





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

UDK-UDC 05 : 625; ISSN 0017-2774  
Ljubljana, junij 2015, letnik 64, str. 133-156

Izdajatelj:

**Zveza društev gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije (ZDGITS)**, Karlovška cesta 3, 1000 Ljubljana, telefon 01 52 40 200; faks 01 52 40 199 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 Univerze v Mariboru in Zavoda za gradbeništvo Slovenije**

Izdajateljski svet:

ZDGITS: **mag. Andrej Kerin**, predsednik  
**Dušan Jukić**  
**prof. dr. Matjaž Mikoš**  
IZS MSG: **Gorazd Humar**  
**Mojca Ravnikar Turk**  
**dr. Branko Zadnik**  
UL FGG: **izr. prof. dr. Sebastjan Bratina**  
UM FG: **doc. dr. Milan Kuhta**  
ZAG: **doc. dr. Matija Gams**

Glavni in odgovorni urednik:

**prof. dr. Janez Duhovnik**

Lektor:

**Jan Grabnar**

Lektorica angleških povzetkov:

**Romana Hudin**

Tajnica:

**Eva Okorn**

Oblikovalska zasnova:

**Mateja Goršič**

Tehnično urejanje, prelom in tisk:

**Kočevski tisk**

Naklada:

**500 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 upokojene 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 presledkom 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: janez.duhovnik@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

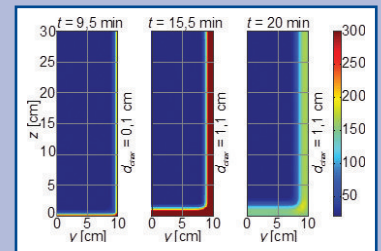
stran **134**

Robert Pečenko, univ. dipl. inž. grad.  
Sabina Huč, univ. dipl. inž. grad.  
doc. dr. Tomaž Hozjan, univ. dipl. inž. grad.

### PERFORMANČNI NAČIN PROJEKTIRANJA POŽARNE ODPORNOSTI LEPLJENEGA LESENEGA NOSILCA –

#### 2. DEL: TOPLOTNA IN MEHANSKA ANALIZA

PERFORMANCE-BASED APPROACH TO FIRE SAFETY DESIGN  
OF GLULAM BEAM –  
PART 2: THERMAL AND MECHANICAL ANALYSIS



stran **145**

Martin Jenko, dipl. inž. grad.  
doc. dr. Mateja Dovjak, dipl. san. inž.  
doc. dr. Roman Kunič, univ. dipl. inž. grad.

### POMEN VSEBOVANE ENERGIJE V IZBRANIH GRADBENIH PROIZVODIH ZA IZREDNO UČINKOVITE TOPLOTNE OVOJE STAVB

IMPORTANCE OF EMBODIED ENERGY IN SELECTED  
CONSTRUCTIONAL PRODUCTS FOR HIGHLY EFFICIENT  
THERMAL ENVELOPES



## Dejavnost strokovnih združenj

stran **155**

doc. dr. Lara Slivnik, univ. dipl. inž. arh.  
**ZDRUŽENJE THE CONSTRUCTION HISTORY SOCIETY**

## Novi diplomanti

Eva Okorn

## Koledar prireditev

Eva Okorn

Slika na naslovnici: Protipoplavna ureditev Meže na Ravnah na Koroškem, foto: Janez Duhovnik

# PERFORMANČNI NAČIN PROJEKTIRANJA POŽARNE ODPORNOSTI LEPLJENEGA LESENEGA NOSILCA – 2. DEL: TOPLOTNA IN MEHANSKA ANALIZA

## PERFORMANCE-BASED APPROACH TO FIRE SAFETY DESIGN OF GLULAM BEAM – PART 2: THERMAL AND MECHANICAL ANALYSIS

**Robert Pečenko, univ. dipl. inž. grad.**

robert.pecenko@fgg.uni-lj.si  
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo  
Jamova 2, 1000 Ljubljana

**Sabina Huč, univ. dipl. inž. grad.**

sabina.huc@gmail.com  
GiiP, d. o. o., gradbeni inženiring, nepremičnine, projektiranje  
Dobja vas 200, 2390 Ravne na Koroškem

**doc. 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 614.89:624.011.1

**Povzetek** | V prispevku je na primeru lepljenega lesenega nosilca, ki je del nosilne strešne konstrukcije športne dvorane v Dravogradu, predstavljen koncept performančnega načina projektiranja požarne odpornosti konstrukcijskega elementa. V že objavljenem prvem delu prispevka je prikazana prva faza požarne analize, v kateri je z uporabo naprednega računalniškega programa Fire Dynamics Simulator določen časovni potek temperature zraka v okolici nosilcev. V tem, drugem delu prispevka predstavimo še drugo in tretjo fazo požarne analize, kjer poleg performančnega načina predstavimo tudi predpisni način projektiranja požarne odpornosti konstrukcijskega elementa. V drugi fazi požarne analize, imenovani tudi toplotna analiza, določimo časovno spreminjanje temperature po lepljenem lesenem nosilcu. Z upoštevanjem dobljenih rezultatov v zadnji, tretji fazi požarne analize, imenovani tudi mehanska analiza konstrukcije, prikažemo še analizo požarne odpornosti obravnavanega lepljenega lesenega nosilca z napredno računsko metodo in poenostavljenim računskim postopkom po SIST EN 1995-1-2.

Ključne besede: lepljeni leseni nosilec, požarna analiza, napredna računsko metoda, požarna odpornost

**Summary** | The paper presents a performance-based approach to fire design of a glulam beam. The analyzed glulam beam is part of the sports hall roof structure located in Dravograd. In the first part of the paper the first phase of the fire analysis was shown, where advanced computational software, Fire Dynamics Simulator, was used to determine the time development of the air temperature around the beams during the fire. Here, in the second part of the paper, the second and third phases of the fire analysis are presented. Beside performance-based design approach also well established prescrip-

five rules are shown to determine the fire resistance of structural members. In the second phase of the fire analysis, also called thermal analysis, time development of the temperatures in the glulam beam are determined. Taking into account the results obtained in the second phase, there follows the third phase of the fire analysis, also called mechanical analysis of the structure, where advanced calculation method and a simplified computational procedure according to SIST EN 1995-1-2 are shown to determine the fire resistance of the glulam beam.

**Key words:** glulam beam, fire analysis, advanced calculation method, fire resistance

## 1 • UVOD

S stališča požarne varnosti so lesene konstrukcije v primerjavi z drugimi vrstami gradbenih konstrukcij razmeroma varne. V največji meri je to pogojeno z relativno nizko toplotno prevodnostjo, ki preprečuje hiter razvoj temperatur po lesu. Hkrati je razvoj temperatur v lesu dodatno upočasnen zaradi izparevanja vlage. Delež le-te predstavlja 10–20 % teže lesa, kar je v primerjavi z drugimi konstrukcijskimi materiali relativno visoka vrednost. Pri povišanih temperaturah je les podvržen toplotni degradaciji oziroma tako imenovani pirolizi. Piroliza je izjemno kompleksen pojav, ki se prične pri 200–300 °C in predstavlja hkratno delovanje raznih kemijskih procesov, povezanih s prehodom toplote in vlage. Posledica pirolize je nastanek oglja, plinov, smol in kislin. Pri tem ima nastalo oglje tako pozitiven kot negativen vpliv na nosilnost konstrukcije. Zoglenela plast ima namreč nižjo toplotno prevodnost kot les in služi za dodaten izolacijski sloj pri prevajanju toplote v notranjost lesa. Hkrati pa ima zanemarljivo nizke trdnostne in togostne karakteristike, s čimer se zmanjšuje nosilnost lesenega elementa med požarom.

Projektiranje požarne varnosti stavb se deli v dve fazi, primarno in sekundarno. V primarni fazi se za zagotovitev ustreznega nivoja požarne varnosti predvidi aktivne in pasivne ukrepe. V sekundarni fazi projektiranja požarne varnosti stavb, imenovani tudi

požarna analiza konstrukcij, se glede na zahtevano požarno odpornost nosilne konstrukcije požarnih sektorjev dimenzionirajo posamezni konstrukcijski elementi. Sekundarna faza požarne analize se dalje deli na tri faze. Namen prispevka je prikazati uporabo performančnega načina, ki se uveljavlja kot naprednejši način projektiranja konstrukcij, v vseh fazah požarne analize. V prvem delu prispevka z naslovom Modeliranje razvoja požara v računalniškem programu FDS (Huč, 2015) je bila prikazana prva faza požarne analize konstrukcij. Določen je bil najbolj neugoden razvoj maksimalne adiabatne temperature na površini lepljenih lesenih nosilcev, ki tvorijo nosilno strešno konstrukcijo športne dvorane, ki je del večnamenske dvorane ŠPIC D v Dravogradu (GiiP, 2011).

V tem, drugem delu prispevka prikazujemo nadaljevanje požarne analize, kjer poleg uporabe naprednega performančnega načina predstavimo tudi uveljavljen predpisni način z uporabo poenostavljenih metod, podanih v standardih Evrokod. V drugi fazi požarne analize, imenovani tudi toplotna analiza konstrukcije, najprej določimo časovno spreminjanje temperature po lepljenem lesenem nosilcu. Nato v tretji fazi požarne analize, imenovani tudi mehanska analiza konstrukcije, z uporabo naprednega numeričnega modela in poenostavljenega računskega postopka skladno s SIST EN 1995-1-2 (2005) preverimo

požarno odpornost obravnavanega lepljenega lesenega nosilca na osnovi rezultatov, pridobljenih v drugi fazi požarne analize.

Za potrebe analize po napredni metodi uporabimo programsko orodje NFIRA (Bratina, 2003), ki je v osnovi namenjeno računski obravnavi armiranobetonskih konstrukcij v požaru, vendar je za namene tega članka uporabljena modificirana verzija, prirejena za računanje lesenih konstrukcij, izpostavljenih požaru (Srpčič, 2009). Program uporablja učinkovit linijski končni element (Planinc, 1998), ki je zasnovan na geometrijsko točni Reissnerjevi teoriji in Bernoullijevi predpostavki o ravnih prečnih prerezi (Reissner, 1972). Napetostno-deformacijska zveza lesa v nategu je upoštevana skladno s SIST EN 1995-1-2 (SIST, 2005), medtem ko je za obnašanje lesa v tlaku upoštevan bilinearni materialni model, ki ga je predstavil Pischl (Pischl, 1980). Mehanske lastnosti lesa pri povišanih temperaturah so privzete po SIST EN 1995-1-2 (SIST, 2005).

Poleg napredne računske metode za določitev požarne odpornosti lesenih konstrukcij je predstavljena tudi metoda zmanjšanih materialnih karakteristik, ki spada med poenostavljene postopke, predlagane v Evrokodu (SIST, 2005). Metoda je namenjena določitvi požarne odpornosti enostavnih lesenih elementov (steber, nosilec) in temelji na kontroli napetosti najbolj obremenjenega vlakna rezidualnega prečnega prereza elementa. Pri tem se upoštevata zmanjšan prečni prerez zaradi oglečenja ter zmanjšane trdnostne in togostne karakteristike lesa pri povišani temperaturi.

## 2 • TOPLOTNA ANALIZA

V toplotni analizi glede na znan časovni potek temperature okolice med požarom določimo prostorsko in časovno razporeditev temperature po elementih konstrukcije kot rešitev problema nestacionarnega prostorskega

prevajanja toplote. Matematično gledano, moramo pri tem rešiti parcialno diferencialno enačbo za nestacionarno prevajanje toplote po konstrukciji s pripadajočimi robnimi in začetnimi pogoji.

### 2.1 Temperatura okolice med požarom

Razvoj temperature zraka v prostoru med realnim požarom je odvisen od vrste kompleksnih dejavnikov, zato je njegov analitični zapis zelo zahteven, če ne celo nemogoč. Problem lahko do določene mere rešimo z uporabo poenostavljenih požarnih krivulj, ki so zasnovane na podlagi eksperimentov in jih lahko razdelimo v dve skupini. V prvo skupino umestimo stand-

ardne požarne krivulje (npr. ISO834), pri katerih temperatura okolice ves čas narašča in zato predstavljajo skrajno poenostavitev realnega požara. Na teh krivuljah temelji tudi večina poenostavljenih računskih metod. Nekoliko bolj realen opis naravnega požara omogočajo t. i. parametrične požarne krivulje, ki sodijo v drugo skupino. Odvisne so od večjega števila parametrov, med drugim od zaloge gorljivega materiala, velikosti, oblike in možnosti prezračevanja prostora. Primer parametrične požarne krivulje je predstavljen tudi v standardu SIST EN 1991-1-2 (SIST, 2004b). Prizadevanja za čim bolj realno opredelitev poteka temperature okolice med požarom so privedla do razvoja naprednih računalniških programov za modeliranje požara, ki temeljijo na matematičnih modelih dinamike tekočin (*ang.* CFD). V to vrsto programov spada tudi Fire Dynamics Simulator (*krajše* FDS), ki smo ga uporabili za napoved razvoja temperature zraka v okolici obravnavanih lepljenih lesenih nosilcev, kar smo prikazali v prvem delu prispevka (Huč, 2015).

## 2.2 Prenos toplote v lesu

Za določitev časovno odvisnega temperaturnega polja v prečnem prerezu lepljenega lesenega nosilca upoštevamo naslednje načine prenosa toplote: prenos toplote s konvekcijo, radiacijo in kondukcijo. Prevajanje toplote po prečnem prerezu (kondukcija) opišemo z znano Fourierjevo parcialno diferencialno enačbo

$$\nabla \cdot (\mathbf{k} \nabla T) - \rho C \frac{\partial T}{\partial t} = 0. \quad (1)$$

V enačbi (1) diagonalni členi matrike  $\mathbf{k}$  predstavljajo koeficiente toplotne prevodnosti za različne smeri lesa,  $\rho$  je gostota lesa,  $C$  njegova specifična toplota,  $T$  je temperatura v poljubni točki nosilca, oznaka  $\nabla$  pa predstavlja

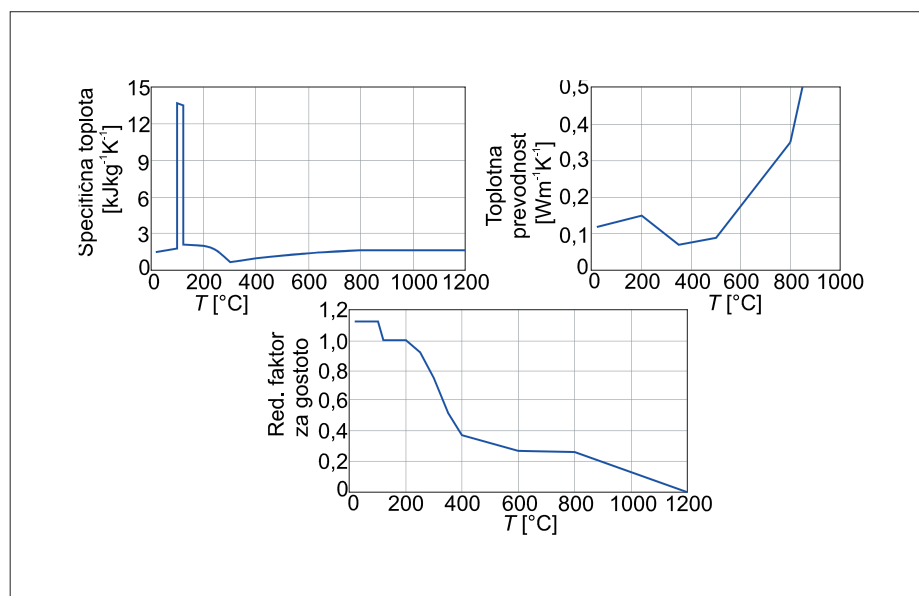
nabla operator. Izmenjavajo toplote med nosilcem in okolico določimo s toplotnim tokom na mejni ploskvi med njima.

$$\frac{\partial T}{\partial n} = \frac{h_{qr}}{k} (T_{\infty} - T), \quad (2)$$

kjer  $\frac{\partial T}{\partial n}$  predstavlja odvod temperature v smeri normale na mejno ploskev,  $T_{\infty}$  je temperatura zraka v požarnem sektorju in  $h_{qr}$  je prestopni koeficient sestavljen iz konvekcijskega in radiacijskega dela:  $h_{qr} = h_c + h_r$ . Problem prenosa toplote rešimo numerično z metodo končnih elementov v programskem okolju Matlab (Hozjan, 2009), pri čemer moramo poznati tudi ustrezen začetni pogoj ( $T(t = 0) = T_0$ ).

## 2.2.1 Termični parametri

Znano je, da se termični parametri lesa in oglja spreminjajo s temperaturo. V literaturi zasledimo različne vrednosti teh parametrov v odvisnosti od temperature, vendar tukaj prikazujemo le tiste, ki jih uporabimo v računskem primeru. Temperaturno odvisno specifično toploto, toplotno prevodnost in redukcijski faktor za gostoto lesa upoštevamo skladno s SIST EN 1995-1-2 (SIST, 2005) (slika 1). Posreden vpliv izparevanja vlage na razvoj temperatur v prečnem prerezu lesa je zajet s povečanjem specifične toplote lesa v temperaturnem območju med 100 °C in 120 °C. Razpokanost zoglene plasti pri temperaturah, višjih od 500 °C, Evrokod upošteva z večjim koeficientom toplotne prevodnosti nad to temperaturo.



Slika 1 • Temperaturno odvisna specifična toplota, toplotna prevodnost in redukcijski faktor za gostoto lesa (vsebnost vlage 12 %) skladno s SIST EN 1995-1-2 (SIST, 2005)

## 3 • MEHANSKA ANALIZA

V tem poglavju je prikazana uporaba poenostavljenih in naprednih računskih metod za določitev mehanskega odziva oziroma požarne odpornosti lesenega nosilca pri požarni izpostavljenosti. Poenostavljene metode, ki jih obravnavajo standardi Evrokod, temeljijo na kontrolah pri normalnih pogojih, pri čemer je treba upoštevati zmanjšanje nosilnosti materiala zaradi povišanih temperatur. Te metode se v prvi vrsti lahko uporabljajo

za kontrolo nosilnih elementov konstrukcije, kot so nosilci in stebri, pri standardni požarni izpostavljenosti. V primeru parametrične požarne izpostavljenosti oziroma v primeru realne požarne krivulje je pri nekaterih metodah treba upoštevati dodatne zahteve. Tako pri računu nosilnosti lepljenih lesenih nosilcev, ki so izpostavljeni realnemu požaru, območje oglenenja določimo na osnovi izololinije 300 °C, medtem ko je v primeru standardne požarne

izpostavljenosti območje oglenenja določeno z empiričnimi izrazi (SIST, 2005). Standard podaja dve poenostavljeni metodi za račun požarne odpornosti lesenih elementov. V nadaljevanju je predstavljena tukaj uporabljena metoda z zmanjšanimi materialnimi karakteristikami. S to metodo se na enostaven način preveri, ali je dimenzija prečnega prereza nosilca ustrezna, da zadosti kriteriju požarne odpornosti. To se določi na osnovi zmanjšanih trdnostnih in togostnih karakteristik lesa pri povišani temperaturi in na osnovi zmanjšane prečnega prereza elementa, ki nastopi zaradi oglenenja. Debelina zoglene

plasti se določi v skladu s toplotno analizo, predstavljeno v drugem poglavju. Napredne računske metode omogočajo realnejšo oceno obnašanja konstrukcije med požarom. Takšna ocena je mogoča samo v primeru, če modeli, uporabljeni v naprednih računskih metodah, vsebujejo vse bistvene fizikalne in kemijske procese obnašanja konstrukcije in njenih sestavnih delov med požarom. Na ta način upoštevamo vpliv spremembe mehanskih lastnosti lesa pri povišanih temperaturah, pri čemer je vpliv temperaturnega krčenja ter lezenja lesa že posredno upoštevan v redukcijskih faktorjih za trdnost in elastični modul lesa pri povišanih temperaturah, podanih v SIST EN 1995-1-2 (SIST, 2005). Vpliv temperaturnih deformacij na mehanski odziv konstrukcije v požaru določimo skladno s SIST EN 1995-1-2 (SIST, 2005).

### 3.1 Poenostavljena metoda

Metoda zmanjšanih materialnih karakteristik prečnega prereza je poenostavljen računski postopek, s katerim se določi mehansko odpornost lesenega elementa pri požarni izpostavljenosti. V skladu s standardom SIST EN 1995-1-2 (SIST, 2005) se lahko metoda uporabi pri pravokotnih prečnih prerezih, ki so izpostavljeni požaru iz treh ali štirih strani. Upošteva se rezidualni prečni prerez ter zmanjšane trdnostne in togostne karakteristike lesa zaradi povišane temperature. Rezidualni prečni prerez je za globino ogljenja zmanjšan prvotni prečni prerez. Globino ogljenja določimo z izotermo 300 °C. Zogleneli del lesa nima trdnosti, zato ne prispeva k mehanski nosilnosti elementa. Trdnostne karakteristike v požarnem projektnem stanju se določijo kot

$$f_{d,fi} = k_{mod,fi} \frac{f_{20}}{\gamma_{M,fi}}, \quad (3)$$

kjer je  $f_{d,fi}$  projektna trdnost,  $f_{20}$  20 % fraktila trdnosti pri sobni temperaturi,  $k_{mod,fi}$  modifikacijski faktor za požar in  $\gamma_{M,fi}$  delni varnostni faktor za les v požaru, ki je enak vrednosti 1,0. Vrednost 20 % fraktile trdnosti  $f_{20}$  se izračuna kot

$$f_{20} = k_{fi} \cdot f_k, \quad (4)$$

kjer je  $f_k$  karakteristična trdnost pri sobni temperaturi, faktor  $k_{fi}$  pa je podan v standardu SIST EN 1995-1-2 (SIST, 2005) in za lepljeni lamelirani les znaša  $k_{fi} = 1,15$ . Modifikacijski faktor za požar  $k_{mod,fi}$  upošteva zmanjšanje trdnostnih karakteristik pri povišanih temperaturah. Pri času  $t = 0$  je vrednost faktorja

enaka 1,0, pri času trajanja požara  $t \geq 20$  min pa se modifikacijski faktor za požar  $k_{mod,fi}$  izračuna takole:

– za upogibno trdnost

$$k_{mod,fi} = 1,0 - \frac{1}{200} \cdot \frac{p}{A_t}, \quad (5)$$

– za tlačno trdnost

$$k_{mod,fi} = 1,0 - \frac{1}{125} \cdot \frac{p}{A_t}, \quad (6)$$

– za natezno trdnost

$$k_{mod,fi} = 1,0 - \frac{1}{330} \cdot \frac{p}{A_t}, \quad (7)$$

kjer je s  $p$  v metrih označen obseg ognju izpostavljenega rezidualnega prečnega prereza, z  $A_t$  v m<sup>2</sup> pa ploščina rezidualnega prečnega prereza. Za čase  $0 \leq t \leq 20$  min. se vrednost faktorja  $k_{mod,fi}$  določi z linearno interpolacijo. Omenimo še, da lahko skladno s SIST EN 1995-1-2 (SIST, 2005) kontrolo striga za pravokotne in okrogle prečne prereze v požarnem projektnem stanju zanemarimo.

### 3.2 Napredna računska metoda

V nadaljevanju predstavljamo računski model za določitev obnašanja lesenega nosilca ob hkratni izpostavljenosti mehanski obtežbi in požaru. Časovno odvisno napetostno in deformacijsko stanje v lesenem nosilcu določimo z inkrementno-iteracijsko metodo, kjer celotno časovno obdobje trajanja požara  $(0, t)$  razdelimo na časovne intervale  $(t^{i-1}, t^i)$ . Deformiranje nosilca opišemo s kinematično točnim Reissnerjevim modelom ravninskega nosilca (Reissner, 1972). Osnovni sistem enačb, ki opisujejo deformiranje nosilca sestavljajo naslednje enačbe:

– kinematične enačbe

$$\begin{aligned} 1 + u' - (1 + \varepsilon) \cos \varphi &= 0 \\ w' - (1 + \varepsilon) \sin \varphi &= 0 \\ \varphi' - \kappa &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

– ravnotežne enačbe

$$\begin{aligned} (N \cos \varphi + Q \sin \varphi)' + p_x &= 0 \\ (-N \cos \varphi + Q \sin \varphi)' + p_z &= 0 \\ M' - (1 + \varepsilon)Q + m_y &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

– konstitucijske enačbe

$$\begin{aligned} N_C &= \int_A \sigma(D_m, T) dA \\ M_C &= \int_A z \sigma(D_m, T) dA \end{aligned} \quad (10)$$

Tukaj  $(\cdot)'$  predstavlja odvod količine po  $x$ ,  $u$  in  $w$  sta pomika težiščne osi v  $x$ - in  $z$ -smeri,  $\varphi$  pa označuje rotacijo okoli  $y$ -osi.  $N$ ,  $Q$  in  $M$  so posplošene ravnotežne notranje sile,  $p_x$ ,  $p_y$  in  $m_y$  pa predstavljajo konservativno zunanjo obtežbo, ki deluje na element. Konstitucijski notranji sili  $N_C$  in  $M_C$  sta odvisni od izbranega materialnega modela, ki ga določimo iz zveze med normalno napetostjo  $\sigma(D_m, T)$  in mehansko deformacijo  $D_m$ . Na podlagi napetostno-deformacijskega stanja pri času  $t^{i-1}$  in temperature pri času  $t^i$ , lahko geometrijsko deformacijo  $D^i = \varepsilon^i + z\kappa^i$  pri času  $t^i$  izračunamo takole:

$$D^i = D^{i-1} + \Delta D^i. \quad (11)$$

Pri tem z  $\varepsilon^i$  in  $\kappa^i$  označujemo specifično spremembo dolžine in psevdoukrivljenost referenčne osi lesenega nosilca,  $\Delta D^i$  pa predstavlja prirastek geometrijske deformacije pri času  $t^i$  in jo izračunamo po adicijskem pravilu:

$$\Delta D^i = \Delta D_m^i + \Delta D_T^i, \quad (12)$$

kjer je  $\Delta D_m^i$  prirastek mehanske deformacije,  $\Delta D_T^i$  pa prirastek temperaturne deformacije. Prirastek temperaturne deformacije določimo skladno s SIST EN 1995-1-2 (SIST, 2005). Prirastka deformacije lezenja in krčenja nista eksplicitno izražena, saj je njun vpliv posredno zajet v redukcijskih faktorjih za trdnost in togost lesa skladno s SIST EN 1995-1-2 (SIST, 2005).

Osnovne enačbe nosilca (8)–(10) rešimo z metodo končnih elementov. Uporabimo tako imenovane deformacijske končne elemente, kjer po končnem elementu interpoliramo deformaciji  $\varepsilon$  in  $\kappa$ . Podroben opis formulacije deformacijskih končnih elementov je predstavljen v (Planinc, 1998) in (Bratina, 2003). Značilnost deformacijskih končnih elementov je, da so zelo natančni in odporni proti blokiranju. Za analizo uporabimo programsko orodje NFIRA (Bratina, 2003), ki temelji na deformacijskih končnih elementih. Konstrukcija se poruši, če postane tangentna togostna matrika konstrukcije singularna. Vzrok za to je lahko globalna nestabilnost konstrukcije ali materialna porušitev. Čas, pri katerem se zgodi porušitev, imenujemo kritični čas, pripadajočo temperaturo okolja pa kritična temperatura  $(t_{cr}, T_{cr})$ .

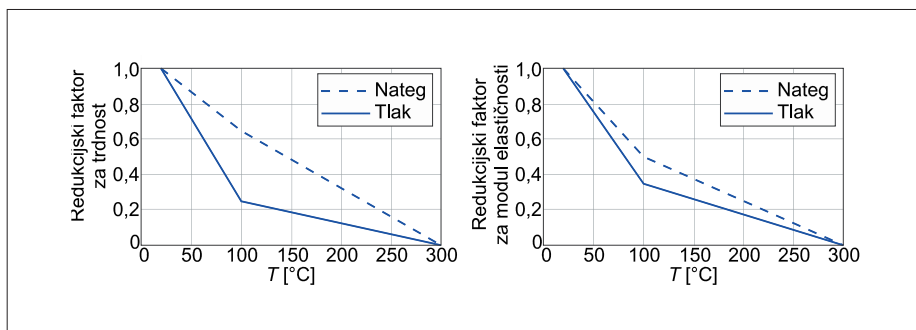
#### 3.2.1 Mehanske lastnosti lesa pri povišanih temperaturah

Mehanske lastnosti za trdnost in modul elastičnosti lesa so upoštevane v skladu s

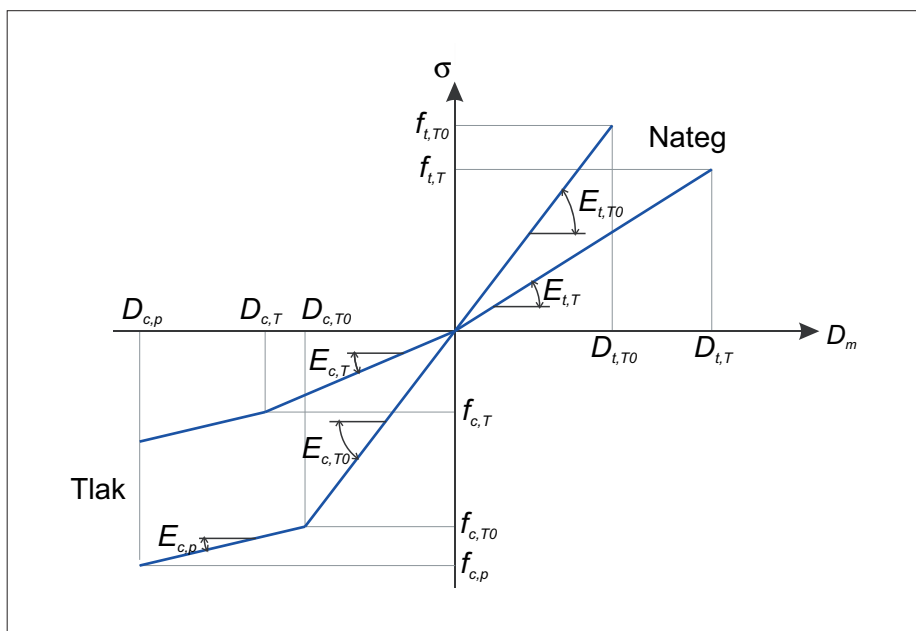
SIST EN 1995-1-2 (SIST, 2005) (slika 2). Kot vidimo, so redukcijski faktorji za les različni v nategu ali tlaku, nad temperaturo 300 °C, ko les prične ogleneti, pa enaki nič.

Konstitucijsko zvezo med normalno napetostjo  $\sigma$  in mehansko deformacijo  $D_m$  opišemo z linearnim diagramom v nategu in bilinearnim diagramom v tlaku (slika 3).

Na zgornji sliki  $D_{i,j}$ ,  $E_{i,j}$  in  $f_{i,j}$  ( $i = c, t$ ;  $j = T, T_0$ ) predstavljajo mejno elastično deformacijo, elastični modul in napetost na meji elastičnosti za les v tlaku ( $c$ ) in nategu ( $t$ ) pri sobni ( $T_0$ ) in pri povišani temperaturi ( $T$ ). Mejna napetost v plastičnem območju  $f_{c,p}$  je definirana v (Pischl, 1980). S simboli  $E_{c,p}$  in  $D_{c,p}$  označujemo plastični modul utrditve in mejno plastično deformacijo.



Slika 2 • Redukcijski faktorji za trdnost in modul elastičnosti lesa skladno s SIST EN 1995-1-2 (2005)



Slika 3 • Konstitucijski diagram za les pri sobni in pri povišani temperaturi

## 4 • RAČUNSKI PRIMER

Na primeru lepljenega lameliranega lesenega nosilca prikažemo uporabo poenostavljene in napredne računske metode za analizo mehanske odpornosti v pogojih požara. Obravnavani nosilec je del strešne konstrukcije športne dvorane v Dravogradu (GiiP, 2011). Vz dolžni raster med lepljenimi lesenimi nosilci znaša 5,4 m. Nosilec je iz lesa trdnostnega razreda GL28c (GiiP, 2011), za katerega so značilne naslednje karakteristične vrednosti pri sobni temperaturi: elastični modul  $E_{0,k} = 1260 \text{ kN/cm}^2$ , upogibna trdnost  $f_{m,k} = 2,8 \text{ kN/cm}^2$ , strižna trdnost  $f_{v,k} = 0,27 \text{ kN/cm}^2$  in tlačna trdnost pravokotno na vlakna  $f_{c,90,k} = 0,27 \text{ kN/cm}^2$ . Vplivi na konstrukcijo zaradi izpostavljenosti požaru so v SIST EN 1991-1-2 (SIST, 2004b)

### 4.1 Računski model, obtežba in obremenitev

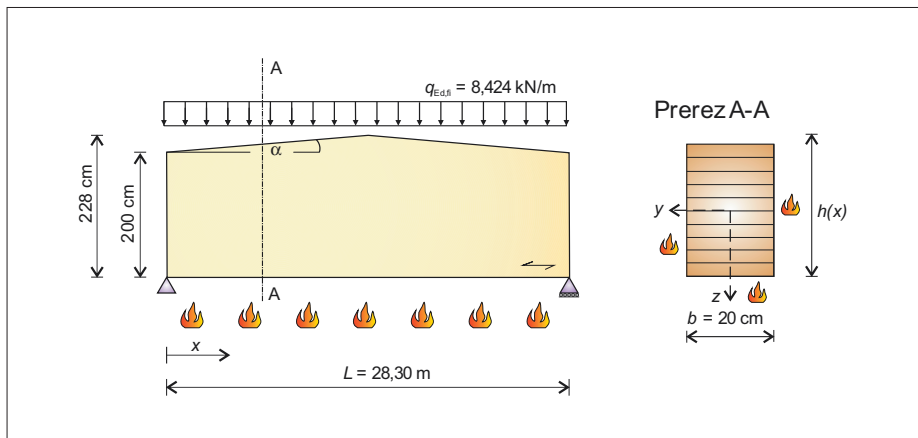
Računski model obravnavanega nosilca je prostoležeči nosilec dolžine  $L = 28,30 \text{ m}$ , širine  $b = 20 \text{ cm}$  in spremenljive višine  $h(x)$  od 200 cm do 228 cm (slika 4). Vz dolžni raster med lepljenimi lesenimi nosilci znaša 5,4 m. Nosilec je iz lesa trdnostnega razreda GL28c (GiiP, 2011), za katerega so značilne naslednje karakteristične vrednosti pri sobni temperaturi: elastični modul  $E_{0,k} = 1260 \text{ kN/cm}^2$ , upogibna trdnost  $f_{m,k} = 2,8 \text{ kN/cm}^2$ , strižna trdnost  $f_{v,k} = 0,27 \text{ kN/cm}^2$  in tlačna trdnost pravokotno na vlakna  $f_{c,90,k} = 0,27 \text{ kN/cm}^2$ . Vplivi na konstrukcijo zaradi izpostavljenosti požaru so v SIST EN 1991-1-2 (SIST, 2004b)

določeni kot nezgodni vplivi, pri čemer skladno s standardom SIST EN 1990 (SIST, 2004a) kombinacijo vplivov za nezgodna projektna stanja izrazimo kot

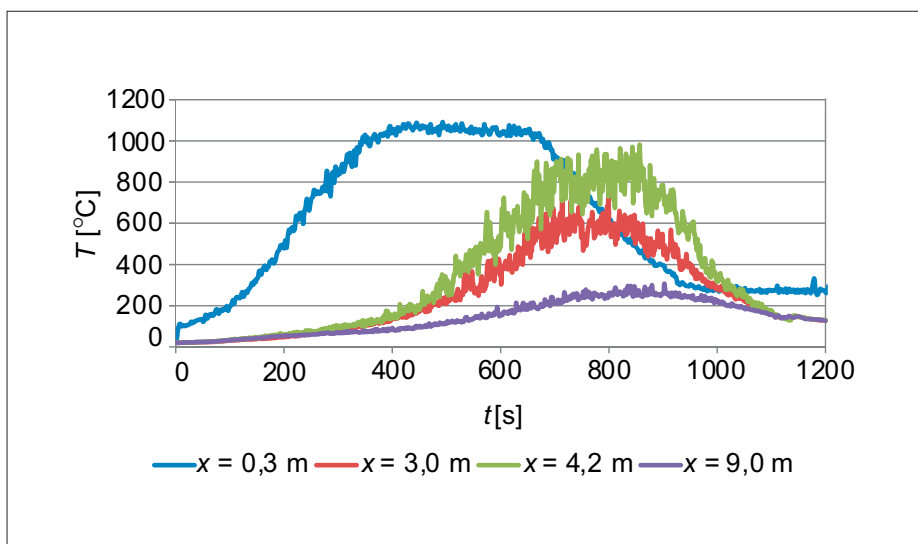
$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} \cdot (\psi_{1,1} \text{ ali } \psi_{2,1}) \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (13)$$

kjer je  $G_{k,j}$  karakteristična vrednost stalnega vpliva  $j$ ,  $Q_{k,1}$  karakteristična vrednost prevladujočega spremenljivega vpliva 1,  $Q_{k,i}$  karakteristična vrednost spremljajočega spremenljivega vpliva  $i$ ,  $\psi_{1,1}$  faktor za pogosto in  $\psi_{2,1}$  faktor za navidezno stalno vrednost prevladujočega spremenljivega vpliva 1 ter  $\psi_{2,i}$  faktor za navidezno stalno vrednost spremljajočega spremenljivega vpliva  $i$ . V nacionalnem dodatku k SIST EN 1991-1-2 (SIST, 2004b) je za prevladujoč spremenljiv vpliv priporočena uporaba pogoste vrednosti  $\psi_{1,1} Q_1$ .

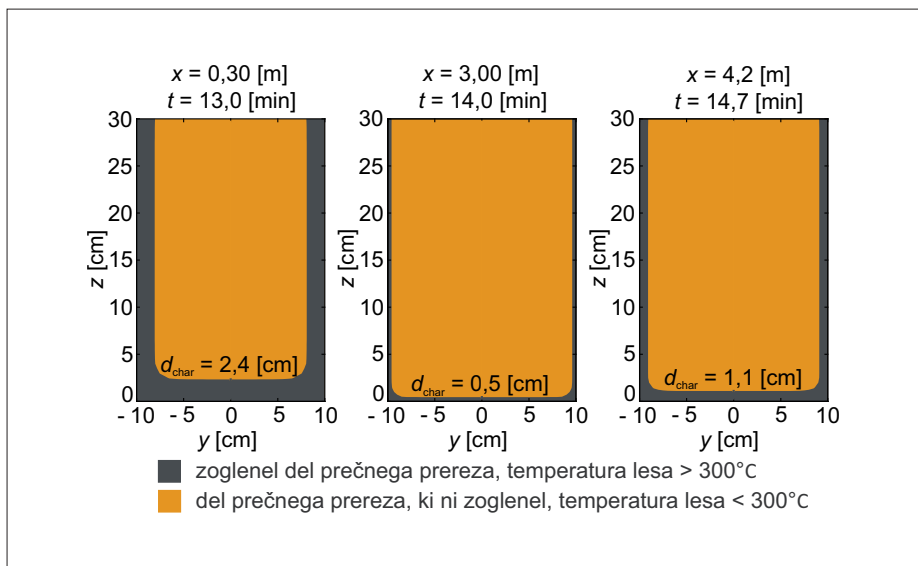




Slika 4 • Računski model, geometrija in obremenitev obravnavanega lepljenega lesenega nosilca



Slika 5 • Najbolj neugoden časovni razvoj temperature na površini nosilca v prečnih prerezih pri  $x = 0,3$  m,  $3,0$  m,  $4,2$  m, in  $9,0$  m



Slika 6 • Debelina zoglenele plasti ( $d_{char}$ ) v treh prečnih prerezih vzdolž nosilca

Skladno z Načrtom gradbenih konstrukcij (GiiP, 2011) upoštevamo karakteristične vrednosti za stalno obtežbo  $g_k = 1,3$  kN/m<sup>2</sup>, obtežbo vetra  $w_k = 0,7$  kN/m<sup>2</sup> in obtežbo snega  $s_k = 1,3$  kN/m<sup>2</sup>. Faktor za pogosto vrednost je enak  $\psi_{1,1} = 0,2$  tako v primeru, da je prevladujoči spremenljivi vpliv sneg  $s_k$ , kakor tudi v primeru, da je prevladujoči spremenljivi vpliv veter (SIST EN 1990, 2004a). Faktor za navidezno stalno vrednost je v primeru, da je spremljajoči spremenljivi vpliv sneg ali veter, enak  $\psi_{2,2} = 0,0$  (SIST EN 1990, 2004a). Po enačbi (13) je najbolj neugodna tista kombinacija vplivov, kjer je prevladujoči spremenljivi vpliv sneg. Največja obremenitev obravnavanega nosilca v požarnem projekt-nem stanju tako znaša  $q_{Ed,fi} = 8,424$  kN/m. V nadaljevanju predstavimo analizo požarne odpornosti nosilca po poenostavljen postopku in po napredni računski metodi.

#### 4.2 Požarna odpornost lepljenega lesenega nosilca po poenostavljenem postopku

Skladno s poenostavljenim postopkom, prikazanim v razdelku 3.1, najprej s toplotno analizo določimo debelino zoglenele plasti v prečnih prerezih vzdolž nosilca. Nato z upoštevanjem dimenzij rezidualnih prečnih prerezov določimo mehansko odpornost lesenega elementa v primeru požara.

##### 4.2.1 Določitev debeline zoglenele plasti

S toplotno analizo, opisano v poglavju 2, na podlagi ovojnice temperatur v okolici nosilcev, ki so dosežene v najbolj neugodnih požarnih scenarijih "zgoraj sredina mat" in "spodaj sredina", kar smo prikazali v prvem delu prispevka (Huč, 2015), določimo potek temperature po prečnih prerezih vsakih 0,3 m vzdolž nosilca. Upoštevamo, da zogleni del prečnega prereza, ki se segreje nad 300 °C, in tako odčitamo debelino zoglenele plasti v posameznem prečnem prerezu ( $d_{char}$ ). Najbolj neugoden časovni razvoj temperature na površini nosilca v izbranih prečnih prerezih pri  $x = 0,3$  m,  $3,0$  m,  $4,2$  m, in  $9,0$  m je prikazan na sliki 5.

Na sliki 6 je v izbranih prečnih prerezih pri  $x = 0,3$  m,  $3,0$  m in  $4,2$  m prikazan potek izololinije 300 °C, s pomočjo katere odčitamo debelino zoglenele plasti ( $d_{char}$ ). Največja debelina zoglenele plasti znaša 2,4 cm in se pojavi v prečnem prerezu na začetku nosilca pri  $x = 0,3$  m, v okolici katerega se razvijejo tudi najvišje temperature (slika 5).

Največjo debelino zoglenele plasti ( $d_{char}$ ) v posameznih prečnih prerezih do  $x = 6,0$  m vzdolž nosilca, vključno s časom, pri katerem

je ta dosežena ( $t_{char}$ ), grafično prikazujemo na sliki 7. Opazimo, da se prečni prerezi od  $x = 6,0$  m naprej do konca nosilca ne segrejejo nad  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ , kar pomeni, da ni ogljenja ( $d_{char} = 0$ ) med predvidenim najbolj neugodnim požarnim scenarijem "spodaj sredina", zato tega na sliki 7 ne prikazujemo.

#### 4.2.2 Določitev mehanske odpornosti z metodo zmanjšanih materialnih karakteristik

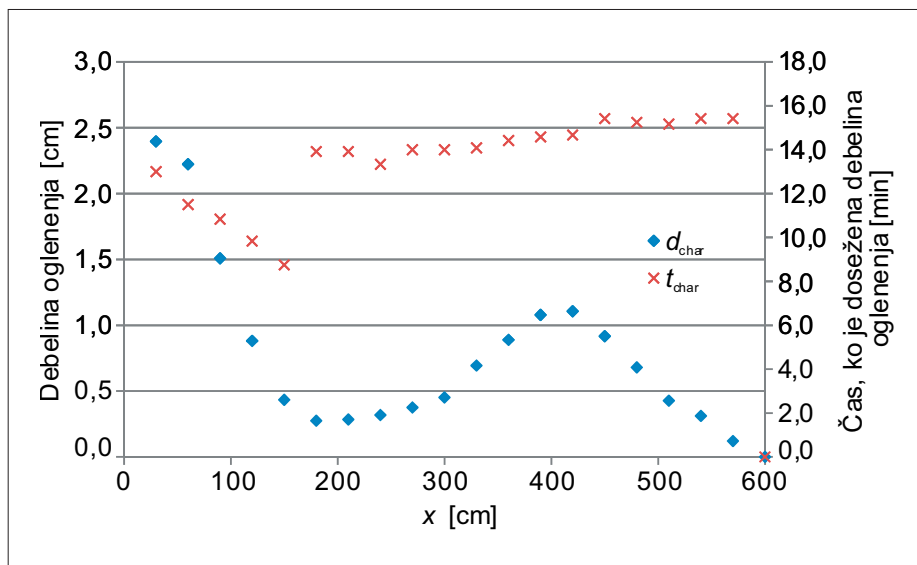
Mehansko odpornost nosilca preverjamo v rezidualnih prečnih prerezi, ki so za debelino ogljenja zmanjšani prvotni prečni prerezi, vzdolž nosilca na vsake  $0,3$  m. Projektni upogibni napetosti na spodnjem ravnem robu  $\sigma_{m,0,d,fi}(x)$  in zgornjem nagnjenem robu  $\sigma_{m,\alpha,d,fi}(x)$  izračunamo kot

$$\sigma_{m,0,d,fi}(x) = \sigma_{m,\alpha,d,fi}(x) = \pm \frac{M_{Ed,fi}(x)}{W_r(x)}, \quad (14)$$

kjer je  $M_{Ed,fi}(x)$  projektna vrednost upogibnega momenta v požarnem projektnejem stanju, ki ga v primeru prostoležečega nosilca izračunamo kot

$$M_{Ed,fi}(x) = \frac{q_{Ed,fi} \cdot L}{2} \cdot x - \frac{q_{Ed,fi}}{2} \cdot x^2, \quad (15)$$

kjer je  $q_{Ed,fi}$  največja obremenitev obravnavanega nosilca v požarnem projektnejem stanju,  $L$  dolžina nosilca in  $x$  vzdolžna koordinata nosilca.  $W_r(x)$  v enačbi (14) predstavlja odpornostni moment rezidualnega prečnega prereza, ki se za pravokotni preizračuna kot



Slika 7 • Največja debelina zoglele plasti ( $d_{char}$ ) v prečnih prerezi vzdolž nosilca in čas, ko je ta dosežena ( $t_{char}$ )

$$W_r(x) = \frac{b_r \cdot h_r^2(x)}{6}, \quad (16)$$

kjer je  $b_r$  širina,  $h_r(x)$  pa višina rezidualnega prečnega prereza.

Kontrolo upogibnih napetosti v požarnem projektnejem stanju na spodnjem ravnem robu preverimo po enačbi

$$\sigma_{m,0,d,fi}(x) \leq f_{m,d,fi}, \quad (17)$$

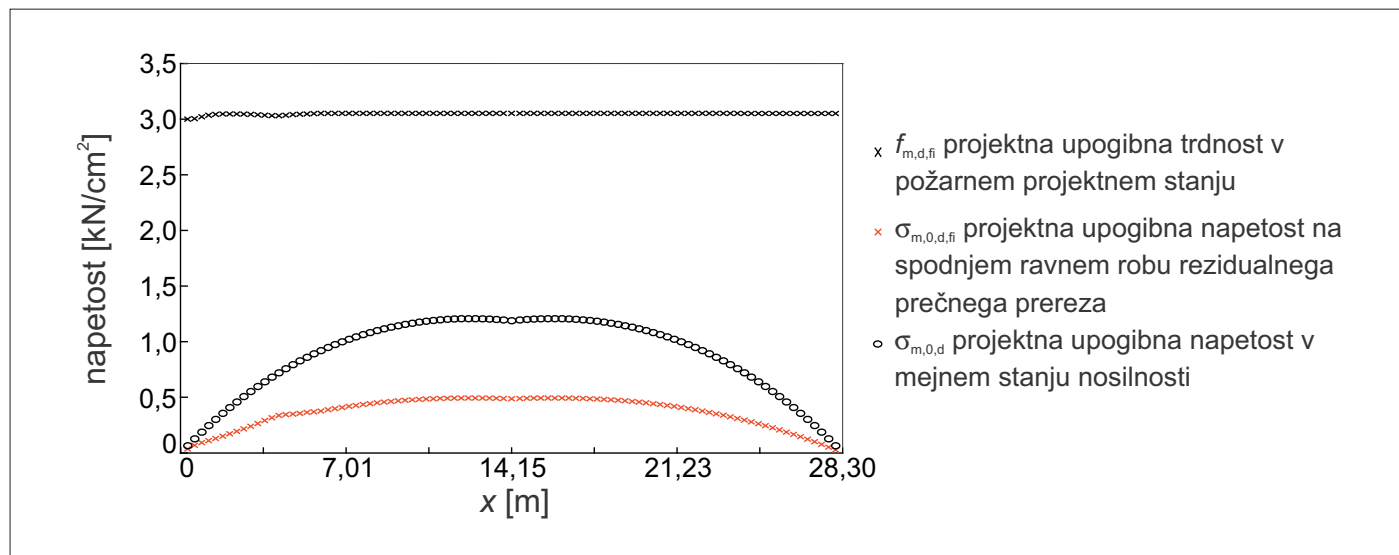
kjer je  $\sigma_{m,0,d,fi}(x)$  projektna upogibna napetost na spodnjem ravnem robu,  $f_{m,d,fi}$  pa projektna upogibna trdnost (slika 8).

Normalne napetosti v požarnem projektnejem stanju v krajnem vlaknu na zgornjem nagnjenem robu morajo izpolniti naslednji pogoj

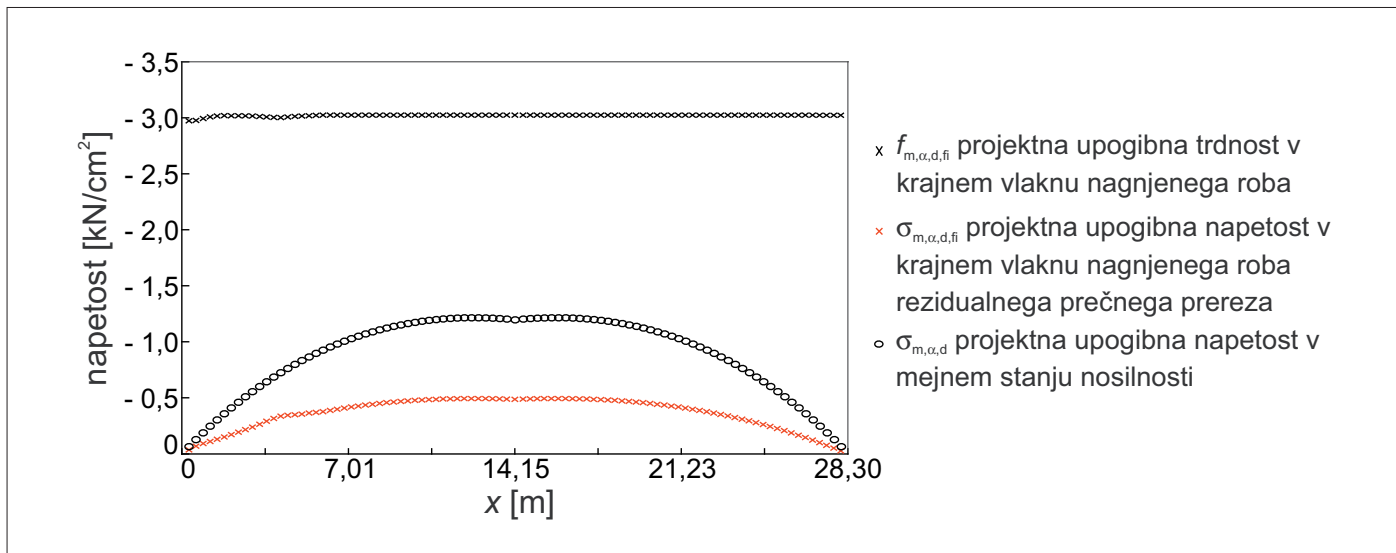
$$\sigma_{m,\alpha,d,fi}(x) \leq f_{m,\alpha,d,fi}, \quad (18)$$

kjer je  $\sigma_{m,\alpha,d,fi}(x)$  projektna upogibna napetost v krajnem vlaknu nagnjenega roba in  $f_{m,\alpha,d,fi}$  projektna upogibna trdnost v krajnem vlaknu nagnjenega roba, ki je enaka produktu

$$f_{m,\alpha,d,fi} = k_{m,\alpha,fi} \cdot f_{m,d,fi}, \quad (19)$$



Slika 8 • Projektna upogibna trdnost in napetost na spodnjem ravnem robu



Slika 9 • Projektna upogibna trdnost in napetost na zgornjem nagnjenem robu

kjer je  $f_{m,d,fi}$  projektna upogibna trdnost. Faktor  $k_{m,\alpha,fi}$  se za tlačne napetosti vzporedno z nagnjenim robom v požarnem projektnem stanju izračuna z izrazom

$$k_{m,\alpha,fi} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_{m,d,fi}}{1,5 \cdot f_{v,d,fi}} \cdot \tan \alpha\right)^2 + \left(\frac{f_{m,d,fi}}{f_{c,90,d,fi}} \cdot \tan^2 \alpha\right)^2}} \quad (20)$$

kjer je  $f_{m,d,fi}$  projektna upogibna trdnost v požarnem projektnem stanju,  $f_{v,d,fi}$  projektna strižna trdnost v požarnem projektnem stanju,  $f_{c,90,d,fi}$  projektna tlačna trdnost pravokotno na vlakna v požarnem projektnem stanju in kot  $\alpha$  nagnjenega roba nosilca (slika 9).

S slik 8 in 9 je razvidno, da sta upogibni napetosti na spodnjem in zgornjem robu manjši od projektne upogibne trdnosti. Največja upogibna napetost je dosežena na zgornjem

robu rezidualnega prečnega prereza pri  $x = 12,30$  m in znaša  $\sigma_{m,\alpha,d,fi} = -0,49$  kN/cm<sup>2</sup>, kar predstavlja le 17 % upogibne nosilnosti rezidualnega prereza v primeru predvidenih najneugodnejših požarnih scenarijev.

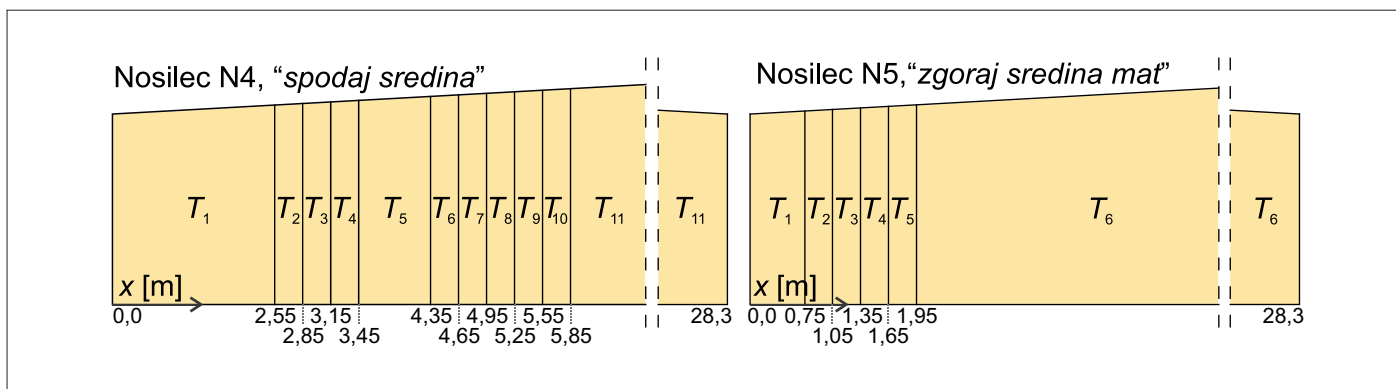
### 4.3 Požarna odpornost lepljenega lesenega nosilca po napredni računski metodi

Na koncu prikažemo še določitev požarne odpornosti nosilca skladno z napredno računsko metodo, ki je prikazana v razdelku 3.2. Kot smo že omenili, najprej opravimo toplotno analizo in nato na osnovi temperaturnih polj, izračunanih v toplotni analizi, določimo še mehanski odziv nosilca, ki je izpostavljen požaru in mehanski obtežbi. V nasprotju s ponostavljeno metodo, kjer smo na osnovi ovojnice temperatur okolice, doseženih v požarnih scenarijih "zgoraj sredina mat" in "spodaj sredina", izračunali debelino zogleneli plasti, je treba pri napredni metodi analizirati nosilca

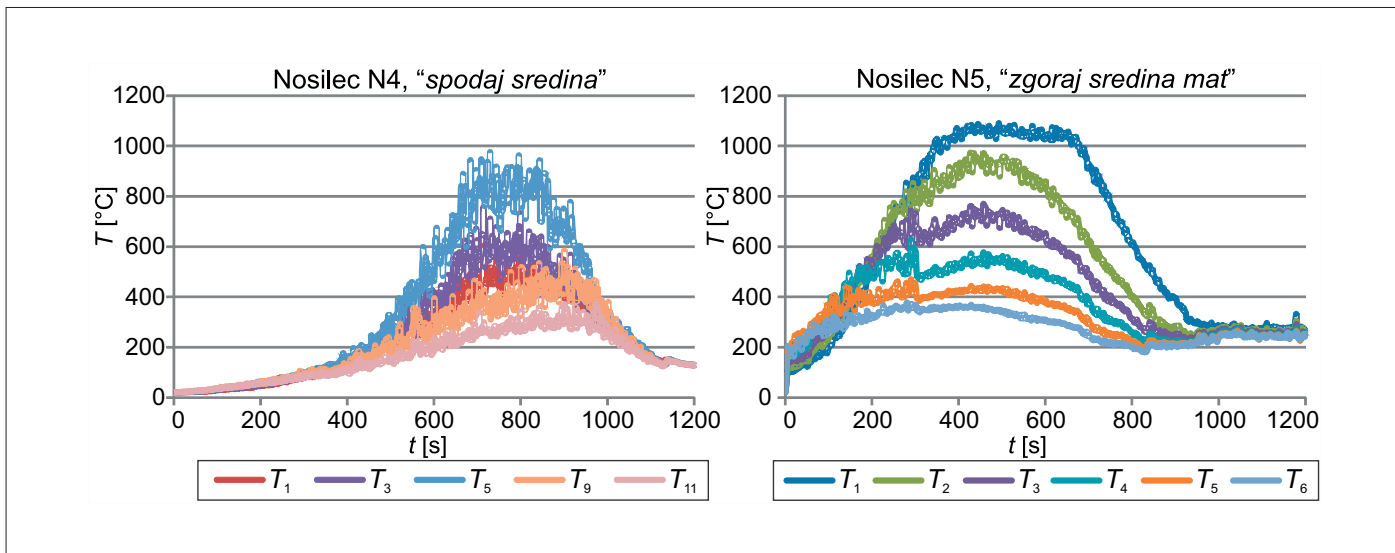
N4 in N5 posebej. V prvem delu prispevka (Huč, 2015) smo prikazali, da je za nosilec N4 merodajen požarni scenarij "spodaj sredina" in za nosilec N5 požarni scenarij "zgoraj sredina mat".

#### 4.3.1 Toplotna analiza

V prvem delu prispevka (Huč, 2015) so bile določene adiabatske temperature na površini nosilca, ki se spreminjajo vzdolž njega. Glede na rezultate nosilca razdelimo v več temperaturnih polj. Tako je vzdolž nosilca N4 določenih 11, vzdolž nosilca N5 pa 6 različnih temperaturnih polj (slika 10). Zaradi tega je toplotna analiza za račun razporeditve temperatur po prečnem prerezu nosilca narejena za 11 oziroma 6 prečnih prerezov, ki pripadajo posameznim temperaturnim poljem. Na sliki 11 je prikazanih nekaj časovnih potekov temperatur znotraj temperaturnih polj vzdolž nosilcev N4 in N5.



Slika 10 • Prikaz razporeditve temperaturnih polj vzdolž nosilcev N4 in N5 za požarna scenarija "spodaj sredina" in "zgoraj sredina mat"



Slika 11 • Prikaz časovnih potekov temperatur znotraj posameznih temperaturnih polj vzdolž nosilcev N4 in N5

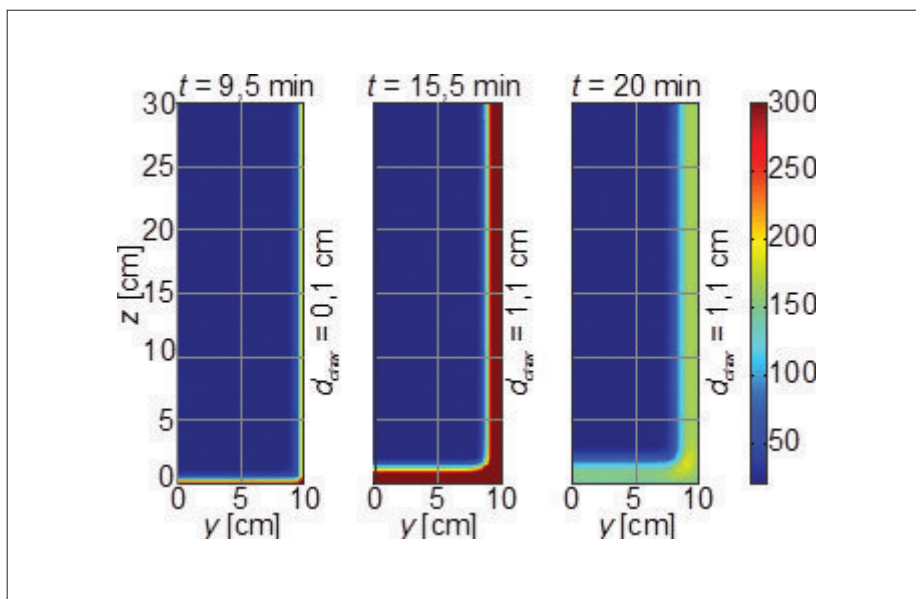
Pri računu prenosa toplote uporabimo termične parametre po priporočilu SIST EN 1995-1-2 (2004). Vhodni podatki za analizo so naslednji: začetna gostota lesa  $\rho_0 = 460 \text{ kg/m}^3$ , faktor emisivnosti  $\varepsilon_m = 0,8$ , konvekcijski prestopni koeficient  $\alpha_c = 35 \text{ W/m}^2\text{K}$  in začetna temperatura  $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Slika 12 prikazuje razvoj temperatur po prečnem prerezu na razdalji  $x = 4,35 \text{ m}$  od podpore za nosilec N4 pri različnih časih (temperaturno polje  $T_5$ ).

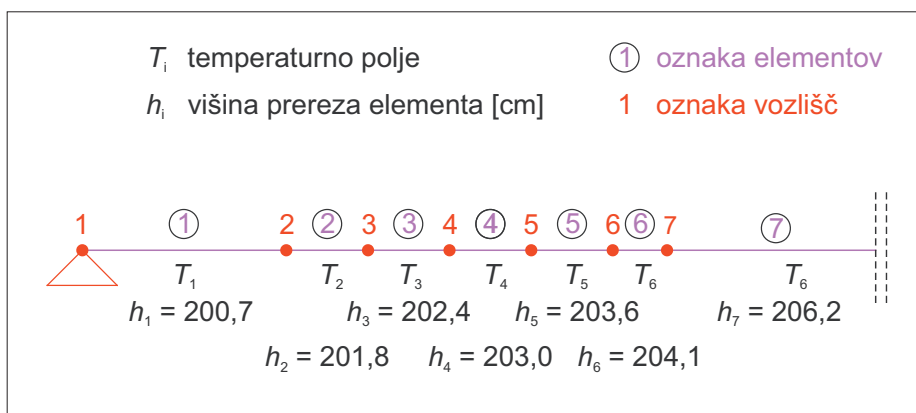
Temperature, prikazane na sliki 12, so zaradi simetrije izračunane samo za polovico širine prereza. Poleg tega je v računu upoštevana višina 30 cm, čeprav realna višina nosilca znaša 200 do 228 cm. Izbira manjše višine bistveno skrajša računski čas, hkrati pa ne vpliva na rezultate, saj je že s slike razvidno, da je temperaturno polje od višine 10 cm naprej enako. Pri interpretaciji slik si pomagamo z legendo, ki je nastavljena tako, da lažje razberemo, kje poteka zoglenela plast ( $T > 300 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Na ta način vidimo, da prerez začne ogleteneti pri času  $t = 9,5 \text{ min.}$ , največja debelina pa nastopi pri času  $t = 15,5 \text{ min.}$  in znaša 1,1 cm. Za tem se temperature po prečnem prerezu znižajo in pri času  $t = 20 \text{ min.}$  padejo pod  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ . Kljub temu se debelina zoglenele plasti v fazi ohlajanja ne zmanjša ( $d_{\text{char}} = 1,1 \text{ cm}$ ), saj je ogletenje ireverzibilen proces.

### 4.3.2 Določitev mehanske odpornosti po napredni računski metodi

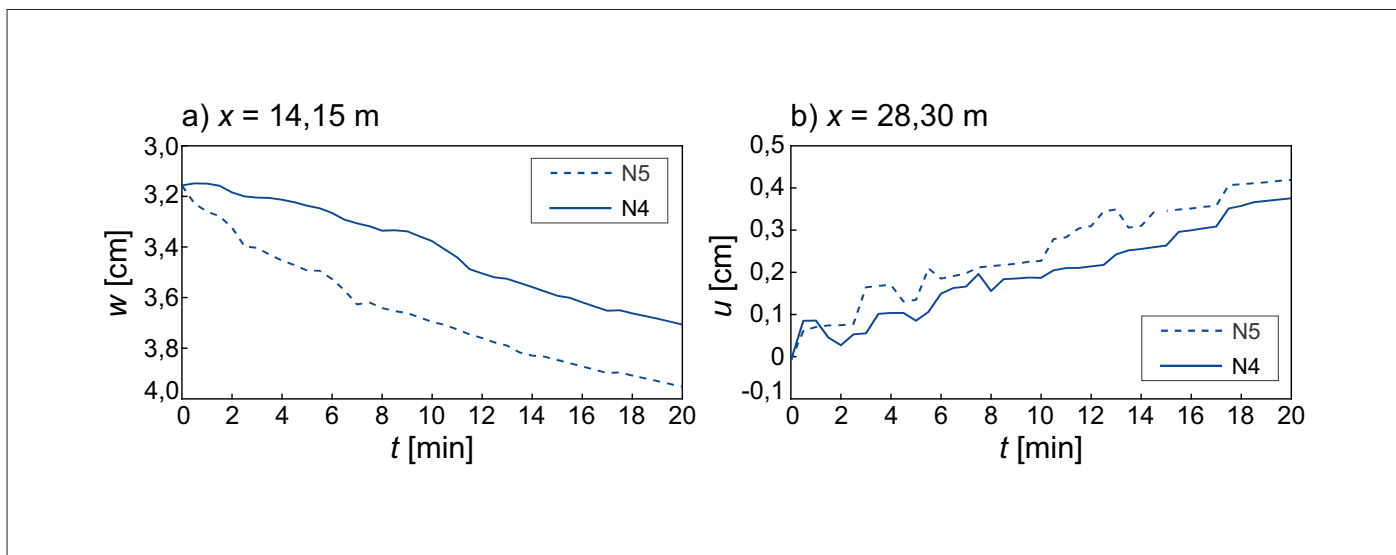
Nosilec N4 modeliramo s 24 končnimi elementi in nosilec N5 z 19 končnimi elementi. Število končnih elementov je nekoliko večje zaradi tega, ker imamo vzdolž nosilcev



Slika 12 • Razporeditev temperature po prerezu pri  $x = 4,35$  za izbrane čase za temperaturno polje  $T_5$



Slika 14 • Računski model nosilca N5



Slika 15 • Potek vertikalnega pomika  $w$  na sredini nosilca ( $x = 14,15$  m) in potek horizontalnega pomika  $u$  v pomični podpori ( $x = 28,30$  m) v odvisnosti od časa

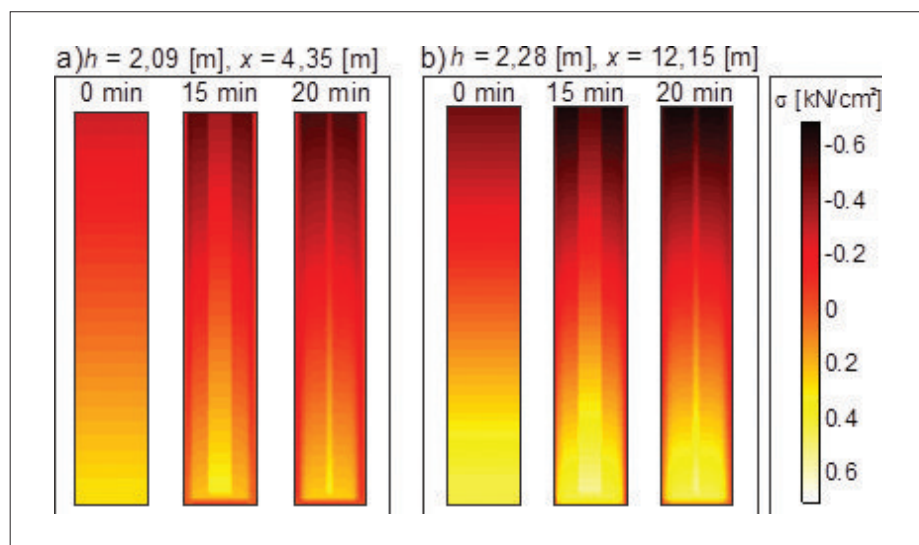
različna temperaturna polja, hkrati pa se vzdolž nosilca spreminja tudi višina nosilcev. Skladno s programskim orodjem NFIRA je posamezno temperaturno polje vezano na prečni prerez, posamezni končni element pa ima vzdolž elementa enak prečni prerez. Tako na primer za modeliranje nosilca N4, ki ima vzdolž svoje dolžine 11 različnih temperaturnih polj, potrebujemo najmanj 11 končnih elementov. Zaradi spreminjajoče se višine nosilca se število končnih elementov še poveča. Višina posameznega prečnega prereza pa je določena kot povprečna višina dejanskega nosilca (slika 4) na mestu končnega elementa. Na sliki 14 so prikazani računski model nosilca N5 ter pripadajoče višine prečnega prereza in oznake temperaturnih polj posameznega končnega elementa. Zaradi preglednosti je prikazan samo del nosilca, kjer je predpisanih več različnih temperaturnih polj.

Skladno z ugotovitvami iz prvega dela prispevka (Huč, 2015) celoten čas trajanja požara znaša 20 min. Izkaže se, da do porušitve analiziranih nosilcev v tem času ne pride. Na sliki 15 je prikazan potek vertikalnega pomika na sredini nosilca ( $x = 14,15$ ) in horizontalnega pomika v pomični podpori na koncu nosilca ( $x = 28,30$ ).

Največji vertikalni pomik za nosilec N4 znaša 3,7 cm, za nosilec N5 pa 3,95 cm. Pomika se od začetnega vertikalnega pomika, ki znaša  $w_0 = 3,15$  cm, razlikujeta za 0,55 cm oziroma 0,8 cm. Prirastek pomika je torej majhen.

Zaradi temperaturnih deformacij se nosilca N4 in N5 nekoliko raztegneta (slika 15b), in sicer je horizontalni pomik na mestu pomične podpore za nosilec N4 enak 0,37 cm, za nosilec N5 pa 0,42 cm. Na sliki 16 prikazujemo še potek napetosti za nosilec N4. Razpored napetosti je prikazan na mestu največje požarne obremenitve ( $x = 4,35$  m) in na mestu največje mehanske obremenitve ( $x = 12,15$  m) pri različnih časih. Največje napetosti v tlaku znašajo  $-0,71$  kN/cm<sup>2</sup>, v nategu pa  $0,54$  kN/cm<sup>2</sup> pri  $x = 12,15$  m. Napetosti so

majhne in lahko sklepamo, da je takšen nosilec sposoben kljubovati veliko večji požarni obtežbi. S slike 16 je razvidno tudi, da napetosti po širini prečnega prereza niso enake, kot je to pri sobni temperaturi ( $t = 0$  min). Pri času 15 min. in 20 min. višje napetosti nastopijo v hladni notranjosti nosilca, medtem ko so napetosti ob robu zaradi povišane temperature in posredno manjše nosilnosti materiala nižje. Vidimo tudi, da so napetosti ob zoglenelem robu prereza pri največji požarni obremenitvi ( $x = 4,35$  m) enake 0 (slika 16a).



Slika 16 • Razpored napetosti po prečnem prerezu nosilca N4

## 5 • SKLEP

V tem delu prispevka sta skladno s SIST EN 1995-1-2 (SIST, 2005) predstavljena napredna računsko metoda in poenostavljen postopek za analizo mehanskega odziva lepljenega lesenega nosilca pri sočasnem vplivu mehanske in požarne obtežbe. Glede na znan časovni potek temperature okolice med požarom je časovna in prostorska razporeditev temperature po lesenem elementu določena v toplotni analizi. Po metodi zmanjšanih materialnih karakteristik, ki spada med poenostavljene postopke, se pri kontroli upogibnih napetosti na spodnjem in zgornjem robu elementa upošteva zmanjšan prečni prerez zaradi oglečenja ter zmanjšane trdnostne in togostne karakteristike lesa pri povišani temperaturi. V naspro-

tju s poenostavljeno metodo, kjer je debelina zoglenele plasti izračunana na podlagi ovojnice temperatur okolice in ob upoštevanju predpostavke, da les zogleni, ko se segreje nad 300 °C, se pri napredni računski metodi analizirajo temperaturna polja nosilcev N4 in N5 ločeno. Pri določitvi mehanskega odziva nosilcev N4 in N5 z napredno računsko metodo je uporabljena metoda končnih elementov za reševanje geometrijsko točnih enačb za opis napetostno deformacijskega stanja nosilca. Pričakovano se izkaže, da pri računu mehanske odpornosti lepljenega lesenega nosilca v primeru požara z metodo zmanjšanih karakteristik dobimo bolj konservativne rezultate kot pri računu z napredno računsko metodo. Najpomembnejša je ugo-

tovitev, da obstoječi lepljeni leseni nosilci, ki so del strešne konstrukcije športne dvorane v Dravogradu, prenesejo predvideno požarno obremenitev. Ta ugotovitev je pričakovana, saj je za dimenzioniranje lesenih konstrukcij pri normalnih pogojih merodajno mejno stanje uporabnosti (MSU). S tem je nosilec manj izkoriščen, kar pomeni, da ima večjo rezervo v smislu mejnega stanja nosilnosti (MSN) in požarne obtežbe.

Celoten prispevek, ki je sestavljen iz že objavljenega prvega dela (Huč, 2015) in tega drugega dela, prikazuje koncept performančnega načina projektiranja konstrukcijskega elementa z uporabo naprednih metod v vseh fazah požarne analize. Koncept se lahko smiselno preslika na načrtovanje celih konstrukcij, kjer pride, predvsem pri kompleksnejših in nestandardnih konstrukcijah, njegova uporabnost do precejšnjega izraza.

## 6 • ZAHVALA

Prispevek je nastal v okviru operacije KROP 13: Razvoj in implementacija projektantskih metod v gradbeno podjetje z lastno projektivo

in operativo – Priložnost za konkurenčno prednost na trgu, št. OP13.2.1.1.07.0018, ki jo po pogodbi št. C2130-14-090118 financirata

Republika Slovenija, ministrstvo za gospodarski razvoj in tehnologijo, ter Evropska unija, Evropski socialni sklad. Delo Roberta Pečenka je podprla Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije po pogodbi št. 1000-11-310126. Za podporo se iskreno zahvaljujemo.

## 7 • LITERATURA

- Bratina, S., Odziv armiranobetonskih linijskih konstrukcij na požarno obtežbo, Doktorska disertacija, FGG, Univerza v Ljubljani, 2003.
- Hozjan, T., 2D analiza prevajanja toplote po mediju: program HEATKO. Ljubljana, UL FGG, 2009.
- Huč, S., Rozman, M., Kolšek, J., Hozjan, T., Performančni način projektiranja požarne odpornosti lepljenega lesenega nosilca – 1.del: Modeliranje razvoja požara v računalniškem programu FDS, Gradbeni vestnik, april 2015.
- Načrt gradbenih konstrukcij, Večnamenska dvorana ŠPIC D, GiiP, d. o. o., 2011.
- Pischl, R., Holzbau mit kritischen betrachtungen und neuen vorschlägen zur bemessung nach theorie 1. und 2. Ordnung, Institut für Stahlbau, Holzbau und Flächentragwerke, Technische Universität Graz, 1980.
- Planinc, I., Račun kritičnih točk konstrukcij s kvadratično konvergentnimi metodami, doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani, 1998.
- Reissner, E., On one-dimensional finite-strain beam theory: the plane problem, J. Appl. Math. Phys. (ZAMP), 23, 795–804, 1972.
- Srpčič, S., Srpčič, S., Saje, M., Turk, G., Mechanical analysis of glulam beams exposed to changing humidity, Wood Sci. Technol., 43, 9–22, 2009.
- SIST EN 1990:2004 – Evrokod – Osnove projektiranja konstrukcij, 2004a.
- SIST EN 1991-1-2:2004 – Evrokod 1 – Vplivi na konstrukcije – 1-2. del: Splošni vplivi – Vplivi požara na konstrukcije, 2004b.
- SIST EN 1995-1-2:2005 – Evrokod 5 – Projektiranje lesenih konstrukcij – 1-2. del: Splošna pravila – Projektiranje požarnovarnih konstrukcij, 2005.

# POMEN VSEBOVANE ENERGIJE V IZBRANIH GRADBENIH PROIZVODIH ZA IZREDNO UČINKOVITE TOPLOTNE OVOJE STAVB

## IMPORTANCE OF EMBODIED ENERGY IN SELECTED CONSTRUCTIONAL PRODUCTS FOR HIGHLY EFFICIENT THERMAL ENVELOPES

**Martin Jenko, dipl. inž. grad.**

Stiška vas 2, 4207 Cerklje na Gorenjskem

**doc. dr. Mateja Dovjak, dipl. san. inž.**

mateja.dovjak@fgg.uni-lj.si

**doc. dr. Roman Kunič, univ. dipl. inž. grad.**

roman.kunic@fgg.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo

Katedra za stavbe in konstrukcijske elemente, Jamova 2, Ljubljana

**Znanstveni članek**

UDK 621.186.4:699.8

**Povzetek** | Področje učinkovite rabe energije je že od prvih energetske krize izjemno aktualno, s tem pa posredno tudi sanacija energetske potratnih stavb v Sloveniji. Največ raziskav je bilo opravljenih na področju finančnih vložkov in prihrankov energije, potrebne za ogrevanje in hlajenje stavb, kot posledica izvedbe sanacijskih ukrepov v obnovo toplotnih ovojev. Pri tem pa vsebovana energija v primerjavi s porabljeno energijo v amortizacijski dobi toplotnega ovoja ostaja v večji meri slabo raziskana. Pri izvedbi sanacijskih ukrepov, ki so energetske učinkoviti in obenem prispevajo k varovanju okolja, je poznavanje vsebovane energije v gradbenih proizvodih izrednega pomena. Članek obravnava vsebovano energijo izbranih gradbenih proizvodov, toplotnoizolacijskih materialov. S ciljem varčevanja energije v stavbi z amortizacijsko dobo toplotnega ovoja tridesetih let je namen članka ugotoviti smiselnost vgradnje toplotnoizolacijskih gradbenih proizvodov, ki imajo različno veliko količino vsebovane energije. Predpostavili smo referenčni neizoliran objekt, izbrali in določili najpomembnejše konstrukcijske sklope za analizo in objekt locirali v tri različna karakteristična klimatska območja v Sloveniji z različno dobo trajanja ogrevalne sezone. Na podlagi zakonsko določene toplotne prehodnosti posameznega elementa stavbe smo najprej določili izgubo energije ogrevanja na kvadratni meter konstrukcijskega sklopa. S podatki vsebovane energije izbranih gradbenih proizvodov, pripadajočih gostoti in toplotnih karakteristik materiala smo izračunali količino vsebovane energije. V nadaljevanju smo mejne toplotne prehodnosti konstrukcijskih sklopov zaostriili do te mere, da je vsebovana energija v uporabljenih izolacijskih materialih predstavljala približno tretjino vse porabljene energije v amortizacijski dobi toplotnega ovoja. Rezultati analize so pokazali, da je večino organskih toplotnoizolacijskih materialov z izjemo plute in večino anorganskih toplotnoizolacijskih materialih z izjemo penjenega stekla energijsko smiselno vgrajevati v toplotni ovoj izbranega elementa stavbe. Pluta ( $2530 \text{ MJ/m}^2$ ) in penjeno steklo ( $1700 \text{ MJ/m}^2$ ) namreč močno presegata predpostavljeno razmerje energij v primerjavi s preostalimi proizvodi (od  $170 \text{ MJ/m}^2$  do

1400 MJ/m<sup>2</sup>). Pluta kot izolacijski material s stališča razmerja energij ni primerna za izdelavo toplotnega ovoja, saj vsebovana energija v nobenem primeru ne doseže razmerja ena tretjina v primerjavi s porabljeno energijo v dobi trideset let. Penjeno steklo pa ima kopico drugih pozitivnih lastnosti (velika tlačna odpornost, izjemna odpornost proti vlagi in difuzijski pari), zato ga je smiselno uporabiti pod določenimi pogoji. Terasa kot konstrukcijski sklop ima zelo mile zakonsko predpisane mejne vrednosti toplotne prehodnosti, saj v amortizacijski dobi nastajajo prevelike toplotne izgube. Analiza vsebovane energije za sanacijo stavb ima velik pomen za celovito sanacijo stavbe. Omogoča nam lažji izbor proizvodov, ki krepijo energetska učinkovitost gradnje, s tem pa pripomoremo k nižjim emisijam CO<sub>2</sub> in tako tudi k zmanjšanim stroškom za obratovanje stavbe.

Ključne besede: vezana energija, vsebovana energija, toplotna izolacija, življenjski cikel, energetska bilanca, energetska sanacija

**Summary** | Since the first energy crisis, the field of energy efficiency, as well as rehabilitation of inefficient buildings in Slovenia, have been a current issue. Most research has been conducted in the field of financial inputs and energy savings, required for heating and cooling of buildings, as a result of the implementation of remedial actions in the reconstruction of thermal building envelopes. However, the scope of embodied energy compared to the energy consumed in the amortization period of the thermal envelope has not been researched thoroughly. The knowledge about embodied energy is extremely important when carrying out the remedial measures that are more energy efficient and at the same time contribute to the protection of the environment. This article deals with embodied energy of selected construction products, thermal insulation materials. With the aim of saving energy in the building process, the purpose of the article is to determine the differences in the use of building materials with high embodied energy with the intention to save the energy in the amortization period of the thermal envelope over thirty years. Our reference is a non-isolated object, where we selected and defined the most important construction products for analysis. We placed the object into three characteristically different climatic zones in Slovenia with different duration of the heating season. On the basis of the regulated U-value of each building element we calculated the loss of energy for heating per one square meter of the construction complex. Using the obtained data of embodied energy, densities and thermal characteristics of the material we calculated the amount of embodied energy. Later, we tightened the limit U-values to such an extent that the embodied energy represented about a third of all consumed energy in the amortization period of the thermal envelope. The results showed that the majority of organic thermal insulation materials, with the exception of cork, and most of the inorganic thermal insulation materials, with the exception of foam glass, are reasonable to use in the thermal envelope of the building. Cork (2530 MJ/m<sup>2</sup>) and foam glass (1700 MJ/m<sup>2</sup>) are above the assumed ratio of energies compared to other products (from 170 MJ/m<sup>2</sup> to 1400 MJ/m<sup>2</sup>). From the perspective of the ratio between energies, cork is not suitable material for the thermal envelope, because the embodied energy cannot reach one third of the energy consumed over the period of thirty years. Foam glass has plenty of other qualities (high pressure resistance, excellent resistance to moisture and vapor diffusion) and it is therefore reasonable to use it under certain conditions. The analysis has also shown that the terrace has not so strictly regulated limit of U-value, as it experiences excessive heat loss in the amortization period. Analysis of embodied energy for the rehabilitation of buildings is of great importance for the comprehensive rehabilitation of a building. It helps us select products that enhance the energy efficiency of a building and thereby contribute to lower CO<sub>2</sub> emissions and thus reduce the cost of operating the building.

Keywords: embodied energy, thermal insulation, life-cycle analysis, energy balance, energy rehabilitation



## 1 • UVOD

Gradbeništvo, industrija gradbenih proizvodov in ravnanje z gradbenimi odpadki predstavljajo velik delež gospodarske aktivnosti, ki s svojim delovanjem občutno vpliva na okolje in ga do določene mere degradira. V procesu načrtovanja stavbe moramo posvetiti veliko pozornosti varovanju okolja s poudarkom na varčevanju z neobnovljivimi viri energije, rabi obnovljivih virov energije, zmanjšanju porabe surovin in gospodarjenju z odpadki. Študije ((Crowther, 1999), (Crawford, 2003), (Pullen, 2006)) navajajo, da se največ primarne energije porabi v fazi pridobivanja surovin, izdelave posameznih proizvodov, kasnejšem vgrajevanju in transportu. Glavno vprašanje, na katero bo treba odgovoriti v prihodnosti, je, kako naj bo panoga trajnostno naravnana (količina vsebovane energije, možnost razgradnje in ponovne uporabe ...) in orientirana k posamezniku, k zdravemu bivalnemu in delovnemu okolju. Poleg različnih komponent, ki vplivajo na trajnostno gradnjo in povezovanje strok gradbeništva, arhitektov, urbanistov in drugih, je posebno pozornost treba nameniti tudi izbiri trajnostnih gradbenih proizvodov (Dovjak, 2013). Glavna problematika v Sloveniji se je začela z intenzivno gradnjo individualnih in večstanovanjskih objektov v obdobju od

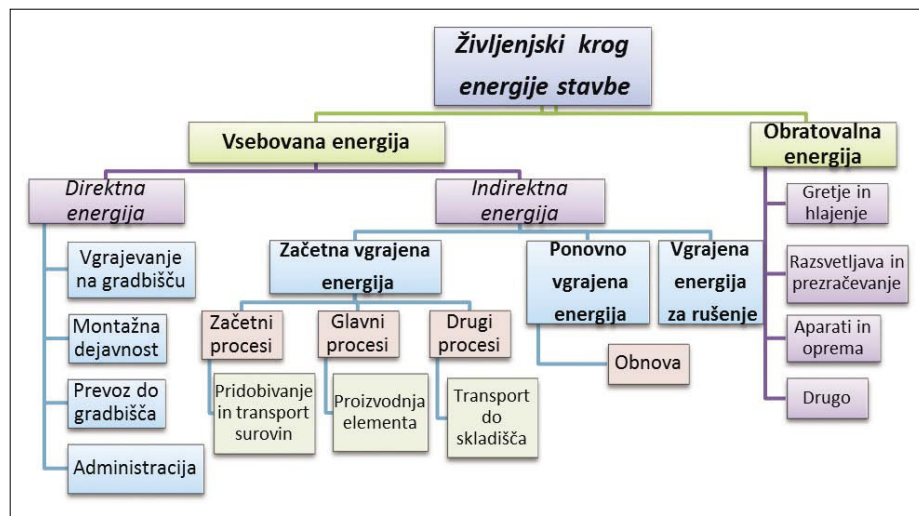
začetka sedemdesetih do konca osemdesetih let (Marušič, 2014). Novi predpisi so v osemdesetih letih zahtevali dodaten sloj toplotne izolacije, vendar pa se je v praksi izkazalo, da so stanovanjske hiše večjih florisnih površin brez toplotne izolacije ali pa je ta neustrezna. V Sloveniji je zadnja leta mogoče opaziti trend povečanja investicij v obnovo starejših objektov, predvsem zaradi čezmerne rabe energije za ogrevanje v kurilni sezoni. Na trgu je dandanes veliko ponudnikov, ki ponujajo različne gradbene toplotnoizolacijske proizvode. Ti se med seboj razlikujejo tudi glede na izbiro gradnika izolacije, to pa kasneje privede do izbire optimalnega tehnološkega postopka izdelave izolacije. Marsikatera toplotna izolacija je z vidika porabe energije med samo proizvodnjo, vključno s pridobivanjem surovin, izjemno potratna. Vprašamo se, ali je z namenom varčevanja smiselno vgrajevati proizvode, ki že v osnovi vsebujejo veliko količino vsebovane energije (vgrajena, vsebovana, vezana ali vključena energija; ang. *embodied energy*). Načrtovanje stavb v današnjem času še vedno poteka v smeri prizadavanja za ohranjanje energije na račun obratovalne energije. Pri tem je ključnega pomena ukrep na nivoju toplotne izolativnosti ovoja s povečanjem debeline to-

plotne izolacije. Ta ukrep predstavlja občutno večji delež k zmanjšanju rabe energije, kot pa je delež vsebovane energije stavbe oziroma njenih delov. Vendar pa raziskave dokazujejo ravno nasprotno. Raziskovalci ((Crowther, 1999), (Crawford, 2003), (Pullen, 2006)) ugotavljajo, da vsebovana energija predstavlja znaten delež celotne energije v življenjskem ciklu stavbe oziroma njenih delov. Vsebovana energija se namreč porabi enkrat v začetni fazi gradnje stavbe, medtem ko se operativni del energije zvišuje med efektivno življenjsko dobo zgradbe (Koskela, 1992). Ohranjanje oziroma zmanjševanje obratovalne energije lahko dosežemo z energetsko učinkovitimi napravami (ogrevanje, ohlajanje ...) in s sodobnimi toplotnoizolacijskimi materiali. Še več, Kumar Dixit s sodelavci (Kumar Dixit, 2010) navaja, da je vsebovano energijo mogoče zmanjšati z nizkoenergetsko intenzivnimi materiali, optimizacijo proizvodnega procesa in transportnih poti. Poznavanje vsebovane energije ima velik pomen pri celostni sanaciji stavbe, ki je energetsko varčna in obenem okolju prijazna. Namen članka je ugotoviti dejanski prihranek energije v določenem časovnem obdobju, ko v stavbi ovoj investiramo toplotno zaščito. Osredotočili smo se na porabo energije, ki je potrebna za izdelavo določenega gradbenega proizvoda (toplotnoizolacijskega materiala), od pridobivanja surovin, transporta do končne uporabe.

## 2 • VLOGA VSEBOVANE ENERGIJE PRI UČINKOVITI RABI ENERGIJE V STAVBAH

### 2.1. Vsebovana energija

Izbor materialov in tehnologij za gradnjo stavb mora biti usmerjen tako, da zadovalji potrebe posameznika kot tudi razvojne strategije družbe, hkrati pa mora imeti čim manjši škodljiv vpliv na okolje ((Rio Convention, 2002), (GC ZRMK, 2003)). V zadnjih letih se je zavedanje o okoljskih vidikih v sektorju gradbeništva povečalo. Proizvodni procesi gradbenih proizvodov izpuščajo v ozračje velike količine toplogrednih plinov, kot je denimo CO<sub>2</sub>. Zato sta se pojavili velika skrb in pozornost za zmanjševanje emisij toplogrednih plinov v ozračje z namenom, da bi nadzirali škodljive vplive na okolje (Venkatarama Reddy, 2003). Energijo v stavbi lahko razvrstimo v dve skupini, in sicer energijo za obratovanje oz. vzdrževanje njenega časa obratovanja in vse-



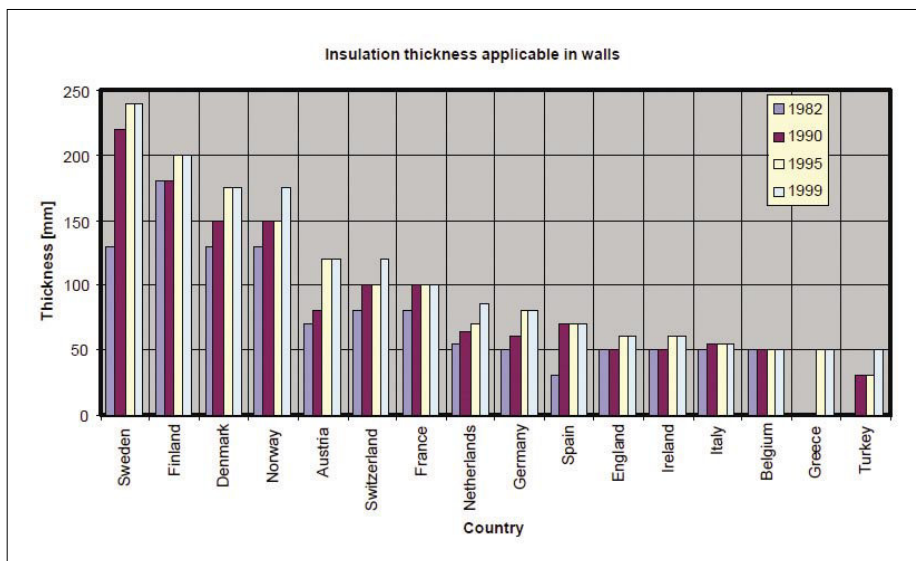
Slika 1 • Življenjski krog energije stavbe v povezavi s posameznimi gradbenimi proizvodi (Kumar Dixit, 2010)

bovano energijo oziroma vgrajeno energijo (ang. *embodied energy*) v gradbenih proizvodih, ki tvorijo stavbo kot celoto (slika 1). Izraz vsebovana energija se je uveljavil v začetku devetdesetih let, ko raziskovalec Tennenbaum definira metodo input-output oz. interpretira ekosistem energetskega toka (Tennenbaum, 1988). Predstavlja količino energije, ki je potrebna za proizvodnjo produkta, transporta do mesta vgradnje, same vgradnje in kasneje ustrezne odstranitve (Kumar Dixit, 2010). Kvantitativno jo izrazimo kot celotno vsoto posredne in neposredne potrebne energije za izdelavo proizvoda. V dobesednem pomenu je vsebovana energija računsko kvantitativna metoda, katere namen je določiti skupno porabo energije, od pridobivanja surovin, transporta, proizvodnje, predelave, obdelave, montaže in drugih stroškov, z namenom izdelave proizvoda ali storitev ter končno demontažo in skrb za odpadke (Kunič, 2008). Vsebovana energija v stavbah se lahko spreminja glede na izbiro gradbenih materialov in načina gradnje (Venkatarama Reddy, 2003). Venkatarama Reddy in Jagadish (Venkatarama Reddy, 2003) navajata, da vsebovano energijo tvorijo tri glavne komponente: a) poraba energije pri proizvodnem procesu izdelave oz. recikliranja gradbenih proizvodov; b) energija, potrebna za prevoz gradbenih proizvodov; c) energija, ki je potrebna za »spajanje različnih materialov, da se tvori stavba«, oziroma energija, ki je potrebna za demontažo gradbenih materialov. Če upoštevamo te tri glavne komponente vsebovane energije, lahko lažje izberemo proizvode, ki krepijo energetska učinkovitost gradnje, in s tem pripomoremo k nižjim emisijam CO<sub>2</sub> ter tako tudi zmanjšamo stroške gradnje stavb (Venkatarama Reddy, 2003).

## 2.2 Učinkovita raba energije

Ukrep na področju toplotne izolativnosti ovoja stavbe je bil v večini evropskih držav sprejet pred približno 40 leti. Velja za glavno orodje, ki se navezuje/odraža na učinkoviti rabi energije v stavbah. Raziskava (Papadopoulos, 2005) povzema zakonsko predpisane debeline toplotne izolacije v EU (slika 2). V večini evropskih držav zakonsko predpisana debelina iz leta v leto narašča. Situacija se od leta 1970 razlikuje glede na geografski položaj države v Evropi. V nekaterih državah so zahteve po debelini izolacije v istem obdobju skoraj podvojili, denimo v severni Evropi (Papadopoulos, 2005).

Prvi kakovostni predpisi, ki so se lotili problema toplotne izolacije stavb v Sloveniji, so

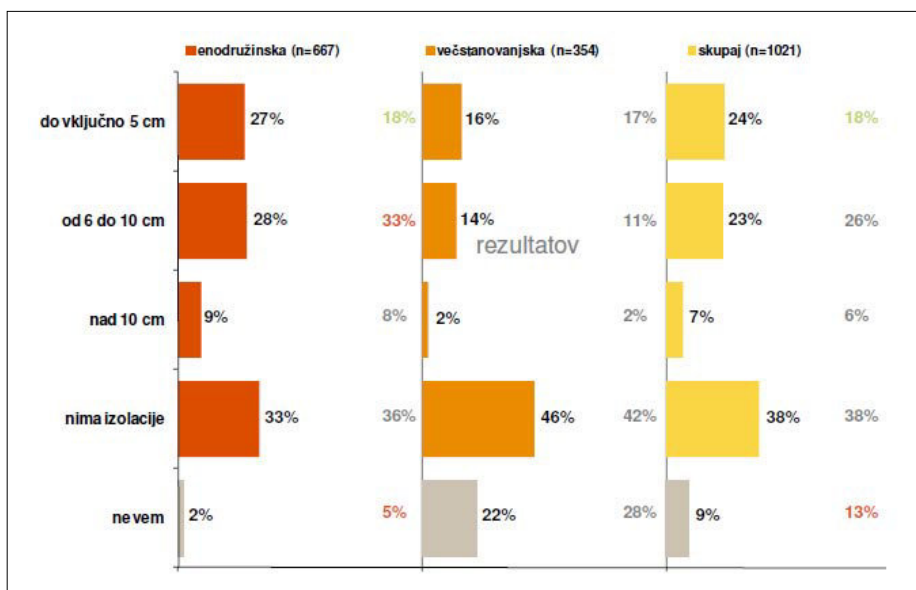


Slika 2 • Zakonski razvoj debeline izolacije po Evropi (Papadopoulos, 2005)

bili izdani leta 1970, in sicer v Pravilniku o tehničnih ukrepih in pogojih za toplotno zaščito stavb (SFRJ, 1970). Pravilnik je predpisoval največje dovoljene toplotne prehodnosti (W/m<sup>2</sup>K) elementov ovoja stavbe v odvisnosti od lokacije objekta oziroma klimatske cone. Služil je kot podlaga za izdelavo standarda JUS leta 1980 (GC ZRMK, 2002). Predpisane zahteve so nekoliko omilile porabo energije, saj je bil po tem pravilniku na primer za zunanjo steno v tretji klimatski coni največji dovoljeni koeficient 1,28 W/m<sup>2</sup>K. Šele leta 1980 se je na območju Slovenije zgodil večji preboj na področju zmanjševanja toplotnih izgub z uveljavitvijo obvezne uporabe standarda JUS

– Tehnični pogoj za projektiranje in graditev stavb (JUS, 1980). Za primer je bila v standardu definirana največja dovoljena toplotna prehodnost za zunanjo steno v tretji klimatski coni 0,83 W/m<sup>2</sup>K. Kljub drastični spremembi oziroma zaostritvi mejne vrednosti je bila toplotna zaščita stavb manj stroga v primerjavi s takratnimi trendi drugje po razviti Evropi. Če namreč preračunamo potrebno debelino dodatne izolacije, ta znaša približno 3 cm, pri čemer smo v takratnem obdobju primerljivi s Španijo (glej sliko 2 – rdeča črta).

V raziskavi REUS (raziskava energetske učinkovitosti Slovenije) iz leta 2012, opravila jo je agencija Informa Echo (REUS, 2013),

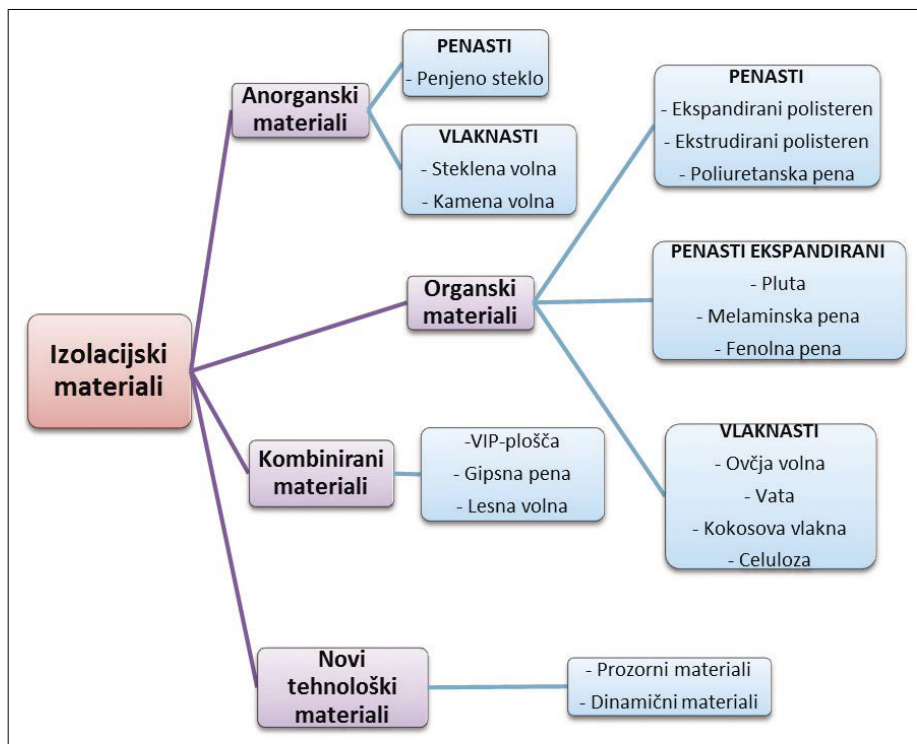


Slika 3 • Debelina toplotne izolacije stavb (REUS, 2013)

je bilo ugotovljeno, da ima okoli 27 % enodružinskih hiš debelino toplotne izolacije le pet centimetrov, 33 % individualnih stavb sploh nima toplotnega ovoja, delež neizoliranih večstanovanjskih stavb pa je 46 %, kar je razvidno tudi s slike 3. Torej 60 % enodružinskih in 75 % večstanovanjskih stavb po debelini izolacije spada med energetske neučinkovite. Le 9 % enodružinskih hiš bi lahko uvrstili v energetske učinkovite razred, saj imajo debelino izolacije nad 10 cm (REUS, 2013).

Slednje se odraža v veliki rabi energije za grejte in hlajenje stavb. Statistični urad Republike Slovenije (SURS, 2012) navaja, da gospodinjstva v Sloveniji porabijo več kot 20 % vse končne energije. Skupaj s pridelovalnimi dejavnostmi in gradbeništvom pa delež naraste čez polovico. Zmanjševanje rabe končne energije je pomembno z vidika zagotavljanja nemotene dobave energije in konkurenčnosti gospodarstva kakor tudi z vidika zmanjševanja vplivov na okolje (ARSO, 2014).

V Sloveniji analiza vsebovane energije v proces načrtovanja stavb še ni vključena. Omenjeno je nujno za sanacije oziroma novogradnje v prihodnosti. Pri analizi vsebovane energije ima velik pomen tudi vrsta gradbenega proizvoda. Najbolj razširjeni



Slika 4 • Shematična razdelitev toplotnoizolacijskih materialov (Papadopoulos, 2005)

gradbeni proizvodi za toplotno izolacijo so prikazani na sliki 4. Z namenom naše analize smo izbrali gradbene proizvode: ekspandirani polistiren, ekspandirani polistiren z dodanimi

aditivi (grafit), ekstrudirani polistiren, poliuretanska pena, steklena volna, kamena volna, celulozna vlakna, pluta, penjeno steklo, aerogel in vakuumskoizolacijski paneli.

### 3 • METODA

Za analizo vsebovane energije smo predpostavili neizolirano enodružinsko hišo. Objekt namišljeno umestimo v tri različne klimatske cone s čim bolj karakterističnim trajanjem kurilne sezone, in sicer v Ljubljano, Portorož in Rateče. Predvidena notranja temperatura v času ogrevalne sezone je 20 °C, kot predpisuje Pravilnik o učinkoviti rabi energije, PURES 2010 (RS, 2010).

V analizi smo primerjali več proizvodov za toplotni ovoj. Poglavitni podatek pri tem je računski debelina dodatne toplotne izolacije, saj je toplotna prehodnost U fiksna in neodvisna od položaja toplotnega ovoja. Najprej smo dimenzionirali potrebno izolacijo, da smo dosegli mejno vrednost, ki nam jo predpisuje pravilnik (MOP, 2010). Kasneje pa smo mejno toplotno prehodnost konstrukcijskega sklopa zaostri in analizirali, pri kateri toplotni prehodnosti dobimo optimalno predpostavljeno razmerje energij (preglednica 1). Stremeli smo

k cilju, da mora vsebovana energija predstavljati približno tretjino vse porabljene energije v dobi tridesetih let. V teh tridesetih letih smo upoštevali le čas ogrevalnega obdobja. Pri izračunu prehoda energije smo se osredotočili na kvadratni meter posameznega dela konstrukcijskega sklopa. Obravnavali

smo štiri sklope, ki so z vidika porabe energije najbolj izpostavljeni:

- tla na terenu oziroma tla nad neogrevano kletjo,
- zunanja stena oziroma stena proti neogrevanim prostorom,
- strop proti neogrevanemu prostoru oziroma strop v sestavi ravnih streh ali poševnih streh,
- terase manjše velikosti, ki skupaj ne presegajo 5 % površine strehe.

Gradbeni elementi stavb, ki omejujejo ogrevane prostore	U - mejno (W/(m <sup>2</sup> K))	U - zaostreno (W/(m <sup>2</sup> K))
Zunanje stene in stene proti neogrevanim prostorom	0,28	0,15
Tla na terenu in tla nad neogrevano kletjo, neogrevanim prostorom ali garažo pri talnem ogrevanju	0,30	0,15
Strop proti neogrevanemu prostoru, stropi v sestavi ravnih ali poševnih streh	0,20	0,10
Terase manjše velikosti, ki skupaj ne presegajo 5 % površine strehe	0,60	0,20

Preglednica 1 • Tabela mejnih in zaostrenih toplotnih prehodnosti za posamezni konstrukcijski sklop

Pri analizi vsebovane energije smo upoštevali le energijske vrednosti za toplotne izolacije brez upoštevanja zaščitnih slojev, pritril in tehnologij vgrajevanja. Ti parametri so sicer nujni sestavni deli sistemov, vendar se sestava sistemov zelo razlikuje od vrste konstrukcijskega sklopa in izbire toplotne izolacije. Tako bi upoštevanje teh elementov oziroma parametrov zelo otežilo analizo in medsebojno primerjavo različnih proizvodov.

V analizi smo zajeli najpogosteje uporabljene toplotne izolacije na našem trgu. V preglednici 2 so prikazani z različnimi gostotami, ki se najpogosteje uporabljajo v gradbeništvu. Obe mineralni volni, kameno in stekleno, smo zaradi pogoste uporabe v različnih konstrukcijskih sklopih oz. z različnimi obremenitvami posledično analizirali z dvema različnima gostotama. V analize zajete toplotne izolacije se uporabljajo za toplotni stavbni ovoj ne glede na pozicijo (ravna ali poševna streha, stena, tla ...) ali konkretno rešitev (prezračevana, neprezračevana, z obremenitvijo ali brez nje ...). V preglednici 2 sta navedeni tudi vrednosti toplotnih prevodnosti (W/mK) in vsebovane energije (MJ/kg).

Vrednosti vsebovane energije smo privzeli iz podatkov, ki so trenutno na voljo v strokovni literaturi (študije, inštituti) in tehničnih dokumentacijah (okoljska proizvodna deklaracija, ang. Environmental Product Declaration, EPD) (preglednica 1). V članku je vsebovana energija smatrana kot skupek energij, ki so potrebne za izdelavo elementa brez upoštevanje energije za vgrajevanje, montažo, transporta, administracije ter energije potrebne za demontažo in ustrezno ravnanje z odpadki.

Gradbeni proizvodi in referenca izvora podatka	Gostota (kg/m <sup>3</sup> )	Toplotna prevodnost (W/mK)	Vsebovana energija (MJ/kg)
EPS (Hammond, 2008)	25	0,037	100,2
	20	0,037	100,2
	16	0,037	100,2
EPS + aditivi ((IBO, 2000), (Sto, 2006))	12	0,032	100,2
	18	0,032	100,2
	16	0,032	100,2
XPS ((IBO, 2000), (Sto, 2006))	36	0,038	67,2
	45	0,038	67,2
	32	0,038	67,2
POLIURETAN (Hammond, 2008)	28	0,025	72,1
	100	0,025	72,1
STEKLENA VOLNA MIN GOSTOTA ((IBO, 2000), (Hammond, 2008))	45	0,025	72,1
	15	0,036	49,4
	40	0,036	49,4
STEKLENA VOLNA MAX GOSTOTA ((IBO, 2000), (Hammond, 2008))	22	0,036	49,4
	40	0,038	49,4
	150	0,038	49,4
KAMENA VOLNA MIN GOSTOTA ((IBO, 2000), (Hammond, 2008))	80	0,038	49,4
	20	0,040	26,4
	120	0,040	26,4
KAMENA VOLNA MAX GOSTOTA ((IBO, 2000), (Hammond, 2008))	70	0,040	26,4
	120	0,045	26,4
	200	0,045	26,4
CELULOZNA VLAKNA (IBO, 2000)	155	0,045	26,4
	30	0,044	10,5
	80	0,044	10,5
PLUTA ((Ecoinvent centre, 2006), (IBO, 2000), (KBOB, 2009))	60	0,044	10,5
	100	0,050	51,5
	220	0,050	51,5
PENJENO STEKLO ((IBO, 2000), (Pittsburgh, 2007))	160	0,050	51,5
	90	0,060	27,1
	200	0,060	27,1
AEROGEL (Aspen aerogels, 2014)	170	0,060	27,1
	60	0,017	53
	160	0,017	53
VIP PANELI (Schonhardt, 2003)	140	0,017	53
	170	0,006	249,7

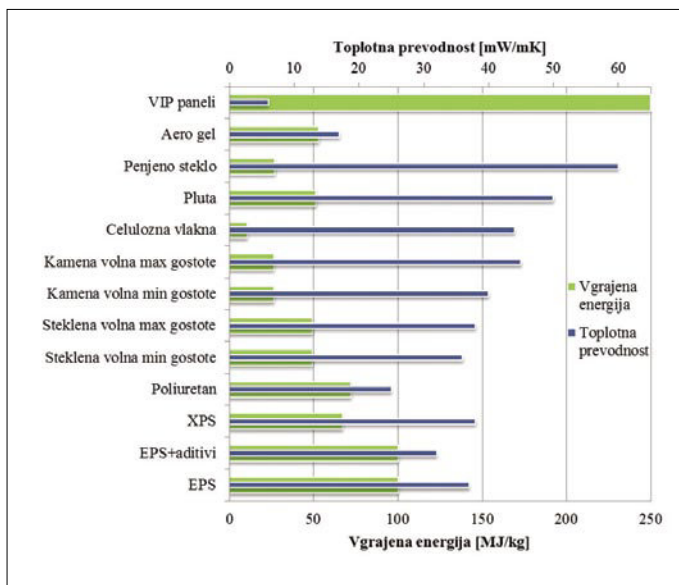
Preglednica 2 • Izbrani gradbeni proizvodi za izračun vsebovane energije s pripadajočimi koeficienti gostote in toplotne prevodnosti in referenco izvora podatka ((Jenko, 2014); (Hammond, 2008); (IBO, 2000); (Sto, 2006))

## 4 • REZULTATI

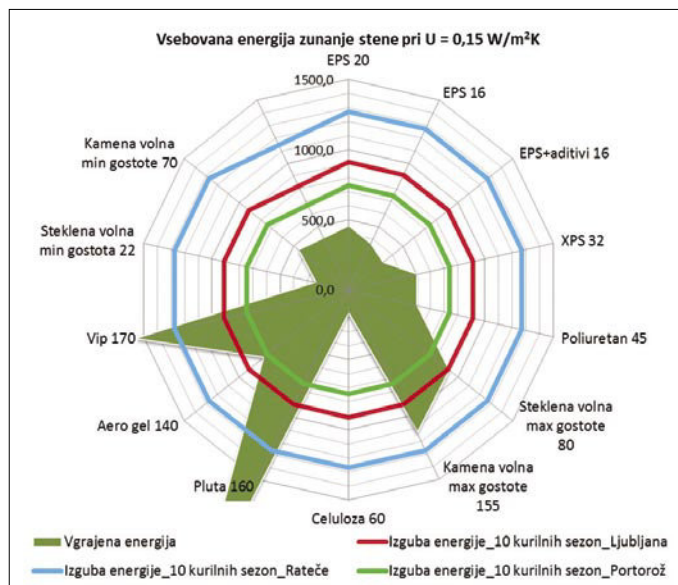
Slika 5 prikazuje razmerje med toplotno prevodnostjo izbranih gradbenih proizvodov in pripadajočo količino vsebovane energije.

Vakuumskoizolacijsko ploščo je kljub relativno visoki vsebnosti vsebovane energije smiselno uporabiti za toplotni ovoj pri ostrejšem pod-

nebju. Izkazalo se je tudi, da pluta kot izolacijski material s stališča razmerja energij ni primerna za izdelavo toplotnega ovoja, saj v nobenem primeru ne doseže razmerja iz osnovne predpostavke (da mora vsebovana energija predstavljati približno tretjino vse porabljene energije).



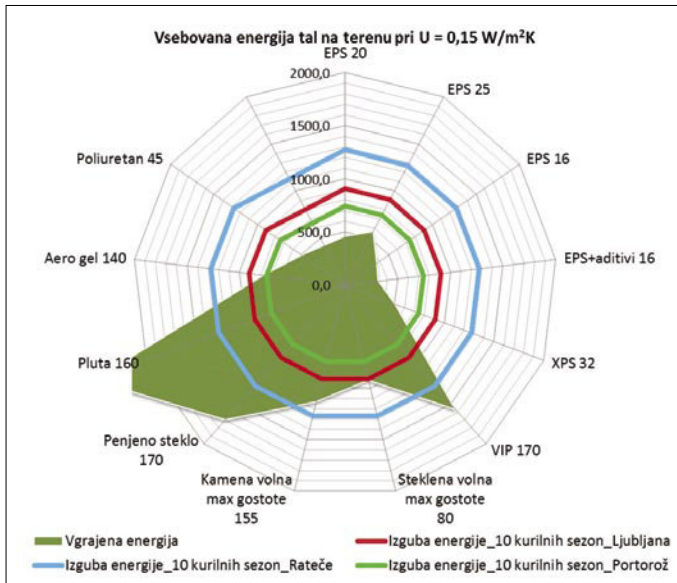
Slika 5 • Razmerje med toplotno prevodnostjo izbranih gradbenih proizvodov in pripadajočo količino vsebovane energije



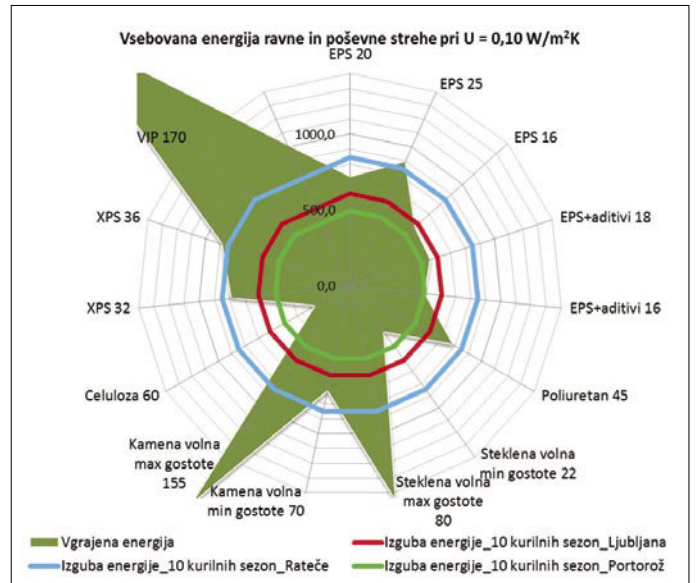
Slika 6 • Vsebovana energija (MJ) toplotnoizolacijskih materialov konstrukcijskega sklopa zunanje stene pri  $U = 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$  v primerjavi z izgubljeno energijo (MJ)

Material in pripadajoča gostota (kg/m <sup>3</sup> )	Zunanja stena		Tla na terenu		Ravna in poševna streha		Terasa manjše velikosti	
	$\Delta d$ (cm) pri $U = 0,28 \text{ W/m}^2\text{K}$	$\Delta d$ (cm) pri $U = 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$	$\Delta d$ (cm) pri $U = 0,30 \text{ W/m}^2\text{K}$	$\Delta d$ (cm) pri $U = 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$	$\Delta d$ (cm) pri $U = 0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$	$\Delta d$ (cm) pri $U = 0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$	$\Delta d$ (cm) pri $U = 0,60 \text{ W/m}^2\text{K}$	$\Delta d$ (cm) pri $U = 0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$
EPS 25	/	/	10	23	17	36	5	17
EPS 20	11	23	10	23	17	36	5	17
EPS 16	11	23	10	23	17	36	5	17
EPS+aditivni 18	/	/	/	/	15	31	/	/
EPS+aditivni 16	10	20	9	20	15	31	4	15
XPS 36	/	/	/	/	18	37	/	/
XPS 32	12	23	11	23	18	37	5	18
Poliuretan 45	8	15	7	15	12	24	/	/
Steklena volna 80	12	23	11	23	18	37	5	18
Steklena volna 22	11	22	/	/	17	35	5	17
Kamena volna 155	14	28	13	28	21	43	6	21
Kamena volna 70	12	25	/	/	19	39	5	19
Celulozna vlakna 60	13	27	/	/	21	43	/	/
Pluta 160	15	31	14	31	/	/	7	23
Aero gel 140	5	10	4	10	/	/	2	8
VIP 170	2	4	2	4	3	6	1	3
Penjeno steklo 170	/	/	17	37	/	/	8	28

Preglednica 3 • Vrednosti dodatne debeline izolacije za posamezni konstrukcijski sklop pri različni toplotni prehodnosti



Slika 7 • Vsebovana energija (MJ) toplotnoizolacijskih materialov konstrukcijskega sklopa tal na terenu pri  $U = 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$  v primerjavi z izgubljeno energijo (MJ)

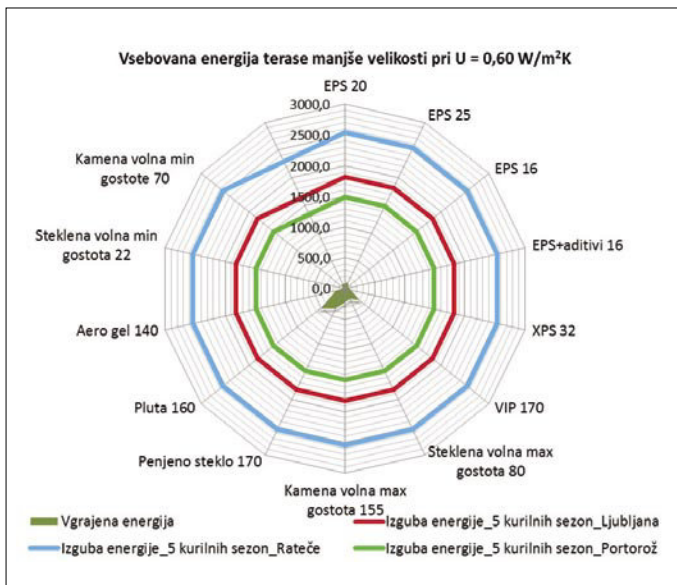


Slika 8 • Vsebovana energija (MJ) toplotnoizolacijskih materialov konstrukcijskega sklopa ravne in poševne strehe pri  $U = 0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$  v primerjavi z izgubljeno energijo (MJ)

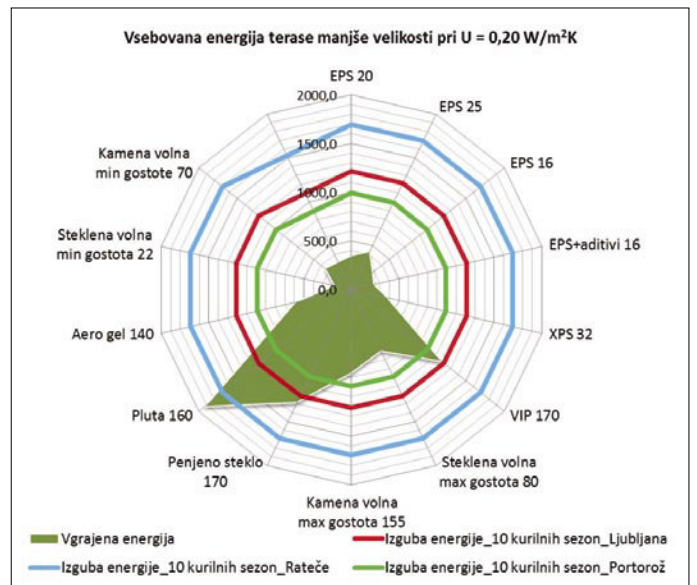
V preglednici 3 so predstavljene vse absolutne vrednosti dodatne debeline izolacije za posamezni konstrukcijski sklop pri različni toplotni prehodnosti. Najprej smo izračunali potrebno debelino izolacije, da smo zadostili mejnim vrednostim (preglednica 1), nato smo toplotno prehodnost zaostri in na podlagi dodatne izolacije ( $\Delta d$ ) izračunali vsebovano energijo. Med organskimi materiali so se najbolj izkazali ekspanzirani polistiren (EPS) ( $0,037 \text{ W/mK}$ ;  $20, 25, 16 \text{ kg/m}^3$ ), ekspanzirani polistiren z

odanimi aditivi ( $0,032 \text{ W/mK}$ ;  $16, 18 \text{ kg/m}^3$ ), ekstrudirani polistiren (XPS) ( $0,038 \text{ W/mK}$ ;  $32, 36 \text{ kg/m}^3$ ), poliuretanska pena ( $0,025 \text{ W/mK}$ ;  $45 \text{ kg/m}^3$ ) in celulozna vlakna ( $0,044 \text{ W/mK}$ ;  $60 \text{ kg/m}^3$ ). Slednja so se izkazala za najboljšo izbiro, kar je razvidno v vseh polarnih diagramih (slika 6, 7, 8, 10). Ti proizvodi imajo sami po sebi zelo nizko gostoto in s tem primerno nizko toplotno prevodnost. Najslabše rezultate pa je izkazala pluta ( $0,050 \text{ W/mK}$ ;  $160 \text{ kg/m}^3$ ), ki smo jo zajeli v vseh smiselnih

konstrukcijskih sklopih (slika 6, 7, 10) z izjemo konstrukcijskega sklopa strehe. Med anorganskimi materiali sta bili najboljši steklena ( $0,036 \text{ W/mK}$ ;  $22 \text{ kg/m}^3$ ) in kamena ( $0,040 \text{ W/mK}$ ;  $70 \text{ kg/m}^3$ ) volna manjše gostote, medtem ko so volne večje gostote energijsko bolj potratne ( $0,038 \text{ W/mK}$ ;  $80 \text{ kg/m}^3$ ,  $0,045 \text{ W/mK}$ ;  $155 \text{ kg/m}^3$ ), vendar jih je še vedno smiselno vgrajevati v toplotni ovoj (slika 6, 7, 8, 10). S stališča vsebovane energije je slabši material penjeno steklo ( $0,060 \text{ W/mK}$ ;



Slika 9 • Vsebovana energija (MJ) toplotnoizolacijskih materialov konstrukcijskega sklopa terase manjše velikosti pri  $U = 0,60 \text{ W/m}^2\text{K}$  v primerjavi z izgubljeno energijo (MJ)



Slika 10 • Vsebovana energija (MJ) toplotnoizolacijskih materialov konstrukcijskega sklopa terase manjše velikosti pri  $U = 0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$  v primerjavi z izgubljeno energijo (MJ)

170 kg/m<sup>3</sup>), kar je razvidno na slikah 7 in 10, vendar pa ima ta material kopico drugih pozitivnih lastnosti in ga je zato smiselno uporabiti pod določenimi pogoji (velika tlačna odpornost, izjemna odpornost proti vlagi in difuzijski pari).

Med novjšimi proizvodi se je za najboljši toplotnoizolacijski material izkazal aerogel (slike 6, 7, 10), ki se s stališča vsebovane energije lahko primerja s stekleno izolacijo večje gostote. Aerogel (0,017 W/mK; 140 kg/m<sup>3</sup>) kot izolacijski material predstavlja boljšo izbiro kot steklena volna, saj ga za enak učinek porabimo polovico manj (10 cm aerogela za 23 cm celuloznih vlaken), kar je razvidno v preglednici 3. Vakuumskoizolacijski paneli so se izkazali nekoliko slabše, saj jih

je upravičeno uporabiti le pod določenimi pogoji (slike 6, 7, 10). Ugotovili smo tudi, da vakuumskoizolacijskih plošč (VIP) energetsko ni smiselno vgrajevati v konstrukcijski sklop strehe (0,006 W/mK; 170 kg/m<sup>3</sup>), kar je razvidno na sliki 8 (poševna in ravna streha oz. terasa). Edina pozitivna lastnost VIP-plošč je izredno majhna toplotna prevodnost in s tem povezana izjemno majhna debelina izolacije (5 cm) za isti učinek toplotne izolativnosti, kar je tudi razvidno v preglednici 3.

Najbolj izstopajoči so bili rezultati konstrukcijskega sklopa terase manjše velikosti, ki skupaj ne presega 5 % površine strehe, kjer je dovoljena izjemno visoka toplotna prehodnost  $U = 0,60 \text{ W/m}^2\text{K}$  (slika 9). Če namreč sledimo definiciji po zastavljeni osnovni predpostavki

o tretjini vsebovane energije v primerjavi s porabljeno energijo v tridesetih letih, lahko hitro ugotovimo, da bi bilo potrebno toplotno prehodnost močno zaostriti. Ugotovili smo, da bi morala biti toplotna prehodnost vsaj reda velikosti  $U = 0,20 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ , pri čemer smo prvotni faktor  $U = 0,60 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  zmanjšali za trikrat. Pri vseh drugih konstrukcijskih sklopih smo ta faktor zmanjšali samo za polovico (preglednica 1).

Pri sami izbiri toplotne izolacije in drugih konstrukcijskih materialov ter tehnologiji gradnje bi sicer morali upoštevati celovito analizo proizvoda oziroma celotnega okoljskega vpliva, izkazanega v enotah CO<sub>2</sub>, in ne samo na podlagi vsebovane energije oziroma na podlagi ekonomske analize.

## 5 • SKLEP

Z analizo lahko potrdimo, da pluta kot izolacijski material na dolgi rok oziroma v času amortizacijske dobe ni primerna v nobenem konstrukcijskem sklopu. Vakuumskoizolacijski paneli, penjeno steklo in kamena volna večje gostote pa le na območju podnebja, identičnega Ratečam, in še to pod posebnimi pogoji (npr. majhna debelina toplotne izolacije, velika tlačna odpornost, cena itd.). Vsi drugi, v stavbeništvu izrazito razširjeni organski in anorganski materiali, katerih gostote se najbolj uporabljene v gradbeništvu, so s stališča energijskih razmerij primerni.

Največje odstopanje je bilo pri analizi terase manjše velikosti, kjer je največji dovoljen prehod toplote po pravilniku (RS, 2010) definiran zelo skopo, in sicer  $U = 0,60 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Izkazalo se je, da so energijske izgube v dobi petih kurilnih sezon znatno večje, kot je celotna količina vsebovane energije izolacijskih materialov. Ko smo toplotno prehodnost sklopa zaostrili na  $U = 0,30 \text{ W/m}^2\text{K}$ , smo dobili znatno manjše energijske izgube. Šele pri toplotni prehodnosti  $U = 0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$  smo dosegli razmerje energij v skladu z osnovno predpostavko. Torej je bilo treba toplotno prehodnost zmanjšati za trikratnik, medtem ko je bilo pri vseh drugih konstrukcijskih sklopih toplotno prehodnost treba zmanjšati le za polovico, da je bil končni rezultat v skladu z osnovno predpostavko. Najverjetneje se je zakonodajalec odločil za tako ohlapno omejitev ( $U \leq 0,60 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) v primerih teras manjših velikosti zaradi večnih težav z višinami v

dotičnih konstrukcijskih sklopih, čeprav se hkrati zaveda, da je zahteva ni najboljša za varčevanje z energijo.

Strnemo lahko, da so okoljski vplivi v obliki vsebovane energije toplotnoizolacijskih gradbenih proizvodov v primerjavi z vsebovano energijo drugih gradbenih proizvodov, ki so vgrajeni v povprečni stavbi, majhni. Poleg tega je treba poudariti, da zaradi prihrankov energije ob namestitvi toplotnih izolacij (drastično zmanjšanje toplotnih izgub) ključno prispevajo k zmanjšanju vplivov stavb na okolje v celotni življenjski dobi stavb. Ker imajo nekateri materiali zelo dolgo dobo razgradnje in različno življenjsko dobo, bi bilo treba v prihodnosti dodatno raziskati in opraviti tudi celovite analize CO<sub>2</sub>-ekvivalenta. Toplotne izolacije uvrščamo v sam vrh najučinkovitejših naložb za varčevanje z energijo in posredno v zmanjševanje vpliva na okolje (Kunič, 2012).

## 6 • VIRI

ARSO, Agencija Republike Slovenije za okolje, Potrošnja v gospodinjstvih 2014, [http://kazalci.arso.gov.si/?data=group&group\\_id=12](http://kazalci.arso.gov.si/?data=group&group_id=12), pridobljeno 30. 7. 2014, 2014.

Crawford, R.H., Treloar, G.J., Validation of the use of Australian input output data for building embodied energy simulation, Eighth International IBPSA Conference, Eindhoven, Netherlands, 2003.

Crowther, P., Design for disassembly to recover embodied energy, The 16th Annual Conference on Passive and Low Energy Architecture, Melbourne/Brisbane/Cairns, Australia, 1999.

Dovjak, M., Krainer, A., A tool for the design of sustainable building concepts, v: Hauser, G. (ur.), Lützkendorf, T. (ur.), Essig, N. (ur.), Implementing sustainability – barriers and chance, Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 967–974, 2013.

Ecoinvent centre, Ecoinvent database, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, [www.ecoinvent.ch](http://www.ecoinvent.ch), pridobljeno 7. 8. 2014, 2006.

GC ZRMK, Predpisi o toplotnih izgubah stavb, <http://gcs.gi-zrmk.si/Svetovanje/Clanki/PDFknjiznjicaAURE/IL2-02.PDF>, pridobljeno 21. 6. 2014, 2002.

- GC ZRMK, Toplotnoizolacijski materiali, <http://gcs.gi-zrmk.si/Svetovanje/Clanki/PDFknjiznjicaAURE/IL2-03.PDF>, pridobljeno 21. 6. 2014, 2003.
- Hammond, G., Jones, C., Inventory of Carbon and Energy (ICE), Sustainable Energy Research Team, Department of Mechanical Engineering, University of Bath, UK, <http://www.uea.ac.uk/~e680/energy/NBS-M016/ICE%20Version%201.6a.pdf>, pridobljeno 5. 8. 2014, 2008.
- IBO, Ökologie der Dämmstoffe, Österreichisches Institut für Baubiologie und ökologie, Donau Universität Krems, Zentrum für Bauen und Umwelt, Dunaj, Springer Verlag, 2000.
- Jenko, M., Analiza vsebovane energije v izbranih gradbenih proizvodih, diplomska naloga, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, samozaložba M. Jenko, 2014.
- JUS.U.J.5.600 – Tehnični pogoji za projektiranje in graditev stavb, 1980.
- KBOB, Empfehlung – Ökobilanzdaten im Baubereich, Bundesamt für Bauten und Logistik 2009/1 (BBL), Bern, <http://www.bbl.admin.ch/kbob/00493/00495/>, pridobljeno 4. 8. 2014, 2009.
- Koskela, L., Application of the new production philosophy to construction, Technical Report 72, California, USA, Stanford University, 1992.
- Kumar Dixit, M., Fernández-Solís, J.L., Lavy, S., Culp, C. H., Identification of parameters for embodied energy measurement, Energy and Buildings 42, 1238–1247, 2010.
- Kunič, R., Krainer, A., Energetska učinkovitost, varovanje okolja in celostno načrtovanje, Gradbeni vestnik 57, 6, 146–152, 2008.
- Kunič, R., Tavzes, Č., Kutnar, A., Ogljični odtis toplotnoizolacijskih materialov v toplotnem ovoju stavb, Gradbeni vestnik 61, 9, 206–214, 2012.
- Marušič, I., Celovita obnova toplotnega ovoja večstanovanjske stavbe na obali v pogledu ekonomike in ogljičnega odtisa, diplomska naloga, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo samozaložba I. Marušič, 2014.
- MOP, Ministrstvo za okolje in prostor, Tehnična smernica TSG-1-004:2010. 2013, Učinkovita raba energije, Ljubljana, [http://www.arhiv.mop.gov.si/fileadmin/mop.gov.si/pageuploads/zakonodaja/prostor/graditev/TSG-01-004\\_2010.pdf](http://www.arhiv.mop.gov.si/fileadmin/mop.gov.si/pageuploads/zakonodaja/prostor/graditev/TSG-01-004_2010.pdf), pridobljeno 15. 8. 2014, 2013.
- Papadopoulos, A.M., State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments, Energy and Buildings, 37, 77–86, 2005.
- Pullen, S., Holloway, D., Randolph, B., Troy, P., Energy profiles of selected residential developments in Sydney with special reference to embodied energy, Proceedings of the Australian and New Zealand Architectural Science Association, 40th Annual Conference, Challenge for architectural science in changing climate, Adelaide, Australia, 2006.
- REUS, Pozitivna energija, <http://www.pozitivnaenergija.si/raziskava/raziskava-reus/predstavitev-rezultatov>, pridobljeno 25. 7. 2014, 2013.
- RS, Pravilnik o učinkoviti rabi energije v stavbah, Ur. l. RS, št. 42/2002, 29/2004, 93/2008, 52/2010.
- SFRJ, Pravilnik o tehničnih ukrepih in pogojih za toplotno zaščito stavb, Ur.l. SFRJ, št. 35/1970.
- STO, Technisches Merkblatt, Sto-Polystyrol-Hartschaumplatte EPS 15/20, Sto AG, Niederglatt, [www.sto-ag.ch](http://www.sto-ag.ch), pridobljeno 7. 8. 2014, 2006.
- SURS, Statistični urad Republike Slovenije, Poraba goriv in energije v gospodinjstvih, Slovenija 2012, [http://www.stat.si/novica\\_prikazi.aspx?id=5803](http://www.stat.si/novica_prikazi.aspx?id=5803), pridobljeno 30. 7. 2014, 2012.
- Tennenbaum, S.E., Network Energy Expenditures for Subsystem Production (MS), OCLC 20211746, Docket CFW-88-08, 1988.
- Venkatarama Reddy, B.V., Jagadish, K.S., Embodied energy of common and alternative building materials and technologies, Energy and Buildings, 35, 129–137, 2003.



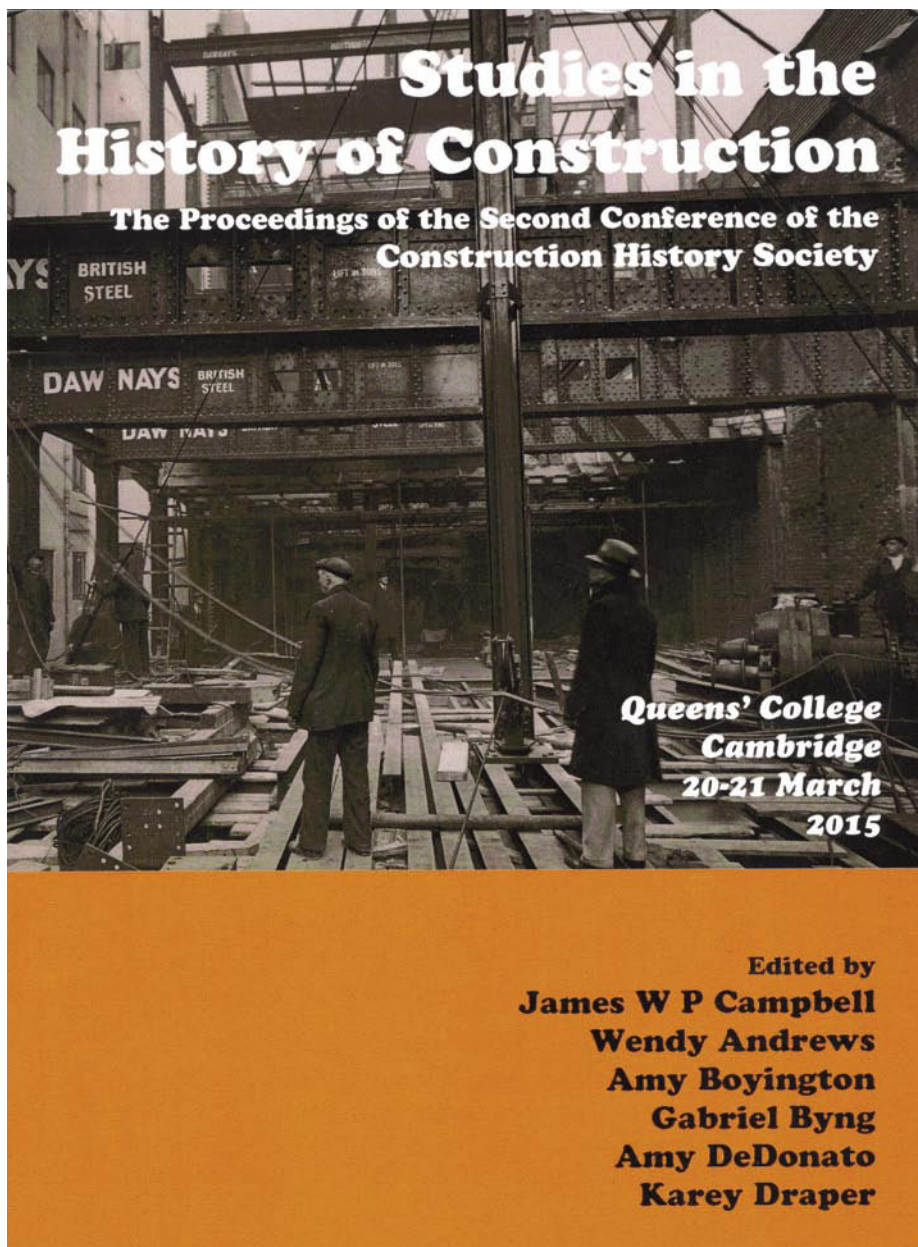
# ZDRUŽENJE THE CONSTRUCTION HISTORY SOCIETY

The Construction History Society (CHS) je mednarodna organizacija, v kateri smo združeni raziskovalci z vsega sveta, ki nas zanima zgodovina gradnje. Člani društva so entuziasti: prevladujejo visoko izšolani raziskovalci v specializiranih laboratorijih in akademski znanstveniki, a člani so tudi amaterski raziskovalci in praktični obrtniki. Področje je zelo interdisciplinarno in združuje različne poklice: največkrat so to gradbeni inženirji, arhitekti, umetnostni zgodovinarji ali arheologi.

CHS je svetovna organizacija, čeprav so dejavni predvsem člani iz zahodne Evrope in Severne Amerike. Še posebno dobro so organizirane nacionalne skupine v Angliji, Španiji, Belgiji, Franciji, Nemčiji ter v Združenih državah Amerike. Odprti so do vseh zgodovinskih obdobij: od prvih ohranjenih najdišč poselitve pa vse do današnjih dni. Tako imajo npr. v Španiji veliko izkušenj z raziskovanjem obočnih in kupolnih konstrukcij srednjega veka, v Belgiji se največ posvečajo raziskavam uporabe železa po letu 1850, v Italiji proučujejo predvsem uporabo betona in z njim povezanih tehnik gradnje.

Vsakoletno dvodnevno srečanje članov CHS poteka pod okriljem Queens' Collegea v angleškem Cambridgeu. Letošnje srečanje je bilo v sredini marca. Med šestdesetimi prijavljenimi povzetki so izbrali 27 prispevkov, ki so zajemali zgodovino gradnje od začetka sedemnajstega do konca dvajsetega stoletja. Predstavila sem slovenski prispevek k začetkom protipotresne gradnje: horizontalno seizmično izolacijo v Nebofličniku. Vse predavane prispevke so v celoti objavili knjigi z naslovom *Studies in the History of Construction*.

Srečanje se je končalo z mednarodnim simpozijem, na katerega je James W.P. Campbell, predsednik CHS, povabil predstavnike šestih nacionalnih skupin, da so ovrednotili delo v svojem lokalnem okolju. Angleško združenje je predstavil Bill Addis, avtor številnih knjig s področja gradbeništva in gradnje. Santiago Huerta, ki je eden izmed pobudnikov raziskovanja zgodovine gradnje, je povedal, da so v Španiji začeli izdajati leta 1993 serijo knjig, ki obravnavajo zgodovino gradnje. Istega leta so organizirali tudi dvodnevni seminar, ki je nato prerasel v bienalni nacionalni kongres in leta 2003 v prvi svetovni kongres. Predmet Zgodovina gradnje I in II s skupno 40 urami predavanj poslušajo študenti na drugi stop-



Slika 1 • Naslovnica zbornika *Studies in the History of Construction*

nji študija na madridski politehnik. Že od leta 1998 imajo organiziran tudi doktorski program *Mecánica de las estructuras antiguas: historia, teoría y práctica*. Od leta 1997 so raziskovalci združeni v *Sociedad Española de Historia de la Construcción*. Antonio Becchi je zastopal Italijo, kjer so raziskovalci združeni v *Associazione Edoardo Benvenuto*. Zavzemajo se predvsem za organizacijo poletnih šol, nagrajevanje doktorskih del s področja zgodovine gradnje in založništvo. Robert Carvais

je predstavil francosko združenje *L'association francophone des historiens de la construction*. Izdajajo knjige in organizirajo kongrese, želijo omogočiti lažji dostop do arhivov in jih poenotiti. Bernard Espion je razložil situacijo v Belgiji, kjer je že preko 40 doktorjev znanosti s področja zgodovine gradnje. Čeprav nimajo svojega združenja, vsako leto organizirajo enodnevne konference, ki se jih udeležujejo gradbeni inženirji, arhitekti, konservatorji, umetnostni zgodovinarji. Nемеc Werner Lorenz je

zastopal celotno nemško govorno območje, ki je združeno v Gesellschaft für Bautechnikgeschichte. Imajo izvrstne raziskovalce, ki objavljajo v revijah, specializiranih za gradbeništvo, izdajajo knjige o delu inženirjev in organizirajo konference; zadnja je bila konec aprila 2015 v Innsbrucku.

Srečanje v Cambridgeu je porodilo veliko zamisli in odprlo mnogo idej. Velika želja združenja je, da bi se v CHS vključilo več raziskovalcev tudi z vzhoda Evrope. Kogar področje zanima, lahko z mano naveže stik. Poleg letnih srečanj CHS vsako tretje leto organizira večji enotedenski svetovni kongres. Prvi je bil v Madridu leta 2003, sledilo je druženje v Cambridgeu 2006., nato v nemškem Cottbusu 2009. in Parizu 2012. Letošnji kongres pripravlja CHS v sodelovanju z ameriškim The Construction History Society of America in je bil v začetku junija 2015. Na srečanju je bilo predstavljenih skoraj 200 prispevkov z vsega sveta.

CHS izdaja tudi CHS Newsletter, v katerem so zbrane novice o aktualnih dogodkih, in revijo Construction History s podnaslovom International Journal of the Construction History Society, v kateri so izbrane zanimivejše teme s konferenc in razširjene v daljšo objavo. Spletna stran društva je <http://www.constructionhistory.co.uk/>.

V Construction History Society imamo skupno veselje do proučevanja zgodovine gradnje: raziskovanje starih načinov gradnje, starih načrtov in listin. V užitek je obujati pretekla znanstva in navezovati nove stike z gradbenimi inženirji, arhitekti in umetnostnimi zgodovinarji, ki z naklonjenostjo delijo svoje bogate izkušnje in znanje.

**doc. dr. Lara Slivnik, univ. dipl. inž. arh.  
UL, Fakulteta za arhitekturo**



Slika 2 • Udeleženci mednarodnega simpozija, z leve: James Campbell, Bernard Espion, Santiago Huerta, Werner Lorenz, Bill Addis, Antonio Becchi in Robert Carvais

# NOVI DIPLOMANTI

## UNIVERZA V LJUBLJANI, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO IN GEODEZIJO

### VISOKI STROKOVNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

**Dejan Radešič**, Uporabnost podatkov registra nepremičnin za analizo stanovanjskega fonda na primeru Mestne občine Koper ter občine Ankaran, mentorica izr. prof. dr. Maruška Šubic-Kovač, somentor asist. mag. Matija Polajnar

**Andrej Krmelj**, Analiza prodajnih cen stanovanj in stanovanjskih hiš na nivoju statističnih regij Slovenije ter izbranih lokalnih skupnosti v letu 2013, mentorica izr. prof. dr. Maruška Šubic-Kovač, somentor asist. mag. Matija Polajnar

**Boštjan Pohlin**, Projekt štiri etažne poslovne stavbe, mentor doc. dr. Franc Sinur

### UNIVERZITETNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

**Tanja Srednik**, Projekt konstrukcije iz prednapete membrane, mentor prof. dr. Boštjan Brank

**Sara Resnik**, Davek na zemljišče kot alternativni predlog obdavčitve nepremičnin, mentorica izr. prof. dr. Maruška Šubic-Kovač

**Primož Megušar**, Vpliv toplotnih mostov na porabo energije za ogrevanje na primeru osnovne šole, mentor doc. dr. Mitja Košir, somentorica dr. Živa Kristl

**Špela Prevodnik**, Vpliv senčil na osvetljenost prostora, mentor doc. dr. Mitja Košir

**Jure Eržen**, Parametrična študija optimizacije zastekljenih površin ovoja stavbe, mentor doc. dr. Mitja Košir

### UNIVERZITETNI ŠTUDIJ VODARSTVA IN KOMUNALNEGA INŽENIRSTVA

**Filip Žitek**, Optimizacija procesa proizvodnje bioplina na Bioplinarni Nemščak s predobdelavo substrata in kombiniranjem z odpadnim blatom, mentor doc. dr. Darko Drev, somentor asist. dr. Sabina Kolbl

### I. STOPNJA – VISOKOŠOLSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM OPERATIVNO GRADBENIŠTVO

**Jure Intihar**, Rekonstrukcija lokalne ceste 111011 na odseku Grosuplje - Ponova vas, mentor doc. dr. Peter Lipar, somentor viš. pred. mag. Robert Rijavec

**Anže Rus**, Večkriterijska primerjava variantnih rešitev pri sanaciji stanovanjskih objektov, mentorica izr. prof. dr. Jana Šelih, somentor asist. dr. Matej Kušar

### I. STOPNJA – UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI PROGRAM VODARSTVO IN OKOLJSKO INŽENIRSTVO

**Leja Plesničar**, Meritve in izračun izhlapevanja, mentorica doc. dr. Mojca Šraj, somentor prof. dr. Mitja Brilly

### DOKTORSKI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

**Dušan Ružič**, Požarna analiza delno razslojenih ukrivljenih armiranobetonskih linijskih konstrukcij, mentor prof. dr. Igor Planinc, somentor doc. dr. Tomaž Hozjan

**Petra Štukovnik**, Vpliv okolja na historične materiale z mineralnim vezivom, mentorica prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov, somentorica prof. dr. Breda Mirtič

**Jure Pirc**, Algoritem za združevanje prometnih podatkov, pridobljenih iz točkovnih in linijskih meritev za oceno potovalnih časov na avtocestah, mentor izr. prof. dr. Marijan Žura, somentor prof. dr. Goran Turk

## UNIVERZA V MARIBORU, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO

### VISOKOŠOLSKI STROKOVNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

**Matej Simrajh**, Detajliranje armature, mentor doc. dr. Milan Kuhta, somentor pred. Aljoša Klobučar

**Aleksandar Đurić**, Energetska prenova stanovanjske hiše v Rogaški slatini, mentorica doc. dr. Vesna Žegarac Leskovar

### I. STOPNJA – VISOKOŠOLSKI STROKOVNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

**Mitja Ješovnik**, Investicijska in razpisna dokumentacija za rekonstrukcijo lokalne ceste v Občini Benedikt, mentorica doc. dr. Nataša Šuman

**Peter Prša**, Opažni sistemi v gradbeništvu, mentor izr. prof. dr. Andrej Štrukelj, somentor asist. Zoran Pučko

### 2. STOPNJA, MAGISTRSKI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

**Aleš Grmšek**, Analiza prednosti in pomanjkljivosti izvedbe gradbenih jam na hidroelektrarnah Arto-Blanca in Brežice, mentor izr. prof. dr. Stanislav Škrabl, somentor doc. dr. Borut Macuh

**Rebeka Križaj**, Dimenzioniranje glavnega dela jeklenega železniškega mostu Kelaniya Bridge na Šrilanki, mentor red. prof. dr. Stojan Kravanja, somentor izr. prof. dr. Bojan Žlender

**Jaka Prelec**, Dimenzioniranje jeklene hale 25 x 48 x 10 m na požarno projektno stanje, mentor red. prof. dr. Stojan Kravanja, somentor doc. dr. Tomaž Hozjan

**Nikola Biškup**, Presoja možnih rešitev rekonstrukcije štirirakega križišča v Koprivnici, mentor red. prof. dr. Tomaž Tollazzi

**Karmen Košutar**, Problematika gradnje cest v tropih, primer: EN 380 Macomia – Oasse, mentor doc. dr. Marko Renčelj, somentor izr. prof. dr. Bojan Žlender

**Gorazd Mernik**, Presoja možnih rešitev rekonstrukcije križišča Tržaške–Titove–Ptujske–Proletarskih brigad v Mariboru, mentor red. prof. dr. Tomaž Tollazzi

**Gregor Senekovič**, Obnašanje leseno-steklenih kompozitov s silikonskim adhezivom pod dolgotrajno obtežbo, mentor red. prof. dr. Miroslav Premrov, somentor Ber Boštjan, univ. dipl. inž. grad.

## UNIVERZA V MARIBORU, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO – EKONOMSKO POSLOVNA FAKULTETA

### INTERDISCIPLINARNI UNIVERZITETNI ŠTUDIJ GOSPODARSKEGA INŽENIRSTVA – SMER GRADBENIŠTVO

**Vitjan Muršec**, Zasnova projekta plezalno-razglednega stolpa z računsko analizo jeklene konstrukcije, mentorja red. prof. dr. Stojan Kravanja – FG in doc. dr. Igor Vrečko – EPF

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

# KOLENDAR PRIREDITEV

**9.-11.7.2015**

**International Scientific Conference Road Research and Administration, "CAR 2015"**

Bukarešta, Romunija  
[http://car.utcb.ro/page\\_id=17&lang=en](http://car.utcb.ro/page_id=17&lang=en)

**5.-7.8.2015**

**Watershed Management Symposium**

Reston, Virginia, ZDA  
[www.watershedmanagementconference.org/](http://www.watershedmanagementconference.org/)

**17.-20.8.2015**

**IASS2015 Annual International Symposium on Future Visions**

Amsterdam, Nizozemska  
[www.iass2015.org/](http://www.iass2015.org/)

**10.-11.9.2015**

**8th International Conference Fibre Concrete 2015**

Praga, Češka  
<http://concrete.fsv.cvut.cz/fc2015/>

**15.-17.9.2015**

**NDT-CE- International Symposium on Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE) 2015**

Berlin, Nemčija  
[www.ndt-ce2015.net/home](http://www.ndt-ce2015.net/home)

**21.-23.9.2015**

**CONCREEP 10 – Mechanics and Physics of Creep, Shrinkage and Durability of Concrete and Concrete Structures**

Dunaj, Avstrija  
<http://concreep10.conf.tuwien.ac.at/home/>

**23.-25.9.2015**

**IABSE Conference Geneva 2015  
Structural Engineering**

Ženeva, Švica  
[www.iabse.org/Geneva2015](http://www.iabse.org/Geneva2015)

**1.-3.10.2015**

**16th International Symposium of Macedonian Association of Structural Engineers (MASE 2015)**

Ohrid, Makedonija  
<http://mase.gf.ukim.edu.mk/index.php?lang=en.net/home>

**15.-16.10.2015**

**21. simpozij Vodni dnevi 2015**

Podčetrtek, Slovenija  
[www.vodnidnevi.si/index.php/si/](http://www.vodnidnevi.si/index.php/si/)

**1.-4.11.2015**

**6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering**

Christchurch, Nova Zelandija  
[www.6icege.com](http://www.6icege.com)

**26.-27.11.2015**

**15. kolokvij o asfaltih in bitumnih, ZAS**

Bled, Slovenija  
[www.zdruzenje-zas.si/](http://www.zdruzenje-zas.si/)

**2.-4.12.2015**

**International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry**

Istanbul, Turčija  
[www.shc2015.org/home.html](http://www.shc2015.org/home.html)

**7.-9.12.2015**

**Building Simulation Conference 2015 (BS2015)**

Hyderabad, Indija  
[www.bs2015.in/](http://www.bs2015.in/)

**14.-17.2.2016**

**Geotechnical and Structural Engineering Congress**

Phoenix, Arizona, ZDA  
[www.geo-structures.org/](http://www.geo-structures.org/)

**8.-11.5.2016**

**IABSE Conference Guangzhou 2016  
Bridges and Structures Sustainability-Seeking Intelligent Solutions**

Guangzhou, Kitajska  
[www.iabse.org/Guangzhou2016](http://www.iabse.org/Guangzhou2016)

**24.-29.5.2016**

**1st European and Mediterranean Structural Engineering and Construction Conference**

Istanbul, Turčija  
[www.isec-society.org/EURO\\_MED\\_SEC\\_01/](http://www.isec-society.org/EURO_MED_SEC_01/)

**17.-22.7.2016**

**35th International Conference on Coastal Engineering**

Istanbul, Turčija  
<http://icce2016.com/en/>

**27.-29.7.2016**

**3rd International Conference on Structures and Architecture**

Guimaraes, Portugalska  
[www.icsa2016.arquitectura.uminho.pt/](http://www.icsa2016.arquitectura.uminho.pt/)

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