorcev betonskih mešanic smo uporabili naravni mineralni agregat rečnega izvora iz reke Drave, ki ga pridobivajo v separaciji Podlesnik v Mariboru. Gre za mineralno najbolj raznolik rečni prod v Sloveniji, prevladujoča je silikatna sestava (do 75 %), manj je karbonatov (do 30 %) in klastitov (do 20 %) (Kavčič, 2018). Skupna sejalna krivulja agregata, ki je bila uporabljena v preizkusnih mešanicah, je v največji možni meri sledila

krivulji B16 standarda SIST 1026:2016 (SIST, 2016).

2.1.2 Cement in EPF

Za pripravo mešanic betona smo uporabili cement CEM I 42,5 R proizvajalca Lafarge. Z oznako CEM I označimo čisti portlandski cement. Takšen cement vsebuje minimalno 95 % portlandskega klinkerja in maksimalno 5 % dodatkov – polnil in sadre. 30 vol. % delež cementa smo nadomestili z EFP. Uporabljena sta bila dva po sestavi različna tipa EPF, prvi,

	EFF tip 1 % (m/m)	EFF tip 2 % (m/m)
Žarilna izguba pri 950 °C	2,59	1,79
CaO, reaktivni	11,73	4,38
SiO ₂ , reaktivni	34,68	40,93
CaO, prosti	1,46	0,34
SiO ₂	44,34	49,50
Al ₂ O ₃	19,82	26,99
Fe ₂ O ₃	8,61	9,51
CaO	13,80	5,22
MgO	2,81	2,22
SO ₃	2,96	1,20

Preglednica 1 • Rezultati laboratorijskih analiz EFF v masnih deležih (m/m).

2.1.4 PP-mlevci

Za nadomestilo dela drobnega kamenega mineralnega agregata v betonski mešanici smo uporabili mlevce iz PP, ki jih z reciklažo odpadne embalaže proizvaja družba Interseroh Slovenija. Granulometrijska sestava PP-mlevcev je podana v preglednici 2 (Červan, 2019). Gostota PP-mlevcev znaša 1,00 g/cm³.

- etalonska mešanica z EFF tipa 2, ki smo jo označili kot (ETM-EFF-2),
- mešanica s PP mlevci z EFF tipa 1, ki smo jo označili kot (PPM-EFF-1),
- mešanica s PP mlevci z EFF tipa 2, ki smo jo označili kot (PPM-EFF-2).

Sestavine smo mešali v laboratorijskem mešalcu z oznako UTEST UTC-0750 z močjo

Odprtina sita (m/m)	0	2	4	8	16
Prvo sejanje (g)	6,00	81,00	778,00	135,00	0,00
% frakcije	0,60	8,10	77,80	13,50	0,00
Drugo sejanje (g)	3,00	68,00	760,00	167,00	0,00
% frakcije	0,30	6,80	76,00	16,70	0,00
Povprečje (%)	0,45	7,45	76,90	15,10	0,00

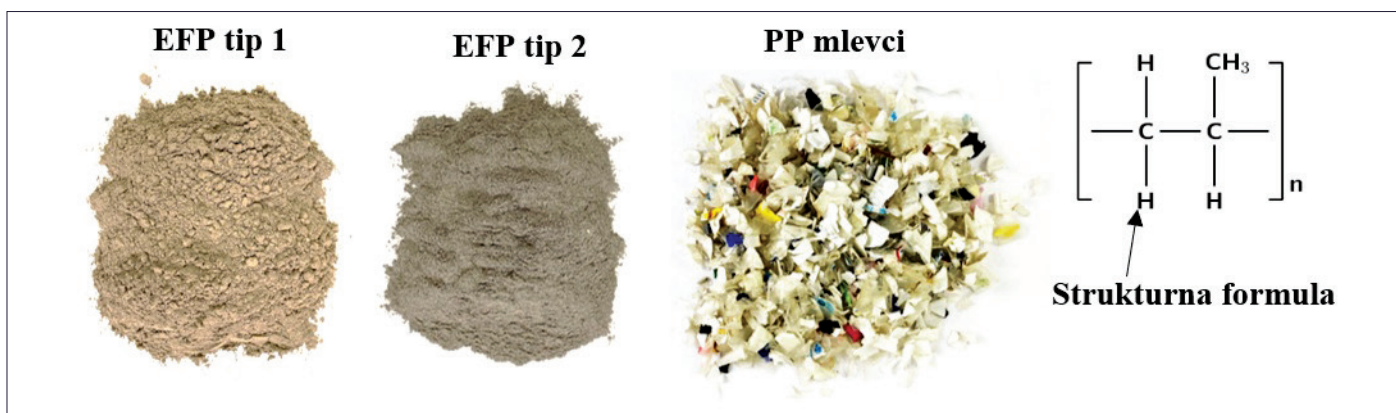
Preglednica 2 • Rezultati sejalnih analiz PP-mlevcev.

cement, EFF in PP-mlevce. Vse skupaj smo pokrili z drobnim agregatom. Suho mešanico smo pri 36 obratih na minuto mešali 60 sekund. Suhi mešanici smo nato dodali vodo, aerant in hiperplastifikator. Vse sestavine smo pri 36 obratih na minuto mešali še nadaljnjih 90 sekund. Sestava svežega betona posameznih mešanic je podana v preglednici 3. Sveži beton smo nato vgradili v standardne kalupe dimenzij 150 x 150 x 150 mm (za merjenje tlačnih trdnosti) in kalupe dimenzij 100 x 100 x 400 mm (za merjenje upogibne natezne trdnosti). Pri vgradnji v kalupe smo beton zgostili na vibracijski mizi s frekvenco 50 Hz. Beton smo vgradili v dveh slojih, pri čemer smo vsak sloj posebej zgoščevali 10 sekund. 24 ur po vgradnji smo vzorce betona vzeli iz kalupov in jih 28 dni negovali v kadi z vodo pri temperaturi 20 °C ± 1 °C. Po 28 dneh smo betonske vzorce vzeli iz vode in na njih opravili standardni tlačni in upogibni test. Vzorce smo pripravili v skladu s standardi SIST EN 12390-1 in SIST EN 12390-2 ((SIST, 2001), (SIST, 2009d)).

2.3 Karakterizacijske metode

2.3.1 Karakterizacija sveže betonske mešanice

Konsistenco betona smo izmerili z metodo poseda v skladu s standardom SIST EN 12350-2 (SIST, 2009a). Rezultat te meritve je konsistenčni razred. Vsebnost zračnih por smo izmerili v skladu s standardom SIST EN 12350-7 (SIST, 2009c). Za meritev smo uporabili 8-litrski porozimeter z oznako Testing 5900. Beton smo v porozimeter vgradili v treh



Slika 1 • Normirana uklonska in tlačna nosilnost prečnega prereza lesenega stebra pri $t = 0, 5, 15, 30$ in 60 minut za različne vitkosti lesenega stebra in različne začetne vlažnosti lesa, to je $W_0 = 0, 12$ in 20°M .

2.2 Priprava betonskih mešanic

Pripravili smo štiri različne mešanice betona:

- etalonska mešanica z EFF tipa 1, ki smo jo označili kot (ETM-EFF-1),

3800 W. Notranjost bobna mešalca smo navlažili in tako minimalizirali absorpcijo vode, ki smo jo dodali mešanici. Najprej smo v mešalec dodali grobi agregat, nato

slojih, da smo dosegli dovolj dobro zgoščenost. Meritev gostote svežega betona smo izvajali v skladu s standardom SIST EN 12350-6 (SIST, 2009b). Izmerili smo maso vzorca

Mešanica	Material (kg/m ³)									
	Voda	Cement	EFP1	EFP2	H	A	A/0-4	A/4-8	A/8-16	PPM
ETM-EFP-1	180,00	252,00	108,00	0,00	3,60	0,36	858,58	171,08	681,78	0,00
ETM-EFP-2	180,00	252,00	0,00	108,00	3,60	0,36	858,58	171,08	681,78	0,00
PPM-EFP-1	180,00	252,00	108,00	0,00	3,60	0,36	858,58	167,66	681,78	1,27
PPM-EFP-2	180,00	252,00	0,00	108,00	3,60	0,36	858,58	167,66	681,78	1,27

Legenda: H – hiperplastifikator, A – aerant, A/0-4, A/4-8, A/8-16 – frakcije kamenega mineralnega agregata, PPM – polipropilenski mlevci.

Preglednica 3 • Sestava posameznih betonskih mešanic.

svežega betona, ki smo jo delili z znanim volumnom vzorca:

$$\rho_{bs} = \frac{M_{bs}}{V_{bs}} \text{ [kg/m}^3\text{]}, \quad (1)$$

pri čemer je ρ_{bs} gostota svežega betona (kg/m³); M_{bs} masa vzorca svežega betona (kg); V_{bs} volumen vzorca svežega betona (m³).

Meritev vodocementnega razmerja (v/c) smo opravili v skladu s standardom SIST 1026:2016, dodatek NC (SIST, 2016). Vodocementno razmerje svežega betona se določi kot količnik mase celotne količine vode in mase celotne količine veziva v 1 m³ svežega betona.

Z meritvijo izgube mase med sušenjem svežega betona v mikrovalovni pečici smo določili količino vode v vzorcu svežega betona. Masni delež celotne količine vode v svežem betonu smo izračunali po naslednji enačbi:

$$v = \frac{M_{bs} - M_{bp}}{M_{bs}} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

pri čemer je:

v masni delež celotne vode v svežem betonu (m/m %);

M_{bs} masa vzorca svežega betona (kg);

M_{bp} masa vzorca posušenega betona (kg).

Celotna količina vode v 1 m³ svežega betona V se izračuna po naslednji enačbi:

$$V = \rho_{bs} \cdot v \text{ [kg/m}^3\text{]}, \quad (3)$$

pri čemer je:

V celotna količina vode v 1 m³ svežega betona (kg/m³);

ρ_{bs} gostota svežega betona (kg/m³);

v masni delež celotne vode v svežem betonu (m/m %).

2.3.2 Karakterizacija otrdele betonske mešanice

Tlačno trdnost betona smo izmerili v skladu s standardom SIST EN 12390-3 (SIST, 2009e). Vzorce smo obremenjevali do porušitve s konstantno obremenitvijo 0,6 MPa/s. Preskus tlačne trdnosti smo izvedli s stiskalnico UTEST UTC-4331. Tlačna trdnost betona se izračuna z izrazom (SIST, 2009e):

$$f_c = \frac{F}{A_c}, \quad (4)$$

pri čemer je:

f_c tlačna trdnost betona (MPa);

F maksimalna sila pri lomu materiala (N);

A_c del prereza vzorca, na katerem deluje tlačna sila (mm²).

Upogibno natezno trdnost betona smo izmerili v skladu s standardom SIST EN 12390-5 (SIST, 2009f). Vzorce smo obremenjevali do porušitve s konstantno obremenitvijo 0,5 MPa/s. Upogibno natezno trdnost smo izračunali z izrazom (SIST, 2009f):

$$f_{ct,fl} = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot d_1 \cdot d_2^2}, \quad (5)$$

pri čemer je:

$f_{ct,fl}$ upogibna natezna trdnost betona (MPa);

F maksimalna sila pri lomu materiala (N);

l razdalja med valjastima podporama (mm);

d_1, d_2 bočne dimenzije vzorca (mm).

2.3.3 Določitev mikrostrukture in mikrokemijske analize betona

Za določitev mikrostrukture stične površine med cementnim kamnom in PP-mlevcem v otrdelem betonu je bil uporabljen elektronski

vrstični mikroskop FEI QUANTA 200 3D, ki je okoljski vrstični mikroskop z volframovo katodo kot izvorom elektronov. Oznaka »okoljski« pomeni ESEM (Environmental Scanning Electron Microscope), kar omogoča delo pri različnih tlakih in vlažnosti. Rezultati dela s tem mikroskopom so SEM – SEI (Scanning Electron Microscope – Secondary Electron Image) fotografije. Fotografije SEM – SEI so bile izdelane pri visokem vakuumu, ki omogoča opazovanje prevodnih ali neprevodnih vzorcev, ki so prevlečeni s prevodno plastjo, ki je iz zlata.

FEI SIRION NC je visokoločljivi vrstični elektronski mikroskop s poljsko emisijo elektronov, ki omogoča izredno velike povečave (do milijonkrat) in visoko ločljivost (1 nm). Opremljen je z analizatorjem za mikrokemične analize EDS (Energy Dispersive Spectroscopy), Oxford Instruments. ima Schottkyjev izvor elektronov, kjer s poljsko emisijo dobimo curek elektronov z majhnim premerom in veliko gostoto. Rezultat je visoka ločljivost tudi pri majhnih napetostih: 1,0 nm pri 15 kV ali 2,0 nm pri 1 kV.

Mikroskop je opremljen za mikrokemično analizo z energijsko disperzijskim spektrometrom EDS Oxford INCA 350. Omogoča kvalitativno in kvantitativno mikrokemično analizo v točki in na ploskvi ter kvalitativno linijsko analizo in ploskovno porazdelitev elementov (analiza XRM mapping). Ločljivost EDS-detektorja je 129 pri Mn Ka. Vzorčenje smo opravili iz vsake gredice za upogibni preizkus po tri vzorce, ki so vsebovali vpete delce PP-mlevcev.

rali na 5%. S takšnim deležem zračnih por že lahko dosežemo zmrzlinsko odporne betone. Seveda moramo v skladu s standardom SIST EN 206:2013 (SIST, 2013) za zagotavljanje zmrzlinске odpornosti zagotoviti tudi dovolj nizko vodocementno razmerje in dovolj veliko tlačno trdnost betona. Tako kot konsistenco smo pri vsaki mešanici preverili tudi vsebnost

3 • REZULTATI IN DISKUSIJA

3.1 Meritve svežega betona

Konsistenco smo fiksirali v konsistenčni razred S3 s posedom med 100 in 150 mm. S tem konsistenčnim razredom smo zagoto-

vili dobro vgradnjo betona v kalupe, dobro zgoščenost, simulirali pa smo tudi najbolj uporabljen konsistenčni razred na slovenskih betonarnah. Vsebnost zračnih por smo fiksi-

zračnih por. Z izbranim aerantom lahko zelo dobro kontroliramo delež in tako smo dobili rezultate med 4,9% in 5,2% zračnih por.

Ob upoštevanju koncepta k-vrednosti za mineralne dodatke v skladu z standardom SIST EN 206:2013 (SIST, 2013) je bila določena vrednost računskega vodocementnega razmerja 0,61. Če upoštevamo deklarirano vpojnost agregata, je vrednost računskega efektivnega vodocementnega razmerja 0,58. Določili smo tudi gostoto v svežem stanju. Vrednosti vodocementnega razmerja in gostote, ki smo jih dobili z našimi meritvami, so predstavljene v preglednici 4.

Mešanica	v/c	v/ceff	Gostota (kg/m ³)
ETM-EFP-1	0,62	0,59	2.261,23
ETM-EFP-2	0,61	0,58	2.258,41
PPM-EFP-1	0,60	0,57	2.251,58
PPM-EFP-2	0,61	0,58	2.250,13

Preglednica 4 • Vrednosti izmerjenega vodocementnega razmerja in pripadajoče gostote.

Pri vsaki vrsti mešanice smo za preiskavo tlačne trdnosti betona v svežem stanju naredili po en preizkušanelec. S preiskavami svežega betona smo želeli kontrolirati, da je beton res zamešan tako, kot je bilo določeno z recepturami.

Podobne raziskave kažejo, da se konsistenca betona oz. njegov posed, s čimer določimo obdelavnost betona, z dodajanjem plastičnih delcev navadno zmanjša. To je posledica nepravilne oblike in večje specifične površine plastičnih delcev ((Sharma, 2016), (Mahmood, 2020)). V primeru uporabe okroglih delcev plastike pa se obdelavnost lahko tudi izboljša ((Saikia, 2012), (Gu, 2016), (Gholampour, 2019)). Padeč konsistence je manjši ob uporabi gladkih delcev plastike (Bahij, 2020). Gostota betona se z večanjem vsebnosti plastičnih delcev manjša. To je posledica manjše gostote plastike v primerjavi z gostoto ostalih komponent betona ((Almshal, 2020), (Li, 2020)). Poroznost betona se zaradi nepravilne oblike plastičnih delcev, ki vodijo v slabo zgoščenost, šibko prehodno območje in pojav mikrorazpok, zelo poveča (Babafemi, 2018). Z dodajanjem EFP betonu izboljšamo obdelovalnost (Thomas, 2007). Za to obstaja več razlogov. Zaradi nižje gostote EFP v primerjavi s cementom se poveča prostornina razpoložljive paste. EFP prav tako zmanjša flokulacijo cementnih delcev. Ker EFP počasneje reagira z vodo, je stopnja hidratacije v začetnem obdobju nižja, s tem pa beton dlje drži začetno konsistenco.

Največ pa k dobri obdelovalnosti betona z EFP pripomore njihova sferična oblika (Hemalatha, 2017).

3.2 Meritve betonske mešanice v trdnem stanju

3.2.1 Tlačne trdnosti

Rezultati 28-dnevne tlačne trdnosti so zbrani v preglednici 5, povprečne vrednosti pa so prikazane na sliki 2. Po pregledu rezultatov opazimo 16-% znižanje tlačne trdnosti z dodajanjem PP-mlevcev v primerjavi z etalonskima mešanicama. Do dodatnega znižanja tlačne trdnosti pride z uporabo EFP 2, pridobljenega iz antracita, ki ima nižjo specifično površino

(3288 cm²/g) v primerjavi z EFP1 iz lignita (5.025 cm²/g). To pomeni, da so delci EFP tipa 1 manjši, da jih je več in da imajo večjo kapaciteto za potrebno reakcijo s stranskimi produkti hidratacije cementa. Gre za reakcijo, pri kateri se tvori dodatni kalcijev-silikat-hidrat (C-S-H), ki je primarni produkt hidratacije cementa in glavna sestavina, ki vpliva na trdnost betona.

Napravljene betonske mešanice smo v skladu s standardom SIST EN 206:2013, dodatek B, (SIST, 2013) razvrstili v trdnostne razrede. Postopek je podan v nadaljevanju in preglednici 6.

S pomočjo preglednice B.1, standarda SIST EN 206:2013 (SIST, 2013), določimo merilo istovetnosti za tlačno trdnost z naslednjimi enačbami:

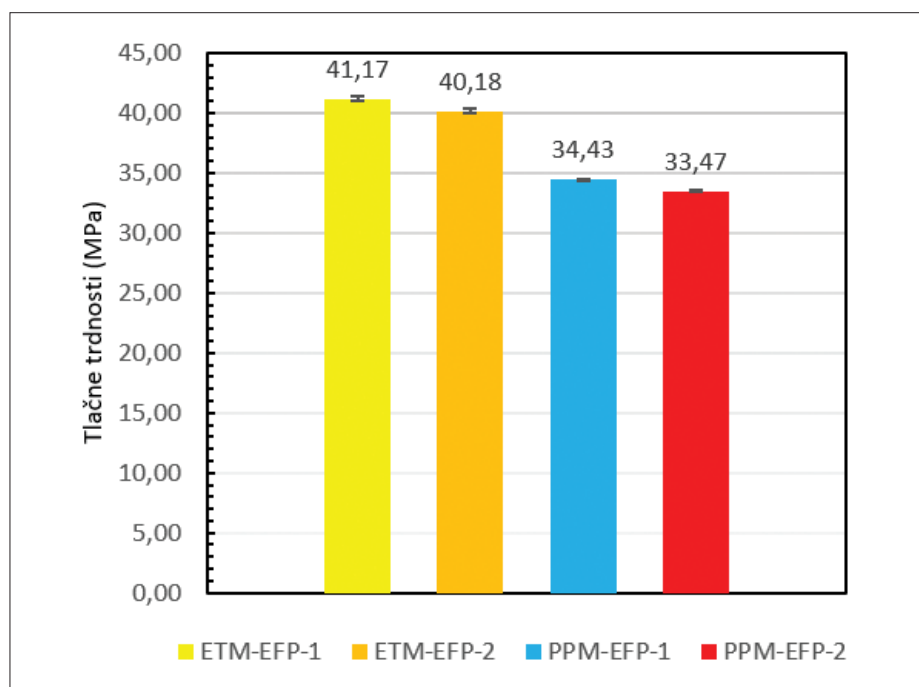
$$- \text{prvo merilo: } f_{cm} \geq f_{ck} + 1, \quad (6)$$

$$- \text{drugo merilo: } f_{ci} \geq f_{ck} - 4, \quad (7)$$

Prvo in drugo merilo določata potrebno minimalno povprečno vrednost tlačne trdnosti in minimalno vrednost posamezne tlačne trdnosti.

Tlačna trdnost (MPa)	ETM-EFP-1	ETM-EFP-2	PPM-EFP-1	PPM-EFP-2
Preizkušanelec 1	40,97	40,32	34,34	33,52
Preizkušanelec 2	41,37	40,03	34,52	33,42
Povprečna vrednost	41,17	40,18	34,43	33,47
Standardni odklon	0,20	0,15	0,09	0,05

Preglednica 5 • Rezultati tlačne trdnosti posamezne mešanice s povprečno vrednostjo in standardnim odklonom.



Slika 2 • Povprečne tlačne trdnosti betonskih mešanic.

Mešanica	Povprečna vrednost (MPa)	Minimalna vrednost (MPa)	Prvo merilo (MPa)	Drugo merilo (MPa)
ETM-EFP-1	41,17	40,97	38,00	33,00
ETM-EFP-2	40,18	40,03	38,00	33,00
PPM-EFP-1	34,43	34,34	31,00	26,00
PPM-EFP-2	33,47	33,42	31,00	26,00

Preglednica 6 • Vrednotenje rezultatov tlačne trdnosti.

Na podlagi vrednotenja rezultatov tlačne trdnosti vidimo, da etalonski mešanici spadata v trdnostni razred C 30/37, mešanice s PP-mlevci pa v trdnostni razred C 25/30. To pomeni, da bi lahko, če pogledamo samo tlačno trdnost, etalonski mešanici ter mešanice s PP-mlevci uporabili tudi v primeru konstrukcijskih betonskih elementov. Seveda bi bilo za takšne zaključke treba narediti še preizkus trajnosti in reoloških lastnosti. Trajnost betona določajo lastnosti, kot so prodor vode, prepustnost zraka in vode, migracija kloridov, karbonizacija, krčenje ter odpornost proti zmrzovanju in tajanju.

Z dodajanjem plastičnih delcev kot zamenjava za mineralni agregat se poveča prodor vode v betonski element, saj mešanica mineralnega agregata in plastike vodi do bolj poroznega betona (Coppola, 2018). Z dodajanjem odpadne plastike v beton se povečata tudi prepustnost zraka in vode. Večje število praznin v betonski matrici vodi do večje penetracije ionov klorida in višje karbonizacije (Silva, 2013). Med procesom karbonizacije kalcijev hidroksid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) reagira z ogljikovim dioksidom (CO_2) iz ozračja, kar ima negativen vpliv na mehanske lastnosti betona.

Pri betonu, ki vsebuje odpadno plastiko, opazimo večje krčenje zaradi sušenja kot pri običajnih betonih. V splošnem se napetost zaradi krčenja v cementnih pastah, ki vsebujejo plastične delce, zmanjša (Bendimerad, 2016). Odpornost proti zmrzovanju in tajanju betona, ki vsebuje odpadno plastiko, ustreza vsem standardom za varno uporabo. V določenih primerih s povečanjem deleža odpadne plastike v betonu opazimo celo boljšo odpornost proti zmrzovanju in daljši trajnosti betonskega elementa (Kan, 2009).

Razlogov za padec tlačne trdnosti je več: hidratacija cementa na površini plastičnih delcev se zaustavi zaradi pomanjkanja vode zaradi hidrofobne narave plastičnih delcev; vzpostavi se zelo slaba vez med cementno pasto in plastičnimi delci; velika poroznost

in vsebnost zraka v betonu; nizki modul elastičnosti plastičnih delcev; možen razpad plastičnih delcev zaradi izpostavljenosti alkaličnemu okolju ((Almeshal, 2020), (Sharma, 2016), (Gholampour, 2019), (Babafemi,

se lahko doseže višjo tlačno trdnost, kot jo dosežemo z uporabo večjih plastičnih delcev (Li, 2020). Nižja hidratacija betona z EFP vodi do počasnejšega pridobivanja trdnosti oz. nižjih začetnih trdnosti (Garcia, 2015). To je lahko v določenih primerih prednost, lahko pa tudi velika slabost. Kljub temu da so začetne tlačne trdnosti betona z EFP nižje od tlačnih trdnosti navadnega betona, so lahko končne tlačne trdnosti betona z EFP tudi višje. Zaradi ponavljajoče se pucolanske reakcije EFP s stranskimi produkti hidratacije se vez med pasto in mineralnim agregatom izboljšuje, kar dolgoročno izboljša trdnost betona (Thomas, 2007).

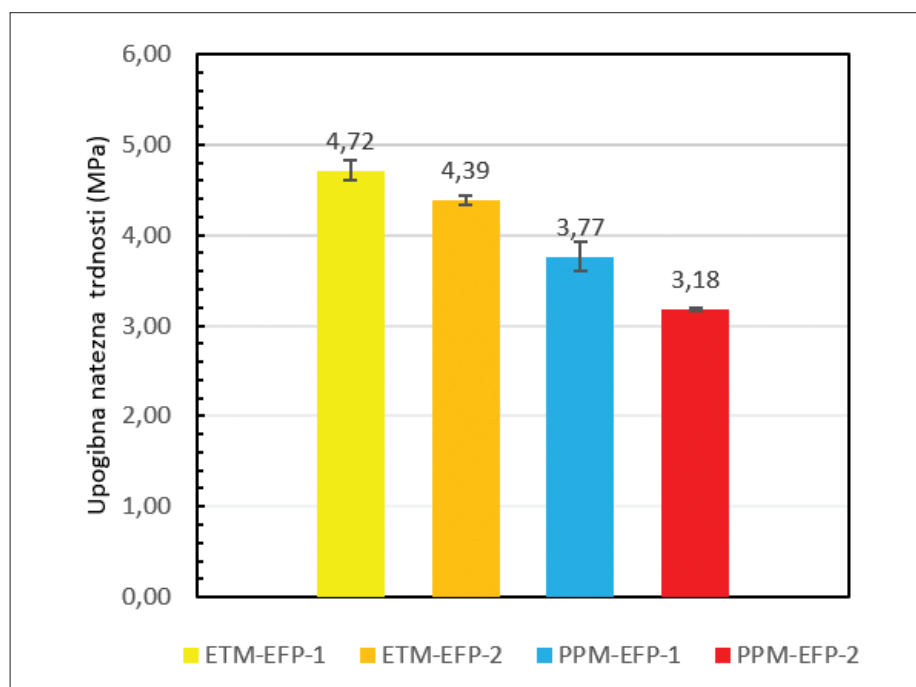
Upogibna natezna trdnost (MPa)	ETM-EFP-1	ETM-EFP-2	PPM-EFP-1	PPM-EFP-2
Preizkušanelec 1	4,82	4,34	3,93	3,17
Preizkušanelec 2	4,61	4,43	3,60	3,19
Povprečna vrednost	4,72	4,39	3,77	3,18
Standardni odklon	0,11	0,04	0,17	0,01

Preglednica 7 • Rezultati upogibne natezne trdnosti posamezne mešanice s povprečno vrednostjo in standardnim odklonom.

2018)). V primeru nepravilne oblike plastičnih delcev je padec tlačne trdnosti večji kot v primeru pravilne oblike plastičnih delcev ((Gu, 2016), (Bahij, 2020), (Mahmood, 2020)). Z zmanjšanjem velikosti plastičnih delcev za zamenjavo mineralnega agregata

3.2.2 Upogibne natezne trdnosti

Rezultati 28-dnevne upogibne natezne trdnosti so zbrani v preglednici 7, povprečne vrednosti pa so prikazane na sliki 3. Tako kot pri tlačni trdnosti, tudi pri upogibni natezni trdnosti, opazimo znižanje vrednosti z dodajanjem PP-



Slika 3 • Povprečne upogibne natezne trdnosti betonskih mešanic.

-mlevcev. V primerjavi z etalonskimi mešanica- mi se je najmanj znižala upogibna natezna trdnost mešanice z EFP tipa 1. Opazimo 20-% znižanje upogibne natezne trdnosti. Znižanje trdnosti z EFP tipa 2 in dodanimi PP-mlevci v primerjavi z etalonsko mešanico z EFP tipa 2 je 28%. Takoj opazimo razlike v dobljenih rezultatih med različnima tipoma EFP. Večja specifična površina EFP tipa 1 pride tukaj še do večjega izraza kot pri tlačni trdnosti. Upogibna natezna trdnost je namreč še bolj odvisna od prehodnega območja med PP-delci in cementnim kamnom.

Razlogi za znižanje upogibne natezne trdnosti so enaki kot pri padcu tlačne trdnosti. Medtem ko smo v naši raziskavi opazili večje znižanje upogibne natezne trdnosti v primerjavi tlačni trdnosti, sta Saika in de Brito (Saikia, 2012) opazila, da je zmanjšanje upogibne trdnosti z dodajanjem plastičnih delcev manjše kot zmanjšanje tlačne trdnosti. To sta pojasnjevala s spremembo obnašanja pri porušitvi betonskega elementa, ki je bolj duktilen kot element iz navadnega betona, kar ima večji vpliv pri upogibni trdnosti. V raziskavi, ki sta jo predstavila avtorja, so bili uporabljeni delci plastike oglete oblike. Glede

na to da so bili v naši raziskavi uporabljeni delci luskaste oblike, lahko sklenemo, da delci oglete oblike bolj ugodno vplivajo na upogibno trdnost kot delci luskaste oblike. Delci luskaste oblike imajo površino veliko večjo od prostornine. To neugodno vpliva na vez z betonsko matrico, kar seveda neugodno vpliva tudi na mehanske lastnosti. Določene raziskave so pokazale tudi izboljšanje upogibne trdnosti pri uporabi manjšega deleža zamenjave agregata s plastičnimi delci (Babafemi, 2018).

3.3 Mikrokemijska analiza betona

3.3.1 Analiza SEM – SEI

Tako na tlačno trdnost kot tudi na upogibno natezno trdnost vpliva mikrostruktura betona. Na sliki 4 je prikazana mikrostruktura betonskih mešanic PPM-EFP-1 in PPM-EFP-2.

S slike je jasno razvidna lega PP-delca in okoliškega betona. Dobro lahko vidimo prehodno območje med betonom in PP-delcem. Lastnosti prehodnega območja najbolj vplivajo na trdnost betonskega elementa. Vidimo, da je vez med betonom in PP-delcem šibka in porozna. Pravzaprav lahko rečemo, da je prišlo do ločitve med plastičnim delcem in be-

tonska matrico. To je posledica luskaste oblike in gladke površine PP-delca. Sama betonska matrica je veliko bolj zgoščena in kompaktna. Iz prehodnega območja se v beton vidno širijo mikrorazpoke. Te se pri obremenjevanju elementa med seboj združijo in tvorijo razpoke večjega velikostnega razreda. Večje razpoke pa vodijo do porušitve elementa. Iz tega lahko hitro sklepamo, zakaj je tlačna in upogibna natezna trdnost betona manjša, ko mu dodamo PP-delce.

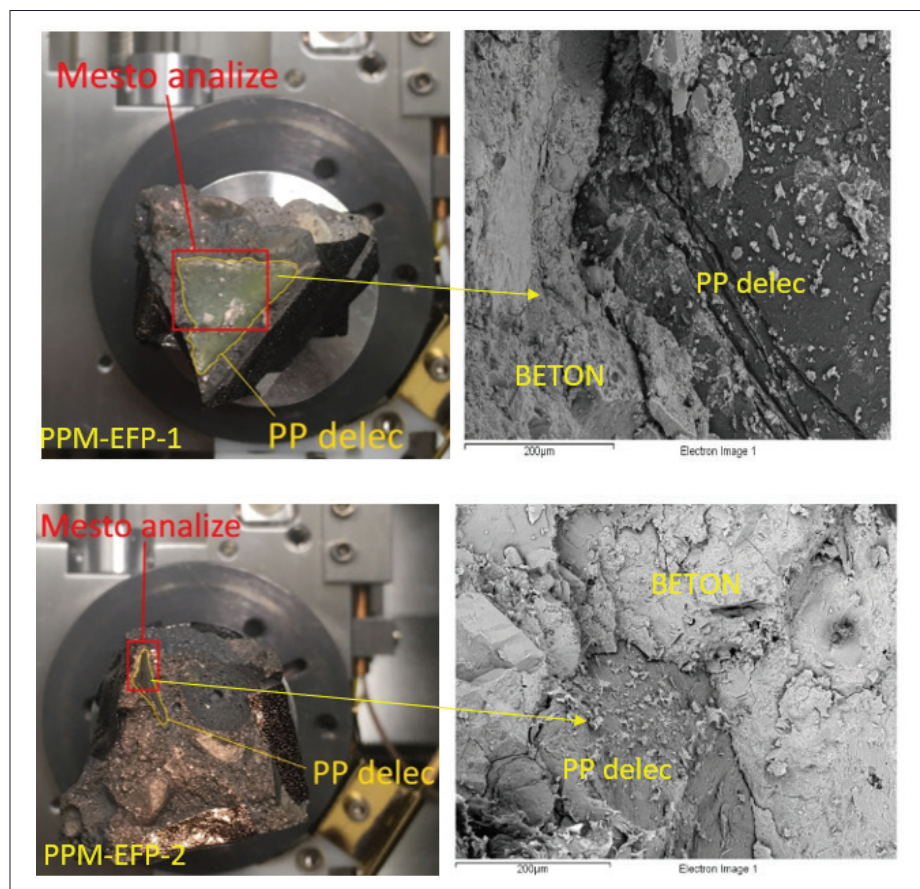
Belmokaddem s sodelavci (Belmokaddem, 2020) je odkril šibko vez med plastičnimi delci in cementno pasto. Odkrili so, da je prehodno območje širše od tistega med cementno pasto in mineralnim agregatom. Opazili so slabšo adhezijo med cementno matrico in PP-delci. Prav tako so opazili pojav večjih zračnih mehurčkov v betonu z dodanimi PP-delci. Zaradi teh pojav je bila izmerjena manjša tlačna trdnost pri betonu z dodanimi PP-delci. Raziskava Zaleska in sodelavcev (Zaleska, 2018) pravi, da pri nižji volumenski zamenjavi PP-delcev z agregatom ni opaziti slabše formacije trdne strukture cementne matrice. Pri večji volumenski zamenjavi pa je prišlo do bolj porozne strukture. Opaziti je ostro mejo med PP-delci in hidratizirano cementno matrico. Raziskave na ostalih tipih plastičnih delcev kažejo enake rezultate ((Basha, 2020), (Safi, 2013)).

3.3.2 EDS-analiza

Preglednica 8 prikazuje rezultate EDS-analize betonske mešanice PPM-EFP-1. Lokacije odvzetih spektrov so razvidne na sliki 5. Vidimo, da prisotnost elementov variira odvisno od tega, kje je bil posnet spekter. Na PP-delcu imamo prisotnega največ ogljika (C), povprečno 53%. Dobrih 29% je kisika (O). V betonu najbolj zastopana elementa sta O in kalcij (Ca), povprečno okrog 61% ter 31%. Na prehodnem območju (spekter 5) je najbolj zastopan element O.

V preglednici 9 so podatki EDS-analize betonske mešanice PPM-EFP-2. Vidimo, da je zastopanost kemijskih elementov na PP-delcu podobna kot v primeru betonske mešanice PPM-EFP-1. V betonu pa so opazne večje razlike predvsem v zastopanosti elementov Ca in silicija (Si). Opazimo, da je v primeru uporabe EFP tipa 1 prisotnega več Ca in Si. Na prehodnem območju mešanice PPM-EFP-2 (spekter 3) je največ C.

S pomočjo EDS-analize smo želeli tudi ugotoviti, kakšno je razmerje Ca/Si. Glavni produkt



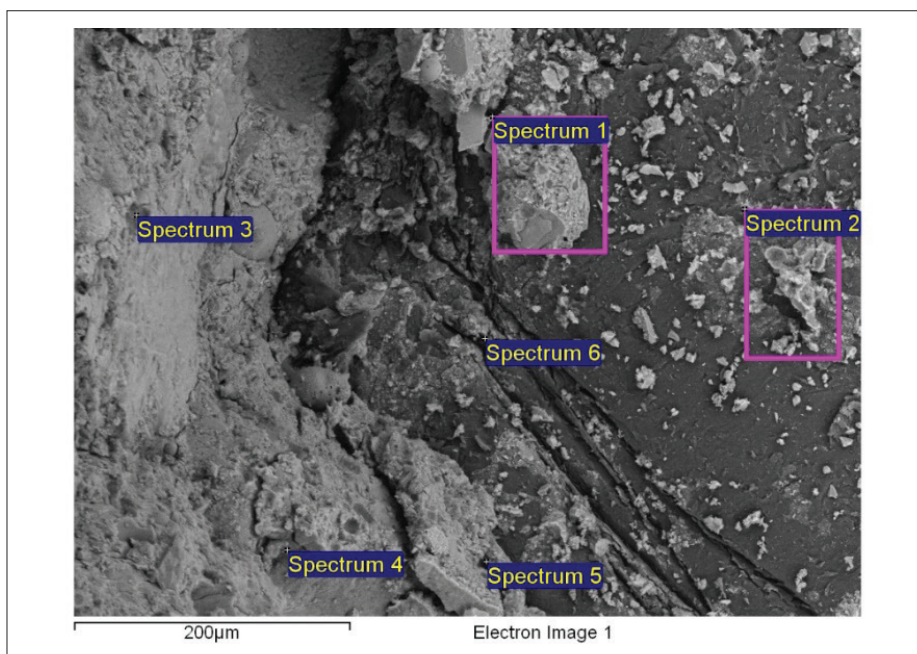
Slika 4 • Analiza SEM - SEI betonske mešanice PPM-EFP-1 in PPM-EFP-2.

Kemijski element	C	O	Al	Si	Ca	Fe
Spectrum 1	30,84	39,80	1,49	8,20	17,74	0,94
Spectrum 2	44,37	34,23	0,77	4,12	16,50	
Spectrum 3	1,96	48,55	2,54	13,29	30,39	
Spectrum 4	4,69	33,73	1,62	8,25	43,56	5,39
Spectrum 5	2,12	43,92	6,30	17,61	27,66	
Spectrum 6	62,46	25,12	0,60	2,50	8,99	

Preglednica 8 • EDS-analiza betonske mešanice PPM-EFP-1.

hidracije cementa in glavna sestavina, ki prispeva k trdnosti betonskega elementa, je kalcijev-silikat-hidrat (C-S-H). Sestavljena je iz različnih komponent, večkrat pa se izrazi kot

2017). Višja vrednost razmerja pove, da je na določenem mestu višja prisotnost krhkih kristalov kalcijevega hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), ki seveda neugodno vplivajo na trdnost (Ivanič,



Slika 5 • EDS-analiza betonske mešanice PPM-EFP-1.

povprečno razmerje Ca/Si. Trdnost betona je tako odvisna od tega razmerja. Nižje ko je to razmerje, višja bo trdnost betona (Kunther,

2011). Z dodajanjem EFP vrednost razmerja Ca/Si pada. To je posledica reakcije EFP s stranskimi produkti hidracije, npr. $\text{Ca}(\text{OH})_2$

Kemijski element	C	O	Al	Si	Ca	Fe
Spectrum 1	75,19	18,79		1,83	4,19	
Spectrum 2	77,66	17,24		1,64	3,45	
Spectrum 3	86,97	10,65		0,53	2,38	
Spectrum 4	14,71	45,43	2,90	8,39	28,57	
Spectrum 5	33,29	44,56		18,53	3,62	
Spectrum 6	14,31	57,00	1,32	5,52	21,85	
Spectrum 7					70,62	29,38

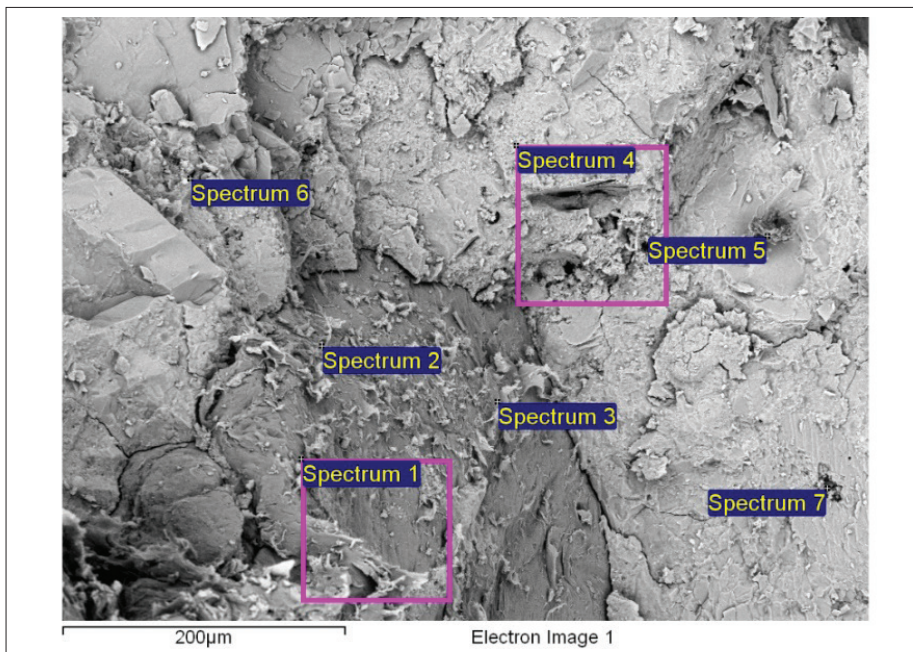
Preglednica 9 • EDS-analiza betonske mešanice PPM-EFP-2.

(Shehata, 1999). Tako lahko EFP dolgoročno pozitivno vpliva na trdnost betona.

V preglednici 10 so prikazane vrednosti Ca/Si razmerja različnih mešanic. Zgoraj smo omenili, da je prehodno območje tisto, ki najbolj vpliva na trdnost betona. Zato je smiselno primerjati med seboj Ca/Si-razmerja spektrov, ki so posneti na prehodnem območju. V preglednici sta ta dva rezultata označena z zvezdo. Vidimo, da je razmerje Ca/Si v mešanici PPM-EFP-1 (spekter 5) manjše od tistega v mešanici PPM-EFP-2 (spekter 3). Tako se naši rezultati, pridobljeni s preizkusom tlačne trdnosti, povsem skladajo tudi z vrednostmi Ca/Si-razmerja. Če se osredotočimo na Ca/Si-razmerje posamezne mešanice opazimo, da je pri mešanici PPM-EFP-1 to razmerje nižje v betonu. Zanimivo je, da smo pri mešanici PPM-EFP-2 dobili drugačen rezultat, in sicer je razmerje Ca/Si v betonu višje od tistega na PP-delcu, razen na mestu spektra 5. To je lahko posledica uporabljenega drugega tipa EFP.

Mešanica/spekter	PPM-EFP-1	PPM-EFP-2
	Ca/Si	Ca/Si
Spectrum 1	2,16	2,29
Spectrum 2	4,00	2,10
Spectrum 3	2,29	4,49*
Spectrum 4	5,28	3,41
Spectrum 5	1,57*	0,20
Spectrum 6	3,60	3,96

Preglednica 10 • Vrednosti Ca/Si-razmerja različnih mešanic.



Slika 5 • EDS-analiza betonske mešanice PPM-EFP-1.

4 • SKLEP

Na osnovi opravljenih raziskav možnosti zamenjave mineralnega agregata z odpadno plastiko, pri čemer so bili kot odpadna plastika uporabljeni PP-mlevci, lahko pridemo do naslednjih sklepov:

1. Tlačna in upogibna natezna trdnost betona se z dodajanjem PP-mlevcev znižata.
2. Z dodajanjem PP-mlevcev je možno pripraviti beton trdnostnega razreda C 25/30. Tak beton se lahko uporabi v enostavnih betonskih konstrukcijskih elementih.
3. Vež med betonom in PP-delci je šibka, saj luskasta in gladka površina plastičnega delca ne omogoča dobre adhezije med PP-delci in cementno matrico.
4. Na podlagi analize SEM-SEI je na prehodnem območju med PP-delci in cement-

no matrico opaziti številne mikrorazpoke. Te mikrorazpoke se širijo v cementno matrico, kjer se med seboj združujejo v razpoke večjega velikostnega razreda. Večje razpoke vodijo do hitrejše porušitve betonskega elementa in s tem do nižjih tlačnih ter upogibnih nateznih trdnosti.

5. S pomočjo analize SEM-EDS smo pridobili Ca/Si-razmerja. Razvidno je, da vrsta EFP vpliva na vrednosti Ca/Si-razmerja in posledično na mehanske lastnosti. V mešanici PPM-EFP-1 je Ca/Si-razmerje manjše od tistega v mešanici PPM-EFP-2. V primeru zamenjave deleža cementa z EFP je pomembno izbrati tak pepel, ki ima dovolj veliko specifično površino in reaktivnost s stranskimi produkti hidratacije cementa.

Največja prednost uporabe odpadne plastike in EPF v betonski mešanici je zmanjševanje odpada v naravi. Proizvodnja plastike in EFP se vsako leto večja, s tem pa je vedno več odlagališč. Zato je zelo pomembno, da se vsaj del plastike in EFP reciklira. Videli smo, da lahko delež mineralnega agregata v betonski mešanici nadomestimo s plastičnimi delci, s tem pa dobimo beton, katerega tlačna trdnost je še vedno dovolj dobra za uporabo v enostavnih betonskih konstrukcijskih elementih. Prednost uporabe plastike proti drugim recikliranim materialom, na primer z recikliranim naravnim agregatom, pa je tudi, da v primeru plastike v beton ne dodajamo različnih primesi, ki bi lahko dodatno negativno vplivale na lastnosti betona. Postopek recikliranja plastike je namreč veliko bolj kontroliran. Da bo gradbena industrija širše sprejela uporabo recikliranih plastičnih odpadkov v betonu, bo potrebnih še precej preiskav z vidika ekonomije, družbene sprejemljivosti, reologije in trajnosti.

5 • LITERATURA

- Almeshal I., Tayeh B., Alyousef R., Alabduljabbar H., Mohamed A. M., Alaskar A., Use of recycled plastic as fine aggregate in cementitious composites: A review, *Construction and Building Materials*, 253, 2020.
- Babafemi A. J., Šavija B., Paul S. C., Anggraini V., Engineering Properties of Concrete with Waste Recycled Plastic: A review, *Sustainability*, 10, 2018.
- Bahij S., Omary S., Feugeas F., Faqiri A., Fresh and hardened properties of concrete containing different forms of plastic waste – A review, *Waste Management*, 113, 157-175, 2020.
- Basha S. I., Ali M. R., Al-Dulajjan S. U., Maslehuddin M., Mechanical and thermal properties of lightweight recycled plastic aggregate concrete, *Journal of Building Engineering*, 32, 2020.

- Belmokaddem M., Mahi A., Senhadji Y., Pekmezci B. Y., Mechanical and physical properties and morphology of concrete containing plastic waste as aggregate, *Construction and Building materials*, 257, 2020.
- Bendimerad, A.Z., Rozi re, E., Loukili, A., Plastic shrinkage and cracking risk of recycled aggregates concrete, *Construction and Building Materials* 121, 733-745, 2016.
- Case R. J., Duan K., Suntharavadevel T. G., On Effects of Fly Ash as a Partial Replacement of Cement on Concrete Strength, *Applied Mechanics and Materials*, 2012.
- Coppola, B., Courard, L., Michel, F., Incarnato, L., Scarfato, P., Di Maio, L., Hygro-thermal and durability properties of a lightweight mortar made with foamed plastic waste aggregates, *Construction and Building Materials* 170, 200-206, 2018.
- Červan U., Določitev optimalne mešanice betona z uporabo PP mlevcev kot nadomestilo mineralnega agregata, 2019.
- Ersan Y. C., Gulcimen S., Imis T. N., Saygin O., Uzal N., Life cycle assessment of lightweight concrete containing recycled plastics and fly ash, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2020.
- Garcia N. M., Zapata L. E., Suarez O. M., Cabrera-Rios M., Effect of fly ash and nanosilica on compressive strength of concrete at early age, *Advances in Applied Ceramics*, 114 (2), 99-106, 2015.
- Geyer R., Jambeck J. R., Law K. L., Production, use and fate of all plastics ever made, *Science advances*, 3, 2017.
- Gholampour A., Ozbakkaloglu T., Recycled plastic, *New Trends in Eco-efficient and Recycled Concrete*, 59-85, 2019.
- Gu L., Ozbakkaloglu T., Use of recycled plastics in concrete: A critical review, *Waste Management*, 51, 19-42, 2016.
- Hemalatha T., Ramaswamy A., A review on fly ash characteristics- Towards promoting high volume utilization in developing sustainable concrete, *Journal of Cleaner Production*, 147, 546-559, 2017.
- Herath C., Gunasekara C., Law D. W., Setunge S., Performance of high volume fly ash concrete incorporating additives: A systematic literature review, *Construction and Building Materials*, 258, 2020.
- Ivanič A., Lubej S., Rudolf R., Anžel I., Bond behaviour of carbon-fiber yarn embedded in cement mortar, *Science and Engineering of Composite Materials*, 18, 181-186, 2011.
- Ivanovski M., Kontrola elastičnih lastnosti betona z dodatkom gumenih sekancev, 2016.
- Jelušič P., Lubej S., Ivanič A., Odpornost betona z dodatkom reciklirane gume proti zmrzovanju in tajanju, *Gradbeni vestnik*, 62, 124-130, 2013.
- Kan, A., Demirboğa, R., A new technique of processing for waste-expanded polystyrene foams as aggregates, *Journal of materials processing technology* 209(6), 2994-3000, 2009.
- Karahan O., Atis C. D., The durability properties of polypropylene fiber reinforced fly ash concrete, *Materials and Design*, 32, 1044-1049, 2010.
- Kavčič F., Cotič Z., Prebil D., Ipavec A., Jereb V., Bokan Boksiljkov V., Priročnik za beton, Načrtovanje in proizvodnja betona, Združenje za beton Slovenije, 2018.
- Kunther W., Ferreira S., Skibsted J., Influence of the Ca/Si ratio on the compressive strength of cementitious calcium-silicate-hydrate binders, *Journal of Materials Chemistry A*, 5, 17401-17412, 2017.
- Li X., Ling T-C., Mo K. H., Functions and impacts of plastic/rubber wastes as eco-friendly aggregate in concrete – A review, *Construction and Building Materials*, 240, 2020.
- Lehne J., Presto F., Making Concrete Change: Innovation in Low-carbon Cement and Concrete, Chatham House Report, Energy, Environment and Resources Department, London, 2018.
- Mahmood R. A., Kockal N. U., Cementitious materials incorporating waste plastics: a review, *SN Applied Sciences*, 2:2072, 2020.
- Meys R., Frick F., Westhues S., Sternberg A., Klankermayer J., Bardow A., Towards a circular economy for plastic packaging wastes – the environmental potential of chemical recycling, *Resources, Conservation & Recycling*, 162, 2020.
- Plastics – the Facts, spletna stran združenja proizvajalcev plastike, https://www.plasticseurope.org/application/files/9715/7129/9584/FINAL_web_version_Plastics_the_facts2019_14102019.pdf, Plastics Europe, Association of Plastics Manufacturers, datum vpogleda 8.9.2020, 2019.
- Safi B., Saidi M., Aboutaleb D., Maallem M., The use of plastic waste as fine aggregate in the self-compacting mortars: Effect on physical and mechanical properties, *Construction and Building Materials*, 43, 436-442, 2013.
- Saikia N., de Brito J., Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review, *Construction and Building Materials*, 34, 2012.
- Sharma R., Bansal P. P., Use of different forms of waste plastic in concrete – a review, *Journal of Cleaner Production*, 112, 2016.
- Shehata M. H., Thomas M. D. A., Bleszynski R. F., The effects of fly ash composition on the chemistry of pore solution in hydrated cement pastes, *Cement and Concrete Research*, 29, 1915-1920, 1999.
- Silva, R.V., de Brito, J., Saikia, N., Influence of curing conditions on the durability-related performance of concrete made with selected plastic waste aggregates, *Cement and Concrete Composites* 35(1), 23-31, 2013.

SIST, SIST EN 12390-1:2001, Preskušanje strjenega betona – 1. del: Oblika, mere in druge zahteve za vzorce in kalupe, Ljubljana, Slovenski inštitut za standardizacijo, 2001.

SIST, SIST EN 12350-2:2009, Preskušanje svežega betona - 2. del: Preskus s posedom stožca – Preskušanje svežega betona, Ljubljana, Slovenski inštitut za standardizacijo, 2009a.

SIST, SIST EN 12350-6:2009, Preskušanje svežega betona – 6. del: Gostota, Ljubljana, Slovenski inštitut za standardizacijo, 2009b.

SIST, SIST EN 12350-7:2009, Preskušanje svežega betona – 7. del: Vsebnost zraka – Metode s pritiskom, 2009c.

SIST, SIST EN 12390-2:2009, Preskušanje strjenega betona – 2. del: Izdelava in nega vzorcev za preskus trdnosti, Ljubljana, Slovenski inštitut za standardizacijo, 2009d.

SIST, SIST EN 12390-3:2009, Preskušanje strjenega betona – 3. del: Tlačna trdnost preskušancev, Ljubljana, Slovenski inštitut za standardizacijo, 2009e.

SIST, SIST EN 12390-5:2009, Preskušanje strjenega betona – 5. del: Upogibna trdnost preskušancev, Ljubljana, Slovenski inštitut za standardizacijo, 2009f.

SIST, SIST EN 206:2013, Beton – Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost – Pravila za uporabo SIST EN 206, Ljubljana, Slovenski inštitut za standardizacijo, 2013.

SIST, SIST 1026:2016, Beton-Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost – Pravila za uporabo SIST EN 206, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2016.

Thomas M., Optimizing the Use of Fly Ash in Concrete, Portland Cement Association, 2007.

Timu A., Barbuta M., Green concrete with fly ash and plastic waste, Buletinul Institutului Politehnic Din Iasi, 64 (3), 2018.

Wang Y., Zheng T., Zheng X., Liu Y., Darkwa J., Zhou G., Thermo-mechanical and moisture absorption properties of fly ash-based lightweight geopolymer concrete reinforced by polypropylene fibers, Construction and Building Materials, 251, 2020.

Zaleska M., Pavlikova M., Pokorny J., Jankovsky O., Pavlik Z., Černý R., Structural, mechanical and hygrothermal properties of lightweight concrete based on the application of waste plastics, Construction and Building Materials, 180, 1-11, 2018.

Zhang P., Li Q., Effect of polypropylene fiber on durability of concrete composite containing fly ash and silica fume, Composites: Part B, 45, 1587-1594, 2012.

Mednarodna konferenca CoMS 2020/21

GRADBENI MATERIALI ZA TRAJNOSTNO PRIHODNOST

CoMS_

2020/21

Prihodnost stavb in naše družbe bo zelena, zdrava in digitalizirana

Zavod za gradbeništvo Slovenije (ZAG) je 20. in 21. aprila 2021 organiziral 2. mednarodno konferenco Gradbeni materiali za trajnostno prihodnost (CoMS 2020/2021). Soorganizatorji konference so bili Fakulteta za gradbeništvo Univerze v Zagrebu, Fakultete za tehnične znanosti Univerze v Novem Sadu in Zvezni inštitut za raziskave in testiranje materialov BAM iz Berlina. Zaradi epidemije konferenca žal ni potekala na Bledu, kot je bilo načrtovano, temveč po spletu. V ožji delovni skupini za pripravo in izvedbo konference so bili dr. Aljoša Šajna, dr. Sabina Jordan, Petra Horvat, Ema Kemperle in prof. dr. Andraž Legat.

Vsebinski poudarek konference CoMS 2020/21 je bil trajnostni razvoj gradbenega sektorja, ki je eden od pomembnih dejavnikov pri razvoju v trajnostno družbo in pri doseganju podnebnih ciljev EU. Konference se je udeležilo več kot 130 znanstvenikov in strokovnjakov iz 19 različnih, večinoma evropskih držav. Glavni cilji konference so bili predstavitev rezultatov raziskav z vseh področij gradbeništva, povezanih s trajnostnim razvojem, izmenjava mnenja in izkušenj ter soustvarjanje glavnih trendov raziskav in tehnološkega razvoja na področjih:

- inovacije v materialih in tehnologijah,
- trajnostno načrtovanje,
- recikliranje in krožno gospodarstvo,
- interakcija med materialom in okoljem,
- energetska učinkovitost,
- pregledi, monitoring, ocenjevanje in sanacije,
- digitalizacija in avtomatizacija,
- gradnja, vzdrževanje in modeliranje.

Uvodni govorniki na konferenci so bili: doc. dr. Aleš Žnidarič, direktor ZAG, dr. Tomaž Boh, direktor Direktorata za znanost na MIZŠ, in dr. Patrik Kolar, vodja Oddelka C (Zelene raziskave in Inovacije, ang. Green Research and Innovation) pri Evropski agenciji za podnebje, infrastrukturo in okolje (CINEA). Ključne zaozkrožene tematike so predstavili plenarni predavatelji (slika 1), ki so priznani znanstveniki in strokovnjaki na svetovnem nivoju.

- o prof. Ueli Angst, ETH Zürich, Švica
 - o prof. Kristina Mjörnell, Research Institutes of Sweden (RISE), Švedska
 - o prof. Alexander Passer, TU Gradec, Avstrija
 - o prof. John Provis, The University of Sheffield, Velika Britanija
 - o dr. Andreas Rogge, Federal Institute for Materials Research and Testing, BAM, Nemčija
 - o prof. Erik Schlangen, Delft university of Technology, Nizozemska
- Program je sestavljalo osem različnih sekcij, ki so jih s svojimi predavanji odprli prizna-

ni znanstveniki in strokovnjaki: prof. Karen Scrivener iz Švice, prof. dr. Andreja Kutnar, dr. Ana Mladenovič, dr. Sabina Jordan, dr. Andrej Anžlin in Ksenija Marc iz Slovenije ter doc. dr. Marijana Serdar in dr. Irina Stipanović iz Hrvaške. Skupno je bilo na konferenci predstavljenih 74 znanstvenih in strokovnih prispevkov, 58 v obliki predavanj in 16 posterjev. Zbornik konferenčnih prispevkov je bil objavljen v dveh zvezkih v skupnem obsegu 60 prispevkov. Oba dela zbornika sta prosto dostopna na spletni strani konference CoMS



PROF. ERIK SCHLANGEN
Delft university of Technology,
Nizozemska



DR.-ING. ANDREAS ROGGE
Federal Institute for Materials
Research and Testing BAM,
Nemčija



PROF. UELI ANGST
ETH Zürich, Švica



PROF. ALEXANDER PASSER
TU Gradec, Avstrija

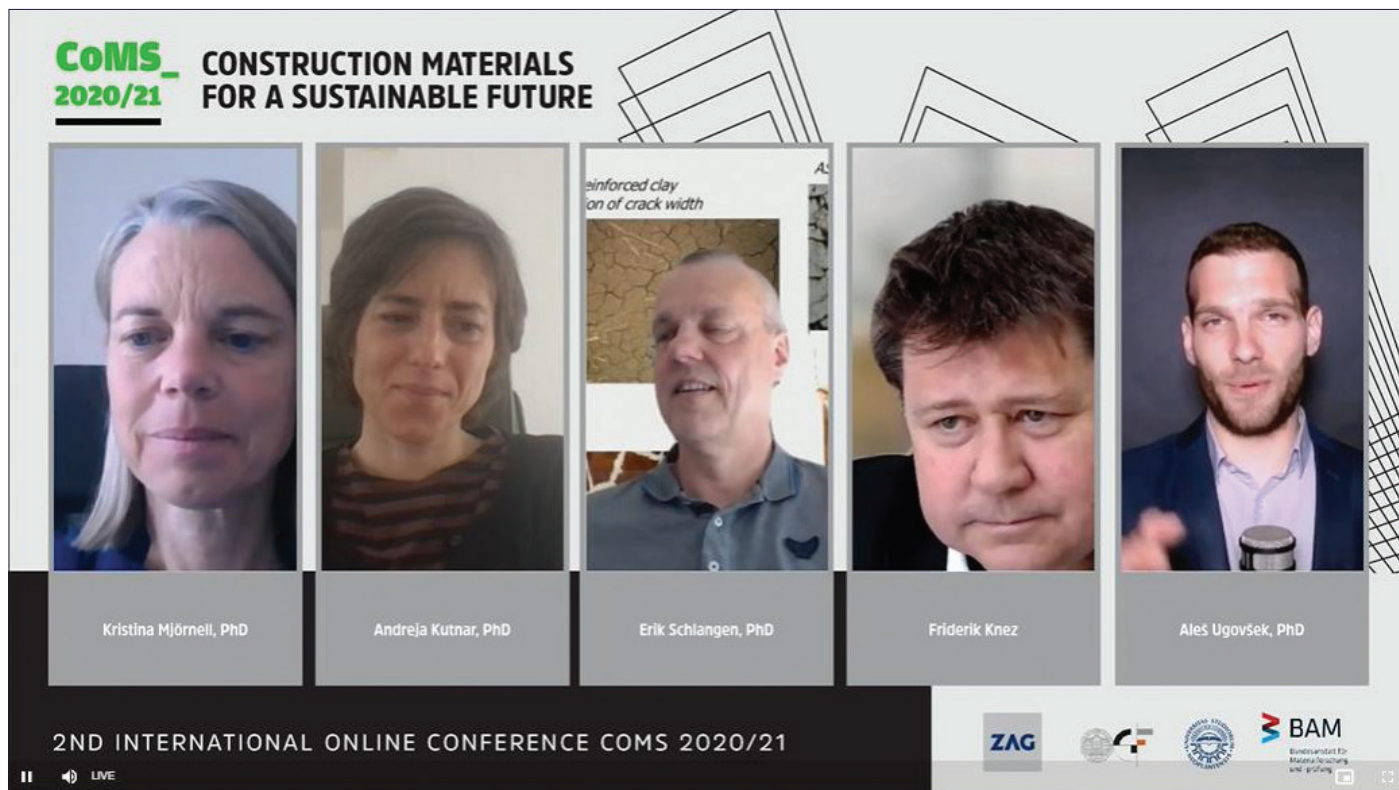


PROF. KRISTINA MJÖRNELL
Research Institutes of Sweden,
Sweden (RISE), Švedska



PROF. JOHN PROVIS
The University of Sheffield,
Velika Britanija

Slika 1 • Plenarni predavatelji na mednarodni konferenci CoMS 2020/21.



Slika 2 • Okrogla miza ob zaključku mednarodne konference CoMS 2020/21.

2020/21, <https://coms.zag.si/>. V predavanjih je bila posebej izpostavljena trajnostnost (ang. sustainability) in z njo povezano krožno gospodarstvo, ki je postalo nujni sestavni del vseh materialov in tehnologij na širšem področju gradbeništva. Kot izjemno pomemben del gradbeništva se uveljavlja digitalizacija, pri čemer je BIM (ang. Building Information Modelling) v veliko državah že postal nujni del pri pripravi in izvedbi investicij v javno infrastrukturo.

Konferenca se je zaključila z okroglo mizo, ki jo je vodil dr. Aleš Ugovšek, sodelovali so prof. Kristina Mjörnell, Research Institutes of Sweden, prof. Andreja Kutnar, InnoRenew CoE in Univerza na Primorskem, prof. Erik Schlangen, Delft University of Technology in Friderik Knez, Zavod za gradbeništvo Slovenije (slika 2). Udeleženci okrogle mize so odgovarjali na ključna vprašanja, povezana s trajnostnim gradbeništvom, in začrtali smernice za nadaljnji razvoj naprednega in človeku prijaznega okolja. Razprava je potekala v sozvočju z večino predhodnih predavanj, predvsem glede pomembnosti krožnega gospodarstva in digitalizacije. Z uporabo novih vrst senzorjev in njihovo množično uporabo se bo razvoj usmeril tudi v segment zbiranja in obdelave velikih količin podatkov, ki bodo služili za napovedovanje obnašanja in upravljanja

objektov grajenega okolja v obliki digitalnih dvojčkov. Izjemno pomembna bosta tudi uporaba strojnega učenja in umetne inteligence. Središče raziskovanja se s pametnih stavb širi na pametne soseske, predvsem na področju upravljanja virov in zmanjševanja vplivov na okolje. Predvideva se, da bodo bodoče stavbe plus energetske in pametne ter kot take integralni del skupnosti, da bodo naslavljale tako ekonomske kot okoljske in sociološke izzive družbe. Podobni procesi se dogajajo tudi na področju infrastrukture. Na področju novih proizvodnih procesov je treba omeniti 3D-tiskanje, ki že kaže prve rezultate v gradbeni operativi, saj omogoča ekonomsko učinkovito izdelavo standardiziranih elementov iz različnih, tudi kombiniranih materialov. Omenjena tehnologija bo v prihodnosti omogočila tudi množično proizvodnjo t. i. gradbenih elementov »ready-made«, kar bo lahko bistveno zmanjšalo čas gradnje in obnove stavb in objektov. Zahtevno usklajevanje vseh tehnologij in izvedbenih procesov ter razvoj specifičnih kombinacij materialov za tiskanje bodo zahtevali tudi več raziskav in hitrejši razvoj posameznih področij. Tudi zato so udeleženci okrogle mize poudarili pomembnost in nujnost sodelovanja med raziskovalci in gospodarstvom. V zaključnem sporočilu so se strinjali, da bo prihodnost grajenega okolja zelena in digitalizirana ter povezana z zdravim družbo.

Poleg plenarnih in osrednjih predavanj, kratkih predstavitev prispevkov in posterjev so bili na konferenci na voljo digitalni razstavniki prostori za razširjanje ciljev raziskovalnih projektov in za mreženje med raziskovalci. V digitalnih razstavnih prostorih je bilo predstavljeno 16 različnih projektov: **ACES, ADRISEISMIC, CARE4CLIMATE, Cinderella, ComTraForce, EnDureCrete, EURAD, FLOW, FRISSBE, InnoCrosLam, LIFEproETV, MEZeroE, oWERFLOW, POCITYF, RIS-ALICE in WOOL2LOOP**. Projektni partnerji so informacije o svojem delu pri projektih in o rezultatih ponujali v obliki posterjev, elektronskih letakov in videoposnetkov. Udeleženci so imeli možnost neposredne izmenjave mnenj s predstavniki projektov pri pogovornih okencih. V ločenih digitalnih prostorih so se predstavila tudi podjetja, ki so konferenco finančno podprla, TRIMO, POMGRAD, SCAN, JEOL, Igea in Labtim.

Izbrani prispevki konference bodo objavljeni v posebni številki znanstvene revije *Materials*, z naslovom *Feature Papers on Construction Materials for a Sustainable Future 2020/21* (ISSN 1996-1944; CODEN: MATEG9). Uredniki posebne številke so prof. dr. Andraž Legat, dr. Sabina Jordan in dr. Aljoša Šajna.

Več informacij o konferenci *Gradbeni materiali za trajnostno prihodnost (CoMS 2020/21)* najdete na spletni strani konference: <http://coms.zag.si>.



Sporočilo za javnost

Vpliv toplotnega ovoja stavbe na optimizacijo stroškov vzdrževanja bivalnih prostorov

22. 4. 2021, strokovni spletni seminar

V Ljubljani, 12. maja 2021: **Slovensko združenje za trajnostno gradnjo GBC Slovenija je 22. aprila letos v okviru projekta kakovost bivalnih prostorov organiziralo četrti spletni seminar, v katerem je v ospredje postavilo stroške vzdrževanja bivalnih prostorov, ki jih je mogoče optimizirati s pravilno izvedbo transparentnih delov fasadnega ovoja, pravilno vgradnjo in sidranjem izolacije ter kakovostno izvedbo streh. Izobraževanje je spremljalo 80 udeležencev iz vrst arhitektov, projektantov, investitorjev in upravnikov večstanovanjskih stavb. Predavanja so pripevali strokovnjaki s Fakultete za strojništvo Univerze v Ljubljani, Fakultete za arhitekturo Univerze v Zagrebu ter predstavniki družb JUB, Termoglas, M Sora Norica, F. Leskovec in ILD.**

»V GBC Slovenija pogosto opozarjamo na pomen energijske učinkovitosti stavb, pri tem pa je poznavanje konstrukcijskih delov pri gradnji novih ali sanaciji obstoječih objektov ključnega pomena,« poudarja predsednik združenja **dr. Iztok Kamenski**. »Z njimi je povezana kakovostna izvedba zidne podlage z izolacijsko oblogo, pravilno sidranje izolacije ter pravilna vgradnja in obdelava oken in drugih stavbnih elementov. Če ti deli ovoja na novozgrajenih ali obstoječih objektih med sanacijo niso ustrezno tehnično izvedeni, lahko na stikih nastanejo toplotni mostovi, na zidnih ali fasadnih površinah pa se pojavita kondenz in celo plesen. Težave investitorjem

lahko predstavljajo tudi poškodbe hidroizolacijske membrane na ravnih strehah, vendar je puščanje mogoče z ustreznimi metodami hitro detektirati. Poleg zvočne izolirnosti stavbnih elementov smo udeležencem na seminarju predstavili tudi najnovejši računalniški program EnCERT, namenjen projektantom pri izračunih učinkovitosti toplotne izolacije ter energetskemu certificiranju stavb, v tej luči pa obravnavali še zaključne premaze v notranjih prostorih in njihovo paroprepustnost. Vsak od naštetih dejavnikov lahko pomembno vpliva na stroške vzdrževanja objektov, zlasti pa na kakovost bivanja v notranjih prostorih, zato jim je pri gradnji ali obnovi treba posvetiti kar največ pozornosti.«

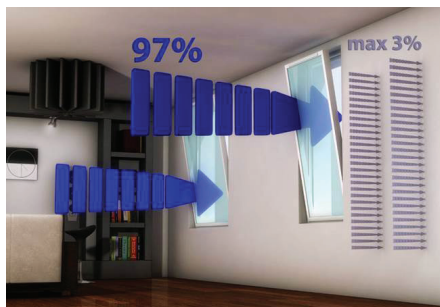
Pri projektiranju energijsko učinkovitih stavb in njihovem certificiranju načrtovalci za pripravo energijskih bilanc že uporabljajo napredna računalniška orodja, ki jim omogočajo hitro izdelavo projektov za racionalno rabo energije ter toplotne zaščite stavbe. Tako z računalniškim programom EnCERT-HR na Hrvaškem že pripravljajo izračune za projektiranje skoraj ničenergijских objektov (nZEB), ki upoštevata vse veljavne zakonske predpise za projektiranje toplotne izolacije ter energijskega certificiranja stavb. Nadgrajeno, že tretjo verzijo programa ter Katalog gradbenih elementov je udeležencem predstavil **doc. Mateo Biluš** s Fakultete za arhitekturo Univerze v Zagrebu, ki je izpostavil tudi številne prednosti njegove uporabe za projektante.

Na temperaturo obodnih površin vpliva toplotna izolacija – boljša ko je, manjše so izgube energije skozi stene. V bivalnih prostorih sta za ugodno klimo odločilna dva dejavnika: sobna temperatura in relativna zračna vlaga. Kar 97 % odvečne vlage se iz prostorov odvaža z ustreznim prezračevanjem, le 3 % pa preko zidu oz. difuzije vodne pare skozi konstrukcijo. V objektih je zato treba poskrbeti, da bodo materiali za posamezne sloje pravilno izbrani in razporejeni, da ne bi prišlo do nedovoljene kondenzacije vodne pare. Ta se lahko kondenzira v enem ali v več slojih materialov konstrukcije, vlažne konstrukcije pa povečujejo vlažnost zraka v stavbi in ustvarjajo pogoje za razvoj mikroorganizmov. Tudi pri barvah in premazih, ki jih uporabljamo pri zaključnih slojih v notranjih prostorih, se po standardu ISO 7783 ugotavlja njihova prepustnost za vodno paro. Rezultate primerjav učinkovitosti različnih vrst notranjih barv in premazov JUPOL je glede na njihovo paroprepustnost udeležencem z uporabo programa EnCERT predstavil gradbeni inženir **Ivica Vlahek** iz družbe JUB Hrvaška.

Stiki fasadnega toplotnoizolacijskega sistema z okenskimi in vratnimi okvirji, z okenskimi policami in omaricami senčil so najzahtevnejši detajli na fasadnem delu stavbnega ovoja. S tehnično pravilno in kakovostno izvedbo je mogoče zagotoviti ustrezno vodotesnost in zrakotesnost fasade, spojenim konstrukcijskim sklopom pa je omogočeno



Slika 1 • Odvajanje vlage – JUB.



Slika 2 • Odvajanje vlage – JUB.



Slika 3 • Vgradnja okenske police – JUB.



Slika 4 • Europark Maribor – IDL.

neovirano dilatiranje. Pravilna vgradnja oken, njihova toplotna in zvočna izolativnost ter zrakotesnost so zato za vsak objekt izjemno pomembni, to pa velja tudi za okenske police in senčila. O pomenu kakovosti oken, senčil in

vrat na sami fasadni površini so na seminarju predavanja prispevali **Mojca Mlakar Kunst** iz družbe Termoglas, **Jože Cigale** iz družbe M SORA Norica in vodja JUB Akademije **dr. Iztok Kamenski**, ki so opozorili na nenadzorovane



Slika 5 • Hotel Brdo pri Kranju.

toplotne izgube na mestih, ki jih povzročajo slabo tesnjenje med okenskim okvirjem in konstrukcijo, ne glede na to, ali je vgradnja izvedena na klasičen način ali po smernicah RAL-vgradnje. Po smernicah RAL je tesnjenje treba zagotoviti na treh ravneh – z izdelavo notranje vodotesne in paroneprepustne ovire, zunanje paroneprepustne ovire ter vmesne toplotne in zvočne izolacije. Pri tem se uporablja toplotnoizolacijske materiale, ki se jih še pred namestitvijo v odprtino nalepi na zunanji in notranji rob okenskega okvirja. Če na zunanji strani to ni pravilno izvedeno, se lahko vlaga, ki ne more neovirano prehajati, pojavi na stikih na notranji strani, zaradi kondenza pa se lahko pojavi plesen.

V družbi F. Leskovec proizvajajo in razvijajo pritrdila za termoizolacije za fasade. Gradbeni inženir **Miha Alič** poudarja, da je mehansko sidranje izolacije na objekt potrebno zaradi vetrne obremenitve ter zaradi same teže toplotnoizolacijskega sistema, izračun števila potrebnih pritrdil pa določa tudi vrsta izolacijskega materiala, ki ga je treba z izbiro ustreznih sider pravilno pritrditi v fasadni ovoj. O zvočni izolirnosti eno- in dvoslojnih stenskih pregrad, fasadnih slojev ter oken in vrat je predavanje prispeval **izr. prof. dr. Jurij Prezelj**, vodja laboratorija za tehnično akustiko na Fakulteti za strojništvo Univerze v Ljubljani. V podjetju ILD, ki ga je predstavil gradbeni inženir **Bojan Kuhar**, pa so specializirani za preiskave zamakanja streh in fasad, za preventivno zaščito pa investitorjem ponujajo tudi trajne zaščitne varnostne sisteme, s katerimi je na strehah mogoče odkriti poškodovana mesta in izvore puščanja, še preden pride do nevarnega vdora vode, ki lahko na objektu povzroči precejšnjo škodo.

Več podrobnejših informacij in kratki povzetki predavanj so objavljeni na spletni strani www.gbc-slovenia.si.

Miša Hrovat, agencija MAGA

Fotografije: arhiv GBC



Več informacij:

dr. Iztok Kamenski, predsednik UO GBC Slovenija,
M: 041 716 845,
E: iztok.kamenski@jub.eu,
W: www.gbc-slovenia.si

NOVA TRASA ŽELEZNIŠKE PROGE MARIBOR-ŠENTILJ, VIADUKT PESNICA

Lokacija: **Pesnica pri Mariboru**

Investitor: **Direkcija Republike Slovenije za infrastrukturo (DRSI)**

Projektant gradbenih konstrukcij: **Ponting inženirski biro, d. o. o.**

Inženir: **DRI upravljanje investicij, Družba za razvoj infrastrukture, d. o. o.**

Izvajalec: **Konzorcij Pomgrad, d. d., Kolektor Koling, d. o. o., SŽ – ŽGP Ljubljana, d. d., GH Holding, d. o. o., Gorenjska gradbena družba, d. d.**

V zaključku preteklega leta so se pričela gradbena dela novogradnje železniške proge Maribor-Šentilj v dolžini 3,7 km. Nova trasa železniške proge vključuje gradnjo viadukta Pesnica, predora Pekel, podvoza, podpornih in opornih konstrukcij, cestne ureditve itd. Viadukt Pesnica in predor Pekel predstavljata ključna objekta na novo grajeni trasi. Celotna nova trasa bo grajena v namen dvotirne železniške proge, a se bo v prvi fazi izvedel samo en tir.

Viadukt Pesnica je zasnovan kot armiranobetonska integralna konstrukcija z 32 polji povprečne dolžine po 28 m. Prekladna konstrukcija ima konstantni prečni prerez dveh reber konstrukcijske višine 2,30 m iz prednapetega betona. Integralnost konstrukcije je dosežena z delitvijo konstrukcije na devet segmentov. Dolžini prvega in zadnjega segmenta znašata 56 m, dolžine preostalih segmentov pa znašajo 112 m. Vgrajenega bo približno 20.000 m³ betona, 4113 ton jekla za armiranje in 345 ton jekla za prednapenjanje. Tehnologija gradnje je na fiksnem odru. Zaradi zasnove segmentov bo treba v eni fazi vgraditi več kot 1500 m³ betona.



Slika 1 • Severni portal predora Pekel, avtocesta A1, regionalna cesta, obstoječa železniška proga, viadukt Pesnica – stebri v osi 6 in 7, maj 2021.



Slika 2 • Viadukt Pesnica, maj 2021.



Slika 3 • Armatura prekladne konstrukcije enega segmenta, junij 2021.



Slika 4 • Kableske cevi in armatura rebra, junij 2021.

Novo grajeni viadukt Pesnica bo s 896 m predstavljal najdaljši železniški viadukt v Sloveniji. Zaključek gradnje je predviden v prvi polovici leta 2023.

Fotografije: Tomaž Goričan, Milan Kuhta

NOVI DIPLOMANTI

UNIVERZA V LJUBLJANI, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO IN GEODEZIJO

I. STOPNJA – VISOKOŠOLSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM GRADBENIŠTVO

Vesna Dimc, Rekonstrukcija cestne mreže v območju naselja Šentjernej, mentor viš. pred. dr. Robert Rijavec; <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=127198>

II. STOPNJA – MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM GRADBENIŠTVO (smeri Gradbene konstrukcije, Geotehnika-hidrotehnika, Nizke gradnje)

Andrej Turk, Predlog tehničnih smernic za načrtovanje skupnih prometnih prostorov, mentor doc. dr. Peter Lipar; <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=127384>

Uroš Jotanovič, Tehnologije za zajem podatkov snovnega sveta v informacijska okolja za gradbeništvo, mentor prof. dr. Žiga Turk, somentorja asist. dr. Klemen Kregar in asist. dr. Robert Klinc; <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=127193>

Jernej Gortnar, Reinženiring procesov terminske in stroškovne spremljave gradnje z BIM, mentor doc. dr. Tomo Cerovšek; <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=127385>

Matija Majhen, Numerična analiza velike zračno podprte konstrukcije nepravilne oblike, mentor prof. dr. Boštjan Brank, somentor prof. dr. Matjaž Četina; <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=127214>

Anita Kaplan, Smernice za načrtovanje avtomatskih parkirnih naprav, mentor doc. dr. Peter Lipar; <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=127213>

II. STOPNJA – MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM STAVBARSTVO

Sara Bečirevič, Intenzivno naravno prezračevanje kot strategija za zmanjšanje potrebe po ohlajevanju stavbe, mentor doc. dr. Mitja Košir, somentor asist. Luka Pajek; <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=127194>

II. STOPNJA – MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM VODARSTVO IN OKOLJSKO INŽENIRSTVO

Ivo Pertot, Analiza delovanja Centralne čistilne naprave Nova Gorica s programom BioWin, mentor doc. dr. Mario Krzyk, somentorica dr. Aleksandra Krivograd Klemenčič; <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=127197>

Tim Primožič, Idejna zasnova odvodnje odpadnih in padavinskih voda naselja Kulen Vakuf v Bosni in Hercegovini, mentor doc. dr. Mario Krzyk; <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=127196>

III. STOPNJA – DOKTORSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM GRAJENO OKOLJE

Mitja Papinutti, Dinamična analiza plavajočih mostov, mentor prof. dr. Boštjan Brank, somentor izr. prof. dr. Ole Oiseth; <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=126906>

UNIVERZA V MARIBORU, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO, PROMETNO INŽENIRSTVO IN ARHITEKTURO

I. STOPNJA – UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI PROGRAM GRADBENIŠTVO

Študij je z diplomskim izpitom zaključil:
Gregor Grah

II. STOPNJA – MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM GRADBENIŠTVA

Žiga Bauman, Celovito BIM projektiranje infrastrukturnega objekta, mentor doc. dr. Zoran Pučko, somentorja izr. prof. dr. Marko Renčelj in Miha Stergar; <https://dk.um.si/lzpisGradiva.php?id=79109>

Bojana Mastnak, Uporaba BIM-pristopa za vzdrževanje in upravljanje kanalizacijskega sistema, mentor izr. prof. dr. Andrej Tibaut, somentor viš. pred. Matjaž Nekrep Perc; <https://dk.um.si/lzpisGradiva.php?id=79113&lang=slv>

Luka Sreš, Analiza uporabe leseno-steklenih stenskih elementov na primeru lesenega okvirno-panelnega objekta, mentor prof. dr. Miroslav Premrov, somentorja asist. Mateja Držečnik in Željko Vene; <https://dk.um.si/lzpisGradiva.php?id=79041&lang=slv>

Miha Vodeb, Zasnova in statična analiza jeklene stolpnice višine 53 m z dvonadstropno podzemno garažo, mentor prof. dr. Stojan Kravanja, somentorja doc. dr. Tomaž Žula in doc. dr. Primož Jelušič; <https://dk.um.si/lzpisGradiva.php?id=79073&lang=slv>

Rubriko ureja • Eva Okorn, gradb.zveza@siol.net

KOLEDAR PRIREDITEV

10.-11.6.2021

ASFE' 21- Mednarodna konferenca »Applications of structural fire engineering«

Spletna konferenca
www.fgg.uni-lj.si/mednarodna-konferenca-asfe-21/

15.-17.6. 2021

7th E&E Congress

”Asphalt 4.0 for future mobility - Eurasphalt & Eurobitume”

Spletna konferenca
www.eecongress2021.org/congress/welcome-letter/

19.-20.6.2021

ICPE 2021 - 2nd International Conference on Press-in Engineering

Spletna konferenca
Kochi, Japonska
<https://icpe-ipa.org/>

10.-12.7.2021

4th International Conference on Civil Engineering and Architecture

Spletna konferenca
www.iccea.org/index.html

19.-21.7.2021

GSCAEE 2021 - Global Summit on Civil, Architectural and Environmental Engineering

Barcelona, Španija
www.thescientist.com/civil-structural-environmental-engineering/

22.-24.9.2021

S.ARCH 2021 - 8th International Conference on Architecture and Built Environment with Architecture AWARDS

Spletna konferenca
Rim, Italija
www.s-arch.net/

24.-26.9.2021

ICSCE 2021 - 5th International Conference on Structural and Civil Engineering

Barcelona, Španija
www.icsce.org

27.-29.9.2021

International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering

Lyon, Francija
www.olcinternational.com/civil-engineering/index.php

30. 9. 2021

8. posvetovanje slovenskih geoteknikov in 21. Šukljjetov dan

Spletna konferenca
<http://sloged.si/>

14.-16.10.2021

ICCEN 2021 - 9th International Conference on Civil Engineering

Singapur
www.iccen.org/index.html

2.-6.11.2021

5th World Landslide Forum

Kjoto, Japonska
<http://wlf5.iplhq.org/>

1.-4.12.2021

11th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar

Valletta, Malta
www.iwagpr2021.eu/

23.-25.2.2022

DFI-PFSF Piling & Ground Improvement Conference 2022

Sydney, Avstralija
www.dfi.org/dfieventlp.asp?13385

1.-6.5.2022

20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering

Sydney, Avstralija
<https://www.icsmge2022.org/>

20.-24.6.2022

ICOSSAR 2021-2022, 13th International Conference on Structural Safety & Reliability

Šanghaj, Kitajska
www.icossar2021.org/

27.-29.6.2022

IS-Cambridge 2022 – 10th International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground

Cambridge, Združeno kraljestvo Velike Britanije in Severne Irske
www.is-cambridge2020.eng.cam.ac.uk/

17.-21.9.2023

12th International Conference on Geosynthetics

Rim, Italija
www.12icg-roma.org

Rubriko ureja • **Eva Okorn**, ki sprejema predloge za objavo na e-naslov: gradb.zveza@siol.net