

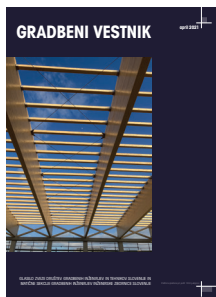
GRADBENI VESTNIK

april 2021



GLASILO ZVEZE DRUŠTEV GRADBENIH INŽENIRJEV IN TEHNIKOV SLOVENIJE IN
MATIČNE SEKCIJE GRADBENIH INŽENIRJEV INŽENIRSKO ZBORNICE SLOVENIJE

Poštnina plačana pri pošti 1102 Ljubljana



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, april 2021, letnik 70, str. 61-88

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:

Kočevski 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

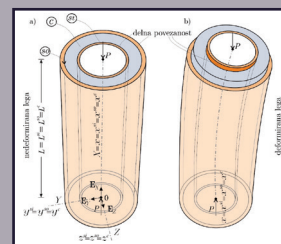
Vsebina • Contents

Članki • Papers

stran 62

dr. Bojan Čas, univ. dipl. inž. grad.

**UKLON VITKIH OKROGLIH DVOCEVNIH SOVPREŽNIH STEBROV
Z BETONSKIM JEDROM OB UPOŠTEVANJU ZDRSOV MED SLOJI**
BUCKLING CAPACITY OF SLENDER CONCRETE FILLED DOUBLE
SKIN STEEL TUBULAR COLUMNS CONSIDERING INTERFACE SLIPS

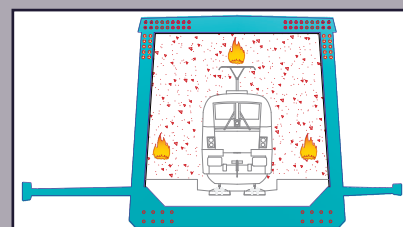


stran 70

izr. prof. dr. Sebastjan Bratina, univ. dipl. inž. grad.

izr. prof. dr. Tomaž Hozjan, univ. dipl. inž. grad.

**OCENA POŽARNE ODPORNOSTI ŽELEZNIŠKEGA MOSTU
ČEZ GLINŠČICO V SKLOPU IZGRADNJE DRUGEGA TIRA
DIVAČA-KOPER S POMOČJO NAPREDNE RAČUNSKE METODE**
ESTIMATION OF FIRE RESISTANCE OF THE RAILWAY BRIDGE
OVER GLINŠČICA AS PART OF THE CONSTRUCTION OF THE SECOND
TRACK DIVAČA-KOPER USING AN ADVANCED CALCULATION METHOD



Poročili s strokovnega spletnega seminarja

stran 84

Miša Hrovat

**IZBOLJŠANJE KAKOVOSTI BIVALNIH PROSTOROV Z
AKTIVNIMI NOTRANJIMI BARVAMI IN PREMAZI**



stran 86

Miša Hrovat

ZVOČNA IZOLACIJA IN AKUSTIČNO UDOBJE



Fototrunki z gradbišča

stran 88

GIC GRADNJE d.o.o.

GRADBIŠČE GARAŽNE HIŠE V LUKI KOPER



Novi diplomanti

Eva Okorn

Koledar prireditev

Eva Okorn

Slika na naslovnici: Lesena konstrukcija ostrešja novega objekta Plavalni zimski bazen
Nova Gorica, foto Matej Jan

UKLON VITKIH OKROGLIH DVOCEVNIH SOVPREŽNIH STEBROV Z BETONSKIM JEDROM OB UPOŠTEVANJU ZDRSOV MED SLOJI

BUCKLING CAPACITY OF SLENDER CONCRETE FILLED DOUBLE SKIN STEEL TUBULAR COLUMNS CONSIDERING INTERFACE SLIPS

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 004.42:624.012.4

Povzetek | V prispevku predstavimo nov matematični model za izračun kritične uklonske sile vitkih okroglih dvocevniH sovprežnih stebrov z betonskim jedrom in upoštevanjem zdrsa med jeklom in betonom. V angleškem govornem področju se tovrstne konstrukcije poimenujejo »concrete filled double-skin tubular columns« in se običajno označijo s kratico CFDST, ki jo uporabimo tudi v tem prispevku. Razviti računski model nam omogoča analizo vpliva različnih osnovnih parametrov na vrednost uklonske sile CFDST-stebrov. Izkaže se, da je uklonska sila tovrstnih stebrov neodvisna od vzdolžne togosti stika med jeklenim in betonskim delom sovprežnega prečnega prereza, medtem ko prečna togost stika podprerezov pomembno vpliva na vrednost kritične uklonske sile. Z naraščanjem vrednosti prečne togosti stika narašča tudi vrednost uklonske sile. Pokažemo tudi, da analitična vrednost kritične uklonske sile razvitega računskega modela dobro sovpada z rezultati eksperimentalnih in numeričnih raziskav drugih raziskovalcev, če v računskih postopkih uporabimo kalibrirane vrednosti prečne togosti stika med jeklenima cevema in betonskim jedrom CFDST-stebrov. S parametričnimi študijami pokažemo tudi, da prečna togost stika, kot je bila dosežena v primerih realnih, testom podvrženih CFDST-stebrov, zavzema številčno relativno nizke vrednosti.

Ključne besede: uklon, kompoziti jekla in betona, zdrs, stebri

Summary | In this paper, a novel mathematical model for the global buckling behaviour of slender concrete-filled double-skin tubular columns (CFDST) with finite compliance between the steel tubes and a sandwiched concrete core is derived for the first time. The model is capable to investigate the influence of various basic parameters on the critical buckling loads of CFDST columns. It is shown that the elastic buckling load of circular and slender CFDST columns is independent of the contact stiffness in the longitudinal direction, but on the other hand, it can strongly depend on the contact stiffness in the circumferential direction. Increasing the contact stiffness in the circumferential direction increases the critical buckling load. It is also shown that the analytical results agree well with the experimental and numerical results when the calibrated values of the circumferential contact stiffness are used in the calculations. Moreover, it is shown that the contact between the steel tubes and a sandwiched concrete core of the tested large sized CFDST columns used for comparison is relatively weak.

Key words: buckling, CFDST, slip, column

1 • UVOD

Dvocevni okrogli sovprežni stebri z betonskim jedrom (CFDST) se danes pogosto uporabljajo v najrazličnejših inženirskih konstrukcijah. Tako so vgrajeni kot stebri v konstrukcijah infrastrukturnih objektov kot npr. v obalnih konstrukcijah, kot stebri premostitvenih objektov cestne in železniške infrastrukture, v konstrukcijah globokega temeljenja večnadstropnih zgradb, podpornih stebrov vetrnih elektrarn itd. Primerno konstruirani in dimenzionirani CFDST-stebri lahko imajo precej prednosti pred klasičnimi jeklenimi ali armiranobetonskimi stebri, kot so npr. ugodnejše razmerje med težo ter togostjo njihovih prečnih prereзов, večja osna nosilnost, togost, duktilnost, odpornost proti seizmičnim kot tudi požarnim obremenitvam ter številne druge. Poudariti je treba, da je uporaba CFDST-stebrov tudi ekonomsko precej ugodna, saj jeklene cevi med gradnjo prevzamejo funkcijo opažev, ki kot strošek gradnje tako odpadejo, prav tako pa je tovrstna gradnja hitra.

V preteklosti je bilo opravljenega veliko znanstvenoraziskovalnega dela z namenom boljšega razumevanja obnašanja predstavljenih kompozitnih CFDST-stebrov. Obširne eksperimentalne raziskave so predstavili Elchalakani, Tao, Han, Yang in Essopjee s sodelavci ((El-

chalakani, 2002), (Tao, 2004), (Han, 2004), (Yang, 2012), (Essopjee, 2015)) ter številni drugi. Numerične študije tovrstnih stebrov so predmet znanstvenoraziskovalnega dela avtorjev Huanga s sodelavci ((Huang, 2010), Hu in Su (Hu, 2011), Pagoulathou s sodelavci (Pagoulathou, 2014), Hassanein in Kharoob (Hassanein, 2014)). Analitične računske postopke sta predstavila Tan in Zhang (Tan, 2010).

Večina omenjenih študij se je omejila predvsem na obnašanje kratkih CFDST-stebrov, pri katerih porušitev stebra običajno nastopi zaradi tlačne porušitve betonskega dela kompozitnega prereza, ki ga spremlja tudi lokalna izbočitev ter plastifikacija pločevine jeklenih cevi. Obnašanje kratkih in vitkih CFDST-stebrov pa se medsebojno precej razlikuje, saj je porušni mehanizem vitkih stebrov običajno povezan z njihovo stabilnostjo, ki ga predstavlja njihov globalni uklon. V znanstveni literaturi so poročila o eksperimentalnih preiskavah vitkih CFDST-stebrov precej redka, na primer Tao s sodelavci ((Tao, 2004), Essopjee ter Dundu (Essopjee, 2015), Romero s sodelavci (Romero, 2015)). Podobno ugotavljamo tudi za numerične analize vitkih CFDST-stebrov, ki sta jih obravnavala na primer Hassanein in Kharoob (Hassanein, 2014). Glede na dostopno

znanstveno literaturo ocenjujemo, da analitični računski model za analizo globalnega uklona vitkih dvocevni okroglih sovprežnih stebrov z betonskim jedrom (CFDST), ki je predmet pričujočega prispevka, do sedaj še ni bil predstavljen.

Glede na navedeno predstavlja bistvo prispevka predstavitev novega matematičnega modela s pripadajočo analitično rešitvijo za določitev kritične uklonske sile vitkih dvocevni okroglih sovprežnih stebrov z betonskim jedrom (CFDST) ob upoštevanju možnosti razslojevanja okroglih jeklenih cevi in betonskega jedra. Vsebinska prispevka predstavlja nadaljevanje znanstvenoraziskovalnega dela, ki sta ga Schnabl in Planinc ((Schnabl, 2015), (Schnabl, 2017), (Schnabl, 2019)) predstavila na področju obnašanja vitkih okroglih jeklenih sovprežnih stebrov z betonskim jedrom.

V tretjem poglavju z naslovom Rezultati in diskusija predstavimo primerjavo analitičnih rezultatov razvitega matematičnega modela z eksperimentalno pridobljenimi vrednostmi uklonskih obtežb CFDST-stebrov, kot jih v prispevkih navajajo Tao (Tao, 2004) in Essopjee in Dundu (Essopjee, 2015). Analitično pridobljene vrednosti uklonskih obtežb vitkih CFDST-stebrov primerjamo tudi z numeričnimi rešitvami avtorjev Hassanein in Kharoob (Hassanein, 2014) ter z rezultati, ki sta jih navedena avtorja izračunala upoštevaje standarde ((CEN, 1992) in (AISC, 2010)).

Oznake:		$P, P_{cr,AN}$	osna obremenitev in analitično določena kritična osna sila
A^{so}, A^{si}, A^c	površina prečnih prereзов zunanje in notranje jeklene cevi ter betonskega jedra	$P_{ul,MKE}, P_{EC4}, P_{AISC}$	kritična osna sila izračunana z MKE ter skladno s (CEN, 1992) in (AISC, 2010)
D^{so}, D^{si}	zunanjí premer zunanje in notranje jeklene cev	p_X, p_Z	komponenti strižne napetosti na stiku slojev v smeri X in Z
E^{so}, E^{si}, E^c	modul elastičnosti materiala zunanje in notranje jeklene cevi ter betonskega jedra	R_X, R_Z	komponenti ravnotežne sile prečnega prereza v smeri X in Z
I^{so}, I^{si}, I^c	upogibni vztrajnostni momenti zunanje in notranje jeklene cevi ter betonskega jedra	u_X, u_Z	osni in prečni pomik CFDST-stebra
K_X, K_Z	togost stika v vzdolžni ter prečni smeri CFDST-stebra	Δ_X, Δ_Z	zdrs v smeri osi X in Z
L	dolžina CFDST-stebra	$\epsilon^{so}, \epsilon^{si}, \epsilon^c, \kappa^{so}, \kappa^{si}, \kappa^c, \varphi^{so}, \varphi^{si}, \varphi^c$	specifična sprememba dolžine materialnega vlakna v smeri osi X , psevdoukrivljenosti ter zasuki zunanje in notranje jeklene cevi ter betonskega jedra
$M_Y^{so}, M_Y^{si}, M_Y^c$	upogibni momenti zunanje in notranje jeklene cevi ter betonskega jedra	λ	vitkost CFDST-stebra
N_{test}	eksperimentalna osna nosilnost CFDST-stebra	out, in	zunanjí, notranjí

Preglednica 1 • Pomen oznak.

2 • OSNOVNE ENAČBE

2.1 Uvod

Na sliki 1 je prikazana nedeformirana in deformirana oblika okroglega jeklenega dvocevne- nega sovprednega stebra z betonskim jedrom (CFDST), na sliki 2 pa njegov karakteristični prečni presek. Obravnavani stebel ima začetno dolžino L . Sestavljata ga zunanja (so) in notranja (si) jeklena cev z dolžinama L^{so} in L^{si} ter vmesno betonsko jedro (c), ki je dolžine L^c .

vativno tlačno osno silo P , ki deluje v težišču sovprednega prečnega prereza.

2.2 Predpostavke matematičnega modela

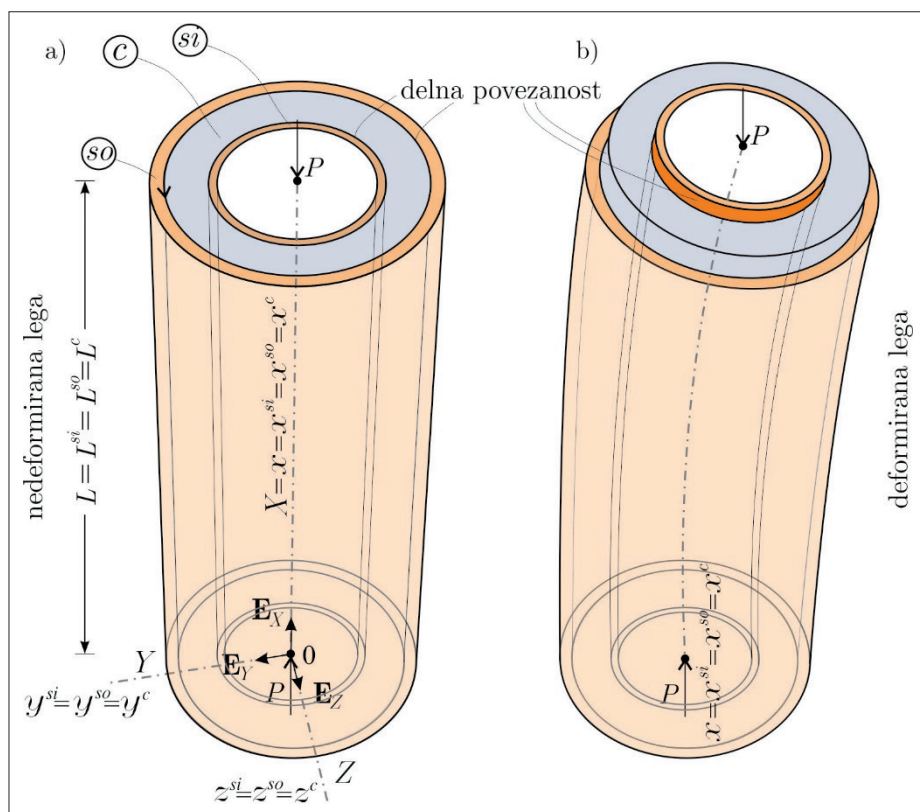
Osnovne predpostavke pri izpeljavi osnovnih enačb predstavljenega matematičnega modela CFDST-stebrov so:

1. materiali jeklenih cevi ter betonskega jedra so homogeni, izotropni ter linearno elastični,

2. obnašanje jeklenih cevi ter betonskega jedra CFDST-stebrov opišemo z linearizirano Reissnerjevo teorijo ravninskih nosilcev (Reissner, 1972),
3. jeklene cevi in betonsko jedro so zvezno medsebojno povezani na način, da med njimi lahko nastopijo relativni zamiki oziroma zdrsi,
4. zdrsi med betonskim jedrom in jeklenimi cevmi so majhni,
5. materialni zakon stika med betonskim jedrom in kovinskimi cevmi je linearno elastičen,
6. vpliv strižnih deformacij na mehansko obnašanje CFDST-stebrov je zanemarljiv,
7. zanemarljeni so toplotni vplivi, reološki pojavi, začetne zaostale napetosti, izbočitev prečnih prereзов ter imperfekcije CFDST-stebrov ali obtežbe,
8. porušni mehanizem CFDST-stebrov predstavlja njihov globalni uklon.

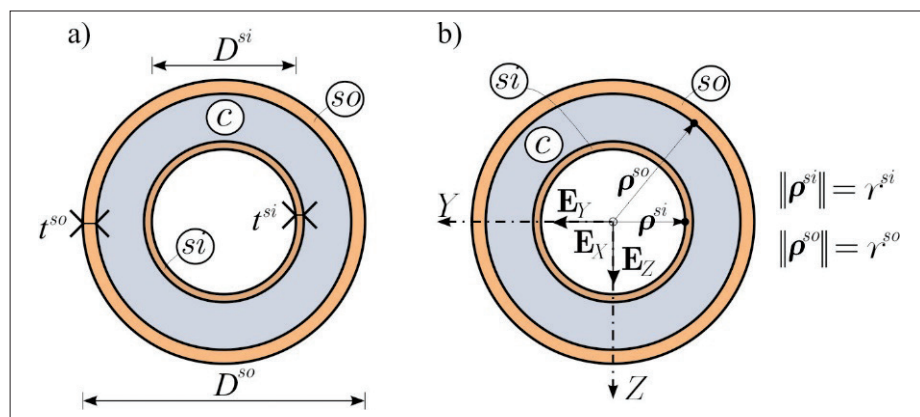
2.3 Osnovne enačbe tlačno obremenjenih CFDST-stebrov

Osnovne matematične enačbe tlačno obremenjenih CFDST-stebrov s podajno povezavo med jeklenima cevema in betonskim jedrom predstavlja sistem linearnih diferencialno algebrskih enačb prvega reda (1)–(6). V nadaljevanju dodamo oznakam količin indekse $(\bullet)^i$, kjer indeks $i=so,si,c$ označuje, kateremu izmed slojev količina pripada. Na podoben način je treba razumeti tudi oznako $(\bullet)'=d(\bullet)/dx$, ki predstavlja odvod količine $(\bullet)$ glede na materialno koordinato x . Sistem osnovnih diferencialno algebrskih enačb (1)–(6), s katerim opišemo fenomen uklona tlačno obremenjenih CFDST-stebrov s podajno povezavo slojev, sestavljajo: kinematične (1), ravnotežne (2) ter konstitucijske enačbe (3) in vezne enačbe (4) s pripadajočimi statičnimi oziroma kinematičnimi robnimi pogoji vsakega izmed slojev (5) in (6).



Slika 1 • Shematski prikaz okroglega jeklenega dvocevne- nega sovprednega stebra z betonskim jedrom (CFDST) s podajnim stikom med zunanjo in notranjo jekleno cevjo in betonskim jedrom a) nedeformirana oblika, b) deformirana (izklonjena) oblika.

Zunanja premera votlih jeklenih cevi označimo z D^{so} in D^{si} , debeline sten obeh jeklenih cevi pa s t^{so} in t^{si} . Zunanja in notranja jeklena cev ter betonsko jedro med njima imajo vzdolž osi stebra konstantne prečne prereze A_x^{so} , A_x^{si} in A_x^c . CFDST-stebel obravnavamo v tridimenzionalnem Evklidskem prostoru z desnosučnim kartezijevim koordinatnim sistemom s prostorskimi koordinatami X, Y, Z in orthonormiranimi baznimi vektorji E_x, E_y, E_z . Nedeformirana referenčna os CFDST-stebra, ki jo parametriziramo z materialno koordinato x , je skupna vsem trem slojem prečnega prereza stebra. CFDST-stebel je obremenjen s konser-



Slika 2 • Prečni presek CFDST-stebra.

Kinematične enačbe

$$\begin{aligned} u_X^i - \varepsilon^i &= 0, \\ u_Z^i + \left(1 + \frac{P}{\sum_i E^i A^i}\right) \varphi^i &= 0, \\ \varphi^i - \kappa^i &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Ravnotežne enačbe

$$\begin{aligned} R_X^{si} - p_{X,in} &= 0, \\ R_X^c - p_{X,out} + p_{X,in} &= 0, \\ R_X^{so} - p_{X,out} &= 0, \\ R_Z^{si} - p_{Z,in} &= 0, \\ R_Z^c - p_{Z,out} + p_{Z,in} &= 0, \\ R_Z^{so} + p_{Z,out} &= 0, \\ M_Y^{si} - \left(1 + \frac{P}{\sum_i E^i A^i}\right) \left(\frac{E^{si} A^{si}}{\sum_i E^i A^i} P \varphi^{si} + R_Z^{si}\right) - m_{Y,in} &= 0, \\ M_Y^c - \left(1 + \frac{P}{\sum_i E^i A^i}\right) \left(\frac{E^c A^c}{\sum_i E^i A^i} P \varphi^c + R_Z^c\right) - m_{Y,out} + m_{Y,in} &= 0, \\ M_Y^{so} - \left(1 + \frac{P}{\sum_i E^i A^i}\right) \left(\frac{E^{so} A^{so}}{\sum_i E^i A^i} P \varphi^{so} + R_Z^{so}\right) + m_{Y,out} &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Konstitucijske enačbe

$$\begin{aligned} R_X^i - E^i A^i \varepsilon^i &= 0, \\ M_Y^i - E^i I^i \kappa^i &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Vezne enačbe

$$\begin{aligned} \Delta_{X,in} &= u_X^{si} - u_X^c, \\ \Delta_{X,out} &= u_X^c - u_X^{so}, \\ \Delta_{Z,in} &= u_Z^{si} - u_Z^c, \\ \Delta_{Z,out} &= u_Z^c - u_Z^{so}, \\ p_{X,in} &= \pi D^{si} K_X^{si} (u_X^{si} - u_X^c), \\ p_{X,out} &= \pi D^{so} K_X^{so} (u_X^c - u_X^{so}), \\ p_{Z,in} &= \pi D^{si} K_Z^{si} (u_Z^{si} - u_Z^c), \\ p_{Z,out} &= \pi D^{so} K_Z^{so} (u_Z^c - u_Z^{so}), \\ m_{Y,in} &= m_{Y,out} = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Robni pogoji

$$\begin{aligned} \text{pri } x=x^{so}=x^c=x^{si}=0 \\ S_1^i + R_X^i(0) &= 0 \quad \text{ali} \quad u_X^i(0) - u_1^i = 0, \\ S_2^i + R_Z^i(0) &= 0 \quad \text{ali} \quad u_Z^i(0) - u_2^i = 0, \\ S_3^i + M_Y^i(0) &= 0 \quad \text{ali} \quad \varphi^i(0) - u_3^i = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

obstaja analitična rešitev ob upoštevanju v poglavju 2.2 predstavljenih predpostavk. Ob upoštevanju osnov linearne algebre je mogoče diferencialno algebrske enačbe (1)–(4) s pripadajočimi robnimi pogoji (5)–(6) zapisati na naslednji način:

$$\mathbf{Z}(x)' = \mathbf{A} \mathbf{Z}(x), \quad (7)$$

in

$$\mathbf{Z}(0) = \mathbf{Z}_0, \quad (8)$$

kjer $\mathbf{A}$ predstavlja matriko realnih koeficientov sistema enačb, ki je dimenzij 18 x 18, $\mathbf{Z}(x)$ predstavlja vektor 18 neznanih funkcij ter $\mathbf{Z}(0)$ vektor 18 neznanih integracijskih konstant. Na podlagi osnovnega izreka o linearnih sistemih enačb (Perko, 2001) je mogoče za sistem linearnih diferencialno algebrskih enačb prvega reda poiskati enolično rešitev za vse $x \in [0, L]$ in $\mathbf{Z}_0 \in \mathbf{R}^{18}$ s pomočjo naslednjega nastavka:

$$\mathbf{Z}(x) = e^{\mathbf{A}x} \mathbf{Z}_0, \quad (9)$$

kjer je $e^{\mathbf{A}x}$ eksponentna funkcija, ki jo je mogoče izvedniti kot vsoto absolutno konvergentne vrste $\sum_{k=0}^{\infty} \frac{x^k}{k!} \mathbf{A}^k$. Tako je mogoče točno analitično rešitev (9) zapisati kot:

$$\mathbf{Z}(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{x^k}{k!} \mathbf{A}^k \mathbf{Z}_0. \quad (10)$$

Ker je $\mathbf{Z}_0$ v enačbi (10) v splošnem vektor poljubnih vrednosti neznanih integracijskih konstant, predstavlja $\mathbf{Z}(x)$ splošno rešitev sistema enačb (7)–(8). Za izračun partikularne rešitve je treba $\mathbf{Z}_0$ izvedniti iz enačb oziroma robnih pogojev (5)–(6). Z upoštevanjem enačbe (10) v enačbah pripadajočih robnih pogojev (5)–(6) dobimo naslednji homogeni sistem 18 linearne algebrskih enačb:

$$\mathbf{K} \mathbf{Z}_0 = \mathbf{0}, \quad (11)$$

za 18 neznanih integracijskih konstant, pri čemer predstavlja $\mathbf{K}$ tangentno togostno matriko sistema linearnih algebrskih enačb dimenzij 18 x 18.

Za sistem enačb (11) obstaja netrivialna rešitev le v primeru neničelne vrednosti determinante tangentne togostne matrike $\mathbf{K}$. Torej v primeru uklona CFDST-stebrov kritično uklonsko silo $P_{cr,AN}$ določimo s pomočjo pogoja:

$$\det \mathbf{K} = 0. \quad (12)$$

Reševanje enačbe (12) predstavlja klasični matematični problem reševanja lastnih vrednosti in lastnih vektorjev. Splošno znano je, da najmanjša lastna vrednost tangentne togostne matrike $\mathbf{K}$, ob iskanju matematične rešitve konkretnega stabilnostnega problema, predstavlja vrednost kritične uklonske sile

pri $x=x^{so}=x^c=x^{si}=L$

$$\begin{aligned} S_4^i - R_X^i(L) &= 0 \quad \text{ali} \quad u_X^i(L) - u_4^i = 0, \\ S_5^i - R_Z^i(L) &= 0 \quad \text{ali} \quad u_Z^i(L) - u_5^i = 0, \\ S_6^i - M_Y^i(L) &= 0 \quad \text{ali} \quad \varphi^i(L) - u_6^i = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

kjer u_j^i ($j=1,2,\dots,6$) in predstavljajo vrednosti posplošenih robnih pomikov in robnih sil zunanje in notranje jeklene cevi ter betonskega jedra ($i=so,c,si$).

2.4 Točna analitična rešitev problema uklona CFDST-stebrov

V nadaljevanju predstavimo izpeljavo točne analitične rešitve sistema linearnih diferencialno algebrskih enačb prvega reda (1)–(6), s katerim opišemo problematiko uklona CFDST-stebrov s podajno povezavo jeklenih cevi ter betonskega jedra. V splošnem so diferencialno algebrske enačbe zelo zapletene in so le redko analitično rešljive. Za konkretno diferencialno algebrske enačbe (1)–(6)

$P_{cr,AN}$ pripadajoči lastni vektor pa uklonsko obliko CFDST-stebra s podajno povezavo jeklenih cevi ter betonskega jedra. V pričujočem prispevku smo kritično uklonsko silo $P_{cr,AN}$ izvedli s pomočjo programske opreme MATHEMATICA (Wolfram S., 2017). Matematični izraz, ki določa kritično uklonsko silo $P_{cr,AN}$ v splošnem podajno povezanega betonskega jedra in kovinskih cevi CFDST-stebrov, je zelo obsežen ter zapleten in ga zato v pričujočem prispevku ne prikazujemo. V nade-

ljevanju prikažemo le matematična izraza za kritično uklonsko silo $P_{cr,AN}$ za primer povsem toge (13) ter povsem podajne (14) povezave med betonskim jedrom in kovinskimi cevmi:

$$P_{cr,AN}(K_X = K_Z = \infty) = \frac{\pi^2 (E^c I^c + E^{si} I^{si} + E^{so} I^{so})}{(1 + \varepsilon) L^2}, \quad (13)$$

$$P_{cr,AN}(K_X = K_Z = 0) = \frac{\pi^2 E^i I^i}{(1 + \varepsilon) L^2} + (E^j A^j + E^k A^k) \varepsilon. \quad (14)$$

V enačbi (14) prestavlja i indeks sloja z najmanjšo upogibno togostjo, j in k pa indeksa preostalih dveh slojev sovprednega prečnega prereza. V enačbah (13) in (14) velja tudi $\varepsilon = \varepsilon^c = \varepsilon^{so} = \varepsilon^{si}$.

3 • REZULTATI IN DISKUSIJA

V tem poglavju predstavimo dva nazorna računska primera. V obsegu prvega računskega primera primerjamo vrednosti uklonskih sil, ki jih izračunamo s predstavljenim matematičnim modelom, in vrednosti uklonskih sil, ki so jih na realnih CFDST-stebrih, v obsegu laboratorijskih preiskav, izmerili Tao s sodelavci (Tao, 2004) in Essopjee ter Dundu (Essopjee, 2015). V drugem računskem primeru predstavimo primerjavo različnih računskih postopkov za določitev uklonskih sil CFDST-stebrov. Primerjamo analitične vrednosti uklonskih sil CFDST-stebrov, izračunane z razvitim matematičnim modelom z vrednostmi uklonskih sil, ki sta jih numerično izvednili Hassanein in Kharoob (Hassanein, 2014). Sočasno izvedemo tudi primerjavo vrednosti kritičnih uklonskih sil CFDST-stebrov, ki sta jih navedena avtorja izračunala upoštevaje standarde ((CEN, 1992) in (AISC, 2010)).

3.1 Primerjava analitičnih in eksperimentalnih vrednosti uklonskih sil CFDST-stebrov

Z namenom validacije predstavljenega matematičnega modela za izračun kritične uklonske sile CFDST-stebrov s podajno povezavo slojev izvedemo primerjavo analitično izračunanih vrednosti uklonskih sil $P_{cr,AN}$ ter eksperimentalno pridobljenih vrednosti uklonskih sil N_{test} , kot jih predstavijo avtorji Tao s sodelavci (Tao, 2004) in Essopjee ter Dundu (Essopjee, 2015). Eksperimentalno preiskani CFDST-stebri so bili obojestransko vrtljivo podprti, njihove oznake pa povzamemo po avtorjih znanstvenih prispevkov, in sicer: S139.2-2.5, S152.4-2.5, S165.1-2.5 ter S193.7-2.5 Essopjee ter Dundu (Essopjee, 2015) in pcc2-1a in pcc2-1b (Tao, 2004). Ker analiza rezultatov analitičnih rešitev pokaže, da so vrednosti kritičnih uklonskih sil $P_{cr,AN}$ odvisne le od prečne togosti stika slojev CFDST-stebrov K_Z , izvedemo primerjavo za različne vrednosti prečnih togosti stika $K_Z \in [0, \infty]$, merjenih v kN/cm². Rezultate primerjav povzemamo v preglednici 2 in na sliki 3.

Iz preglednice 1 je razvidno, da ima vrednost prečne togosti stika K_Z precejšen vpliv na vrednost kritične uklonske sile P_{cr} . Z naraščanjem vrednosti prečne togosti stika K_Z jeklenih cevi in betonskega jedra narašča tudi vrednosti uklonske sile CFDST-stebra. Analitične vrednosti

kritičnih uklonskih sil pri nižjih vrednostih prečne togosti stika K_Z , ki so manjše kot eksperimentalno pridobljene vrednosti, so konservativne in so v preglednici 2 obarvane z modro. Le v primeru preizkušanca z oznako pcc2-1b so analitične vrednosti kritične uklonske sile P_{cr} ne glede na vrednost prečne togosti stika K_Z vedno večje kot eksperimentalno določena uklonska sila $N_{test}^{pcc2-1b} = 595 \text{ kN}$.

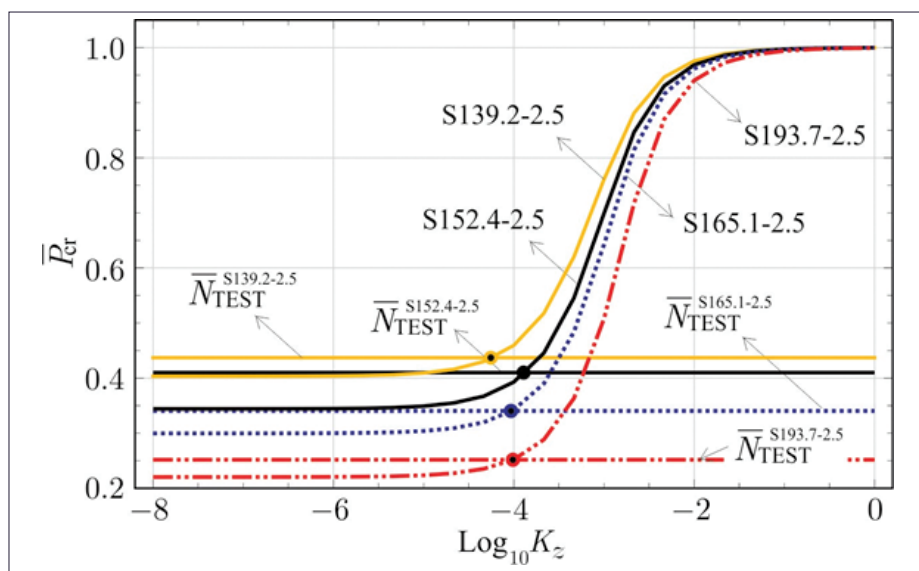
Na podlagi zahteve po enakosti analitične kritične uklonske sile $P_{cr,AN}$ in eksperimentalno določene uklonske sile N_{test} je mogoče izračunati vrednost prečne togosti stika K_Z jeklenih cevi in betonskega jedra. Na sliki 3 prikazujemo primerjavo normiranih analitičnih vrednosti kritičnih uklonskih sil $\bar{P}_{cr} = P_{cr,AN} / P_E$ in normiranih eksperimentalnih uklonskih sil $\bar{N}_{test} = N_{test} / P_E$ za različne vrednosti prečne togosti stika K_Z . Pri tem P_E predstavlja Eulerjevo uklonsko silo CFDST-stebra s togo povezavo jeklenih cevi in betonskega jedra, to je pri $K_Z = \infty \text{ kN/cm}^2$.

Na podlagi pogoja enakosti $\bar{P}_{cr} = \bar{N}_{test}$ lahko izračunamo vrednosti prečne togosti stika K_Z , ki so prikazane v preglednici 3.

Iz rezultatov na sliki 3 ter iz preglednice 3 je razvidno, da prečna togost stika K_Z med jeklenimi cevmi in betonskim jedrom pomembno vpliva na obnašanje CFDST-stebrov. Navedeno

oznaka preizkušanca	$P_{cr,AN} \text{ (kN)}$								
	λ	$N_{test} \text{ (kN)}$	$K_Z=0$	$K_Z=10^{-7}$	$K_Z=10^{-6}$	$K_Z=10^{-5}$	$K_Z=10^{-4}$	$K_Z=10^{-3}$	$K_Z=\infty$
S139.2-2.5	63,7	732,1	675,250	675,348	676,234	685,054	769,194	1273,71	1674,28
S152.4-2.5	59,3	949,0	796,253	796,369	797,415	807,837	909,172	1617,52	2314,56
S165.1-2.5	55,5	1036,5	912,118	912,251	913,448	925,400	1042,76	1956,26	3044,65
S193.7-2.5	48,4	1458,7	1276,92	1277,11	1278,79	1295,54	1461,66	2942,89	5792,84
pcc2-1a	58,5	620	599,209	599,240	599,517	602,282	629,514	853,193	1678,46
pcc2-1b	56,5	595	599,209	599,240	599,517	602,282	629,514	853,193	1678,46

Preglednica 2 • Primerjava analitičnih ($P_{cr,AN}$) in eksperimentalnih (N_{test}) vrednosti kritičnih uklonskih sil CFDST-stebrov za različne vrednosti prečnih togosti stika K_Z , merjenih v kN/cm².



Slika 3 • Normirane analitične vrednosti kritičnih uklonskih sil $\bar{P}_{cr}$ in normirane eksperimentalno določene uklonske sile $\bar{N}_{test}$ obravnavanih preizkušancev za različne vrednosti prečne togosti stika K_z .

preizkušanec	S139.2-2.5	S152.4-2.5	S165.1-2.5	S193.7-2.5
K_z (kN/cm ²)	$5,92 \cdot 10^{-5}$	$1,36 \cdot 10^{-4}$	$9,55 \cdot 10^{-5}$	$9,85 \cdot 10^{-5}$

Preglednica 3 • Vrednosti prečnih togosti stika K_z , izračunanih na podlagi pogoja enakosti $\bar{P}_{cr} = \bar{N}_{test}$ za določene eksperimentalno preiskane CFDST-stebre.

					$P_{cr,AN}$ (kN)				K_z	K_z	K_z
					K_z (kN/cm ²)				(kN/cm ²)	(kN/cm ²)	(kN/cm ²)
$P_{ul,MKE}$									$P_{cr,AN} =$	$P_{cr,AN} =$	$P_{cr,AN} =$
									$P_{ul,MKE}$	P_{EC4}	P_{AISC}
Steber	λ	(kN)	(kN)	(kN)	0	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}			
C5	51	9440	10610	10981	12711	12733	12962	14775	NaN	NaN	NaN
C6	62	8431	9503	10122	8621	8652	8936	11512	NaN	$2,85 \cdot 10^{-5}$	$4,95 \cdot 10^{-5}$
C7	73	7358	8298	9165	6228	6273	6661	9891	$2,70 \cdot 10^{-5}$	$5,17 \cdot 10^{-5}$	$7,68 \cdot 10^{-5}$
C8	84	6591	7115	8176	4709	4768	5273	8910	$3,63 \cdot 10^{-5}$	$4,82 \cdot 10^{-5}$	$7,62 \cdot 10^{-5}$
C9	94	5803	6055	7178	3686	3759	4392	8039	$3,40 \cdot 10^{-5}$	$3,91 \cdot 10^{-5}$	$6,72 \cdot 10^{-5}$
C10	105	5014	5155	6202	2963	3054	3816	7109	$2,78 \cdot 10^{-5}$	$3,04 \cdot 10^{-5}$	$5,55 \cdot 10^{-5}$
C11	116	4393	4411	5274	2433	2544	3433	6186	$2,31 \cdot 10^{-5}$	$2,33 \cdot 10^{-5}$	$4,25 \cdot 10^{-5}$
C12	127	3951	3902	4419	2033	2166	3169	5354	$2,03 \cdot 10^{-5}$	$1,79 \cdot 10^{-5}$	$3,00 \cdot 10^{-5}$
C13	138	3140	3302	3749	1725	1881	2974	4641	$1,19 \cdot 10^{-5}$	$1,39 \cdot 10^{-5}$	$2,16 \cdot 10^{-5}$
C14	149	2827	2890	3220	1482	1661	2812	4043	$1,02 \cdot 10^{-5}$	$1,09 \cdot 10^{-5}$	$1,59 \cdot 10^{-5}$
C15	160	2455	2548	2796	1287	1491	2659	3533	$7,67 \cdot 10^{-6}$	$8,65 \cdot 10^{-6}$	$1,20 \cdot 10^{-5}$
C16	171	2156	2262	2451	1128	1358	2501	3127	$5,93 \cdot 10^{-6}$	$6,94 \cdot 10^{-6}$	$9,22 \cdot 10^{-6}$
C17	182	1971	2020	2165	997	1253	2336	2776	$5,17 \cdot 10^{-6}$	$5,61 \cdot 10^{-6}$	$7,20 \cdot 10^{-6}$
Mean									$1,90 \cdot 10^{-5}$	$2,38 \cdot 10^{-5}$	$3,86 \cdot 10^{-5}$
COV									0,60	0,67	0,68

Legenda: NaN – vrednost ni definirana, Mean – srednja vrednost, COV – koeficient variacije

Preglednica 4 • Primerjava analitičnih vrednosti $P_{cr,AN}$, numeričnih $P_{ul,MKE}$ in skladno s standardoma (CEN, 1992) P_{EN4} in (AISC, 2010) P_{AISC} izračunanih vrednosti uklonskih sil CFDST-stebrov pri različnih vrednostih prečne togosti stika K_z (kN/cm²).

je mogoče potrditi tudi s primerjavo vrednosti uklonskih sil realnih CFDST-stebrov, saj eksperimentalno izmerjene vrednosti uklonskih sil dosegajo le okvirno 25–40 % vrednosti Eulerjevih uklonskih sil CFDST-stebrov s togo povezavo jeklenih cevi in betonskega jedra.

3.2 Primerjava analitičnih, numeričnih in vrednosti uklonskih sil CFDST-stebrov, izračunanih na podlagi standardov

V tem poglavju prikažemo primerjavo kritičnih uklonskih sil $P_{cr,AN}$ CFDST-stebrov, izračunanih s predstavljenim matematičnim modelom, ter uklonskih sil $P_{ul,MKE}$, ki sta jih numerično, z uporabo metode končnih elementov, izračunala avtorja Hassanein in Kharoob (Hassanein, 2014). Navedene uklonske sile primerjamo tudi z vrednostmi uklonskih sil CFDST-stebrov, ki so izračunane skladno s standardoma (CEN, 1992) in (AISC, 2010). Vrednosti uklonskih sil za obojestransko vrtljivo podprte CFDST-stebre, pri različnih prečnih togostih stika K_z , so zbrane v preglednici 4. Geometrijski in materialni podatki obravnavanih CFDST-stebrov kot tudi računski postopki standardov (CEN, 1992) in (AISC, 2010) so podrobneje predstavljeni v znanstvenem prispevku avtorjev Hassanein in Kharoob (Hassanein, 2014).

Kot pričakovano, je iz preglednice 4 razvidno, da se vrednosti uklonske sile zmanjšujejo z naraščanjem vitkosti CFDST-stebrov ter zmanjševanjem prečne togosti stika K_z jeklenih cevi in betonskega jedra. V primeru srednje vitkega stebra C5 opazimo, da so uklonske sile P_{ulMKE} , P_{EN4} in P_{AISC} manjše kot analitično izračunana vrednost kritične uklonske sile $P_{cr,AN}$ ne glede na vrednost prečne togosti stika K_z . Za preostale CFDST stebre, C6–C17,

se vrednosti uklonskih sil nahajajo med mejnima vrednostma, ki jih izračunamo za absolutno podajno ($K_z=0$) in absolutno togo ($K_z=\infty$) prečno togost stika jeklenih cevi in betonskega jedra. Na podlagi pogojev enakosti $P_{cr,AN} = P_{ulMKE}$, $P_{cr,AN} = P_{EN4}$ in $P_{cr,AN} = P_{AISC}$ smo za vse obravnavane CFDST-stebre izračunali tudi pripadajoče vrednosti prečne togosti stika K_z , ki so prikazane v zadnjih treh stolpcih preglednice 4. Opaziti je zmanj-

ševanje vrednosti prečne togosti stika K_z ob naraščanju vitkosti λ obravnavanih CFDST-stebrov. Poleg navedenega smo za vsako izmed računskih metod, ki so obravnavane v znanstvenem prispevku avtorjev Hassanein in Kharoob (Hassanein, 2014), izračunali tudi srednjo vrednost prečnih togosti stika K_z s pripadajočim koeficientom variacije. Te so prikazane v zadnjih dveh vrsticah preglednice 4.

4 • SKLEP

V prispevku smo predstavili nov matematični model in pripadajočo analitično rešitev za izračun kritične uklonske sile vitkih okroglih dvocevni sovprežnih stebrov z betonskim jedrom (CFDST) in upoštevanjem zdrsa med jeklom in betonom.

Glede na rezultate izvedenih računskih analiz, ki so predstavljene v predhodnih poglavjih, lahko podamo naslednje bistvene zaključke:

- analitično določena vrednost kritične uklonske sile, $P_{cr,AN}$ CFDST-stebrov je neod-

visna od vzdolžne togosti stika K_x med jeklenim in betonskim delom sovprežnega prečnega prereza,

- prečna togost stika K_z med jeklenima cevema in betonskim jedrom CFDST-stebrov ima pomemben vpliv na vrednost kritične uklonske sile $P_{cr,AN}$,
- analitične vrednosti kritične uklonske sile, $P_{cr,AN}$ CFDST-stebrov lahko povsem sovpadajo z eksperimentalnimi in numeričnimi vrednostmi uklonskih sil, če v iz-

računih upoštevamo ustrezno kalibrirano vrednost prečne togosti stika K_z ,

- na podlagi izvedenih računskih analiz in primerjav različnih računsko in eksperimentalno določenih vrednosti uklonskih sil CFDST stebrov ugotavljamo, da imajo stične površine med jeklenimi cevmi in betonskim jedrom pomemben vpliv na obnašanje tlačno obremenjenih CFDST-stebrov,
- predstavljeno analitično rešitev je mogoče uporabiti za verifikacijo drugih razvitih računskih modelov za obravnavo deformacijsko napetostnega stanja CFDST-stebrov s podajno povezavo med jeklom in betonom.

5 • ZAHVALA

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

6 • LITERATURA

AISC, Load and resistance factor design specification for structural steel buildings, American Institute of Steel Construction, Chicago, USA, 2010.

CEN, EN 1994-1-1: 1992, Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures, European Committee for Standardization, Brussels, 1992.

Elchalakani M., Zhao X.L., Grzebieta R., Tests on concrete filled double-skin (CHS outer and SHS inner) composite short columns under axial compression, Thin Walled Structures, 40, 415–441, 2002.

Essopjee Y., Dundu M., Performance of concrete-filled double-skin circular tubes in compression, Composite Structures, 133, 1276–1283, 2015.

Han L.H., Tao Z., Huang H., Zhao X.L., Concrete-filled double-skin (SHS outer and CHS inner) steel tubular beam-columns, Thin Walled Structures, 42, 1329–1355, 2004.

Hassanein M.F., Kharoob O.F., Analysis of circular concrete-filled double skin tubular slender columns with external stainless steel tubes, Thin Walled Structures, 79, 23–37, 2014.

Hu H.T., Su F.C., Nonlinear analysis of short concrete-filled double skin tube columns subjected to axial compressive forces, Marine Structures, 24, 319–337, 2011.

Huang H., Han L.H., Tao Z., Zhao X.L., Analytical behaviour of concrete-filled double skin steel tubular (CFDST) stub columns, Journal of Constructional Steel Research, 66, 542–555, 2010.

- Pagoulatou M., Sheehan T., Dai X.H., Lam D., Finite element analysis on the capacity of circular concrete-filled double-skin steel tubular (CFDST) stub columns, *Engineering Structures*, 72, 102–112, 2014.
- Perko L., *Differential equations and dynamical systems*, (3rd Edition), Springer-Verlag, NY, USA, 2001.
- Reissner E., On one-dimensional finite-strain beam theory: The plane problem, *Journal of Applied Mechanics and Physics*, 23, 795–804, 1972.
- Romero M.L., Espinos A., Portoles J.M., Hospitaler A., Ibanez C., Slender double-tube ultra-high strength concrete-filled tubular columns under ambient temperature and fire, *Engineering Structures*, 99, 536–545, 2015.
- Schnabl S., Jelenić G., Planinc I., Analytical buckling of slender circular concrete-filled steel tubular columns with compliant interfaces, *Journal of Constructional Steel Research*, 115, 252–262, 2015.
- Schnabl S., Planinc I., Buckling of slender concrete-filled steel tubes with compliant interfaces, *Latin American Journal of Solids and Structures*, 14(10), 1837–1852, 2017.
- Schnabl S., Planinc I., Circumferential gap and partial debonding effects on buckling loads and modes of slender CFST circular columns, *Acta Mechanica*, 230, 909–928, 2019.
- Tan K.H., Zhang Y.F., Compressive stiffness and strength of concrete filled double skin (CHS inner and CHS outer) tubes, *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, 6, 283–291, 2010.
- Tao Z., Han L.H., Zhao X.L., Behaviour of concrete-filled double-skin (CHS inner and CHS outer) steel tubular stub columns and beam-columns, *Journal of Constructional Steel Research*, 60, 1129–1158, 2004.
- Wolfram S., *Mathematica*, Addison-Wesley Publishing Company, 2017.
- Yang Y.F., Han L.H., Sun B.H., Experimental behaviour of partially loaded concrete filled double-skin steel tube (CFDST) sections, *Journal of Constructional Steel Research*, 71, 63–73, 2012.

OCENA POŽARNE ODPORNOSTI ŽELEZNIŠKEGA MOSTU ČEZ GLINŠČICO V SKLOPU IZGRADNJE DRUGEGA TIRA DIVAČA–KOPER S POMOČJO NAPREDNE RAČUNSKE METODE

ESTIMATION OF FIRE RESISTANCE OF THE RAILWAY BRIDGE OVER GLINŠČICA AS PART OF THE CONSTRUCTION OF THE SECOND TRACK DIVAČA–KOPER USING AN ADVANCED CALCULATION METHOD

izr. prof. dr. Sebastijan Bratina, univ. dipl. inž.
grad.

sebastijan.bratina@fgg.uni-lj.si

izr. prof. dr. Tomaž Hozjan, univ. dipl. inž. grad.

tomaz.hozjan@fgg.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo
in geodezijo,
Jamova 2, 1000 Ljubljana

Znanstveni članek

UDK 614.3:625.1(497.4)

Povzetek | V članku predstavimo napredno računsko metodo za oceno požarne odpornosti betonskih konstrukcij. Metoda, skladna z Evrokodi, vključuje naslednje relevantne korake projektne požarne analize: (i) izbiro za projektiranje merodajnih požarnih scenarijev in določitev ustreznih projektnih potekov požarov, (ii) izračun razvoja temperaturnega polja konstrukcijskih elementov in (iii) izračun mehanskega obnašanja konstrukcije, izpostavljene požaru. Uporabo napredne računske metode prikažemo na primeru ocene požarne odpornosti železniškega mostu čez Glinščico, ki smo jo izdelali za projektanta KO-BIRO, d. o. o. Most bo izveden kot prednapeta betonska konstrukcija. Za drugi in tretji korak projektne analize uporabimo lasten matematični model in pripadajoča računalniška programa HEATKO in NFIRA, ki sta bila razvita v okviru raziskovalnih projektov na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani.

Ključne besede: požarna odpornost, napredna metoda, betonska konstrukcija, železniški most čez Glinščico, programa HEATKO in NFIRA

Summary | The paper presents an advanced calculation method for estimating the fire resistance of concrete structures. According to the Eurocode, the following relevant steps of structural fire design analysis should be considered: (i) selection of the relevant design fire scenarios and determination of the corresponding design fires, (ii) calculation of the temperature evolution in the structural members, and (iii) calculation of the mechanical behaviour of the structure exposed to fire. The application of the advanced calculation method is presented on the example of the fire resistance assessment of the railway bridge over Glinščica, which was carried out in cooperation with the design office

KO-BIRO, Ltd. The railway bridge is designed as a prestressed concrete structure. For the second and third steps of the structural fire design analysis, self-developed mathematical models and the related computer software HEATKO and NFIRA were used. The mentioned software was developed within the research projects at the Faculty of Civil Engineering and Geodesy, University of Ljubljana.

Key words: fire resistance, advanced method, concrete construction, railway bridge over Glinščica, HEATKO and NFIRA software

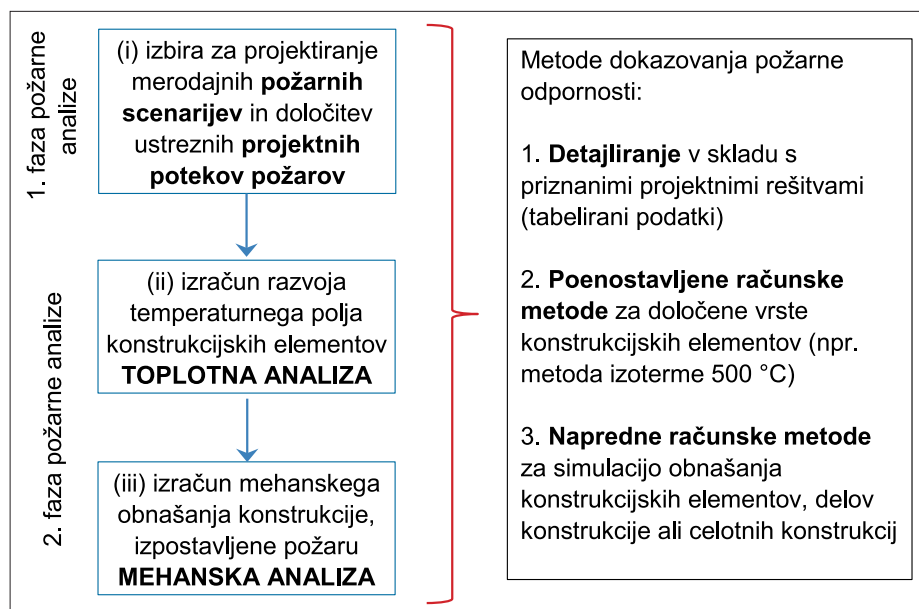
1 • UVOD

Požarno odpornost gradbenih konstrukcij v splošnem lahko ocenimo na dva načina, s preizkusi oziroma eksperimenti ali s pomočjo računskih metod. Eksperimentalno ocenjevanje požarne odpornosti gradbenih konstrukcij poteka v požarnih laboratorijih, izjemoma pa tudi v naravnem merilu na konkretnem objektu. Na ta način moramo iz eksperimentalnih rezultatov na relativno maloštevilnih vzorcih sklepati na požarno odpornost gradbenih konstrukcij v celoti, kar pa je dokaj nezanesljivo. Splošnejši način ocene požarne odpornosti gradbenih konstrukcij pa poteka s pomočjo ustreznih matematičnih modelov oziroma računskih metod. Kot vemo, je matematično modeliranje interakcije med požarom in konstrukcijo v splošnem zelo kompleksna naloga. V primeru betonskih konstrukcij so vzrok temu zahtevni in med seboj povezani kemijski, hidrološki, toplotni in mehanski procesi, ki se odvijajo v betonu pri povišanih temperaturah (Bratina, 2003). Praviloma je modeliranje teh pojavov razdeljeno v dve ločeni fazi. V prvi fazi najprej določimo časovno in krajevno razporeditev temperature v neposredni okolici obravnavane konstrukcije (korak (i) na sliki 1). V drugi fazi požarne analize pa z uporabo teh rezultatov določimo še časovno in krajevno razporeditev temperature ter napetostno in deformacijsko stanje v konstrukciji oziroma njenem delu med požarom. V večini primerov tudi to fazo požarne analize ločimo na toplotni (korak (ii) na sliki 1) in mehanski del (korak (iii) na sliki 1).

Naj pri tem omenimo, da je za natančno določitev razporeditve temperatur po betonski konstrukciji treba upoštevati tudi vpliv transporta tekočin in kemičnih procesov v betonu. Take požarne analize, ki jih privzeti evropski standardi Evrokod (npr. za betonske konstrukcije je to SIST EN 1992-1-2:2005 (SIST, 2005)) imenujejo **napredne računske metode**, so še vedno matematično zelo zahtevne in jih pri projektiranju požarne odpornosti gradbe-

nih konstrukcij redko uporabljamo. Pogosteje uporabljamo **poenostavljene računske metode**, ki pa so namenjene le približni oceni požarne odpornosti enostavnih konstrukcijskih elementov, kot so nosilci, plošče, stene in stebri. Takšne metode zasledimo v strokovni literaturi in v številnih tehničnih predpisih, tudi Evrokodih (npr. (SIST, 2005)). Vse te metode se razlikujejo predvsem v optimiziranju raz-

zajamejo z reduciranjem dimenzij prečnega prereza oziroma zmanjšanjem trdnostih karakteristik materialov. Najpreprostejša metoda dokazovanja požarne odpornosti konstrukcijskih elementov pa je t. i. **detajliranje** v skladu s priznanimi projektnimi rešitvami (npr. za betonske konstrukcije glej (SIST, 2005)). Skladno s to metodo moramo zagotoviti najmanjše dimenzije elementov oziroma najmanjše osne oddaljenosti ojačilne armature od zunanjih površin v primeru armiranobetonskih konstrukcij. Vrednosti so podane v obliki tabel in so bile razvite na empirični podlagi za izbrane



Slika 1 • Relevantni koraki projektne analize za oceno požarne odpornosti betonskih konstrukcij in različne metode dokazovanja ((SIST, 2004a), (SIST, 2005)).

merja med natančnostjo metode in njihovo preprostostjo. Posamezni koraki projektne analize so ustrezno poenostavljeni, in sicer: konstrukcijski elementi so lahko izpostavljeni le določenim projektnim potekom požarom (npr. standardna krivulja temperatura-čas v SIST EN 1991-1-2:2004 (SIST, 2004a)), toplotna analiza je omejena le na določitev razvoja temperature po karakterističnem prečnem prerezu, v okviru mehanske analize pa odpornost elementa določimo na podlagi poenostavljenih računskih postopkov, ki vplive požara

projektne požare in enostavne konstrukcijske elemente (stebri, nosilci, plošče). Običajno sta predpisana tudi nivo obtežbe in kvaliteta betona in armature. Skladno s tem je uporaba tovrstnih tabel precej omejena in redko uporabna v današnji praksi.

Članek ima poleg uvoda in zaključkov še štiri poglavja. V drugem poglavju podrobneje predstavimo poglobljene značilnosti relevantnih korakov projektne požarne analize v primeru naprednih računskih metod. V tretjem poglavju bomo s pomočjo napredne

računske metode ocenili požarno odpornost železniškega mostu čez Glinščico. Ocenimo smo pripravili v okviru študije, ki smo jo izdelali za projektanta KO-BIRO, d. o. o., iz

Maribora (Bratina, 2020). Pri tem smo za izvedbo drugega in tretjega koraka projektne analize uporabili lasten matematični model in pripadajoča računalniška programa

HEATKO (Hozjan, 2009) in NFIRA (Bratina, 2007), ki delujeta v programskem okolju MATLAB (MathWorks, 2016). Ugotovitve bomo predstavili v sklepnem poglavju.

2 • NAPREDNA RAČUNSKA METODA POŽARNE ANALIZE

V tem poglavju predstavimo poglavitne značilnosti relevantnih korakov projektne analize v primeru, ko požarno analizo konstrukcije ali njenega dela izvedemo s pomočjo napredne računske metode.

2.1 Požarni scenarij oziroma projektni požar

Požarni scenarij predstavlja kvalitativni opis poteka požara s časovno opredeljenimi ključ-

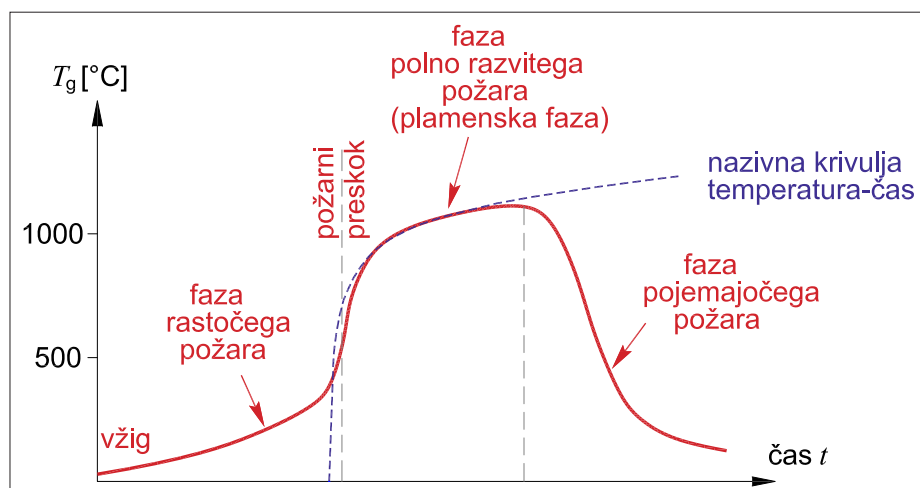
definira proces vžiga in širjenja (rasti) požara, stopnjo polno razvitega požara ter stopnjo pojemanja požara, upoštevajoč lastnosti okolice in sistema zgradbe, ki vplivajo na potek požara (glej sliko 2) (SIST, 2004a).

Temperatura požarnega prostora T_g in njeno časovno spreminjanje sta odvisna od mnogih parametrov, med katerimi so pomembni zlasti

reditev odprtih, termične lastnosti konstrukcije, relativna vlažnost okoliškega prostora, zračni pritisk, intenzivnost zračenja in drugi.

Pri požarno varnem projektiranju betonskih konstrukcij skladno s privzetim evropskim standardom SIST EN 1992-1-2:2005 (SIST, 2005) uporabimo t. i. projektni požar, ki ga ocenimo za vsak požarni scenarij. Intenziteto požara lahko predstavimo na poenostavljen način, in sicer v obliki **nazivnih krivulj temperatura-čas**, ki podajajo temperaturo plinov v okolici površine elementa le kot funkcijo časa (npr. standardna krivulja temperatura-čas oziroma ogljikovodikova krivulja (SIST, 2004a), glej sliko 3), to pomeni, da predpostavimo enakomerno porazdelitev temperature plinov po požarnem prostoru.

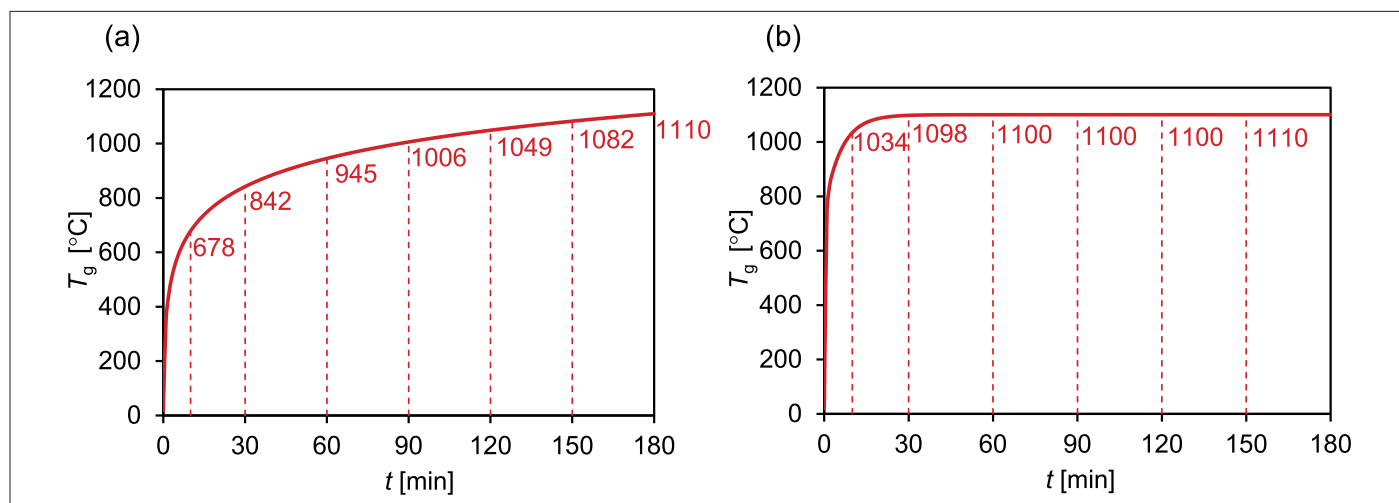
Razvoj temperature v požarnem prostoru pa lahko določimo tudi z uporabo ustreznega **modela naravnega požara** s fizikalno določenimi toplotnimi vplivi. Ločimo poenostavljene in natančnejše modele naravnih požarov. Poenostavljeni požarni modeli temeljijo na posebnih fizikalnih parametrih z omejeno možnostjo uporabe (npr. parametrična krivulja temperatura-čas), natančnejši požarni modeli pa uporabljajo kompleksne numerične metode za reševanje sistema parcialnih diferencialnih enačb, s katerimi matematično opišemo fizikalne in kemijske pojave v prostoru med požarom (npr. hidrodinamični računski modeli oz. modeli CFD – »computational fluid dynamic«). S takšnimi modeli lahko določimo



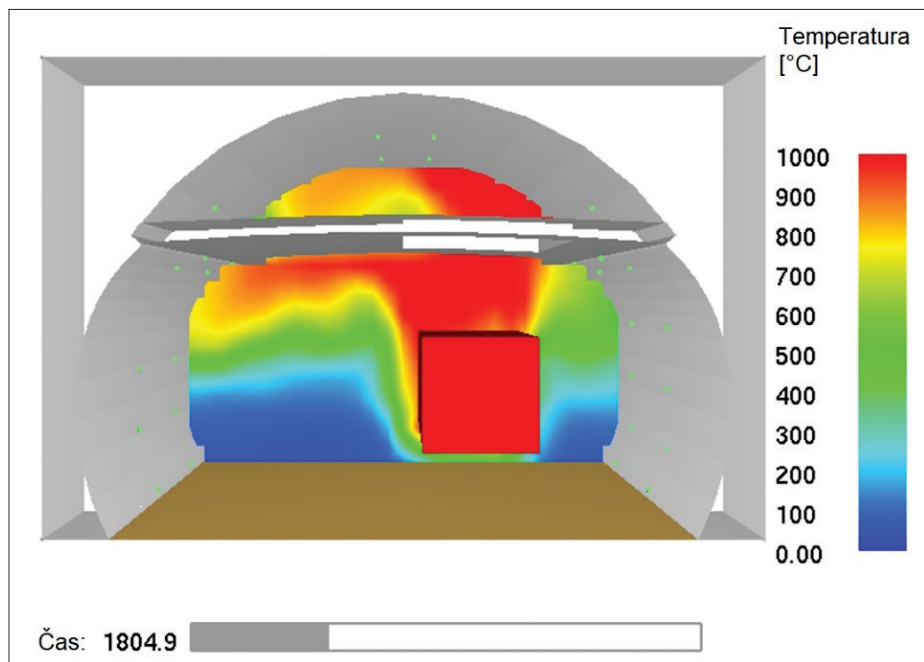
Slika 2 • Požarni scenarij.

nimi dogodki, ki označujejo požar in ga razlikujejo od drugih možnih požarov. Navadno

vrsta, količina in razporeditev gorljivih snovi v prostoru, dimenzije prostora, velikost in razpo-



Slika 3 • Nazivni krivulji temperatura-čas (SIST, 2004a): (a) standardna krivulja, ki predstavlja model polno razvitega požara v sektorju in opisuje gorenje lesa, (b) ogljikovodikova krivulja, ki opisuje gorenje nafte in plinov.



Slika 4 • Porazdelitev temperatur v požarnem prostoru, določena s CFD-modelom (FDS, 2016).

časovni in prostorski razvoj temperature in dimnih plinov v požarnem prostoru (glej sliko 4) (SIST, 2004a).

2.2 Toplotna analiza

Toplotno analizo konstrukcije ali njenega dela izvedemo za določeno časovno obdobje, brez faze ohlajanja oziroma z njo. V splošnem moramo za določitev časovnega spreminjanja temperature v konstrukciji, ki je izpostavljena požaru, upoštevati vse tri načine prenosa toplote:

- sevanje oziroma radiacijo, pri čemer se energija prenaša z elektromagnetnim valovanjem,
- konvekcijo, pri kateri se energija prenaša z gibanjem snovi z različnimi temperaturami, in
- prevajanje ali kondukcijo, pri čemer potuje energija v obliki toplote skozi snov z mest z višjo temperaturo na mesta z nižjo.

Pri običajnih gradbenih konstrukcijah iz betona, jekla ali lesa se med požarom največ toplote po konstrukciji prenaša s kondukcijo. To opišemo s parcialno diferencialno enačbo za prevajanje toplote, znane kot Fourierjeva parcialna diferencialna enačba za prenos toplote po trdni snovi (Özişik, 1985):

$$V: \frac{\partial}{\partial x_i} (\lambda_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j}) + Q - \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = 0,$$

$$(i, j = x, y, z) \quad (1)$$

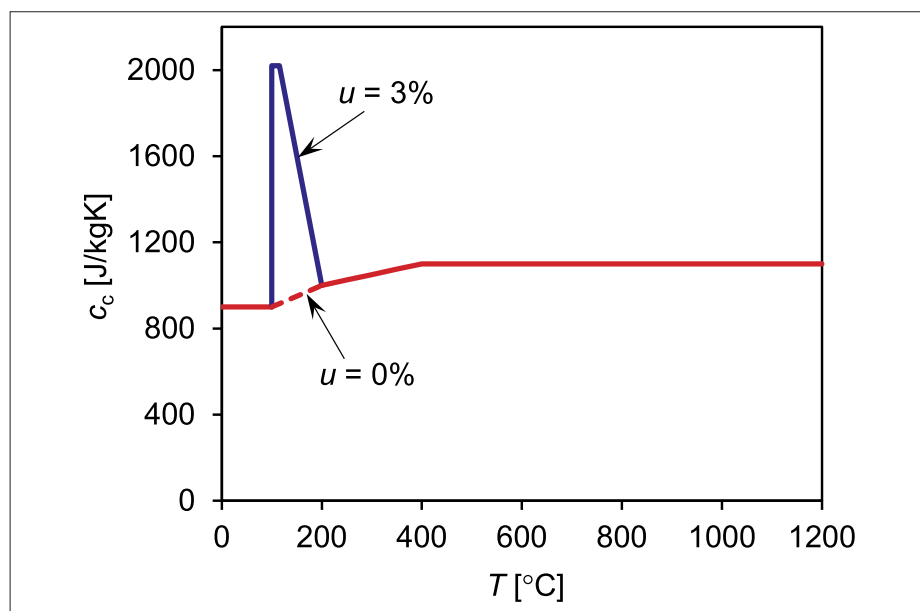
V enačbi (1) s T označimo temperaturo posamezne točke elementa konstrukcije pri času t , λ_{ij} so komponente prevodnostnega tenzorja

snovi (v primeru izotropnega in homogenega materiala je $\lambda_{ij} = \lambda$), Q je specifični prostorninski toplotni tok, ρ je gostota snovi, c specifična toplota snovi, V pa označimo obravnavano območje elementa. Pri tem so toplotne lastnosti materialov v splošnem temperaturno odvisne (npr. zmanjševanje gostote betona je posledica izparevanja vode). Prehod toplote skozi zunanjo površino konstrukcije zaradi konvekcije in radiacije v požarnem prostoru pa upoštevamo z ustreznimi robnimi pogoji. Analitično rešitev osnovne enačbe nestacio-

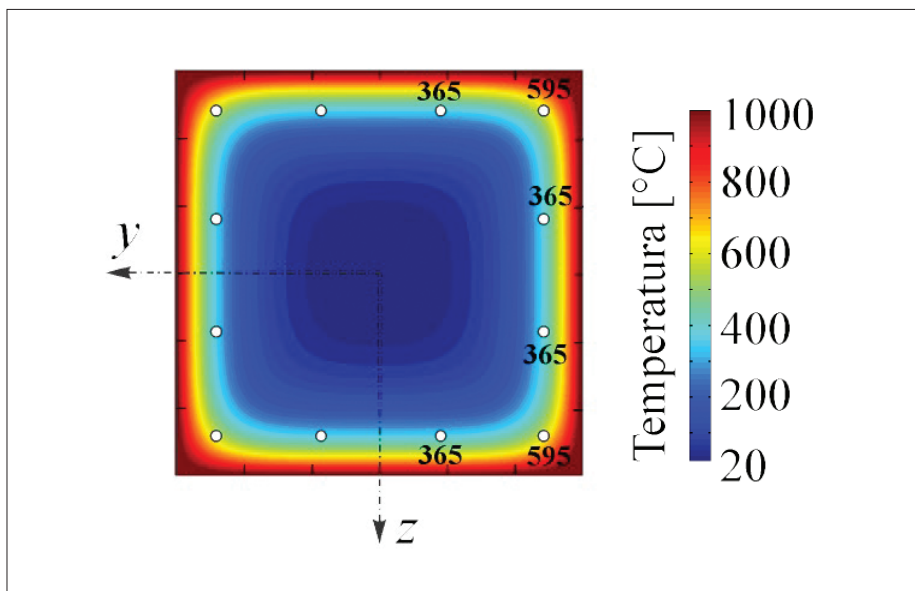
narnega prostorskega prevajanja toplote s pripadajočimi robnimi in začetnimi pogoji poznamo le za najenostavnejše enodimenzionalne ali dvodimenzionalne probleme. V splošnem pa sistem rešimo z uporabo numeričnih metod, in sicer z metodo končnih elementov, z diferenčno metodo ali pa z empiričnimi formulami, ki so na voljo v literaturi.

Poleg prenosa toplote po konstrukciji med požarom se v poroznih materialih, kamor uvrščamo tudi beton, hkrati pretakajo tudi kapljavine in zmesi plinov, sočasno pa potekajo tudi številni kemijski procesi. Takšna povezana kemijsko-temperaturno-vlažnostna analiza, kot jo običajno imenujemo, je za vsakdanjo inženirsko prakso prezahtevna, zato upoštevamo vpliv transporta tekočin in kemičnih procesov na časovno razporeditev temperatur po konstrukciji le posredno. Primer takšne poenostavitve je povečanje specifične toplote betona v temperaturnem območju med 100 in 200 °C, s katerim posredno upoštevamo vpliv izparevanja vode na upočasnjeno razvoj temperatur v betonu. Na sliki 5 prikazujemo tako korigirano temperaturno odvisnost specifične toplote betona cc skladno s standardom SIST EN 1992-1-2:2005 (SIST, 2005).

Pri običajni stopnji armiranja (do 4 % ploščine prečnega prereza) lahko vpliv armature na časovno spreminjanje temperatur v armiranobetonski konstrukciji zanemarimo. Pri tem privzamemo, da je temperatura v armaturi enaka temperaturi v betonu na mestu armature (SIST, 2005).



Slika 5 • Temperaturno odvisna specifična toplota betona pri vsebnosti vlage $u = 0\%$ oziroma 3% teže betona (SIST, 2005).



Slika 6 • Razporeditev temperatur po karakterističnem prečnem prerezu konstrukcije (Hozjan, 2009). Privzamemo, da je temperatura v armaturi enaka temperaturi v betonu na mestu armature.

Pri določanju časovne in krajevne razporeditve temperatur v konstrukciji med požarom pa ne naredimo velike napake, če predpostavimo, da je temperatura celotnega požarnega prostora ali pa vsaj dela na območju obravnavane konstrukcije enakomerna, kar bistveno poenostavi toplotno analizo. V tem primeru izračunamo časovno razporeditev temperature med požarom le v prečnem prerezu obravnavanega dela konstrukcije. Primer takšnega temperaturnega polja prikazujemo na sliki 6.

Spreminjanje temperaturnega polja konstrukcije predstavlja pri mehanski analizi konstrukcije temperaturno obtežbo.

2.3 Mehanska analiza

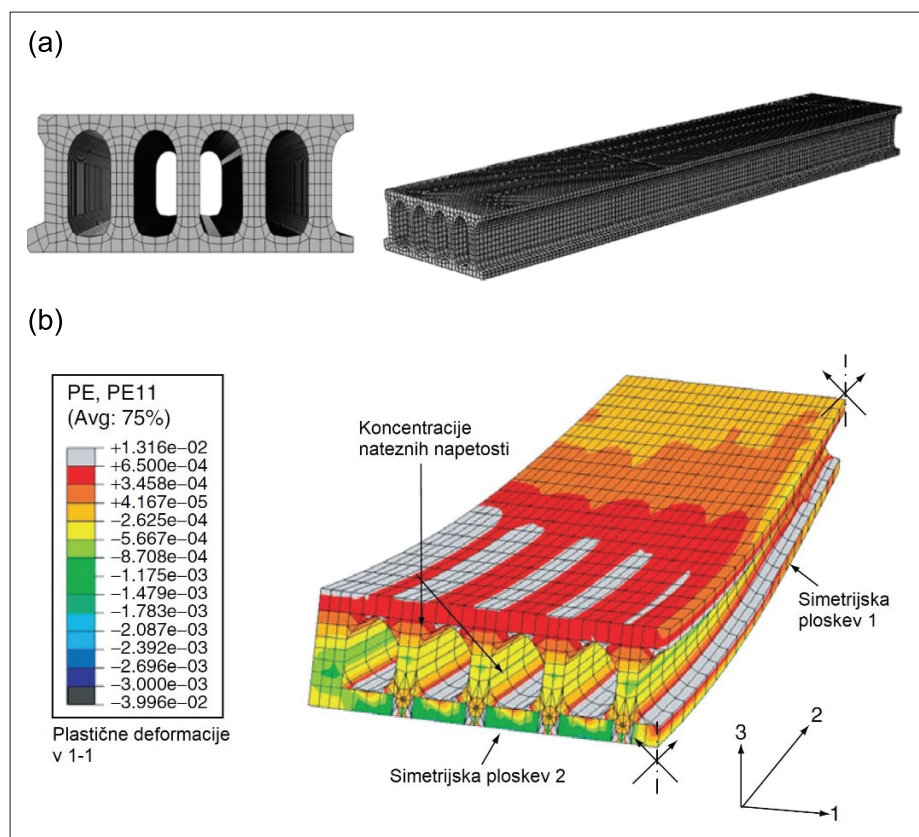
V tretjem, zadnjem koraku požarne analize izvedemo mehansko analizo konstrukcije ali njenega dela, ki je izpostavljen sočasnemu delovanju mehanske in temperaturne obtežbe. Mehansko analizo izvedemo za enak časovni interval, kakor je bil upoštevan v toplotni analizi. Modeli mehanskega obnašanja konstrukcijskih elementov pri povišanih temperaturah so nelinearni. Poleg obremenitev zaradi vplivov kratkotrajne statične obtežbe moramo v analizi upoštevati tudi obremenitve, ki so posledica vsiljenega in preprečenega raztezanja ter deformacij zaradi temperaturnih sprememb pri izpostavljenosti požaru.

Za določitev napetostnega in deformacijskega stanja ojačanih betonskih konstrukcij (armiranih oz. prednapetih), ki so izpostavljene požaru, večina raziskovalcev uporablja

metodo končnih elementov. Točnejše analize odziva ojačanih betonskih konstrukcij pri požarni obtežbi temeljijo na uporabi končnih 3D-elementov (npr. (Aguado, 2016), (Ellobody, 2014)). Takšne analize so zaradi pot-

rebne velikega števila prostostnih stopenj omejene le na najenostavnejše konstrukcije oziroma za analizo detajlov (glej sliko 7). Za običajno inženirsko prakso so za sedaj primernejše metode, ki so zasnovane na teorijah nosilcev in plošč (npr. (Cai, 2003)). Takšne metode so običajne tudi pri analizi odziva jeklenih konstrukcij pri požarni obtežbi (npr. (Tan, 2002)). Obstojne računske metode poleg materialne nelinearnosti upoštevajo tudi geometrijsko nelinearnost konstrukcije, običajno na poenostavljen način v obliki teorije 2. reda.

Pomembna predpostavka, ki jo zasledimo v literaturi (npr. (Harmathy, 1993), (SIST, 2005)), je aditivni razcep geometrijske deformacije ϵ , tj. specifične spremembe dolžine poljubnega materialnega vlakna, na nape-
tostno odvisne mehanske deformacije ϵ_{σ} , na temperaturne deformacije ϵ_{th} , viskozne deformacije ϵ_{cr} in t. i. prehodne deformacije ϵ_{tr} (le pri betonskem vlaknu). Huang (Huang, 1997) v svojem delu navaja, da prehodne deformacije (ang. transient strain) nastopijo pri prvem hitrem segrevanju in osuševanju tlačno obremenjenega betona in so trajne ter nepovratne. Med viskozne deformacije poleg



Slika 7 • Primer uporabe končnih 3D-elementov pri analizi odziva ojačanih betonskih konstrukcij pri požarni obtežbi: (a) računski model plošče (Aguado, 2016), (b) rezultati analize plošče (Ellobody, 2014).

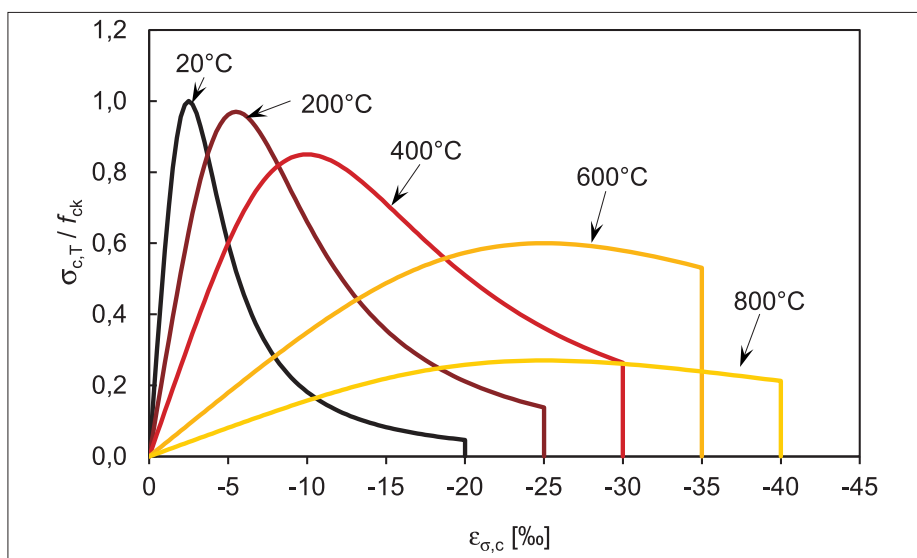
lezenja betona pri povišanih temperaturah uvrstimo tudi viskozno lezenje jekla. Pri tem pojavu gre za izrazito povečanje deformabilnosti jekla, še posebej če temperatura jekla doseže oziroma preseže vrednost 400 °C (Harmathy, 1967).

Dodaten pojav, ki ima pomemben vpliv na požarno odpornost ojačanih betonskih konstrukcij, je eksplozivno luščenje betona. Kot poročajo raziskovalci, je razumevanje pojava še relativno skromno (npr. (Majorana, 2010)). Ta oblika luščenja se pojavi že v začetni fazi požara (5–30 min.) (Savov, 2005). Eksplozivno luščenje betona je v glavnem posledica dveh procesov in sicer termomehanskega procesa, pri katerem se pojavijo napetosti zaradi spreminjanja temperaturnih deformacij znotraj materiala, in toplotno-vlažnostnega procesa, pri katerem prihaja do luščenja lezenja betona pri povišanih temperaturah uvrstimo tudi viskozno lezenje jekla. Pri tem pojavu gre za izrazito povečanje deformabilnosti jekla, še posebej če temperatura jekla doseže oziroma preseže vrednost 400 °C (Harmathy, 1967).

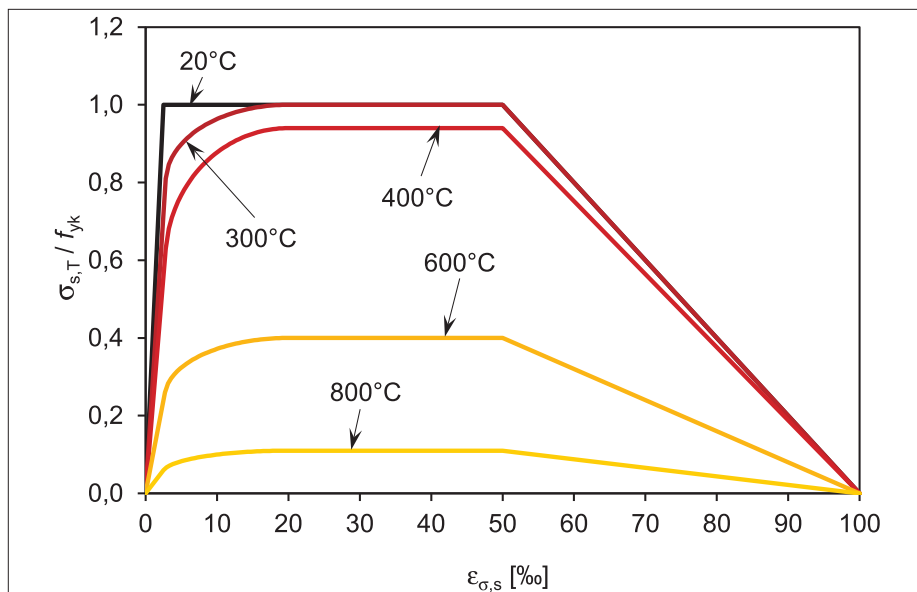
Dodaten pojav, ki ima pomemben vpliv na požarno odpornost ojačanih betonskih konstrukcij, je eksplozivno luščenje betona. Kot poročajo raziskovalci, je razumevanje pojava še relativno skromno (npr. (Majorana, 2010)). Ta oblika luščenja se pojavi že v začetni fazi požara (5–30 min.) (Savov, 2005). Eksplozivno luščenje betona je v glavnem posledica dveh procesov in sicer termomehanskega procesa, pri katerem se pojavijo napetosti zaradi spreminjanja temperaturnih deformacij znotraj materiala, in toplotno-vlažnostnega procesa, pri katerem prihaja do luščenja betona zaradi razvoja parnih tlakov v porah betona (Zeiml, 2008). Večina raziskovalcev upošteva vpliv eksplozivnega luščenja na požarno odpornost konstrukcij le posredno, in sicer v obliki redukcijskih faktorjev oziroma s spremenjeno geometrijo dela konstrukcije zaradi odpadlega betona.

2.3.1 Mehanske lastnosti materialov pri povišanih temperaturah

Bistven korak pri natančnem modeliranju mehanskega odziva vseh vrst konstrukcij med požarom je izbira pravilnega materialnega modela. Najpogostejše predpostavimo materialni model v obliki zveze med napetostjo in deformacijo. Ob predpostavki, da so posamezna materialna vlakna izpostavljena le enoosnemu napetostnemu stanju, se pri formulaciji konstitucijskih zakonov navežemo



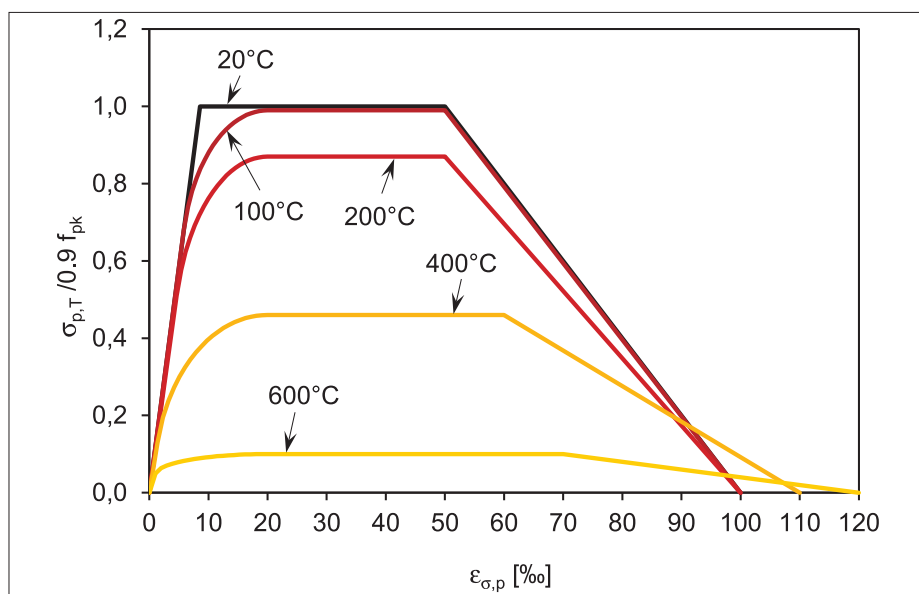
Slika 8 • Temperaturno odvisna sovisnost med napetostjo in deformacijami za tlačno obremenjeni beton z apnenčevim agregatom skladno s SIST EN 1992-1-2:2005 (SIST, 2005).



Slika 9 • Temperaturno odvisna sovisnost med napetostjo in deformacijo za hladno obdelano jeklo za armiranje (razreda N) skladno s SIST EN 1992-1-2:2005 (SIST, 2005).

neposredno na rezultate enoosnih preizkusov. Pri tem s σ označimo vzdolžno normalno napetost vlakna, z ϵ_{σ} pa mehansko deformacijo vlakna. Na slikah 8 do 10 prikazujemo matematične modele sovisnosti med napetostjo in deformacijo enoosno obremenjenega betona pod vplivom tlačnih napetosti, jekla za armiranje in jekla za prednapenjanje pri povišanih temperaturah skladno s SIST EN 1992-1-2:2005 (SIST, 2005). Temperaturno odvisni materialni parametri betona so: tlačna trdnost $f_{c,T}$, deformacija pri tlačni trdnosti $\epsilon_{c1,T}$ in mejna tlačna deformacija $\epsilon_{cu1,T}$ za

armaturo: elastični modul $E_{s,T}$, meja proporcionalnosti $f_{sp,T}$ in največja napetost $f_{sy,T}$, za jeklo za prednapenjanje pa: elastični modul $E_{p,T}$, meja proporcionalnosti $f_{pp,T}$, največja napetost $f_{py,T}$, deformacija pri največji napetosti $\epsilon_{pt,T}$ in mejna deformacija $\epsilon_{pu,T}$.



Slika 10 • Temperaturno odvisna sovisnost med napetostjo in deformacijo hladno obdelanega jekla za prednapenjanje skladno s SIST EN 1992-1-2:2005 (SIST, 2005).

3 • UPORABA NAPREDNE RAČUNSKE METODE NA PRIMERU ŽELEZNIŠKEGA MOSTU ČEZ GLINŠČICO

Uporabo napredne računske metode prikazemo na primeru ocene požarne odpornosti železniškega mostu čez Glinščico v sklopu izgradnje drugega tira Divača–Koper, ki smo jo izdelali za naročnika 2TDK, d. o. o. (Bratina, 2020). Most premošča dolino Glinščice kot kontinuirana škatlasta konstrukcija z razponi 70 + 45 + 100 m, ki je v polju podprta z dve-

ma relativno kratkima stebroma s pravokotnim prečnim prereзом. Prekladna konstrukcija je naknadno prednapeta s 94 kablji. Razporeditev kablov in armature povzamemo iz projektne dokumentacije, prav tako tudi podatke o mehanskih lastnostih uporabljenih materialov, in sicer: beton trdnostnega razreda C50/60 (z apnenčevim agregatom) za preklado oziroma

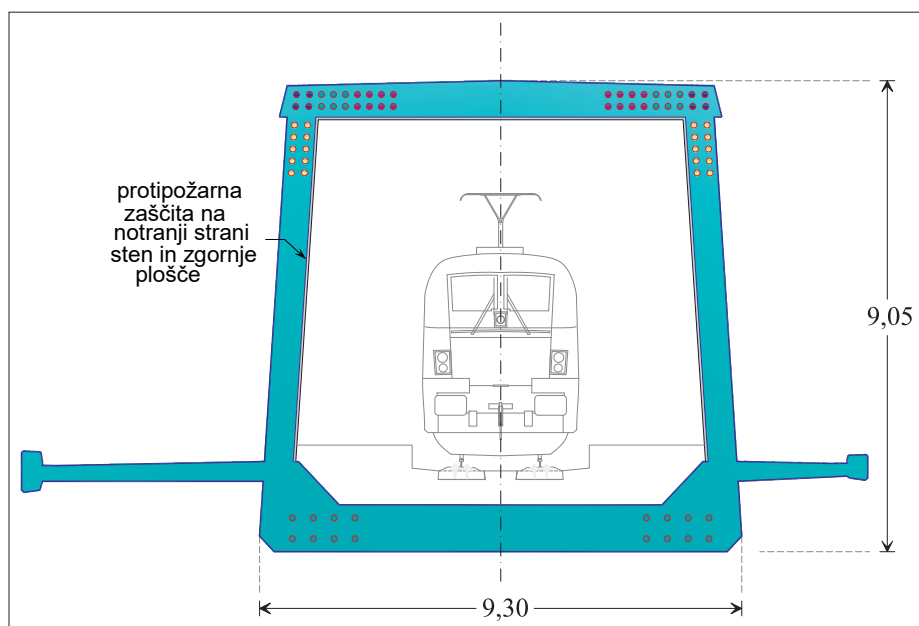
C40/50 za stebra, jeklo za armiranje B500, kablji za prednapenjanje z nazivno trdnostjo Y1860 ($f_{pk} = 186 \text{ kN/cm}^2$). V požarni analizi poleg temperaturne obtežbe upoštevamo tudi lastno in stalno obtežbo konstrukcije ter prometno obtežbo (ustrezno reducirana obtežna shema LM71, ki predstavlja statični vpliv navpične obtežbe zaradi običajnega železniškega prometa in je povzeta iz SIST EN 1991-2:2004 (SIST, 2004b)).

Na sliki 11 prikazemo karakteristični prečni prerez prekladne konstrukcije z razporeditvijo kablov. Na notranji strani obeh sten in zgornje plošče je dodatno izvedena protipožarna zaščita v obliki mikroarmiranega betona s polipropilenskimi vlakni debeline 5 cm.

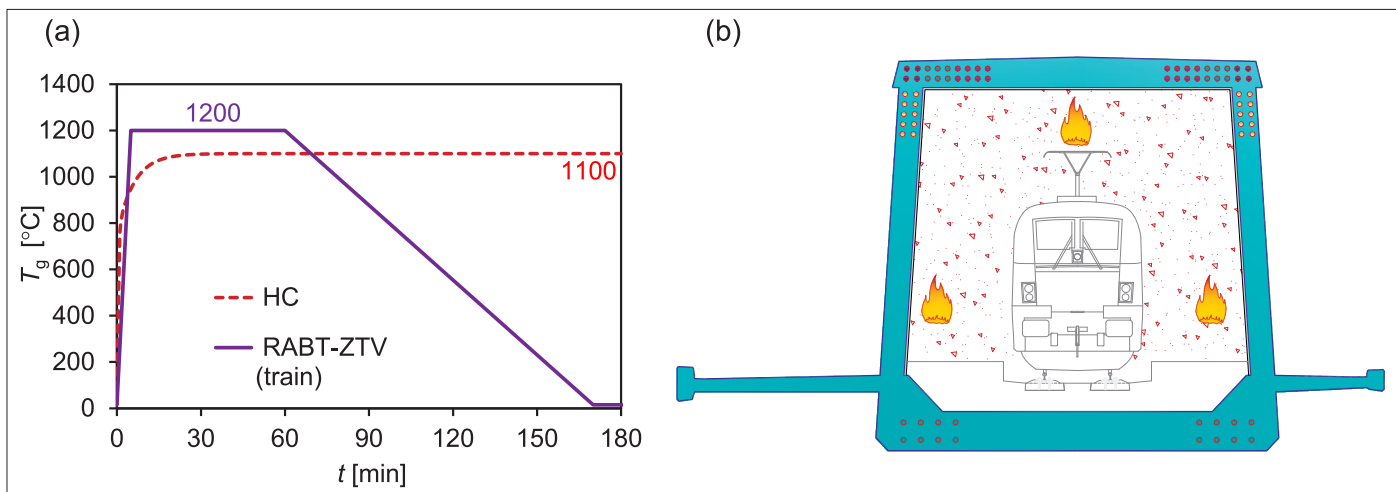
V nadaljevanju za vse tri korake projektne analize podrobneje predstavimo upoštevane predpostavke in rezultate analize.

3.1 Predviden požarni scenarij in projektni požar

V okviru določanja požarne odpornosti železniškega mostu čez Glinščico z napredno računsko metodo obravnavamo požarni scenarij, pri katerem pride do gorenja celotne vlakovne kompozicije. Pri tem predpostavimo, da se požar razširi vzdolž celotne portalne konstrukcije, kar predstavlja najbolj neugoden scenarij za obremenitev mostne konstrukcije. Intenziteto požara v notranjosti portala predstavimo na poenostavljen način, in sicer v obliki nazivne krivulje temperatura-čas, s katero podamo le časovni razvoj temperature plinov v cevi, to pomeni, da predpostavimo



Slika 11 • Karakteristični prečni prerez prekladne konstrukcije (dimenzije v metrih).



Slika 12 • (a) Upoštevan projekti požar v obliki požarne krivulje RABZ-ZTV (train), (b) Površina zgornje plošče in stene preklade je neposredno izpostavljena povišanim temperaturam.

enakomerno porazdelitev temperature plinov po požarnem prostoru. Skladno z navodili s strani naročnika upoštevamo nazivno požarno krivuljo RABZ-ZTV (train). To je nemška karakteristična požarna krivulja za železniške predore, ki je bila razvita na podlagi rezultatov testiranj v naravnem merilu v okviru več projektov (glej npr. (Fehervari, 2008)). Po tej krivulji temperatura plinov že po 5 minutah doseže 1200 °C. Najvišja temperatura se ohranja do 60. minute. Sledi faza ohlajanja, ki traja 110 minut in v kateri se temperatura plinov enakomerno zmanjšuje. Časovni razvoj temperature za to krivuljo prikazujemo na sliki 12(a) in ga primerjamo z razvojem pri ogljikovodikovi (HC) požarni krivulji, ki jo podaja standard SIST EN 1991-1-2:2004 (SIST, 2004a) in opisuje gorenje ogljikovodikov. Dodatno predpostavimo, da požarna zaščita na notranji strani zgornje plošče in sten prekladne konstrukcije v zgodnji fazi požara odpade (konservativna ocena), tako da je površina konstrukcije neposredno izpostavljena povišanim temperaturam, kot to prikazujemo na sliki 12(b). Spodnja plošča pri tem ni neposredno izpostavljena požaru.

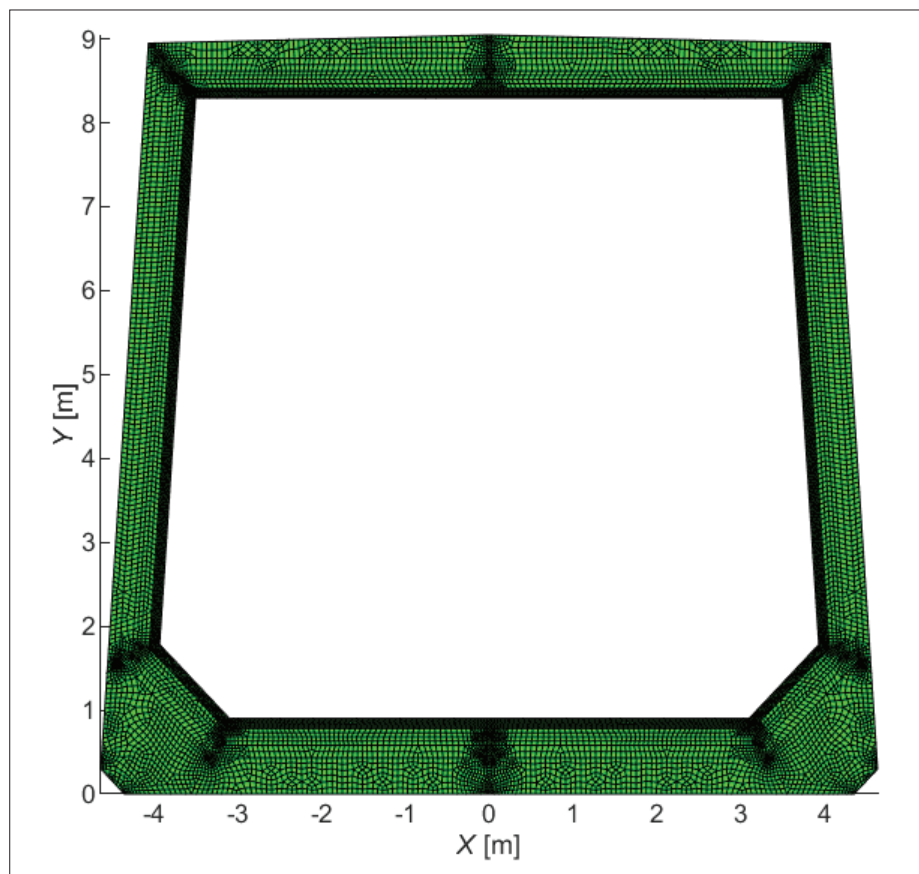
3.2 Toplotna analiza

Kljub temu da se pri požarni krivulji RABZ-ZTV (train) požarni prostor ohladi na začetno temperaturo že po 170 minutah (glej sliko 12(a)), toplotno analizo konstrukcije izvedemo za časovno obdobje 500 min., saj prenos toplote po konstrukciji poteka tudi po koncu požara.

Ob predpostavki, da se požar razširi po notranosti celotne portalne konstrukcije in je zato temperatura celotnega prostora enakomerna, se pri določanju časovne in krajevne razporeditve temperatur v prekladni konstrukciji

omejimo le na račun temperaturnega polja po karakterističnem prečnem prerezu. Pri tem uporabimo računalniški program HEATKO (Hozjan, 2009), ki deluje v programskem okolju MATLAB (MathWorks, 2016) in je bil razvit v okviru raziskovalnega dela na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani. V programu osnovno enačbo nestacionarnega prevajanja

toplote (glej izraz (1)) s pripadajočimi robnimi in začetnimi pogoji rešujemo z metodo končnih elementov. Vpliv armature in kablov na časovno spreminjanje temperatur po prečnem prerezu zanemarimo. Pri tem privzamemo, da je temperatura v armaturi/kablilih enaka temperaturi v betonu na mestu armature/kablov. V analizi upoštevamo toplotne lastnosti betona



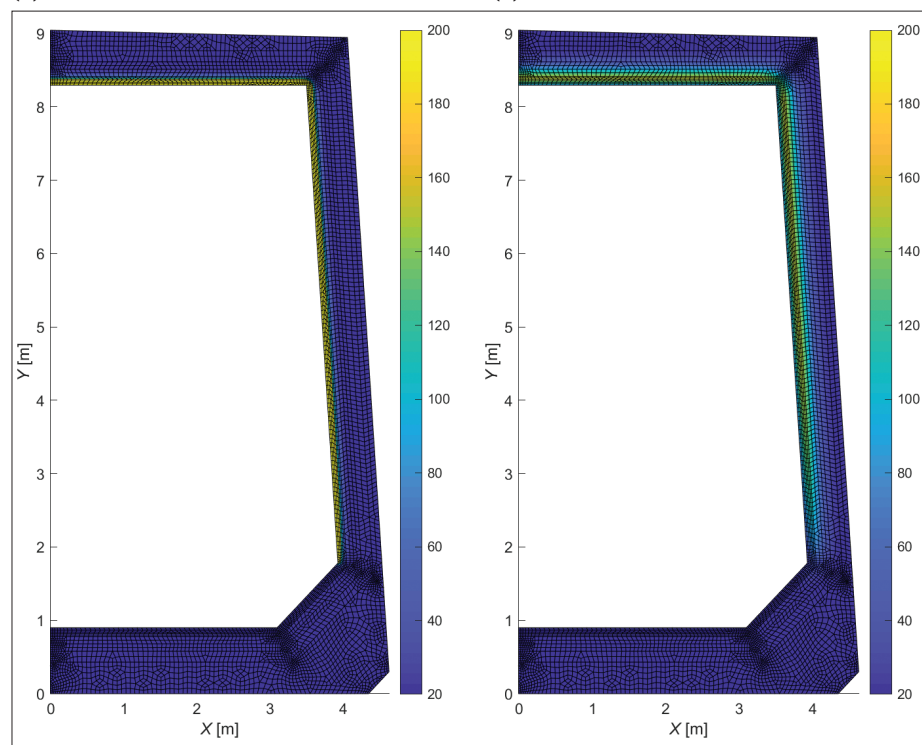
Slika 13 • Mreža končnih elementov za račun temperaturnega polja po prečnem prerezu prekladne konstrukcije v programu HEATKO (Hozjan, 2009).

(prevodnost, gostota, specifična toplota) skladno s SIST EN 1992-1-2:2005 (SIST, 2005). Ob upoštevanju simetrije polovico prečnega prereza prekladne konstrukcije modeliramo s 5356 4-vozličnimi izoparametričnimi končnimi elementi (slika 13).

3.2.1 Rezultati toplotne analize

Rezultate toplotne analize prikažemo v obliki temperaturnih polj po prečnem prerezu pri različnih časih trajanja požarne analize (glej sliko 14). Pri prikazovanju temperatur upoštevamo simetrijo.

(a) $t = 60$ min



Slika 14 • Razporeditev temperatur po prečnem prerezu prekladne konstrukcije pri različnih časih trajanja požarne analize, izračunan s programom HEATKO (Hozjan, 2009).

3.3 Mehanska analiza

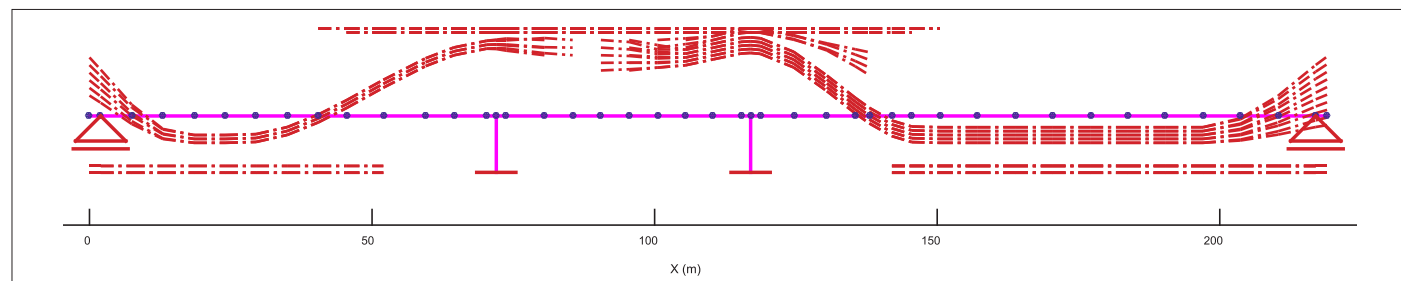
Tretji korak požarne analize izvedemo z uporabo razvitega matematičnega modela in pripadajočega računalniškega programa

NFIRA (Bratina, 2007), ki deluje v programskem okolju MATLAB (MathWorks, 2016). Uporabljeni matematični model, ki je bil razvit v okviru raziskovalnih projektov na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani, je zasnovan na Reissnerjevi teoriji linijskih nosilcev (Reissner, 1972) in omogoča upoštevanje tako materialne kot geometrijske nelinearnosti. Pri izpeljavi modela so bile upoštevane naslednje bistvene predpostavke: ravninsko deformiranje konstrukcije, znana Bernoullijeva predpostavka o ravnih prečnih

štrevane so temperaturno odvisne lastnosti materialov ter aditivni razcep geometrijske deformacije, armaturne palice in kabli so ves čas trajanja požarne analize polno povezani z betonom, vpliv prednapetja je upoštevan na poenostavljen način, in sicer z nadomestno točkovno (npr. na obeh koncih) oziroma linijsko obtežbo (vzdolž kabelske linije), poljubna kratkotrajna statična obtežba deluje v ravnini deformiranja nosilca. Primernost in natančnost uporabljene napredne računske metode za analizo mehanskega odziva ojačanih konstrukcij na sočasen vpliv statične in požarne obtežbe je bila že večkrat preverjena in potrjena s primerjavo računskih rezultatov z rezultati dobro dokumentiranih eksperimentov v literaturi ((Bratina, 2007), (Pečenko, 2019)).

Mostno konstrukcijo modeliramo s 45 linijskimi končnimi elementi. Pri tem prekladno konstrukcijo modeliramo s 43 elementi (najkrajši ima dolžino 1,75 m, najdaljši pa 7,5 m), vsak stebler pa s po enim elementom. Celotna dolžina idealiziranega modela znaša 219 m. Stebra toga vpneemo v podlago, prekladno konstrukcijo pa na obeh koncih podpremo vrtljivo pomično. Idealiziran računski model mostne konstrukcije prikazujemo na sliki 15. Škatlasta prekladna konstrukcija je naknadno prednapeta s 94 kabli, ki so simetrično razporejeni po prečnem prerezu. Od tega je 26 ravnih kablov v spodnji plošči, 28 ravnih kablov se nahaja v zgornji plošči, 20 ukrivljenih kablov pa poteka v stenah škatlastega prereza preklade. Nobeden izmed kablov ne poteka po celotni dolžini prekladne konstrukcije. Njihova razporeditev je shematsko prikazana na sliki 15. Pred začetkom analize upoštevamo, da je napetost v posameznem kablju konstantna. Vrednosti povzamemo iz projektne dokumentacije in so od $\sigma_{p,1} = 112,5$ do 120 kN/cm². Vsi kabli imajo enak prečni prerez, ki je $A_{p,1} = 28,5$ cm².

Glede razporeditve in količine vzdolžne armature v prekladi upoštevamo dve različni



Slika 15 • Idealiziran računski model mostne konstrukcije s shematskim prikazom poteka kablov vzdolž preklade, povzet iz programa NFIRA (Bratina, 2007).



V analizi poleg napetostno odvisnih mehanskih deformacij ε_{σ} skladno s priporočili iz SIST EN 1992-1-2:2005 (SIST, 2005) ter tuje dostopne literature upoštevamo tudi temperaturne deformacije ε_{tvr} , viskozne deformacije zaradi leženja betona $\varepsilon_{\text{cr,c}}$ oziroma viskozne deformacije jekla $\varepsilon_{\text{cr,s(p)}}$ in prehodne deformacije betona $\varepsilon_{\text{tr,c}}$. Zvezo med njimi določa že omenjeni aditivni razcep geometrijske deformacije materialnega vlakna, in sicer:

$$\text{kabli: } \varepsilon_p = \varepsilon_{\sigma p} + \varepsilon_{th p} + \varepsilon_{cr p}. \quad (4)$$

Temperaturne deformacije ϵ_{th} betona in jekla za armiranje oziroma jekla za prednapenjanje upoštevamo skladno s SIST EN 1992-1-2:2005 (SIST, 2005). Predpostavimo, da so temperaturne deformacije med ohlajanjem v celoti povrnejo.

Deformacija lezenja betona pri povišanih temperaturah $\varepsilon_{cr,c}$ je v splošnem odvisna od nivoja napetosti, časa in temperature. V okviru predstavljenega matematičnega modela upoštevamo lezenje betona skladno z modelom po Harmathyju (Harmathy, 1993):

$$\varepsilon_{cr,c} = \beta_1 \frac{\sigma_c}{f_{cT}} \sqrt{t} \cdot e^{d(T-293)}. \quad (5)$$

V izrazu (5) je σ_c napetost, t čas, f_{ct} pa tlačna trdnost betona pri povišani temperaturi T . Parametra β_1 in d sta empirični konstanti materiala in ju določimo z metodo najmanjših kvadratov glede na rezultate meritev lezenja, ki jih je podal Cruz (Cruz, 1968). Model uporabimo tako v fazi segrevanja kot v fazi ohlajanja betona.

Slika 16 • Ukazno okno iz programa NFIRA (Bratina, 2007), s pomočjo katerega podajamo ustrezno prilagojeno geometrijo: (a) prečnega prereza prekladne konstrukcije s prvo shemo razporeditve armature (prevladuje armatura v spodnji plošči) oziroma (b) stebra.

shemi razporeditve: pri prvi shemi prevladuje armatura v spodnji plošči preklade (na dolžini od 0 do 52 m in od 142 do 219 m), pri drugi shemi pa v zgornji plošči (od 52 do 142 m). V obeh stebrih upoštevamo enako razporeditev navpične armature. Na sliki 16 prikazujemo ukazno okno iz programa NFIRA (Bratina, 2007), s pomočjo katerega podamo ustrezno prilagojeno geometrijo prečnega prereza. Na sliki 16(a) so prikazani podatki za prečni prerez preklade s prvo shemo razporeditve armature, na sliki 16(b) pa za prečni prerez stebra. Pri vseh

prerezih je upoštevana simetrija glede na navpično os.

V prečnih prerezih, prikazanih na sliki 16, rdeči krogi predstavljajo posamezno oziroma skupino vzdolžnih armaturnih palic, modri krogi pa so integracijske točke, ki jih uporabimo pri numeričnem računu rezultante tlačnih napetosti po površini betonskega prereza. Za zagotovitev zadostne natančnosti računa prečni prerez razdelimo na ustrezno število lamel. Pri računu prispevkov armature in kablov le-te obravnavamo točkovno.

Viskozneza lezenja jekla za armiranje oziroma jekla za prednapenjanje pa v analizi ne upoštevamo, saj se izkaže, da temperature v armaturi oziroma kablilih ne presežejo 400 °C.

Za določitev prispevka prehodnih deformacij v betonu uporabimo model, ki ga je predstavil Anderberg s sodelavci (Anderberg, 1976). Skladno s tem modelom prehodne deformacije betona izračunamo s pomočjo naslednjih dveh empiričnih izrazov:

$$\epsilon_{tr,c} = k_2 \frac{\sigma_c}{f_{ck}} \epsilon_{th,c} \quad \text{za } T \leq 550 \text{ °C}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial \epsilon_{tr,c}}{\partial T} = 0.0001 \frac{\sigma_c}{f_{ck}} \quad \text{za } T > 550 \text{ °C}, \quad (7)$$

kjer je k_2 parameter materiala. V analizi za k_2 izberemo vrednost 2,0. Prehodne deformacije so nepovratne.

V nadaljevanju prikažemo rezultate mehanskega odziva mostne konstrukcije pri sočasnem delovanju statične in požarne obtežbe, pri katerem se temperatura plinov v škati prekladne konstrukcije spreminja skladno s požarno krivuljo RABT-ZTV (train).

3.3.2 Rezultati mehanske analize

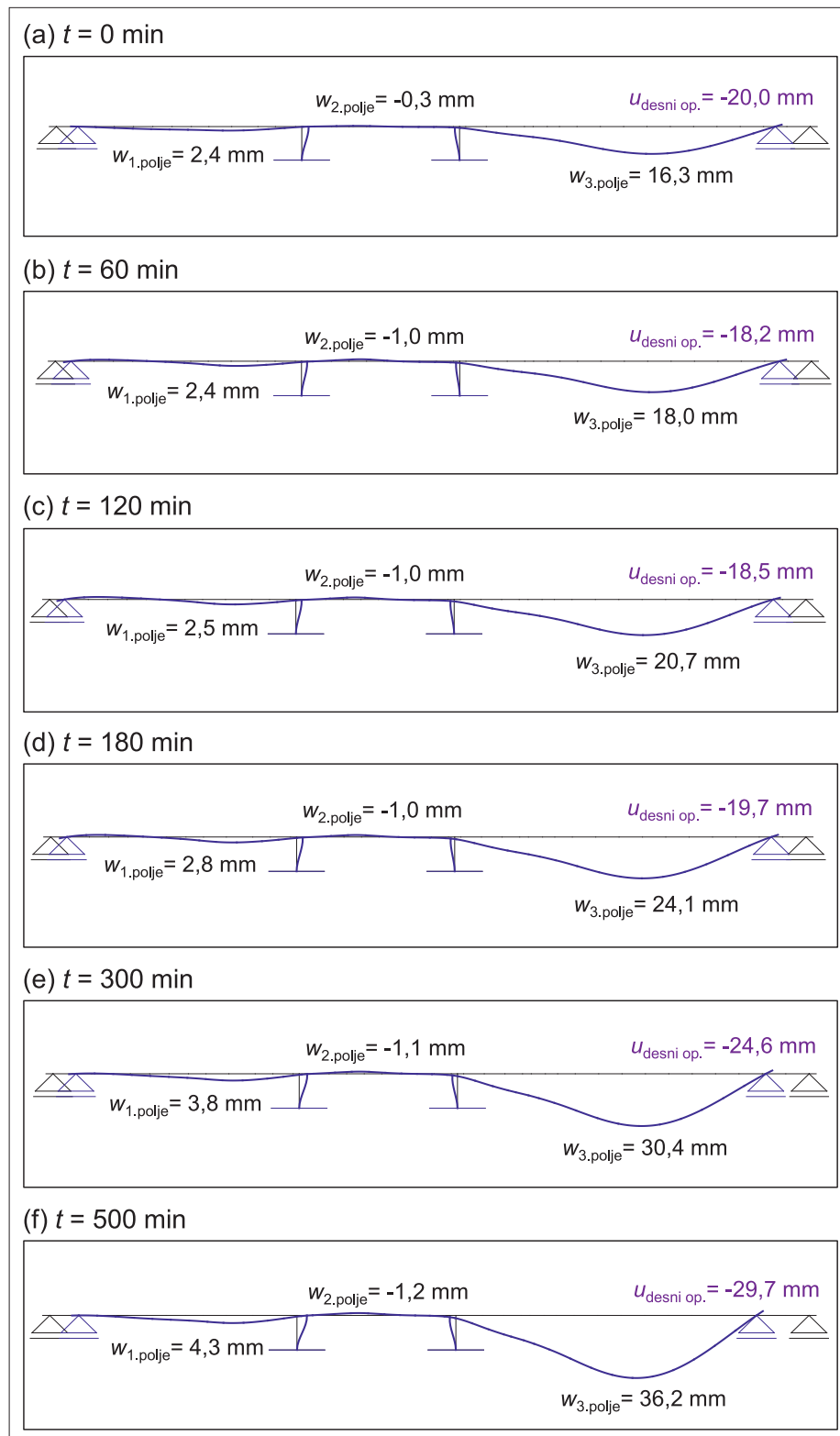
Na sliki 17 prikazujemo deformiranje mostne konstrukcije pri različnih časih trajanja požarne analize. Naj pri tem omenimo, da se skladno z RABT-ZTV požarno krivuljo prostor že po 170 minutah ohladi za začetnih 20 °C (glej sliko 12(a)). Pri vsakem času je pripisan navpični pomik preklade v posameznem polju ($w_{1,polje}$ pri $x = 45,5$ m, $w_{2,polje}$ pri $x = 90,5$ m, $w_{3,polje}$ pri $x = 177,1$ m) oziroma vodoravni pomik preklade ob desnem krajnem oporniku ($u_{desni op.}$ pri $x = 217$ m).

Ugotovimo, da konstrukcija »preživi« požar. Največje računske pomike konstrukcije zaznamo v tretjem polju, ki ima tudi največjo razpetino. Po 500 minutah analize je računski pomik $w_{3,polje}$ 2,2-krat večji kot pred nastopom požara in se počasi stabilizira, čeprav je temperatura v notranjosti zaprte prekladne konstrukcije že po 170 minutah enaka začetni temperaturi 20 °C. To nazorno prikazuje tudi slika 18, na kateri so prikazani časovni razvoji navpičnih pomikov v vseh treh poljih preklade. Povečevanje pomikov je najverjetneje posledica velike masivnosti prekladne konstrukcije in njenega počasnega ohlajanja. Sicer so navpični pomiki v prvem in drugem polju preklade ves čas trajanja požarne analize precej manjši od 1 cm.

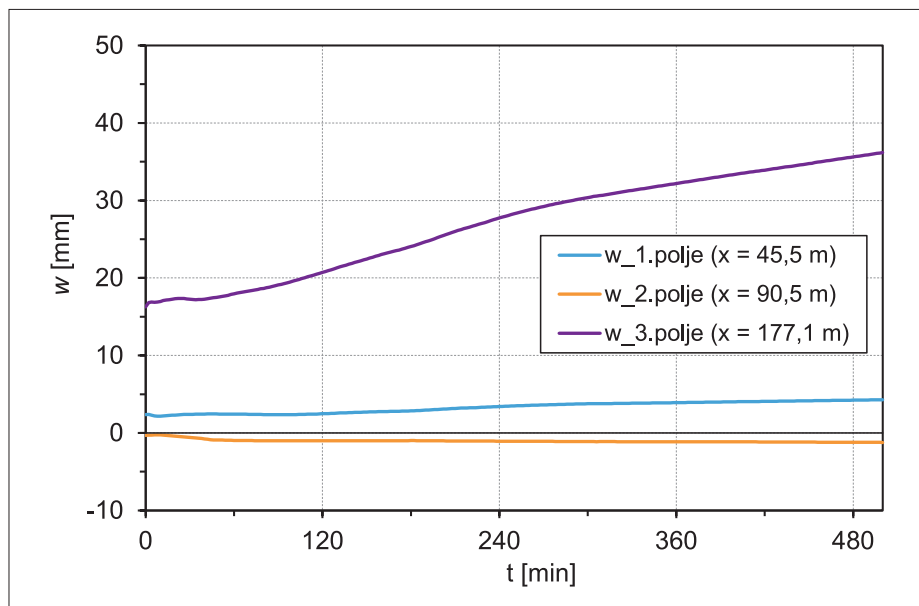
Relativno majhne spremembe deformiranja konstrukcije med obravnavano požarno analizo so posledica zelo majhnih temperaturnih sprememb v kablilih, ki se nahajajo dovolj

globoko v betonu, tako da požarna obtežba nima pomembnega vpliva na stopnjo prednapetja prekladne konstrukcije. To je razvidno s slik 19(b) do (d), ki prikazujejo

časovni razvoj temperatur T_p in napetosti σ_p v toplotno najbolj obremenjenih kablilih v zgornji plošči oziroma v steni preklade, medtem ko slika 19(a) prikazuje stanje v



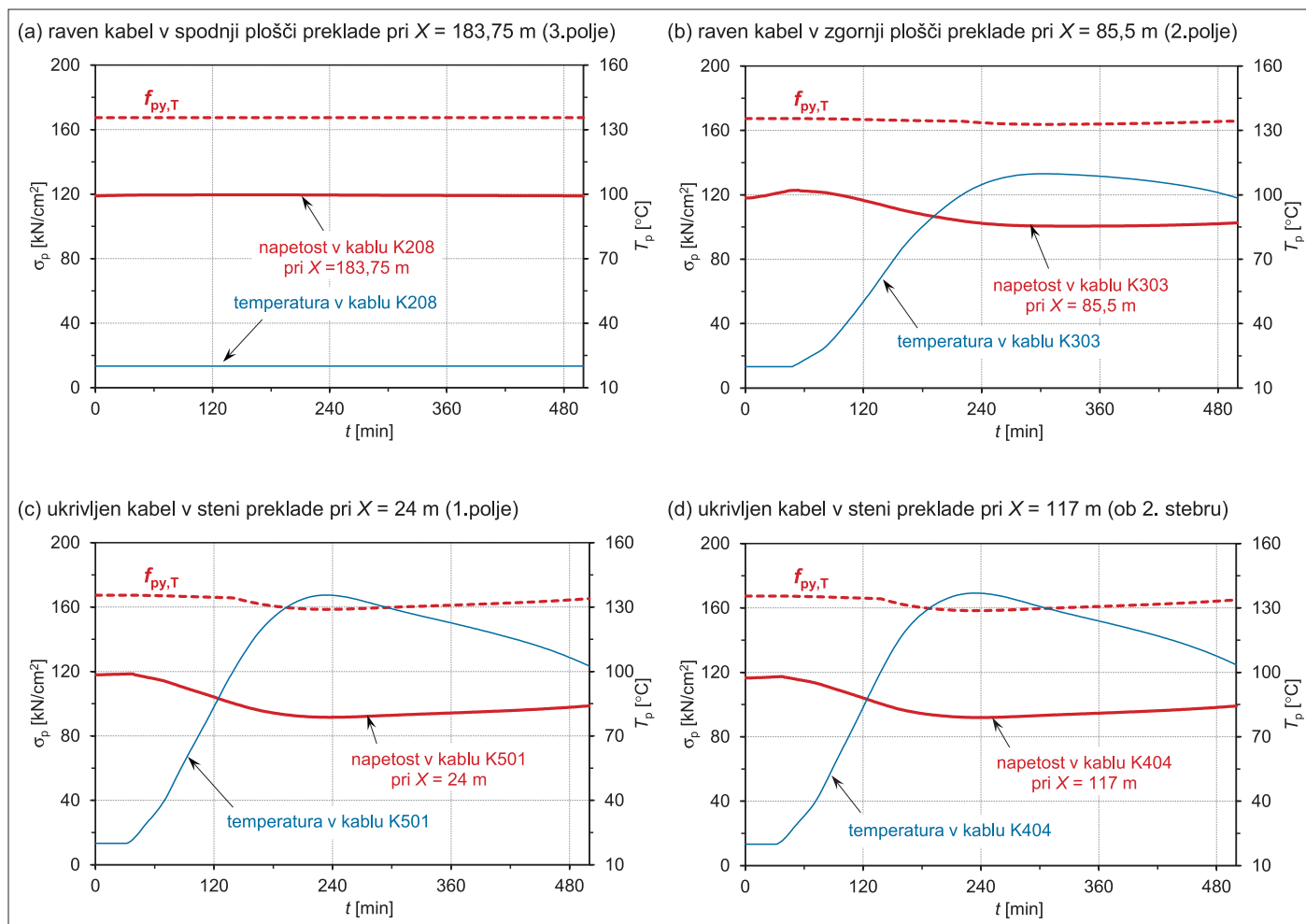
Slika 17 • Deformiranje mostne konstrukcije pri različnih trajanjih požarne analize v primeru izpostavljenosti požaru skladno z požarno krivuljo RABT-ZTV (train). Pomiki so 500-krat povečani.



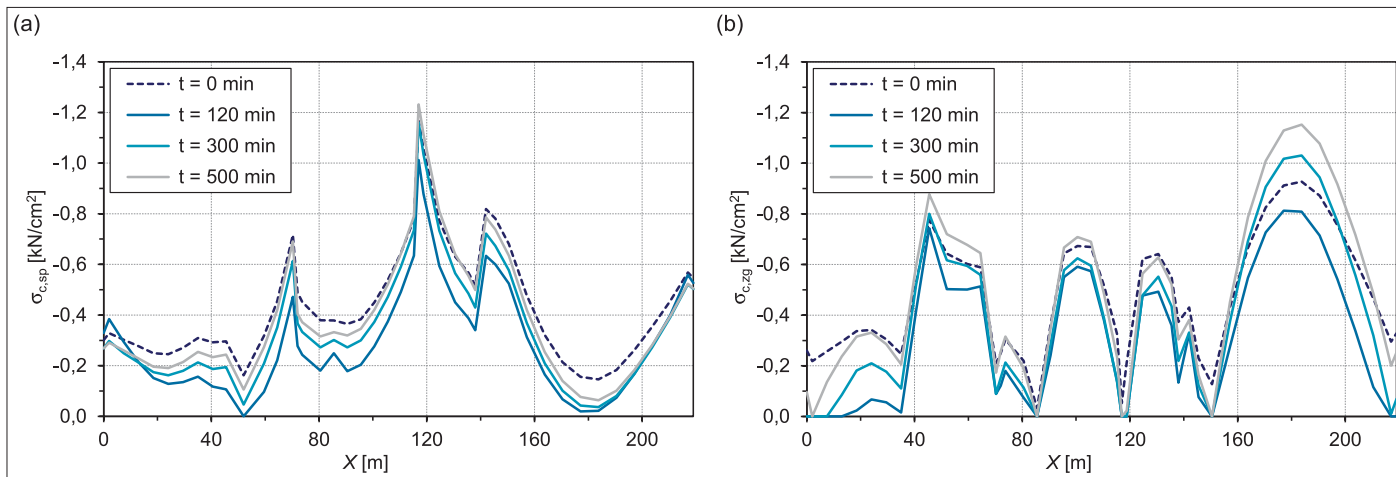
Slika 18 • Časovni razvoj navpičnih pomikov v poljih prekladne konstrukcije.

ravnem kablju v spodnji plošči, ki požaru ni neposredno izpostavljen. Ugotovimo, da pride med požarno analizo le do manjših sprememb napetosti v kablji. Dodatno ugotovimo, da so napetosti v kablji ves čas trajanja požarne analize precej manjše od pripadajoče temperaturno odvisne največje napetosti oz. trdnosti $f_{py,T}$.

Zgoraj podani ugotovitvi pritrjuje tudi slika 20, ki prikazuje razvoj tlačnih napetosti v betonu na spodnji oziroma zgornji površini v osi škatlastega prečnega prereza vzdolž prekladne konstrukcije pri različnih trajanjih požarne analize. Med požarno analizo se natezne obremenitve v betonu pojavijo le na omejenih območjih vzdolž preklade, to je tam, kjer so napetosti $\sigma_c = 0 \text{ kN/cm}^2$. Tlačne napetosti pa le na dveh območjih presežejo vrednost $1,0 \text{ kN/cm}^2$ ($20\% f_{ck}$), in sicer na spodnjem robu prečnega prereza ob drugem stebri oziroma na zgornjem robu prečnega prereza v tretjem polju prekladne konstrukcije.



Slika 19 • Časovni razvoj temperatur in napetosti v izbranih kablji v prekladni konstrukciji.



Slika 20 • Razvoj tlačnih napetosti v betonu na: (a) spodnji oziroma (b) zgornji površini v osi škatlastega prečnega prereza vzdolž prekladne konstrukcije pri različnih trajanjih požarne analize.

4 • SKLEP

S pomočjo napredne računske metode skladno z Evrokodi smo ocenili požarno odpornost železniškega mostu čez Glinščico v sklopu izgradnje drugega tira Divača–Koper. Projektno požarno analizo smo izvedli v treh korakih: v prvem koraku smo določili

ustrezni projektni potek požara, v drugem koraku smo izračunali razvoj temperaturnega polja po prekladni konstrukciji, v zadnjem koraku pa smo izračunali mehanski odziv konstrukcije, sočasno izpostavljene statični in požarni obtežbi. Za drugi in tretji korak

projektne analize smo uporabili računalniška programa HEATKO in NFIRA, ki sta bila razvita na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani. Rezultati projektne požarne analize so pokazali, da je konstrukcija sposobna sočasno prevzeti statično in požarno obremenitev v primeru izpostavljenosti požaru skladno s požarno krivuljo RABT-ZTV (train).

5 • ZAHVALA

Predstavljeni rezultati so pridobljeni v okviru Projektne naloge KM-Poz-06/20, izdelane na UL FGG, za kar se projektantu, podjetju Projektiranje in inženiring KO-BIRO, d. o. o., in

naročniku 2TDK, d. o. o., iskreno zahvaljujemo. V analizi so bili uporabljeni matematični modeli in pripadajoči računalniški programi, ki so nastali v sklopu dela programskih

skupin Gradbene konstrukcije in gradbena fizika (P2-0158) ter Mehanika konstrukcij (P2-0260), ki ju financira Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije. Za finančno pomoč se ji iskreno zahvaljujemo.

6 • LITERATURA

- Anderberg, Y., Thelandersson, S., Stress and deformation characteristics of concrete at high temperatures, 2. Experimental investigation and material behaviour model, Lund Institute of Tehnology, Sweden, 1976.
- Aguado, J., Albero, V., Espinos, A., Hospitaler, A., & Romero, M., A 3D finite element model for predicting the fire behaviour of hollow-core slabs, Engineering Structures, 108, 12–27, 2016.
- Bratina, S., Odziv armiranobetonskih linijskih konstrukcij na požarno obtežbo, Doktorska disertacija, FGG, Univerza v Ljubljani, 2003.
- Bratina, S., Planinc, I., NFIRA (Nonlinear FIRE Anaysis) - program za nelinearno analizo odziva betonskih konstrukcij med požarom, FGG, Univerza v Ljubljani, 2007.
- Bratina, S., Saje, M., Planinc, I., The effects of different strain contributions on the response of RC beams in fire, Engineering Structures, 29(3), 418–430, 2007.
- Bratina, S., Hozjan, T., Ocena požarne odpornosti železniškega portala (mostu) za prečkanje doline Glinščice z uporabo naprednih metod, Projektna naloga KM-Poz-06/20, Projektiranje in inženiring KO-BIRO d.o.o., 2020.
- Cai, J., Burgess, I., Plank, R., A generalised steel/reinforced concrete beam-column element model for fire conditions, Engineering Structures, 25(6), 817–833, 2003.

- Cruz, C.R., Apparatus for measuring creep of concrete at high temperatures, *Journal of the PCA Research and Development Laboratories*, 10(3), 36–42, 1968.
- Ellobody, E., Advanced analysis of prestressed hollow core concrete slabs exposed to different fires, *Advances in Structural Engineering*, 17(9), 1281–1298, 2014.
- Fehervari, S., Characteristics of tunnel fires, *Concrete Structures*, 56–60, 2008.
- FDS, Fire Dynamics Simulator (FDS) and Smokeview (SMV), http://code.google.com/p/fds-smv/wiki/Downloads_Overview?tm=2, 2016.
- Harmathy, T.Z., A comprehensive creep model, *Journal of Basic Engineering*, 89, 496–502, 1967.
- Harmathy T.Z., *Fire Safety Design and Concrete*, London: Longman, 1993.
- Hozjan, T., HEATKO – program za 2D analizo prevajanja toplote po mediju, FGG, Univerza v Ljubljani, 2009.
- Huang, Z., Platten, A., Nonlinear finite element analysis of planar reinforced concrete members subjected to fires, *ACI Structural Journal*, 94(3), 272–282, 1997.
- Majorana, C.E., Salomoni, V.A., Mazzucco, G., Khoury, G.A., An approach for modelling concrete spalling in finite strain, *Mathematics and Computers in Simulation*, 80, 1694–1712, 2010.
- MathWorks, MATLAB R2016b, The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, United States, 2016.
- Özişik, M.N., *Heat Transfer: A Basic Approach*, McGraw-Hill, New York, 1985.
- Pečenko, R., Hozjan, T., Planinc, I., Bratina, S., A computational model for prestressed concrete hollow-core slab under natural fire, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 2019.
- Reissner, E., On one-dimensional finite-strain beam theory: The plane problem, *Journal of Applied Mathematics and Physics (ZAMP)*, 23, 795–804, 1972.
- Savov K., Lackner R., Mang H.A., Stability assessment of shallow tunnels subjected to fire load, *Fire Safety Journal*, 40, 745–763, 2005.
- SIST, SIST EN 1991-1-2: 2004, Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije – Del 1-2: Splošni vplivi – Vplivi na konstrukcije, izpostavljene požaru, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2004a.
- SIST, SIST EN 1991-2: 2004, Evrokod 1: Osnove projektiranja in vplivi na konstrukcije – 2. del: Prometna obtežba mostov, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2004b.
- SIST, SIST EN 1992-1-2: 2005, Evrokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcij – Del 1-2: Splošna pravila – Projektiranje požarnovarnih konstrukcij, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2005.
- Tan, K.H., Ting, S.K., Huang, Z.F., Visco-elasto-plastic analysis of steel frames in fire, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 128 (1), 105–114, 2002.
- Zeiml, M., Lackner, R., Mang, H.A., Experimental insight into spalling behavior of concrete tunnel linings under fire loading, *Acta Geotechnica*, 3, 295–308, 2008.



Sporočilo za javnost

Izboljšanje kakovosti bivalnih prostorov z aktivnimi notranjimi barvami in premazi

16. 2. in 25. 2. 2021, strokovni spletni seminar

V Ljubljani, 9. marca 2021: Slovensko združenje za trajnostno gradnjo GBC Slovenija je 16. in 25. februarja organiziralo prva letošnja spletna seminarja na temo kakovosti bivanja in trajnostnega vrednotenja notranjih prostorov, kar bo tudi rdeča nit izobraževanj, ki jih v prihodnje pripravljajo za različne deležnike. V sodelovanju z družbo JUB so udeležencem tokrat predstavili aktivne notranje barve in premaze, ki v notranjih prostorih pomembno izboljšujejo bivalno klimo. Obravnavali so problematiko čezmerne vlažnosti na zidnih površinah, kjer se pojavljajo plesen ter težave z razraščanjem bakterij in virusov, uravnavanje vlage v notranjih prostorih, notranjo izolacijo sten s tankoslojnimi sistemi ter predstavili materiale za reševanje preobčutljivosti in alergij na konzervanse. Posebno pozornost so posvetili rešitvam za zagotavljanje zdravih notranjih razmer, ki omogočajo nevtralizacijo škodljivih vplivov vgrajenih gradbenih materialov oziroma elementov stanovanjske opreme, kot so talne obloge in pohištvo. Seminarja je spremljalo več kot 80 udeležencev, namenjena pa sta bila arhitektom, projektantom, investitorjem, upravnikom večstanovanjskih stavb, uslužbencem ministrstev in javnih zavodov ter drugi zainteresirani javnosti. Udeleženci, ki so člani IZS in ZAPS, so za izobraževanje pridobili tudi kreditne točke.

Dr. Iztok Kamenski je kot predsednik UO GBC Slovenija uvodoma navedel, da bodo v združenju za razliko od lani, ko so se prvenstveno



Slika 1 • Dr. Iztok Kamenski, predsednik UO GBC Slovenija.

posvečali trajnostni gradnji, energetski prenovi ter toplotnim ovojem stavb, letos pripravili serijo izobraževanj na temo kakovosti bivalnih prostorov: »Naš fokus bo celostno usmerjen v toplotno, akustično in vizualno ugodje ter v kakovost zraka v notranjih prostorih, saj imajo vsi ti dejavniki velik vpliv na zdravje in dobro počutje uporabnikov. Odprli bomo tudi temo standardizacije in testiranja notranjih materialov ter se podrobneje posvetili še požarni varnosti v notranjih prostorih. Prvi dve predavanji namenjamo prednostim obdelave notranjih površin z aktivnimi barvami ter premazi, ki so zdravju in okolju prijazni ter uporabnikom izboljšujejo kakovost bivanja. Tokrat smo se povezali z družbo JUB, ki je razvila in letos predstavlja trgu nove inovativne izdelke, ki notranje zidne površine učinkovito zaščitijo

pred virusi, bakterijami in plesnijo ter s svojimi lastnostmi nevtralizirajo škodljive vplive drugih vgrajenih materialov ali opreme v prostoru.«

Udeležencem so najprej predstavili družbo JUB kot trajnostno podjetje, ki svoj razvoj gradi na štirih gradnikih: razvoju energijsko učinkovitih izdelkov in rešitev, ki uporabnikom izboljšujejo ugodje bivanja, vključevanju v krožno gospodarstvo pri uporabi surovin, varovanju narave ter odgovornemu odnosu do okolja, družbe in zaposlenih. Načela trajnostnega razvoja uresničujejo pri razvoju vseh blagovnih skupin, pozornost pa še posebej namenjajo notranji dekoraciji z notranjimi zidnimi barvami in izravnalnimi masami, dekorativnimi izdelki in fasadnimi sistemi. Njihovi izdelki so okolju in uporabniku prijazni, kar dokazujejo s številnimi pridobljenimi certifikati. Da bi uporabnikom zagotavljali barvit, zdrav, varen in energetsko učinkovit bivanjski prostor, so poleg učinkovitih sistemov za izolacijo stavb razvili še aktivne notranje barve, ki jih ponujajo v segmentu Wellbeing in s katerimi želijo v ospredje postaviti zlasti pomen varstva zdravja ljudi in njihovega dobrega počutja. Vsi izdelki za notranjo obdelavo površin so za potrebe projektiranja vključeni tudi v knjižnice BIM.

V družbi JUB poudarjajo, da je izbira materialov za stavbe, v katerih bivamo, zelo pomembna, kar še posebej velja za zaključne sloje v notranjih prostorih. Poleg skrbne izbire surovin, ki jih uporabljajo pri proizvodnji barv in premazov, v JUB-u veliko pozornost posve-



Slika 2 • Interjer-kakovost bivanja.

čajo njihovemu testiranju na osnovi veljavnih standardov, da z njimi dokazujejo njihovo kakovost, izvajajo pa jih JUB-ovi strokovnjaki v laboratorijih Tehnološko-raziskovalnega centra. Tako so udeleženci seminarja lahko neposredno spremljali, kako pri barvah in premazih preverjajo njihove lastnosti, kot so paroprepustnost, odpornost proti mokremu drgnjenju, oprijem na podlago in pokrivnost, ter kako določajo barvi sijajni ali mat videz.

Predavanja so se osredotočala zlasti na načine in postopke, kako se v notranjih prostorih, tako bivanjskih kot poslovnih in industrijskih, izogniti plesnim, bakterijam in virusom na zidnih površinah ter toplotnim mostovom in zaščiti problematičnih notranjih stenskih površin v slabo izoliranih ali vlagi bolj izpostavljenih stavbah. Ker ima tudi kakovost zraka velik vpliv na zdravje in dobro počutje uporabnikov,

so JUB-ovi strokovnjaki za ključno izpostavili izbiro primernih materialov skozi prizmo mehanizmov delovanja in njihove učinkovitosti ter načinom njihovega vzdrževanja in nanašanja na stenske površine. Med izdelki so predstavili prednosti visokoparoprepustnih notranjih barv, kot sta barvi JUPOL Bio apnena in JUPOL Bio silicate, ki rešujeta težave uporabnikov s preobčutljivostjo ali alergijami, saj ne vsebujeja konzervansov. Predstavili so tudi silikatno barvo JUPOL Klima control, ki učinkovito veže škodljiv formaldehid, ter visokopokrívno barvo JUPOL Eco premium, ki s certifikatom Ecolabel izpolnjuje visoke okoljske standarde. Poleg sistema Thermo, ki je namenjen notranji izolaciji zidnih površin, so predstavili še najnovejšo notranjo zidno barvo JUPOL Antimicrob, ki aktivno preprečuje razvoj mikroorganizmov in v prostoru ustvarja ugodno bivalno klimo.

Slednja je tudi dobitnica pečata Izbran produkt leta 2021, z njeno uporabo pa bodo uporabniki uspešno reševali tudi številne izzive, ki jih je v naše domove prinesla aktualna epidemija koronavirusne bolezni 19. Predavanja so iz družbe JUB prispevali mag. Vojka Kos, Aleksandra Vilfan, mag. Simona Sojar, dr. Janez Orehek, Eva Štangl in dr. Iztok Kamenski kot vodja JUB Akademije.

Združenje za trajnostno gradnjo GBC Slovenija je podrobno predstavilo tudi eno od shem, po kateri poteka trajnostno vrednotenje tako obstoječih kot novih stavb. To je certifikacijska shema nemškega združenja za trajnostno gradnjo DGNB, ki z verzijo 2020 že predstavlja dopolnjena merila za vrednotenje zgradb. Mag. Iva Verbnik je v dveh predavanjih predstavila pristope k ocenjevanju kakovosti bivalnih prostorov z vidika posameznih kriterijev, kot so toplotno, zvočno in vizualno udobje v prostoru, kakovost notranjega zraka, vloga uporabnika pri njihovem upravljanju, varnost in zaščita, kakovostna povezava zunanjega z notranjim prostorom ter uporabnost za vse skupine prebivalcev. Vsi naštetí so namreč osnovni pokazatelji za ocenjevanje bivalnega ugodja, ki jih bo upoštevalo vrednotenje notranjih prostorov za pridobitev certifikata DGNB za interjer. Pridobljen certifikat bo za bivalne prostore veljal 10 in za poslovne 5 let, pri kasnejšem recertificiranju pa bo treba presojevalcu predložiti vsa dokazila o izvedenih izboljšavah. DGNB, ki si želi v trajnostno vrednotenje vključiti čim več stavb in prostorov različnih namembnosti, bo investitorjem tudi za notranje prostore dodeljeval certifikate z bronasto, srebrno, zlato in platinasto stopnjo.

Kratki povzetki vsebin predavanj so na voljo na www.gbc-slovenia.si.

Miša Hrovat, agencija MAGA

Fotografije: arhiv GBC in JUB



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



Sporočilo za javnost

Zvočna izolacija in akustično udobje

25. 3. 2021, strokovni spletni seminar

V Ljubljani, 12. aprila 2021: **Slovensko združenje za trajnostno gradnjo GBC Slovenija** je na temo kakovosti bivanja konec marca izvedlo že tretji letošnji spletni seminar, ki ga je tokrat posvetilo kakovostni zvočni izolaciji in akustičnemu udobju v notranjih prostorih. Zanimiva predavanja o pomenu akustike v prostorih je spremljalo 110 udeležencev, zlasti arhitektov, projektantov in upravnikov večstanovanjskih stavb, prispevali pa so jih strokovnjaki za akustiko s Fakultete za strojništvo Univerze v Ljubljani ter predstavniki podjetij Knauf Insulation, Xella porobeton, Wienerberger in poljskega podjetja Nowy Styl. Udeleženci, člani IZS in ZAPS, so za izobraževanje pridobili tudi kreditne točke.

V prostorih, ki so slabo zvočno izolirani, lahko hrup pomembno vpliva na naše delo in s tem tudi na našo storilnost. Izpostavljeni smo mu na delovnih mestih in v bivanjskih prostorih, s hrupom pa je praktično obremenjen že vsak drugi Evropejec. Da ima hrup velik vpliv na naše zdravje, kažejo tudi izsledki raziskav, ki ga skupaj s slabo akustiko v pisarnah uvrščajo na sam vrh lestvice nezadovoljstva zaposlenih. V stavbah, kjer je akustika pri oblikovanju prostorov postavljena na visoko mesto, načrtovalci v ospredje postavljajo ne le kakovost življenja, pač pa tudi produktivnost vseh njihovih uporabnikov. Vsaka država sicer predpisuje mejne vrednosti hrupa, ki so dovoljene v posameznih vrstah stavb in v posameznih prostorih, a to še ni jamstvo, da bo objekt zagotavljal uporabnikom tudi ustrezno akustično udobje. Tako imamo pri nas minimalne dovoljene ravni hrupa predpisane v Pravilniku o zaščiti pred hrupom v stavbi, v

Tehnični smernici ter v Uredbi o mejnih vrednostih kazalcev hrupa v okolju. Da je zvočno udobje v stavbah mogoče zagotoviti s premišljenim akustičnim oblikovanjem prostorov ter z uporabo ustreznih absorpcijskih materialov, ki ne odbijajo zvoka v prostoru, je na srečanju uvodoma poudaril tudi **dr. Izток Kamenski**, predsednik UO združenja za trajnostno gradnjo GBC Slovenija, zato bo doseganju akustičnega udobja v prihodnje potrebno posvečati vse več pozornosti.

O tem, kako močno orodje je akustika za načrtovalce prostorov, da lahko z njo oplemenitijo arhitekturo objektov, je predaval inženir akustike **Maro Puljizevič** iz podjetja **Knauf Insulation**. Arhitekti morajo vedeti, kakšno akustično sporočilo želijo pustiti končnim obiskovalcem, pa naj gre za muzej, pisarno, konferenčno dvorano, bolniško sobo ali športni objekt. Pri projektiranju je pomembna izbira primernih materialov, zato lahko arhitekti izkoristijo prednosti naravne izolacije, kot je mineralna volna, ki v primerjavi z betonom, steklom in lesom zagotavlja boljšo absorpcijo zvoka in je izolator že sama po sebi. Opozoril je tudi na klasično napako, ki jo za preprečevanje hrupa v notranjih prostorih pogosto naredijo uporabniki z lepljenjem suhomontažnih plošč direktno na stene prostora, ne da bi poprej nanjo namestili mineralno volno. Dobri akustični pogoji povečujejo stopnjo akustičnega udobja, zato je akustika tudi neizbežen del zelenih certifikatov gradnje, kot sta LEED in GSAS, na področju trajnostne gradnje pa se ji posvečajo tudi druge certifikacijske sheme (DGNB, BREEAM...), saj je postala njihov integralni del.

O akustiki v prostoru je predaval **izr. prof. dr. Jurij Prezeli**, vodja laboratorija za tehnično akustiko na **Fakulteti za strojništvo Univerze v Ljubljani**. Da bi bolje razumeli, kako ustvariti akustično prijeten prostor, morajo snovalci objektov dobro poznati tudi razpoložljive absorpcijske materiale ter načine njihove montaže, da bi lahko prilagodili akustične lastnosti prostora uporabnikovem željam. Večina komercialno dostopnih poroznih materialov, ki absorbirajo zvok, je vlaknastih, od naravnih (bombaž, bambus, konoplja, les, volna), do mineralnih (mineralna in steklena volna, grafit in keramika), ter sintetičnih (polimeri, kot so poliestri, polipropilen, ogljik, kevlar in azbest). Za zmanjševanje hrupa in kontrolo odmevnih časov na trgu že vrsto let uporabljajo mikro perforirane plošče – panele in folije (primer kongresne dvorane na Brdu), ki imajo nalogo, da držijo obliko poroznim absorpcijskim materialom in jih ščitijo pred prahom in vlago. V praksi se pogosto uporabljajo še poliuretanska in melaminska pena, keramične in kovinske pene (aluminij, nikelj, jeklo, titan), aerogeli v granulirani obliki ter porozen asfalt. Na raven hrupa v prostoru in na razumljivost govora vpliva tudi odmevni čas – krajši je, bolj bo govor razumljiv in boljša bo tudi reprodukcija glasbe.

Gradbeni inženir **Miloš Kmetič** iz podjetja **Xella porobeton** je predstavil prednosti uporabe njihovih kalcijevo-silikatnih zidakov Silka, ki zagotavljajo vrhunsko zvočno izolirnost ter izjemno tlačno trdnost in so primerni za nosilne stene v večetažnih objektih. Silikatni zidaki so A1 negorljivi, imajo veliko sposobnost akumulacije toplote ter so odporni na



škodljive klimatske vplive. Kakovostni izolativni zidaki sodijo med ekološke izdelke, ki jih odlikujeta tudi trajnost in dolga življenjska doba. Kakšno uporabnost ponuja silikatna in kakovostna zvočno izolacijska opeka, v Xelli predstavljajo na praktičnih primerih in rešitvah, kjer so uporabili silikatne zidake, med njihovimi referenčnimi objekti pri nas pa so stadion Ljudski vrt v Mariboru, vrtec Notranje gorice, večstanovanjski objekti v Polzeli, Kidričevem in Radljah ob Dravi ter v stanovanjskem naselju Pekrska gorca.

Sistemske rešitve za zvočno izolativne opečne zidove je predstavila gradbena inženirka **Irena Hošpel** iz družbe **Wienerberger** iz Ormoža, kjer se v zadnjem času posvečajo prav razvoju izdelkov za izboljšanje zvočne izolativnosti

objektov. Tako na trgu že ponujajo več konstrukcijskih rešitev, kjer uporabljajo opečne zidake Porotherm, opečne votlake, ki jih zapolni z malto ali betonom, ter opečne zidove z oblogo, kot je npr. mineralna volna. Seveda je izboljšanje zvočne izolacije osnovnega zidu odvisno od vrste obloge, kakovosti vgradnje in reševanja detajlov za preprečevanje zvočnih mostov. Med njihovimi referenčnimi objekti v Sloveniji sta Hotel Vivat v Moravskih toplicah in Srednja ekonomska šola v Murski Soboti, v tujini pa atraktivna stolpnica Skyline in poslovno stanovanjski objekt K-District v Beogradu, poslovno stanovanjski objekt Sava Ada 3 ter hotelska stavba Kraljica v Zlatiboru.

Sklepno predavanje je prispeval **Patryk Gydziak** iz poljskega podjetja **Nowy Styl**, ki je

največji dobavitelj pohištvene opreme v Evropi in je specializirano tudi za akustične proizvode, ki jih razvilo in jih uspešno trži v svojem portfelju. V ospredje je postavil zlasti akustiko v poslovnih prostorih, kjer so viri zvoka in hrupa so različni, pogosto pa se slednji v stavbe prenaša tudi neposredno iz okolja. Zatem je podrobno predstavil še posamezne produktne skupine in praktične rešitve, s katerimi uspešno izboljšujejo zvočno izolativnost pisarniških ali prostorov za druženje. Na slovenskem trgu jih zastopa podjetje Elcond.

Kratki povzetki vsebin zanimivih predavanj o akustiki so na voljo na www.gbc-slovenia.si.

Miša Hrovat, agencija MAGA

Fotografije: arhiv GBC



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

GRADBIŠČE GARAŽNE HIŠE V LUKI KOPER

Lokacija: Luka Koper

Investitor: Luka Koper d.d., Vojkovo nabrežje 38, 6000 Koper

Izvajalec: GIC GRADNJE d.o.o., Sv. Florijan 120, 3250 Rogaška Slatina

Garažna hiša je tlorisnih dimenzij 150 x 140 metrov, etažnosti P+5. Skupna površina znaša 120.000 m² in omogoča 6.000 parkirnih mest. Izvedba gradbenih del celotnega nadzemnega dela je trajala manj kot 12 mesecev, vgrajenega je bilo približno 27.000 m³ betona, 3.500.000 kg armature in 120.000 m² metličenega in zaglajenega betona.



Slika 1 • Pogled na gradbišče med izgradnjo garažne hiše. Foto: arhiv Luke Koper d.d., fotograf Kristjan Stojaković



Slika 2 • Notranjost dokončane garažne hiše. Foto: arhiv GIC GRADNJE, d.o.o.



Slika 3 • Pogled na unikatno fasado izvedeno iz aluminijastih profilov, proizvedenih posebej v ta namen. Foto: arhiv GIC GRADNJE, d.o.o.

NOVI DIPLOMANTI

UNIVERZA V LJUBLJANI, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO IN GEODEZIJO

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

Katja Novak, Ocena mehanskih lastnosti betona predhodno izpostavljenega visokim temperaturam z uporabo neporušnih metod, mentor izr. prof. dr. Tomaž Hozjan, somentor doc. dr. Gregor Trtnik; <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=125624>

Matej Matos, Določitev verjetnostnih porazdelitev časovnih razmakov med vozili za prometno modeliranje nesemaforiziranih in krožnih križišč v slovenskem prostoru, mentor doc. dr. Tomaž Ma-her, somentor viš. pred. dr. Rok Marsetič; <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=125622>

III. STOPNJA – DOKTORSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM GRAJENO OKOLJE

Nataša Šprah, Osončenost stavbnega ovoja kot osnova za ener-getske učinkovit razvoj stanovanjske zazidave, mentor doc. dr. Mi-tja Košir; <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=125527> (znanstveno področje Načrtovanje in urejanje prostora)

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

I. STOPNJA – VISOKOŠOLSKI STROKOVNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

Jasmina Horjak, Raziskava možnosti priprave betonskih meša-nic iz granodioritnega agregata, mentor prof. dr. Andrej Štrukelj, somentor izr. prof. dr. Andrej Ivanič; <https://dk.um.si/lzpisGradiva.php?id=78801>

II. STOPNJA – MAGISTRSKI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

Luka Štraus, Uporaba 3D terestričnega laserskega skeniranja za določanje vertikalnih pomikov, mentor izr. prof. dr. Boštjan Kova-čič, somentor doc. dr. Zoran Pučko; <https://dk.um.si/lzpisGradiva.php?id=78748>

Janja Treiber, Optimizacija lokacije postavitve mobilnega dvigala na gradbišču, mentor prof. dr. Uroš Klanšek; <https://dk.um.si/lz-pisGradiva.php?id=78793&lang=eng>

Toni Udovč, Analiza prečkanja železniške proge na južni obvoz-nici Sežana – geotehnični vidik, mentor prof. dr. Bojan Žlender, somentorja doc. dr. Primož Jelušič in Luka Gramc; <https://dk.um.si/lzpisGradiva.php?id=78846>

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

KOLEDAR PRIREDITEV

20.-21. 5. 2021

6th International Conference on Road and Rail Infrastructure
Spletna konferenca
<https://master.grad.hr/cetra/ocs/index.php/cetra6/cetra2020>

1.-17.6.2021

DFI Deep Mixing Conference 2021
Spletna konferenca
www.dfi.org/dfieventlp.asp?13330

7.-9.6.2021

Mediterranean Symposium on Landslides
Spletna konferenca
<https://medsymplandslides.wixsite.com/msl2021>

9.-10.6.2021

Mednarodna konferenca »Applications of structural fire engineering« - ASFE' 21
Spletna konferenca
<https://www.szpv.si/international-conference-asfe/>

15.-17.6. 2021

7th E&E Congress "Asphalt 4.0 for future mobility - Eurasphalt & Eurobitume"
Spletna konferenca
<https://www.eecongress2021.org/congress/welcome-2/>

19.-20.6.2021

2nd International Conference on Press-in Engineering (ICPE) 2021
Spletna konferenca
Kochi, Japonska
<https://icpe-ipa.org/>

10.-12.7.2021

4th International Conference on Civil Engineering and Architecture
Seul, Južna Koreja
www.iccea.org/index.html

19.-21.7.2021

GSCAEE 2021 - Global Summit on Civil, Architectural and Environmental Engineering
Barcelona, Španija
www.thescientistft.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/

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 geotehnikov in 21. Šukljotov 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 2021
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/

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