





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

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

spletna izdaja ISSN 2536-4332.

Ljubljana, julij 2020, letnik 69, str. 177-204

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, prometno inženirstvo in arhitekturo Univerze v Mariboru in Zavoda za gradbeništvo Slovenije**

Izdajateljski svet:

ZDGITS: **mag. Andrej Kerin**, predsednik  
**Dušan Jukič**  
**prof. dr. Matjaž Mikoš**  
IZS MSG: **Jernej Mazij**  
**mag. Jernej Nučič**  
**mag. Mojca Ravnikar Turk**  
UL FGG: **izr. prof. dr. Sebastjan Bratina**  
UM FGPA: **doc. dr. Milan Kuhta**

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:

**450 tiskanih izvodov**  
**3000 naročnikov elektronske verzije**

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

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

Letno izide 12 števil. Letna naročnina za individualne naročnike znaša 23,16 EUR; za študente in 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 všteta DDV.

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

## Navodila avtorjem za pripravo člankov in drugih prispevkov

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

## Uvodnik

stran **178**

prof. dr. Janez Duhovnik, univ. dipl. inž. grad.

**POD ČRTO**

## Članki • Papers

stran **179**

asist. dr. Sara Piculin, univ. dipl. inž. grad.

doc. dr. Primož Može, univ. dipl. inž. grad.

### **TLAČNO OBREMENJENI UKRIVLJENI JEKLENI PANELI V NOSILCIH MOSTOV**

**CURVED STEEL PANELS IN BRIDGE GIRDERS LOADED IN  
COMPRESSION**



stran **194**

Janez Brežnik univ. dipl. inž. arh.

Petar Kochovski, mag. inž. rač. in inf.

izr. prof. dr. Vlado Stankovski, univ. dipl. inž. rač. in inf.

### **UPORABA PLATFORME RAČUNALNIŠTVA V MEGLI PRI RAZVOJU APLIKACIJ ZA PAMETNO IN VARNO GRADNJO**

**THE USE OF A FOG COMPUTING PLATFORM FOR THE  
DEVELOPMENT OF APPLICATIONS FOR SMART AND  
SAFE CONSTRUCTION**



## Poročilo o strokovnem srečanju

stran **201**

Miša Hrovat

**SPLETNI SEMINAR GBC SLOVENIJA**

## Obvestilo ZDGITS

stran **204**

**ZADNJI PRIPRAVLJALNI SEMINAR IN IZPITNI ROK ZA STROKOVNE  
IZPITE ZA GRADBENO STROKO V LETU 2020**

## Novi diplomanti

Eva Okorn

## Koledar prireditev

Eva Okorn

Slika na naslovnici: Gradbišče podzemne parkirne hiše v Kopru, foto Danilo Malnar

## POD ČRTO

Berete julijsko številko 2020 strokovne in znanstvene revije Gradbeni vestnik, ki je zdaj med dvestosedeminštiridesetimi, pri katerih sem bil glavni in odgovorni urednik od januarja 2000 – dvajset let in sedem mesecev. Skupen obseg vseh števil je 6478 notranjih strani in 988 strani na ovitkih. V reviji je bilo v tem času objavljenih 318 strokovnih in 314 znanstvenih člankov. Avgustovsko številko in naslednje bo urejal novi glavni in odgovorni urednik izr. prof. dr. Sebastijan Bratina s fakultete za gradbeništvo in geodezijo ljubljanske univerze.

Ob prevzemu uredništva mi je Gradbeni vestnik pomenil pomemben vir strokovnega znanja. Upal sem, da bom skupaj s sodelavci pomen in vlogo revije ohranil. Zavedal sem se, da v gradbeništvo deluje pester krog strokovnjakov, med katerimi je na eni strani veliko takih, ki imajo vrhunsko znanje na ožjih področjih, na drugi pa tistih, ki morajo pri vsakdanjem delu uporabljati kar se da raznolika znanja. Predvidel sem uvedbo recenzije člankov in povzetke člankov v angleščini, kar naj bi omogočilo uvrstitve Gradbenega vestnika v katero od zbirk, ki so pomembne za dokazovanje pomena posamezne objave. Uvedli naj bi tudi rubrike, v katerih bi objavljali krajše prispevke.

Zavedal sem se, da so za obstoj Gradbenega vestnika najpomembnejši avtorji. Upal sem, da bom poleg tistih, ki so že doslej pisali prispevke za revijo, pridobil še nove, zlasti mlajše avtorje.

Jamstvo za to, da bo vse navedeno mogoče uresničiti, sem videl v tem, da ne začenjam iz nič. Dograjevati je bilo treba le tisto, kar so dosegli v dotakratnih osemindesetih letih izhajanja revije.

V zadnjih dvajsetih letih se je pri Gradbenem vestniku vsebinsko in glede videza marsikaj spremenilo. V vsaki številki sta običajno objavljena vsaj dva in največ trije članki s pretežno znanstveno ali pretežno strokovno vsebino. Vsi znanstveni in strokovni članki so recenzirani. Članki zajemajo vsa področja gradbeništva, nekaj jih je tudi z mejnih področij. V reviji so objavljeni tudi prispevki o dejavnosti društev, članov ZDGITS, spominski in jubilejni zapisi. V večini števil so objavljeni tudi podatki o novih diplomantih gradbeništva na univerzah v Ljubljani in Mariboru, v vseh pa koledar prireditev doma in po svetu.

Najpomembnejša tehnična sprememba je, da je Gradbeni vestnik ves ta čas skoraj brez izjeme izhajal redno vsak konec meseca. Revija je leta 2004 dobila novo oblikovno zasnovo

avtorice Mateje Goršič. Gradbeni vestnik ima tudi spletne podstrani na straneh ZDGITS, kjer je od leta 2016 mogoče najti vse doslej izdane številke revije. Z vsemi, ki sodelujejo pri reviji, si izmenjujemo dokumente izključno v elektronski obliki.

Gradbeni vestnik še vedno izhaja izključno v slovenskem jeziku, le povzetki so objavljeni v angleščini. Tako opravlja pomembno vlogo pri razvoju slovenskega izrazja na področju gradbeništva. Ocenjujem, da bo tako ostalo.

Revije, kot je Gradbeni vestnik, ni brez avtorjev, recenzentov, naročnikov, uredništva in založnika. Moja največja skrb je ves čas bila predvsem ta, ali bom prejel dovolj člankov in drugih prispevkov, da bo lahko Gradbeni vestnik redno izhajal in da bo njegova vsebina čim bolj pisana in zanimiva za čim širši krog gradbenikov. Zato sem bil vesel vsakega avtorja, posebej pa novih, zlasti mladih, ki so mi poslali svoje prve članke.

Nehvaležno nalogo anonimnih recenzentov so bili voljni opravljati številni priznani gradbeniki. Izbiral sem jih tako, da so bili čim manj povezani z avtorji. To v majhni Sloveniji ni lahko. Večina recenzentov je z obeh fakultet in inštitutov s področja gradbeništva, nekateri pa so uveljavljeni strokovnjaki iz prakse. Vsi recenzije opravijo zavzeto in v zaprosenem roku. Čeprav javnosti skrit, je njihov delež h kakovosti objav v Gradbenem vestniku pogosto neprecenljiv. Ceni ga tudi večina avtorjev.

Gradbeni vestnik je imel oktobra 2009 3111 naročnikov tiskane revije. Med njimi je bilo 2675 članov MSG IZS. Drugih zaposlenih naročnikov je bilo 78, upokojujencev 58, študentov 16, diplomantov 147, častnih članov ZDGITS 12, drugih naročnikov, ki GV prejema brezplačno, 20, podjetij iz Slovenije 59, iz tujine 6, 13 izvodov zamenjujemo z domačimi revijami in 27 izvodov s tujimi.

Po odločitvi, da bo Gradbeni vestnik dostopen tudi v elektronski obliki, so se te številke močno spremenile. Na tiskane izvode je bilo decembra 2019 skupaj naročenih 372 naročnikov. Od tega je bilo 19 članov MSG IZS, drugih zaposlenih 54, upokojujencev 34, študentov 19, diplomantov 126, častnih članov ZDGITS 11, drugih naročnikov, ki revijo prejema brezplačno, 54, podjetij iz Slovenije 26, iz tujine 2, 8 izvodov izmenjujemo z domačimi revijami in 19 s tujimi.

Gradbeni vestnik ima izdajateljski svet namesto nekdanjega uredniškega odbora. Ves čas ga je vodil mag. Andrej Kerin, nekateri člani

sveta pa so tudi med najprizadenejšimi avtorji. Pred kratkim je bilo v izdajateljski svet imenovanih več novih članov.

Do maja leta 2008 je bila lektorica Alenka Raič Blažič iz Ljubljane, od takrat dalje pa Jan Grabnar, angleške povzetke je do januarja leta 2015 lektorirala Darja Okorn, odtlej za to skrbi Romana Hudin. Vsa tajniška dela pri reviji je do novembra 2008 opravljala poslovna sekretarica ZDGITS Anka Holobar, nato pa je to delo prevzela njena naslednica Eva Okorn. Za stalni rubriki o novih diplomantih in koledarju prireditev je do konca leta 2012 skrbel Jan Kristijan Juteršek, nato je to delo prevzela Eva Okorn.

Gradbeni vestnik izdaja založnik Zveza gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije. Ta stanovska zveza je bila skupaj z revijo ustanovljena leta 1951. Vsi predsedniki, pod katerimi sem bil urednik, doc. dr. Janez Reflak, Marjan Vengust, Miro Vrhek in doc. dr. Andrej Kryžanowski, ter celotni izvršni odbori so vseskozi podpirali izdajanje Gradbenega vestnika. Pri izdajanju sodeluje Matična sekcija gradbenih inženirjev Inženirske zbornice Slovenije, finančno pa ga podpirajo še Javna agencija za raziskovalno dejavnost RS, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo Univerze v Mariboru in Zavod za gradbeništvo Slovenije.

Za tisk je od leta 2004 dalje zgledno skrbel tiskarna Kočevski tisk iz Kočevja, kjer za Gradbeni vestnik skrbijo komercialist Jože Plot in tehnična urednika Stane Ožbolt do leta 2018 in zdaj Tomaž Pužem.

Vse naštetu tudi nekaj stane in neveselo dejstvo je, da Gradbeni vestnik znotraj ZDGITS posluje z izgubo in da mora ZDGITS to izgubo pokrivati s sredstvi, ki jih pridobi z drugo dejavnostjo.

Ali bo naslednje leto izšel že sedemdeseti letnik tudi na papirju ali le v elektronski obliki? Ali bodo avtorji še pisali v slovenski obliki? Ali bo UO MSG IZS še podpiral izhajanje Gradbenega vestnika? Na ta in podobna vprašanja ne poznam odgovorov, pričam pa sem, da bodo slovenski gradbeniki tudi v prihodnje potrebovali svojo slovensko znanstveno in strokovno revijo, kot je Gradbeni vestnik.

Vsem, ki ste v času mojega dela pri Gradbenem vestniku sodelovali z mano, se iskreno zahvaljujem. Želim, da sodelujete tudi z novim urednikom, izr. prof. dr. Sebastjanom Bratino.

prof. dr. Janez Duhovnik

# TLAČNO OBREMENJENI UKRIVLJENI JEKLENI PANELI V NOSILCIH MOSTOV

## CURVED STEEL PANELS IN BRIDGE GIRDERS LOADED IN COMPRESSION

asist. dr. Sara Piculin, univ. dipl. inž. grad.

sara.piculin@fgg.uni-lj.si

doc. dr. Primož Može, univ. dipl. inž. grad.

primoz.moze@fgg.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo  
in geodezijo

Katedra za metalne konstrukcije

Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana

Znanstveni članek

UDK 624.014.2+624.8

**Povzetek** | V zadnjih letih je uporaba ukrivljenih pločevinastih elementov v nosilcih jeklenih in sovprežnih mostov vse pogostejša. Obnašanje vzdolžno ojačanih, prečno ukrivljenih pločevin je kompleksen problem, zlasti zaradi interakcije ukrivljenosti, relativne togosti ojačitev in začetnih nepopolnosti. Cilj eksperimentalnih in numeričnih testov, ki so predstavljeni v prispevku, je razložiti obnašanje tovrstnih konstrukcij in prikazati prednosti ukrivljenih pločevin v nosilcih mostov. V ta namen je bilo opravljenih devet tlačnih preskusov na vzdolžno in prečno ojačanih pločevinah iz jekla visoke trdnosti, in sicer S500 in S700. Na podlagi eksperimentalnih rezultatov so podane ugotovitve glede vpliva različnih parametrov na tlačno nosilnost ukrivljenih pločevin. V nadaljevanju je opravljena obsežna parametrična študija na poenostavljenem numeričnem modelu, katerega ustreznost je potrjena z eksperimentalnimi rezultati. V študiji so obravnavani različni parametri, kot so ukrivljenost, vitkost pločevine, velikosti ojačitev in oblika začetnih nepopolnosti ter njihovih vplivov na končno nosilnost ojačanih ukrivljenih pločevin. Poudarjeni so pozitivni vplivi ukrivljenosti na nosilnost prečnih prerezov. Predstavljena je študija vpliva geometrijskih nepopolnosti na mejno nosilnost pločevin, ki temelji na spremembi koordinat vozlišč končnih elementov na podlagi sinusnih funkcij. Nazadnje so predlagana pravila za dimenzioniranje vzdolžno ojačanih, ukrivljenih pločevin, ki so izpostavljene tlačnim naporom. Pravila ustrezajo formalizmu obstoječih evropskih standardov za pločevinaste konstrukcije. Mejne obremenitve, dobljene z eksperimentalnimi in numeričnimi preskusi, so primerjane z novimi pravili za dimenzioniranje in doseženo je dobro ujemanje.

Ključne besede: jekleni škatlasti nosilci, ukrivljene pločevine, eksperimentalni testi, numerične simulacije, začetne nepopolnosti

**Summary** | The employment of curved panels in the design of steel and steel-concrete composite bridge decks is gaining popularity. The behaviour of longitudinally stiffened, transversally curved plates is a complex problem, especially due to the interaction of curvature, relative stiffness of the stiffeners and initial imperfections. The experimental and finite element investigations presented in this article aim to explain the behaviour of such structures and to demonstrate the advantages of bridge decks with curved panels. To this end, nine large-scale experimental tests were performed on longitudinally and transversally stiffened plates made of high strength steel, namely S500 and S700. The effects of various parameters on the resistance of the plate to pure compression are discussed. In addition, a comprehensive parametric study is performed on a simplified numerical model verified against the test results. The study examines various parameters such as curvature, plate slenderness, size of the stiffeners and their impact on the ultimate resistance of the stiffened curved plates. From the results, some important conclusions are drawn regarding structural behaviour and the positive effects of curvature on cross-sectional resistance. A study on the influence of geometric imperfections on the ultimate load-car-

rying capacity is presented, which is based on the modification of node coordinates by means of sinusoidal functions. Finally, design rules are proposed for longitudinally stiffened curved plates that are subjected to compressive stresses. The rules correspond to the formalism of EN 1993-1-5 for flat plated structures. The maximum loads obtained from experimental and numerical tests are compared with the new design rules and a good correlation is achieved.

**Key words:** steel box-girder, curved plated structures, experimental tests, numerical simulations, initial imperfections

## 1 • UVOD

Pločevinaste konstrukcije se uporabljajo na številnih tehnoloških področjih, kjer je nizka teža konstrukcije ključnega pomena. Če so ustrezno zasnovane, lahko takšne konstrukcije prenesejo velike obremenitve z razmeroma majhno porabo materiala. V gradbeništvu se pločevine kot nosilni elementi konstrukcije najpogosteje uporabljajo za mostne nosilce, pri katerih je treba premoščati velike razpone. Prečni prerezi so običajno sestavljeni iz pločevinastih elementov, ki so zvarjeni skupaj tako, da tvorijo zaprto škatlo ali polnostenski nosilec. Zasnova takšnih konstrukcij mora izpolnjevati številne zahteve, med katerimi sta najpomembnejši čim manjša lastna teža konstrukcije in ustrezna stabilnost. Pločevine so zaradi tega običajno zasnovane kot vitke in so dodatno ojačane s številnimi prečnimi in vzdolžnimi ojačitvami različnih oblik. Pločevina, utrjena z rebri, lahko doseže večjo nosilnost pri manjši porabi materiala. Drug način za zmanjšanje teže mostov z dolgimi razponi je uporaba jekel visoke trdnosti. Pri tem je pomembno upoštevati, da se zaradi višje meje plastičnosti zmanjša potrebna debelina pločevin, kar pa poveča njihovo vitkost in s tem podvrženost lokalnim nestabilnostim. V zadnjih letih je pri zasnovi jeklenih in sovprežnih mostov vse pogostejša uporaba ukrivljenih pločevinastih elementov v vlogi

spodnje pasnice škatlastega prereza. Ukrivljeni paneli ponujajo nove estetske rešitve in v nekaterih primerih celo povečajo nosilnost v primerjavi z ravnimi paneli enakih dimenzij ((Tran, 2014), (Piculin, 2017)). Takšni elementi so izpostavljeni velikim tlačnim obremenitvam, predvsem v območjih nad podporami, in so posledično podvrženi stabilnostnim problemom.

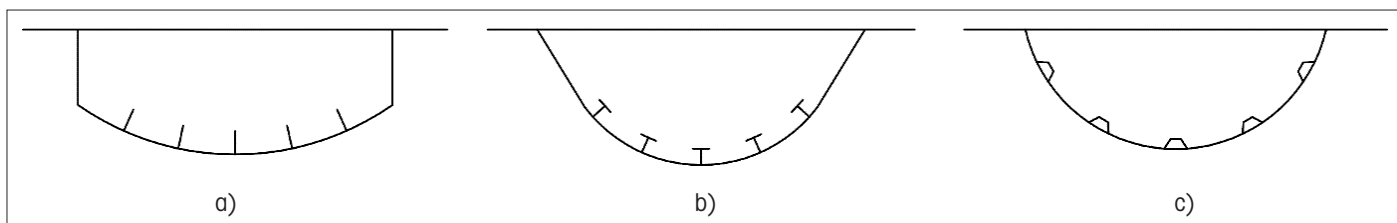
V nasprotju z ravnimi (npr. (Sinur, 2012), (Sinur, 2013), (Timmers, 2016)) ter neojačanimi ukrivljenimi pločevinami ((Tran, 2012), (Martins, 2013), (Martins, 2014)) je področje ojačanih ukrivljenih pločevin še precej neraziskano, čeprav je projektiranje takšnih mostov že precej razširjeno. Posledično se izraža velika potreba po standardih, ki bi projektanta usmerjali pri projektiranju ukrivljenih pločevin. Projektiranje ukrivljenih pločevin namreč ni zajeto v trenutnih evropskih standardih za jeklene konstrukcije. Standarda, ki se ukvarjata s področjem lupinastih jeklenih konstrukcij, sta omejena na ravne panele in rezervoarje, to sta EN 1993-1-5 (CEN, 2006) in EN 1993-1-6 (CEN, 2007). Številni avtorji so pokazali, da se ukrivljeni paneli obnašajo drugače kot obe omenjeni vrsti konstrukcij ((Tran, 2012), (Martins, 2015)).

Obnašanje ukrivljenih in ojačanih konstrukcijskih elementov je zaradi interakcije ukriv-

ljenosti panela, relativne togosti ojačitev in začetnih nepopolnosti kompleksen problem. Vse obstoječe parametrične študije ((Park, 2011), (Tran, 2014), (Piculin, 2017)) razpolagajo z zelo omejenim naborom geometrijskih parametrov, poleg tega so omejene zgolj na odprte prereze vzdolžnih ojačitev in se pri definiciji začetnih nepopolnosti sklicujejo zgolj na prvo uklonsko obliko iz linearne uklonske analize. To lahko v večini primerov vodi do precenjenih vrednosti mejnih nosilnosti ((Martins, 2015), (Timmers, 2018)). Nekaj eksperimentalnih raziskav na področju ojačanih ukrivljenih pločevin je bilo opravljenih v 30. letih prejšnjega stoletja, vendar gre v vseh primerih izključno za konstrukcije iz aluminijevih zlitin. V eksperimentalni študiji so Cho idr. (Cho, 2007) izvedli tlačne teste na šestih ukrivljenih ojačanih panelih, katerih začetna geometrija je bila izbrana glede na dimenzije iz ladjedelniške prakse. Poleg tega materialov in oblik ojačitev ni mogoče direktno aplicirati na področje jeklenih mostnih nosilcev.

Iz vsega naštetega sledi, da je za razvoj novih pravil za dimenzioniranje ukrivljenih pločevin nujna predhodna eksperimentalna in numerična študija njihovega obnašanja. V prispevku so predstavljeni eksperimentalni in numerični testi na ojačanih ukrivljenih panelih, obremenjenih z enakomernimi tlačnimi napetostmi. Poudarjeni so ključni rezultati in ugotovitve testov, prikazane so glavne prednosti uporabe ukrivljenih pločevin v škatlastih nosilcih.

## 2 • URIVLJENE PLOČEVINE V NOSILCIH MOSTOV



Slika 1 • Shematski prikaz možnih oblik škatlastih prečnih prerezov, ki vključujejo ukrivljeno pasnico in različne prereze vzdolžnih ojačitev.

V zadnjih letih je uporaba ukrivljenih pločevinastih elementov v nosilcih jeklenih in sovprežnih mostov vse pogostejša. Med najpogostejše primere uporabe spadajo horizontalno ukrivljene pločevine v stojinah I-nosilcev ter vzdolžno ukrivljene pločevine kot spodnje pasnice nosilcev s spremenljivo višino vzdolž razpona.

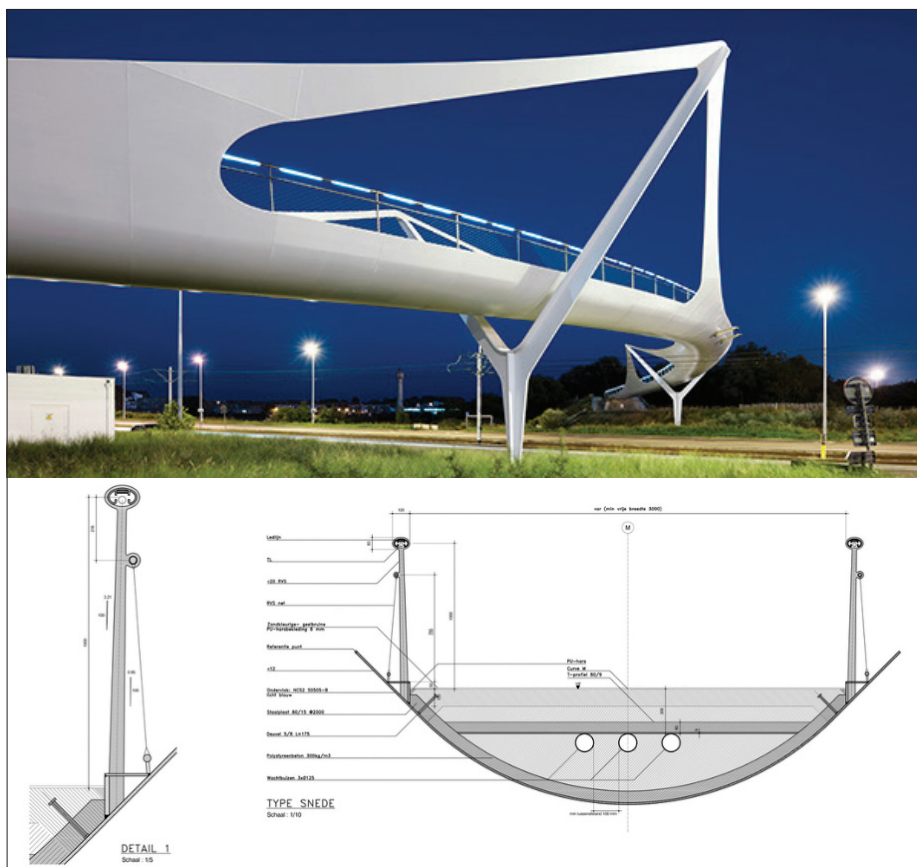
Poleg naštetih možnosti uporabe se v škatlastih prerezih vse pogosteje pojavljajo tudi prečno ukrivljene pločevine, ki v vlogi spodnje pasnice prereza nadomeščajo klasične ravne pločevine. Ukrivljene pasnice so, tako kot ravne, v prečni smeri ojačane s prečnimi ojačitvami ali nosilci, v vzdolžni smeri pa privarjene na vertikalni ali nagnjeni stojini, kot je prikazano na slikah 1a) in b). V nekaterih primerih lahko ukrivljena pasnica opravlja hkrati vlogo pasnice in stojine (slika 1c). Pasnice so običajno vitke in ojačane z vzdolžnimi ojačitvami različnih oblik, ki povečajo njihovo nosilnost in hkrati znižajo lastno težo konstrukcije.

Gradnja jeklenih in sovprežnih mostov z ukrivljeno spodnjo pasnico je v zadnjih letih v porastu po vsej Evropi. O tem priča nedavna študija (Biscaya da Graça, 2017), v kateri je zabeleženih in podrobno opisanih 19 cestnih in železniških mostov ter mostov za pešce, pri katerih se v vlogi spodnje pasnice pojavljajo prečno ukrivljene pločevine. Konstrukcijski sistemi teh mostov so različni, po večini gre za mostove s poševnimi zategami. Dva primera takšnih mostov sta prikazana na slikah 2 in 3. Za zanimivost je vredno omeniti avtocestni viadukt Morandi v italijanski Genovi, katerega del se je avgusta 2018 zrušil na naseljeno območje (Morgese, 2020). Na mestu starega viadukta so aprila letos dokončali gradnjo novega, jeklenega viadukta s škatlastim prezom, ki vsebuje prečno ukrivljeno spodnjo pasnico (slika 4).

Pri veh obstoječih mostovih ukrivljenost spodnje pasnice presega področje uporabe standarda za projektiranje ravnih pločevinastih konstrukcij EN 1993-1-5. Ta namreč podaja omejitve, da se pločevinasti elementi lahko obravnavajo kot ravni le, če parameter ukrivljenosti  $Z$  ustreza pogoju  $Z \leq 1$ , kjer je parameter ukrivljenosti odvisen od širine pločevine  $b$ , debeline  $t$  in radija ukrivljenosti  $R$  (slika 5):

$$Z = b^2 / Rt \quad (1)$$

Pri ukrivljenih pločevinah obstoječih mostov se parameter ukrivljenosti  $Z$  giblje med 5 in 600, kar močno presega omenjeno omejitev.



Slika 2 • Most za pešce De Lichtenlijn, Knokke, Belgija, 2008 (Ney & Partners BXL, 2020).



Slika 3 • Cestni most Renault, Pariz, Francija, 2009 (Massard, 2019).



Slika 4 • Nov avtocestni viadukt v Genovi, 2020 (Corriere Della Sera, 2020).

### 3 • EKSPERIMENTALNI TESTI

V Konstrukcijsko-prometnem laboratoriju Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani smo naredili serijo eksperimentalnih preiskav na ojačanih ukrivljenih pločevinah, izpostavljenim statičnim tlačnim obremenitvam.

Namen testov je bil preučiti obnašanje pločevin ter vpliv različnih parametrov na njihovo mejno nosilnost. V okviru eksperimentalne preiskave

je bilo obravnavanih devet preizkušancev oziroma panelov, sestavljenih iz ukrivljene pločevine in ojačitev, ki so bile izdelane iz jekla visoke trdnosti, in sicer S500 in S700. Dva panela sta bila sestavljena iz ravne osnovne pločevine, preostalih sedem pa iz ukrivljenih pločevin. Paneli so bili obremenjeni z osno silo v vertikalni smeri. V nadaljevanju so na kratko povzeti podatki o geometriji preizkušancev,

zasnovi eksperimentov, meritvah ter ključni rezultati in ugotovitve. Eksperimenti so podrobno predstavljeni v (Piculin, 2020a).

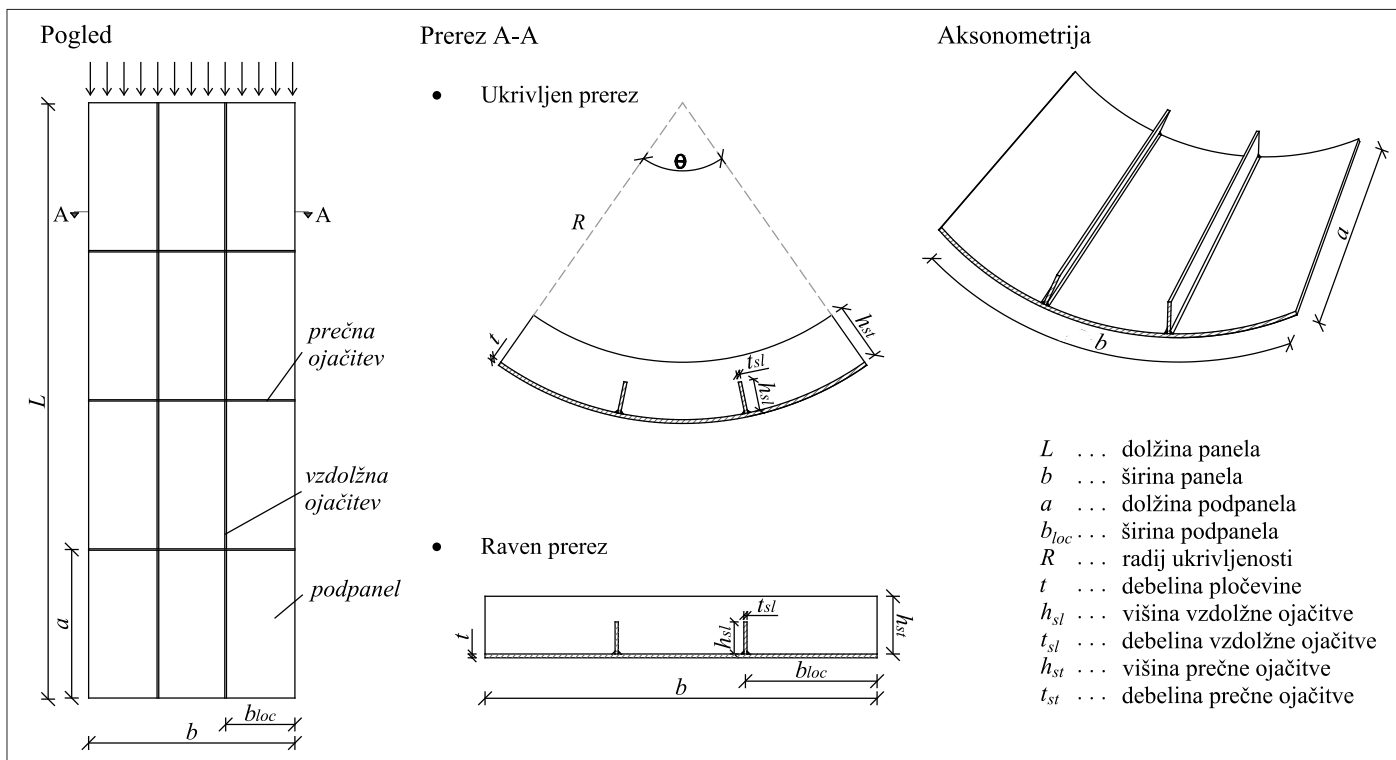
#### 3.1 Geometrija preizkušancev

Ukrivljene pločevine najlaže opišemo s parametrom ukrivljenosti  $Z$  (1) ter razmerjem stranic panela  $\alpha$ , ki je določeno kot razmerje med dolžino panela  $a$  in širino panela  $b$ :

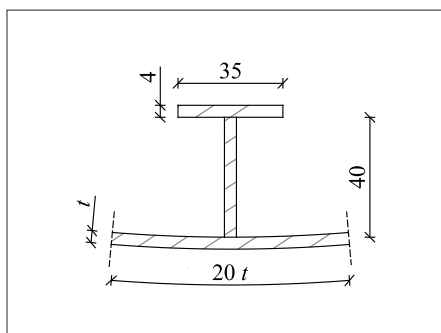
$$\alpha = a/b \quad (2)$$

Če so pločevine ojačane z vzdolžnimi in prečnimi ojačitvami, običajno govorimo o lokalni ukrivljenosti posameznih podpanelov





Slika 5 • Geometrijske karakteristike vzorcev.



Slika 6 • Dimenzije T-ojačitve v (mm).

$Z_{loc}$  ter o lokalnem razmerju stranic podpanela  $\alpha_{loc}$ :

$$Z_{loc} = b_{loc}^2 / Rt \quad (3)$$

$$\alpha_{loc} = a / b_{loc} \quad (4)$$

kjer je  $b_{loc}$  širina posameznega podpanela. Geometrijski parametri ojačane pločevine so prikazani na sliki 5. Za obstoječe mostove z ukrivljeno spodnjo pasnico (Biscaya da Graça, 2017) v splošnem velja, da se lokalni parameter ukrivljenosti giblje na intervalu  $Z_{loc} \in (1-14)$ , globalni parameter ukrivljenosti  $Z$  na intervalu  $Z \in (5-600)$ , lokalno razmerje stranic pa na intervalu  $\alpha_{loc} \in (2-8)$ .

Paneli, ki smo jih testirali v sklopu te študije, so se med seboj razlikovali po vitkosti podpanelov, obliki vzdolžnih ojačitev, razmerju stranic

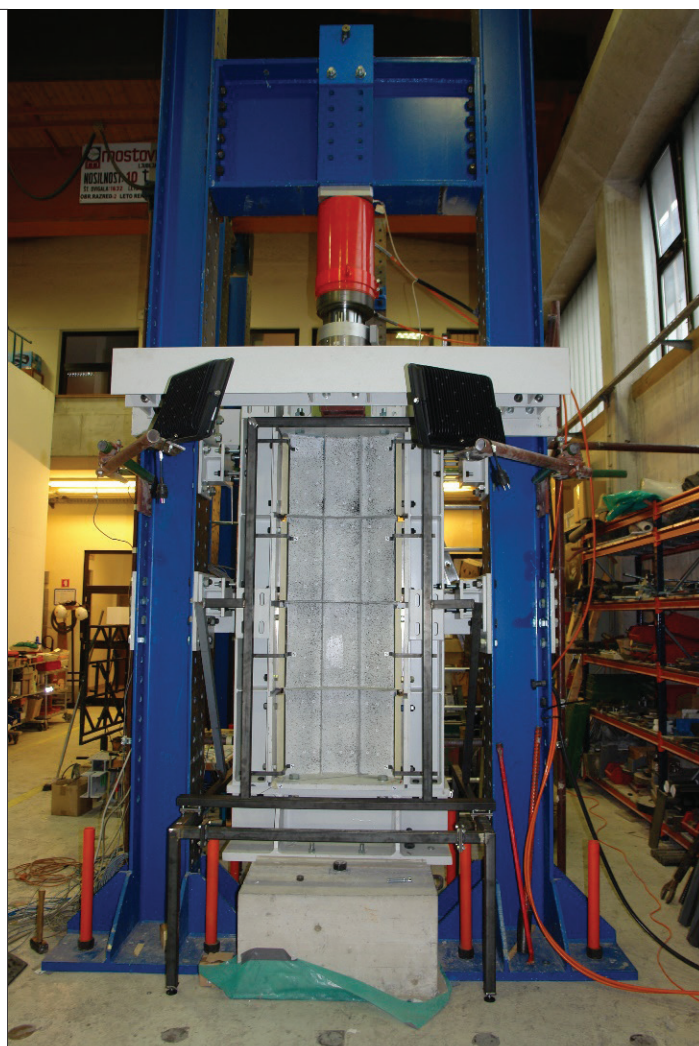
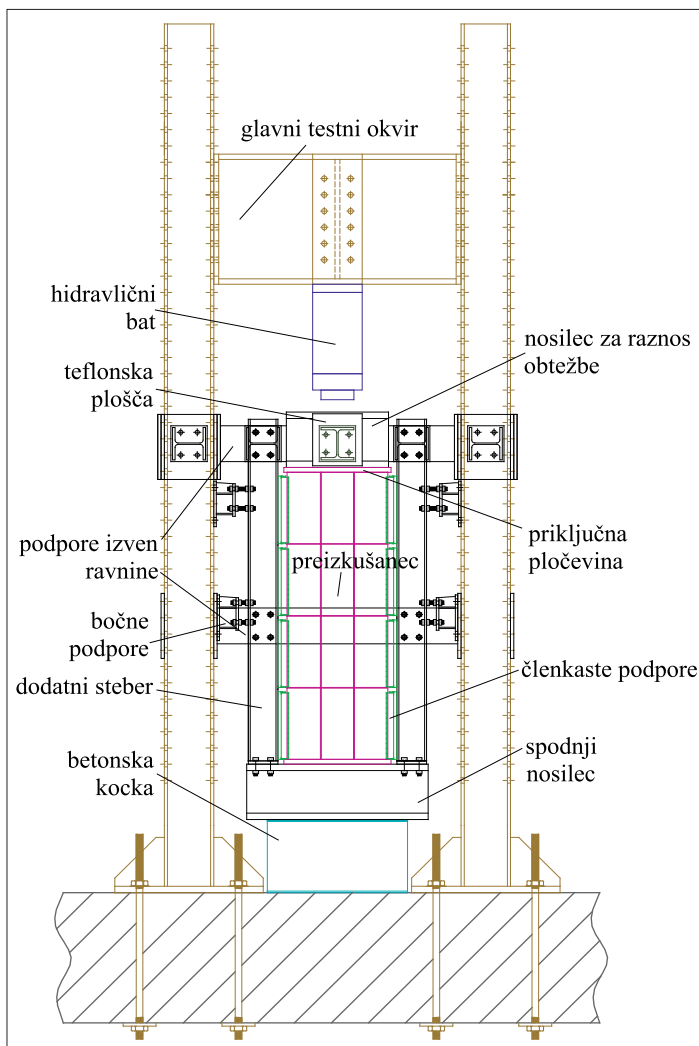
Vzorci	Pločevina				Podpanel		Vzdolžna ojačitev			
	Material	$R$ (mm)	$t$ (mm)	$a$ (mm)	$\alpha$	$\lambda_p$	$Z_{loc}$	$h_{sl}/t_{sl}$ (mm)	Material	
Ukrivljeni	<b>1C-1</b>	S500MC	500	6	432	0,71	0,81	12	50/5	S500MC
	<b>1C-2</b>	S500MC	500	6	432	0,71	0,81	12	50/5	S500MC
	<b>2C</b>	S500MC	500	6	432	0,71	0,81	12	50/4	S700MC
	<b>3C</b>	S500MC	500	4	432	0,71	1,22	18	50/5	S500MC
	<b>4C</b>	S700MC	500	4	432	0,71	1,44	18	50/4	S700MC
	<b>5C</b>	S500MC	500	4	876	1,43	1,22	18	50/6	S500MC
Ravni	<b>1F-1</b>	S500MC		6	432	0,71	0,81		50/5	S500MC
	<b>1F-2</b>	S500MC		6	432	0,71	0,81		50/5	S500MC

Preglednica 1 • Nominalne vrednosti geometrijskih in materialnih lastnosti vzorcev.

panela ter kakovosti materiala. Nekatere dimenzije so ostale enake za vseh devet vzorcev, in sicer širina panela  $b = 612$  mm, višina panela  $L = 1764$  mm ter dimenzije prečnih ojačitev  $h_{st}/t_{st} = 90/4$  mm. Vse druge materialne in geometrijske karakteristike vzorcev so zbrane v preglednici 1. Preizkušane 6C je ojačan z vzdolžnimi ojačitvami T-prereza (slika 6), pri vseh preostalih gre za ploščate odprte ojačitve. Podpaneli se v vseh primerih uvrščajo v 4. razred kompaktnosti z relativno vitkostjo med 0,8 in 1,4.

### 3.2 Zasnova testov

Schematični prikaz statičnega sistema testiranja ter postavitve testnega sistema v laboratoriju sta prikazana na sliki 7. Vertikalno tlačno obtežbo smo vnašali preko hidravličnega bata z maksimalno kapaciteto 3000 kN, ki smo ga vodili preko pomika s hitrostjo 0,01 mm/s do porušitve vzorca. Bat je bil vpet v glavni testni okvir in je deloval na horizontalni togi nosilec HEM300, ki je bil povezan s preizkušancem in je služil za enakomerni prenos



Slika 7 • Statični sistem testiranja.

obtežbe. Nosilec je bil v bočni smeri podprt preko plošče z nizkim koeficientom trenja, ki je omogočala vertikalne pomike. Tudi na spod-

njem delu je bil preizkušavec privijačen na nosilec HEM300, ki je preko betonske kocke prenašal obtežbo v tla (slika 8a). Teste smo

zasnovali tako, da je sila delovala v težišču prečnega prereza preizkušanca. S tem smo v panelu zagotovili čisti tlak in preprečili nas-



a)



b)

Slika 8 • a) Togi nosilec za razporeditev obtežbe in b) členkaste podpore.

tanek dodatnih upogibnih momentov zaradi ekscentričnosti osne sile. Zato je bilo treba pri montaži zagotoviti vertikalnost testnega okvirja in horizontalnost obeh nosilcev, kar smo med drugim dosegli z dodatnim podlivanjem stika med preizkušancem in spodnjim nosilcem. Vertikalni robovi panela so bili členkasto podprti. V ta namen smo zasnovali posebne členkaste podpore, ki so prikazane na sliki 8b. Te so bile pritrjene na dodatne vertikalne stebre, ki so bili bočno podprti.

Obremenjevali smo po korakih, med katerimi smo panel fotografirali, fotografije pa smo uporabili za določitev polja pomikov z metodo fotogrametrije, ki je opisana v naslednjem poglavju.

### 3.3 Meritve

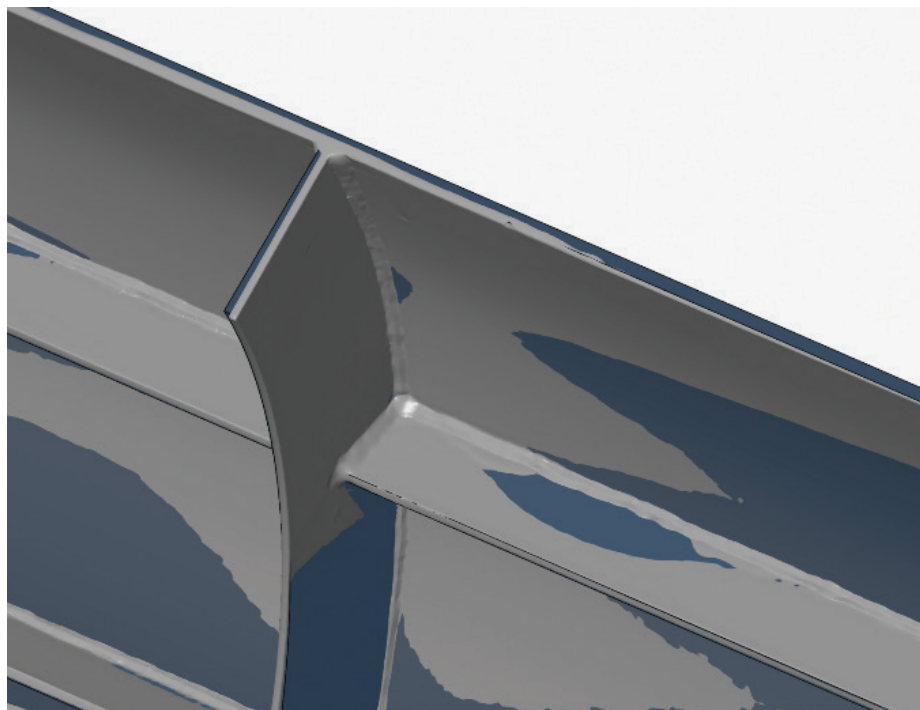
Pred statičnim obremenjevanjem so bili vsi vzorci skenirani z laserskim skenerjem, s katerim smo izmerili natančno geometrijo preizkušancev. Odstopanje dejanske geometrije od nominalne opredelimo kot začetne geometrijske nepopolnosti, ki so služile za nadaljnje numerične simulacije eksperimentov. Preizkušanci so vitki elementi, pri katerih na doseženo mejno nosilnost bistveno vpliva lokalno izbočenje pločevin, ki ga narekujejo oblika in amplituda začetnih nepopolnosti. Primer rezultata skeniranja preizkušanca je prikazan na sliki 9.

Med preizkusom smo vneseno silo merili z merilno celico, ki se nahaja v batu. S pomočjo induktivnih merilcev pomikov, merilnih uric in merilnih lističev deformacij smo med obremenjevanjem merili pomike in deformacije na določenih mestih konstrukcije. Poleg tega smo v posameznih korakih obremenjevanja s fotogrametrijo zajeli celotno polje pomikov ukrivljenega panela. To je omogočilo spremljanje pomikov po celotni konstrukciji in opazovanje izbočenja pločevine. V ta namen je bil celoten vzorec pobarvan z naključnim črno-belimi vzorcem, poleg tega je bilo na vzorcu tudi 40 geodetskih tarč. Za določitev polja pomikov je bilo treba posneti 12 fotografij z različnih zornih kotov in višin. Več o postopku je razloženo v (Grigillo, 2016).

### 3.4 Rezultati

Eksperimentalne krivulje sila–vertikalni pomik ter vrednosti mejne nosilnosti, ki so bile dosežene v eksperimentalnih testih, so razdeljene na vzorce z debelino pločevine  $t = 6$  mm, in prikazane na sliki 10, ter vzorce z debelino pločevine  $t = 4$  mm na sliki 11.

Začetni nakloni krivulj panelov z debelino pločevine  $t = 6$  mm so med seboj primer-



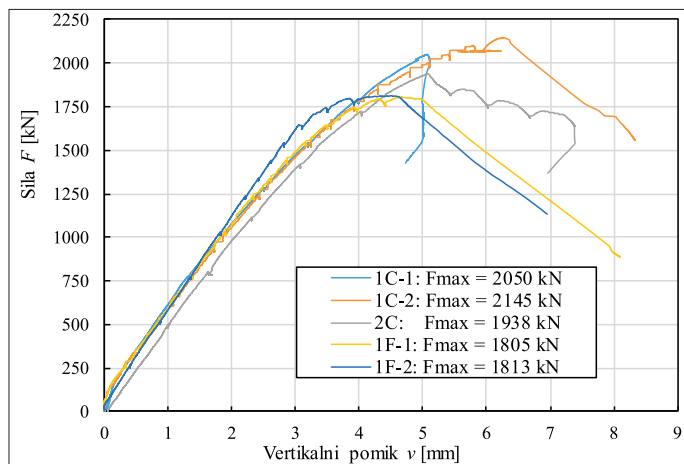
Slika 9 • Detajlna primerjava med idealno (modra) in skenirano (siva) geometrijo vzorca 1C-1.

ljivi. Pri preizkušancu 2C je opaziti nekoliko manjšo togost. Razliko lahko pripišemo manjši debelini vzdolžnih ojačitev. Vsi paneli izkazujejo linearno-elastičen odziv do visokega nivoja obremenitve. Ob prehodu v plastično območje se togost postopno zmanjšuje. Največjo nosilnost je dosegel panel 1C-2, za njim pa 1C-1 s 4,6% manjšo nosilnostjo. Oba panela imata popolnoma enako nominalno geometrijo in material, zato lahko razliko v končni nosilnosti pripišemo razlikam v geometrijskih nepopolnostih in neizogibnim manjšim odstopanjem pri vnosu sile. Oba preizkušanca z ravno pločevino (1F-1 in 1F-2) imata enako nominalno geometrijo, ploščino prečnega preza ter materialne karakteristike kot vzorca 1C-1 in 1C-2, edina razlika je v ukrivljenosti pločevine. Dosežena mejna nosilnost je v primerjavi z ukrivljenimi paneli od 13 do 19% nižja.

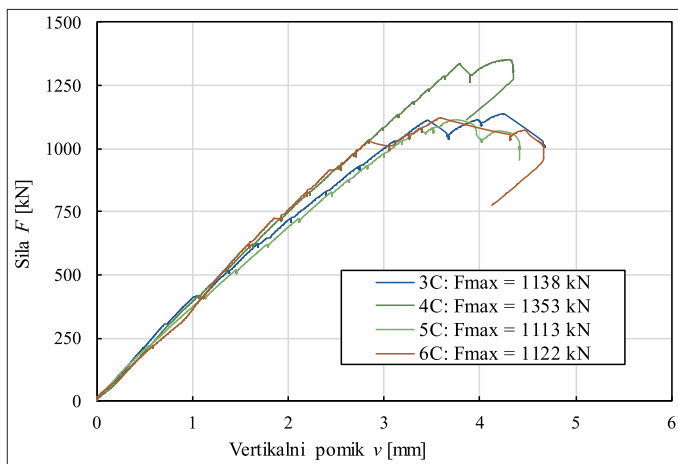
Togosti panelov z debelino pločevine  $t = 4$  mm se v elastičnem delu med seboj nekoliko razlikujejo, saj se vsi štiri preizkušanci razlikujejo v nominalni geometriji in materialu. V vseh primerih opazimo hipen padec odpornosti zaradi lokalne nestabilnosti podpanelov. V večini primerov prvemu padcu nosilnosti sledi ponovno povečanje odpornosti. Končna mejna nosilnost je dosežena zaradi lokalnega izbočenja več podpanelov in uklona ojačitev. Najvišjo nosilnost dosega panel 4C, in sicer

19% višjo v primerjavi s panelom 3C, ki ima enake geometrijske karakteristike in nižjo kvaliteto jekla. Sledijo mu preostali trije paneli (3C, 5C in 6C), pri katerih se tako elastična togost kot dosežena mejna nosilnost bistveno ne razlikujeta. Panela 5C in 6C z večjimi razmerji stranic dosegata podobno mejno nosilnost kot vzorec 3C, ne glede na to da je pri slednjem razdalja med prečnimi ojačitvami za polovico manjša. Ta ugotovitev je v skladu z zaključki, ki so jih avtorji navedli v predhodni numerični študiji (Piculin, 2017), v kateri je bilo pokazano, da s povečanjem razmerja stranic panela  $\alpha$  pri ukrivljenih pločevinah mejna nosilnost ostane skoraj nespremenjena.

S pomočjo fotogrametrije smo med obremenjevanjem spremljali deformirane oblike konstrukcije pri posameznih nivojih obtežbe. Na sliki 12 so prikazani pomiki izven ravnine pri doseženi mejni nosilnosti za vseh devet panelov. V vseh primerih so se paneli porušili zaradi kombinacije lokalnega izbočenja podpanelov in upogibno-torzijskega uklona vzdolžnih ojačitev. Deformirane oblike posameznih panelov se med seboj razlikujejo. Na lokacijo in obliko lokalnih izbočitev podpanelov imajo velik vpliv zaostale napetosti in začetne geometrijske nepopolnosti. Predvsem slednje se med paneli bistveno razlikujejo, kar smo pokazali z meritvami začetne geometrije s 3D-skenerjem.



Slika 10 • Eksperimentalne krivulje sila-pomik za panele debeline  $t = 6$  mm.

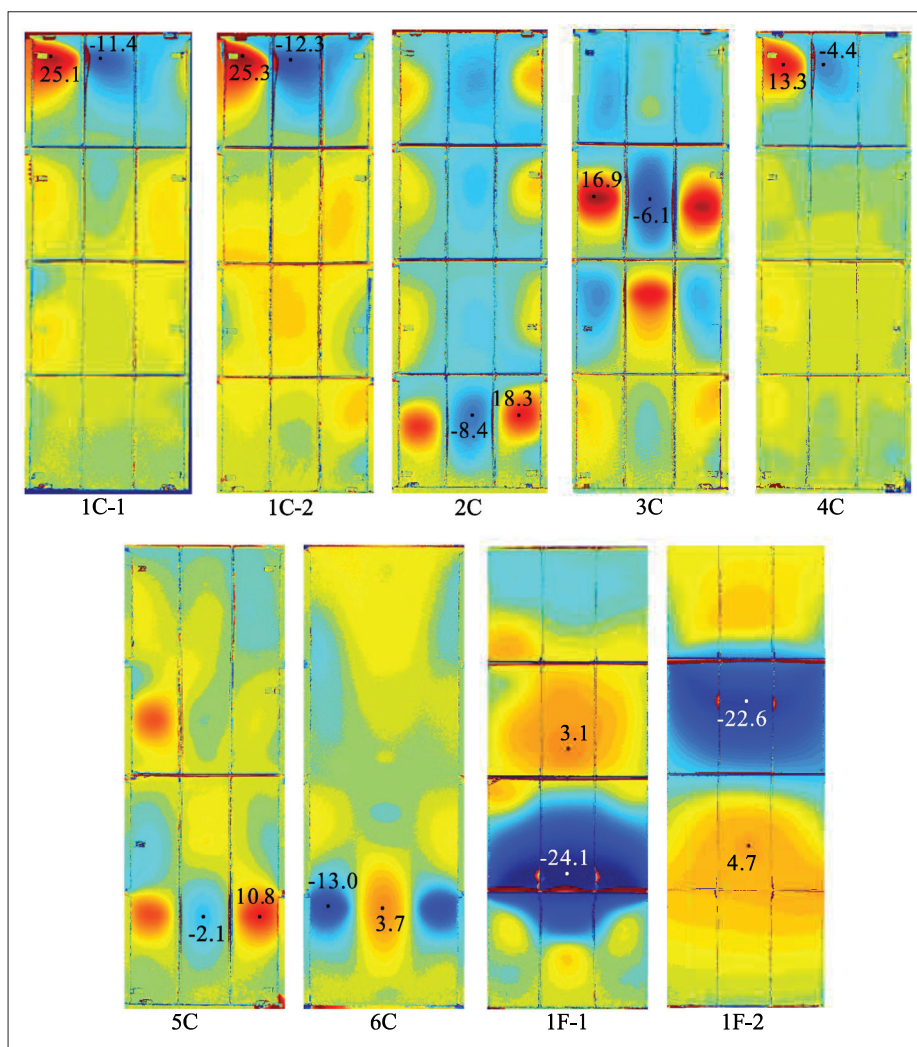


Slika 11 • Eksperimentalne krivulje sila-pomik za panele debeline  $t = 4$  mm.

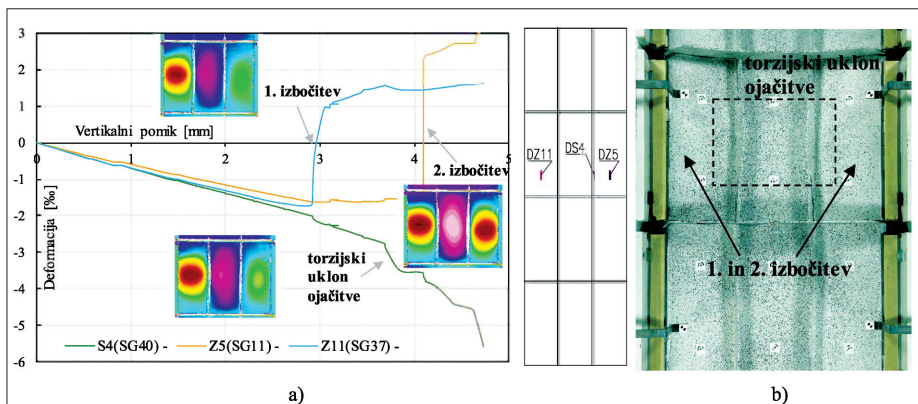
Na sliki 13a so prikazane tri meritve izmed dvajsetih deformacij za panel 3C. V prvi polovici obremenjevanja so deformacije tlačne, elastične in konstantne po prerezu. Izbočitev levega podpanela je jasno razvidna iz meritve Z11, kjer se deformacija hipoma spremeni iz tlačne v natezno. Podpanel zaradi izbočitve izgubi del nosilnosti, napetosti se prerazporedijo na stabilne dele (slika 11), kar privede do ponovnega naraščanja sile z nadaljevanjem obremenjevanja. Torzijski uklon ojačitve (meritev S4) nakazuje mejno nosilnost, ki je dosežena, ko se izboči desni podpanel (meritev Z5), kjer se deformacija ponovno spremeni iz tlačne v natezno. Deformirana oblika konstrukcije po razbremenitvi je razvidna s slike 13b.

V preglednici 2 so mejne eksperimentalne nosilnosti primerjane z nosilnostmi, ki smo jih določili po postopku iz standarda EN 1993-1-5. Pri tem smo upoštevali enake geometrijske podatke in materialne karakteristike ter zamenjali ukrivljenost. Eksperimentalna sila je v povprečju za 21% višja v primerjavi s silo, določeno po metodi efektivnih širin za ravne pločevine. Primerjava za ravna vzorca (1F-1, 1F-2) pokaže manjšo razliko, 10%.

V nadaljevanju študije smo eksperimentalne rezultate primerjali z numeričnimi simulacijami testov, glej (Piculin, 2020b). V numeričnih modelih smo upoštevali dejanske, izmerjene geometrijske nepopolnosti in materialne karakteristike. Numerični in eksperimentalni rezultati so se med seboj dobro ujemali, s čimer smo potrdili ustreznost izbranega numeričnega modela. Slednjega smo v nadaljevanju še dodatno poenostavili in uporabili v obsežni parametrični študiji, ki je predstavljena v naslednjem poglavju.



Slika 12 • Pomiki izven ravnine pri doseženi mejni nosilnosti, izmerjeni s fotogrametrijo.



Slika 13 • a) Deformacije v panelu in ojačitvi za vzorec 3C. b) Deformirana konstrukcija pri doseženi mejni nosilnosti.

Vzorec	$F_{test}$ (kN)	EN 1993-1-5 (Poglavje 4.1)	
		$F_{u,EN}$ (kN)	$F_{u,EN} / F_{test}$
1F-1*	1805	1629	0,90
1F-2*	1813	1629	0,90
1C-1	2050	1629	0,79
1C-2	2145	1629	0,76
2C	1938	1591	0,82
3C	1138	961	0,84
4C	1353	1143	0,84
5C	1113	795	0,71
6C	1122	874	0,78
		Povprečje:	±20,6 %
		St. dev.:	4,8 %

\* Ravne pločevine so izvzete iz računa povprečne vrednosti in standardne deviacije

Preglednica 2 • Primerjava eksperimentalnih mejnih nosilnosti in nosilnosti po metodi efektivnih širin skladno s standardom EN 1993-1-5.

## 4 • PARAMETRIČNA ŠTUDIJA

Z obsežno parametrično študijo na ojačanih ukrivljenih panelih smo podrobno analizirali vpliv različnih parametrov, kot so ukrivljenost, vitkost pločevine, velikost in oblika ojačitve na končno nosilnost tlačno obremenjenih pločevin. Rezultati študije so v nadaljevanju služili za verifikacijo obstoječih postopkov za projektiranje ravnih pločevin iz EN 1993-1-5 ter za razširitev letih na področje ukrivljenih pločevin z novim

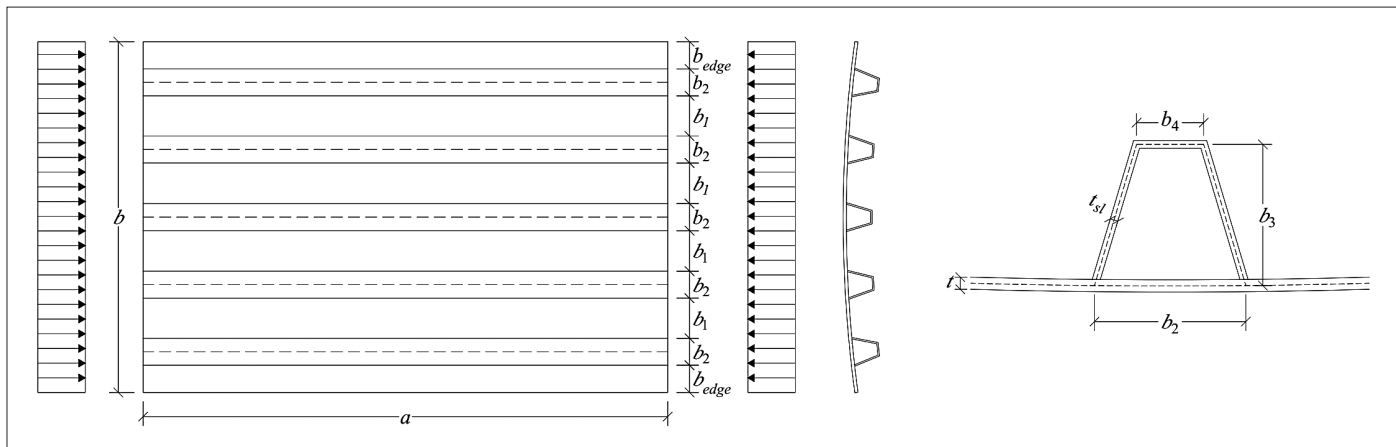
predlogom postopka za dimenzioniranje ojačanih ukrivljenih panelov.

### 4.1 Numerični model

V parametrični študiji smo obravnavali ravne in ukrivljene pločevine, ojačane s petimi trapeznimi vzdolžnimi ojačitvami in obremenjene z enakomernimi tlačnimi napetostmi. Geometrija numeričnega modela je prikazana na sliki 14. Širine panela  $b$ , podpanelov  $b_1$  ter

robnih podpanelov  $b_{edge}$  so bile konstantne za vse obravnavane primere ( $b = 4000$  mm,  $b_1 = 500$  mm,  $b_{edge} = 250$  mm). Vse preostale dimenzije so se znotraj parametrične študije spreminjale.

Mrežo končnih elementov sestavljajo 4-vzliščni elementi z reducirano integracijo. Opravljena je geometrijsko in materialno nelinearna analiza z upoštevanimi geometrijskimi nepopolnostmi (GMNIA) v programu Abaqus. Definiran je bilinearni materialni model z minimalnim platojem utrjevanja  $E/10000$ , ki zagotavlja numerično stabilnost.



Slika 14 • Geometrija ojačane pločevine, obravnavane v parametrični študiji.

Predpostavljeni so elastični modul  $E = 210$  GPa, Poissonov količnik  $\nu = 0,3$  ter meja tečenja  $f_y = 355$  MPa.

#### 4.2 Začetne nepopolnosti

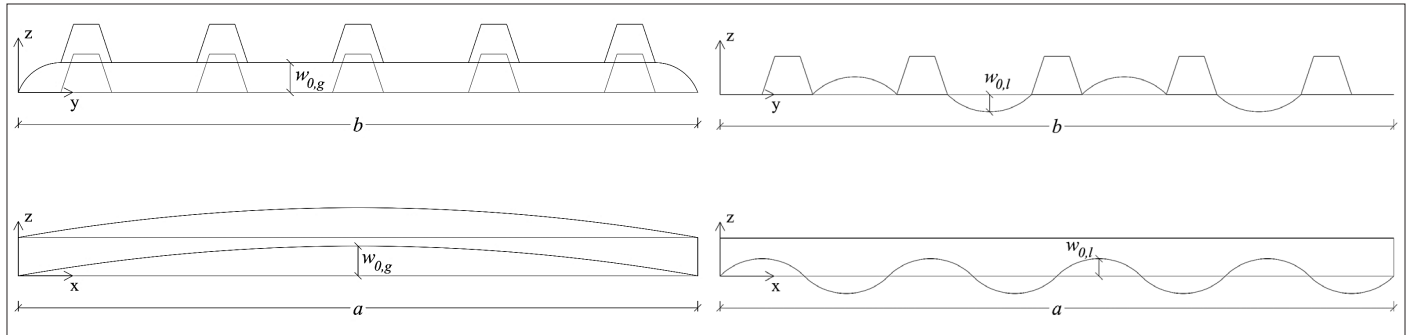
V modelu sta upoštevani dve vrsti začetnih nepopolnosti, in sicer globalne ter lokalne nepopol-

nelov imajo obliko sinusnih valov z amplitudo  $w_{0,l} = b/200$ , glej sliko 15b. Definirani sta z naslednjima funkcijama:

$$w_{glob}(x, y) = w_{0,g} \sin \frac{\pi x}{b} \sin \frac{\pi y}{a} \quad (5)$$

$t$ , ukrivljenost  $Z$  in velikost ojačitev v naslednjem obsegu:

- razmerje stranic panela  $\alpha = (0,5; 0,75; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0)$ ;
- debelina pločevine  $t$  (mm) = (10; 12; 14; 16);



a) globalna nepopolnost

b) lokalna nepopolnost

Slika 15 • Globalne in lokalne nepopolnosti, pripisane ojačani pločevini in podpanelom.

Oznaka	Opis
IMP1	Samo globalna nepopolnost
IMP2	Samo lokalna nepopolnost
IMP3	IMP1 + 0,7 IMP2
IMP4	0,7 IMP1 + IMP2
IMP5	- IMP1 + 0,7 IMP2
IMP6	- 0,7 IMP1 + IMP2
IMP7	- IMP1

Preglednica 3 • Kombinacije začetnih nepopolnosti.

nosti. Definirane so kot ekvivalentne geometrijske nepopolnosti z amplitudami v skladu z Dodatkom C iz standarda EN 1993-1-5. Globalne nepopolnosti celotne ojačane pločevine imajo obliko polovice sinusnega vala z amplitudo  $w_{0,g} = \min(a/400, b/400)$ , glej sliko 15a. Lokalne nepopolnosti podpa-

$$w_{loc}(x, y) = w_{0,l} \sin \frac{\pi x}{b_1} \sin \frac{m\pi y}{a} \quad (6)$$

V enačbi (6) predstavlja  $m$  število polvalov v vzdolžni smeri, definirano kot celo število razmerja  $a/b_1$ .

Pomemben del parametrične študije predstavlja analiza vpliva oblike začetnih nepopolnosti na mejno nosilnost ojačanih panelov. Z analizo želimo za vsak model iz parametrične študije določiti najbolj kritično kombinacijo nepopolnosti izmed sedmih oblik, definiranih v preglednici 3. Mejna nosilnost je za posamezni primer definirana kot najmanjša izmed sedmih nosilnosti, pridobljenih z različnimi nepopolnostmi (IMP1-IMP7):

$$F_{u,FEM} = \min(F_{u,IMP1}; F_{u,IMP2}; F_{u,IMP3}; F_{u,IMP4}; F_{u,IMP5}; F_{u,IMP6}; F_{u,IMP7};) \quad (7)$$

#### 4.3 Parametri, obravnavani v študiji

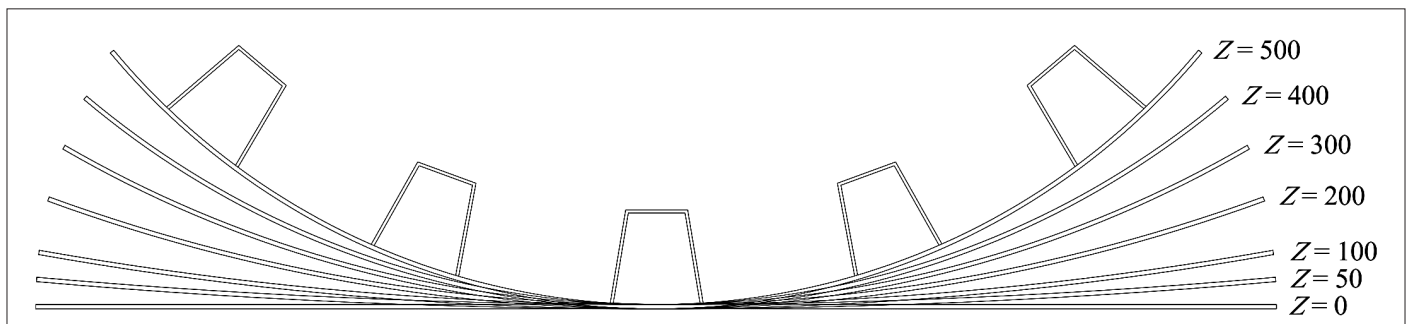
V parametrični študiji poleg nabora začetnih nepopolnosti (IMP1-IMP7) spreminjamo še razmerje stranic panela  $\alpha$ , debelino pločevine

- parameter ukrivljenosti  $Z = (0; 50; 100; 150; 200; 250; 300; 400; 500)$ , glej sliko 14;
- dimenzije trapeznih ojačitev: ojačitve tipa 1, 2 in 3, glej preglednico 4.

Ojačitev tipa 1 je najbolj toga izmed treh, ojačitev tipa 3 pa najbolj podajna. Navedeni parametri vodijo do skupno 810 različnih konfiguracij panelov. Ker se za vsako konfiguracijo upošteva sedem oblik nepopolnosti, je skupno opravljenih 5670 numeričnih analiz.

#### 4.4 Rezultati parametrične študije

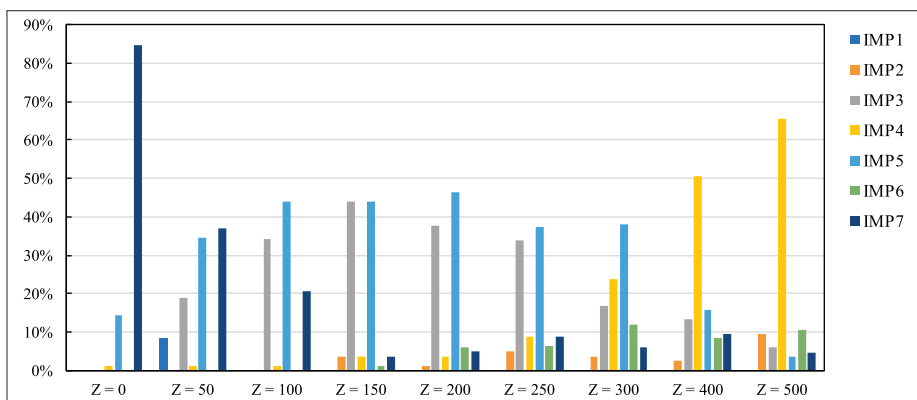
Slika 16 prikazuje porazdelitev najbolj neugodnih oblik nepopolnosti glede na ukrivljenost panela. Pri ravnih panelih ( $Z = 0$ ) prevladuje nepopolnost IMP7. S povečanjem parametra ukrivljenosti se frekvenca nepopolnosti IMP7 strmo zmanjšuje. Nasprotno se z ukrivljenostjo povečuje frekvenca nepopolnosti IMP4, ki je najbolj pogosta pri največji ukrivljenosti  $Z = 500$ . V srednjem delu diagrama ( $Z = 50$  do  $Z = 300$ ) prevladujeta nepopolnosti IMP3 in IMP5. Iz tega



Slika 16 • Različne ukrivljenosti (pri konstantni širini panela b), vključene v parametrično študijo.

	$b_1$ (mm)	$b_2$ (mm)	$b_3$ (mm)	$b_4$ (mm)	$t_{sl}$ (mm)
Ojačitev tipa 1	500	300	300	200	10
Ojačitev tipa 2	500	300	225	150	8
Ojačitev tipa 3	500	300	150	150	6

Preglednica 4 • Dimenzije trapeznih ojačitev (definirane na sliki 14).



Slika 17 • Porazdelitev najbolj neugodnih oblik nepopolnosti za posamezne ukrivljenosti pločevin.

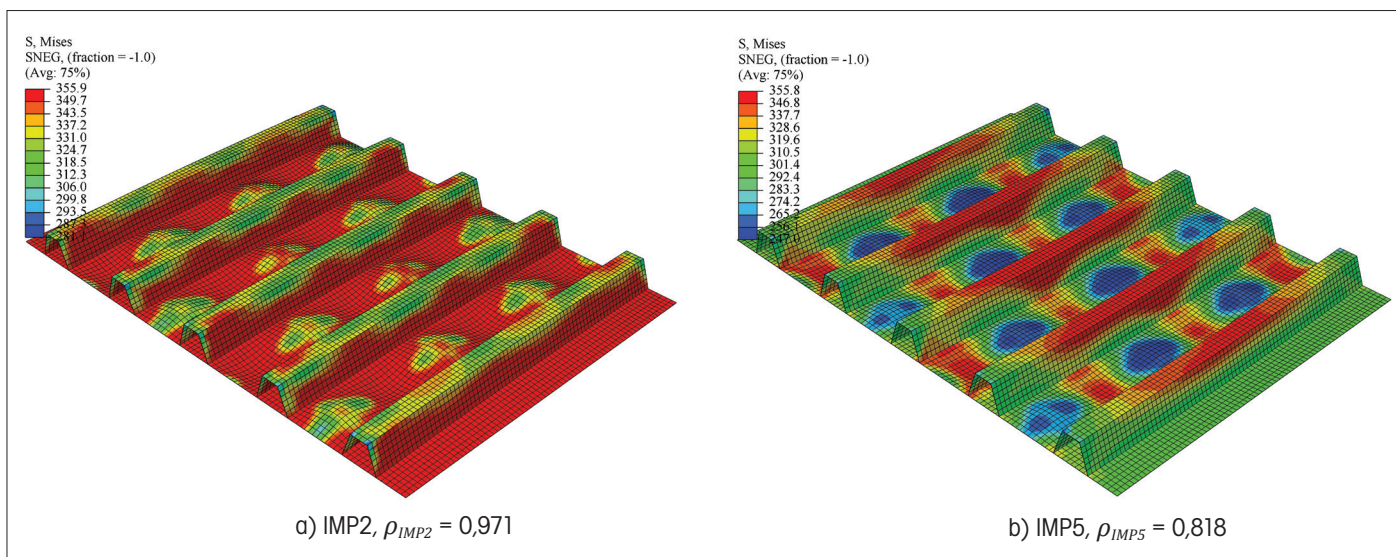
sledi, da se pri različnih ukrivljenostih panelov oblike najbolj kritičnih začetnih nepopolnosti razlikujejo. Pri ravnih panelih prevladujejo globalne oblike, pri močno ukrivljenih panelih pa lokalne oblike nepopolnosti. Za ustrezno določitev mejne nosilnosti vitkih panelov na podlagi numeričnega modela je pomembno, da opravimo natančno analizo vpliva geometrijskih nepopolnosti, s katero določimo najbolj kritično obliko. Pri ravnih panelih je razlika v nosilnosti med panelom z najbolj in najmanj ugodno obliko nepopolnosti v povprečju 27%. Napačna izbira nepopolnosti lahko torej vodi do rezultatov na nevarni stra-

ni. S povečevanjem ukrivljenosti se razlika zmanjšuje in je za panele z ukrivljenostjo  $Z \geq 300$  v povprečju manjša od 5%. Primera razlik med najbolj in najmanj kritično obliko nepopolnosti za ravne in ukrivljene panele sta prikazana na slikah 18 in 19.

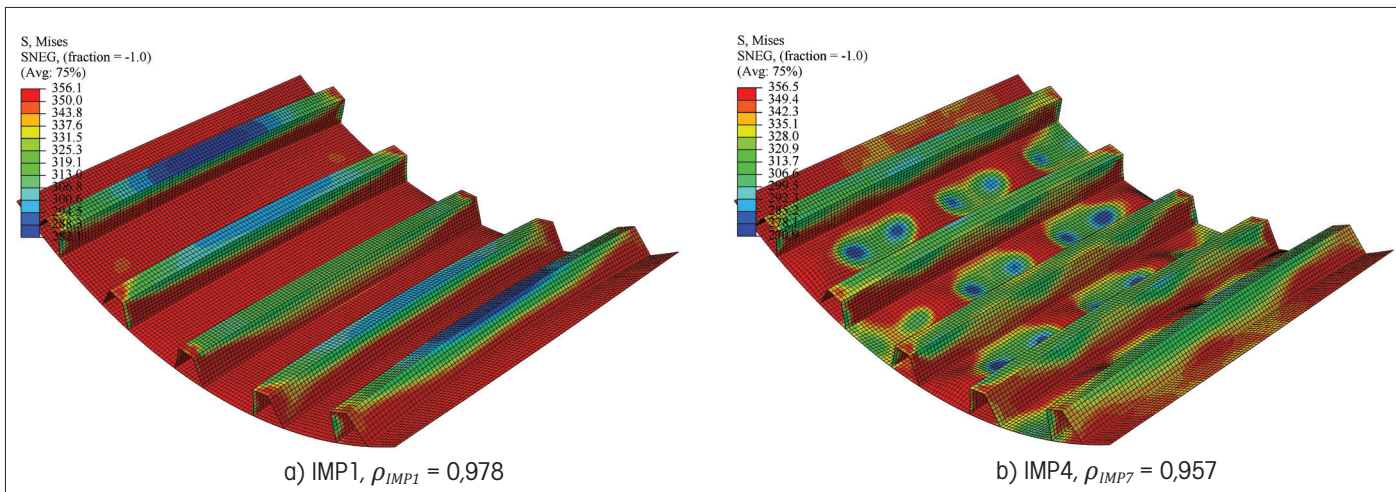
Numerični rezultati kažejo, da se odpornost vzdolžno ojačanih ukrivljenih panelov povečuje s povečanjem parametra ukrivljenosti  $Z$ . S povečanjem globalne ukrivljenosti panela se namreč vztrajnostni moment prečnega prereza pločevine močno poveča. Posledično se pri visokih ukrivljenostih ( $Z \geq 300$ ) zmanjša vpliv izbočenja ojačane pločevine

kot celote na mejno nosilnost panela. Porušitev je v takšnih primerih običajno posledica lokalnega izbočenja podpanelov v kombinaciji s plastifikacijo materiala. Vpliv razmerja stranic panela na mejno nosilnost ojačanih ukrivljenih pločevin je zato čim manjša, tem večja je njena globalna ukrivljenost  $Z$ , glej primer na sliki 20. Pri velikih ukrivljenostih ( $Z \geq 300$ ) je nosilnost praktično neodvisna od razmerja stranic. To potrjuje tudi ugotovitve iz analize rezultatov eksperimentalnih testov.

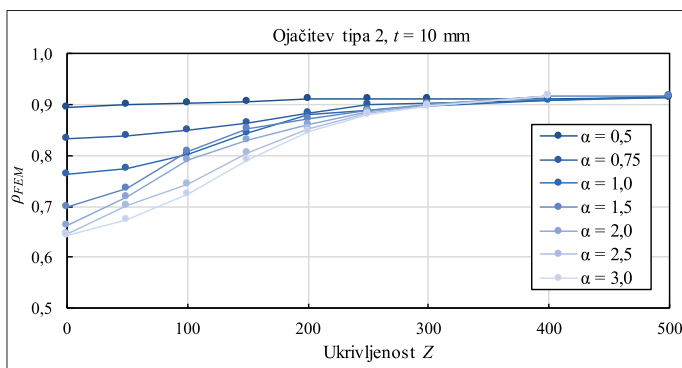
Pri velikih ukrivljenostih ima sama pločevina veliko večji vztrajnostni moment kot ravna pločevina enakih dimenzij, in težišče prečnega prereza se pomakne navznoter (v smeri radija ukrivljenosti). Posledično pri ukrivljenih pločevinah vzdolžne ojačitve prispevajo manjši relativni delež k skupnemu vztrajnostnemu momentu prereza v primerjavi z ravnimi ojačanimi pločevinami. Vzdolžne ojačitve imajo zato veliko manjši vpliv na mejno nosilnost ukrivljenih pločevin, kot ga imajo na mejno nosilnost ravnih. Za ukrivljenosti, večje od  $Z = 250$ , se nosilnost približuje isti relativni nosilnosti ne glede na velikost vzdolžnih ojačitev, glej sliko 21. Pri tem je treba upoštevati, da je na diagramu prikazana relativna nosilnost  $\rho_{FEM}$ , normirana s ploščino prečnega prereza in napetostjo na meji tečenja. Absolutna nosilnost je pri ojačitvah tipa 1 večja od pločevin z ojačitvami tipa 3 zaradi večjega prereza ojačitev.



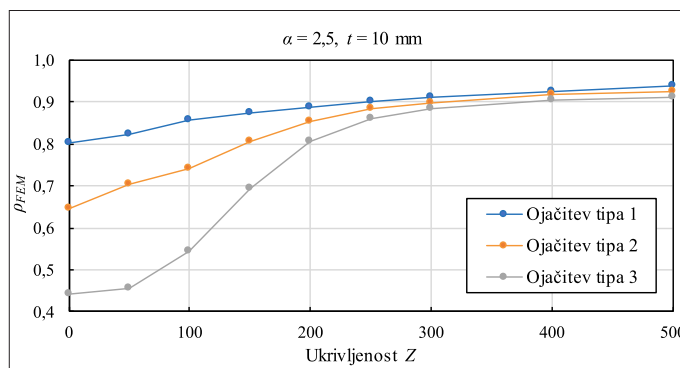
Slika 18 • Razlika med najbolj in najmanj kritično obliko nepopolnosti za pločevino:  $Z = 0$ ;  $\alpha = 0.75$ ;  $t = 12$  mm; ojačitev tipa 2.



Slika 19 • Razlika med najbolj in najmanj kritično obliko nepopolnosti za pločevino:  $Z = 400$ ;  $\alpha = 0.75$ ;  $t = 12$  mm; ojačitev tipa 2.



Slika 20 • Vpliv razmerja stranic panela na mejno nosilnost za vzdolžno ojačitev tipa 2.



Slika 21 • Vpliv togosti ojačitev na nosilnost dolgih panelov.

## 5 • PREDLAGANI POSTOPEK DIMENZIONIRANJA

Zaradi pomanjkljivih evropskih standardov na področju ukrivljenih pločevinastih konstrukcij na podlagi eksperimentalnih in numeričnih rezultatov predlagamo nova pravila za dimenzioniranje ukrivljenih ojačanih pločevin, izpostavljenih enakomernim tlačnim napetostim. Predlagani postopek sledi konceptu obstoječega standarda za ravne pločevine EN 1993-1-5, kjer je po metodi sodelujoče širine mejna nosilnost definirana s kombinacijo lokalnega in globalnega izbočenja. Globalno izbočenje ojačane pločevine je določeno z interpolacijo med dvema različnima načinoma izbočitve, in sicer: t. i. *plate-like buckling*, tj. izbočitev pločevine skupaj z ojačitvami, kjer vzdolžna podprta robova pripomoreta k večji nosilnosti ter t. i. *column-like buckling*, tj. izbočitev pločevine skupaj z ojačitvami, kjer vzdolžna podprta robova ne vplivata na no-

silnost, kar pomeni, da se ojačana pločevina ukloni kot prostoležeči steber v tlaku.

Predlagani postopek dimenzioniranja vključuje naslednje korake:

- izračun elastične kritične napetosti  $\sigma_{cr}$  ukrivljenih podpanelov širine  $b_{loc}$  v skladu s postopkom za neojačane ukrivljene panele (Martins, 2013);
- izračun redukcijskega koeficienta zaradi lokalnega izbočenja posameznega podpanela  $\rho_{loc}$  v skladu s postopkom za neojačane ukrivljene panele (Martins, 2014);
- izračun površine sodelujočega dela tlačnega prečnega prereza  $A_{c,eff,loc}$  ki se določi kot vsota vseh sodelujočih delov posameznih podpanelov s ploščino  $A_{c,i}$ :

$$A_{c,eff,loc} = \sum_i A_{c,eff,loc,i} \quad (8)$$

$$A_{c,eff,loc,i} = \rho_{loc,i} A_{c,i} \quad (9)$$

- izračun elastične kritične napetosti ojačane ukrivljene pločevine  $\sigma_{cr,p}$  po enačbah (10)-(14), izpeljanih na podlagi predpostavk za ortotropno lupino. V spodnjih enačbah sta  $A_{sl,1}$  in  $I_{sl,1}$  ploščina in vztrajnostni moment dela prereza prikazana na sliki 22.

$$\sigma_{cr,p} = \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{a}\right)^2 k_{\sigma,z} \quad (10)$$

$$k_{\sigma,z} = \sqrt{\frac{\gamma_1^2}{(1+\delta_1)^2} + \left(\frac{4\sqrt{3}Z_a}{\pi^2} - 1\right)^2} \quad (11)$$

$$Z_a = \frac{a^2}{Rt} \sqrt{(1-\nu^2)} \quad (12)$$

$$\delta_1 = \frac{A_{sl,1}}{b_{loc} t} \quad (13)$$

$$\gamma_1 = \frac{12(1-\nu^2) I_{sl,1}}{b_{loc} t^3} \quad (14)$$

- izračun redukcijskega koeficienta zaradi izbočenja lupine  $\rho$  v skladu s postopkom



za neojačane ukrivljene panele (Martins, 2014) ob upoštevanju elastične kritične napetosti  $\sigma_{cr,p}$  izračunane v prejšnji točki;

- izračun elastične kritične napetosti uklona tlačnega stebra  $\sigma_{cr,c}$  ki se določi za celoten tlačni prerez;
- izračun redukcijskega koeficienta zaradi uklona tlačnega stebra  $\chi_{cr}$  ki se določi v skladu z EN 1993-1-1 (CEN, 2005);
- izračun končnega redukcijskega koeficienta  $\rho_{cr}$  ki se določi z interpolacijsko funkcijo po EN 1993-1-5.

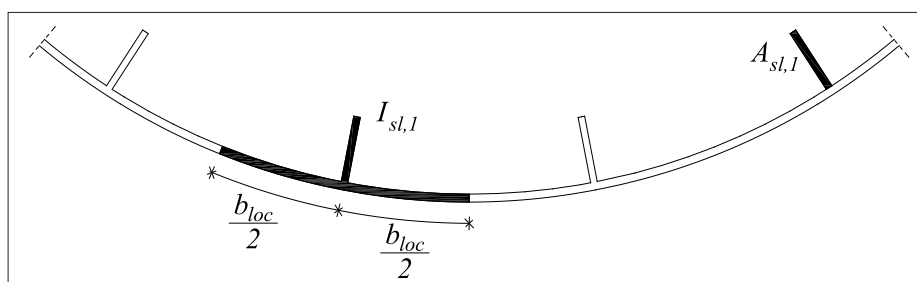
Mejna nosilnost vzdolžno ojačane, ukrivljene pločevine, izpostavljene tlačnim napetostim, je določena z enačbo (15):

$$F_{u,Rd} = (\rho_c A_{c,eff,loc} + \sum b_{edge,eff} t) f_y / \gamma_{M1} \quad (15)$$

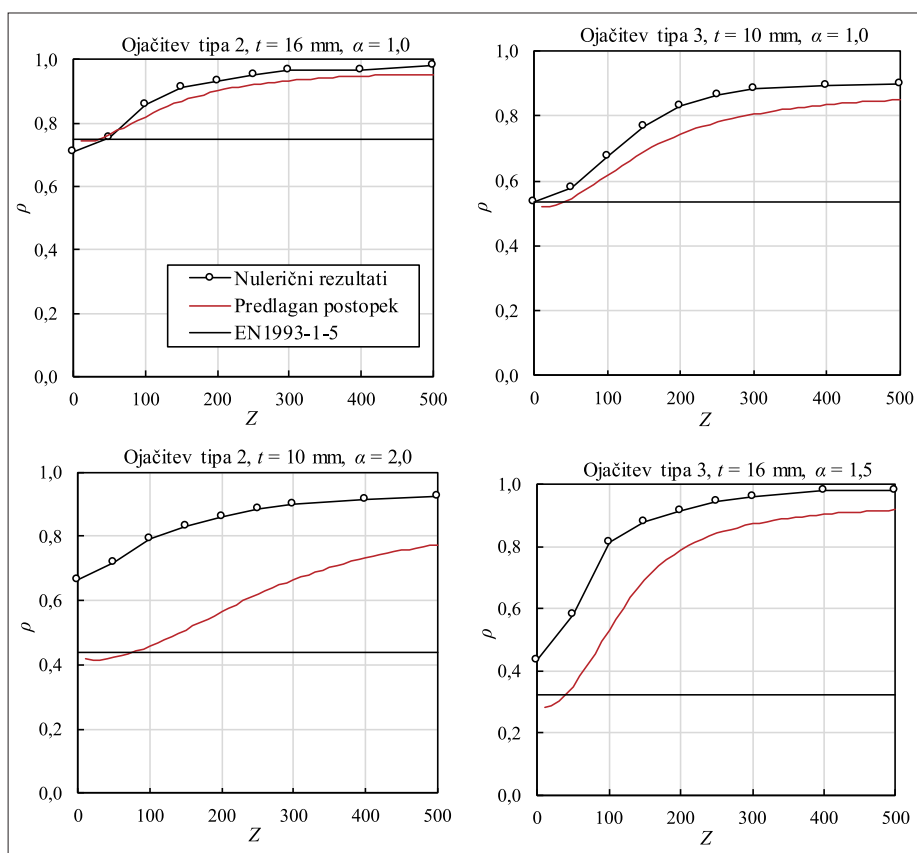
Slika 23 prikazuje primerjavo numeričnih rezultatov in predlaganega postopka za nekaj reprezentativnih primerov ojačanih ukrivljenih panelov. Na diagramih so prikazane vrednosti mejnih nosilnosti, normirane z elastično nosilnostjo  $F_{el} = A f_y$  za naslednje primere:

- numerični rezultati:  $\rho_{FEM} = F_{u,FEM} / F_{el}$ ;
- predlagani postopek dimenzioniranja:  $\rho_{u,Rd} = F_{u,Rd} / F_{el}$ ;
- nosilnost ekvivalentne ravne pločevine določena po EN 1993-1-5:  $\rho_{u,EN} = F_{u,EN} / F_{el}$ .

Predvsem za kratke panele ( $\alpha \leq 1,0$ ) je doseženo zelo dobro ujemanje. Pri daljših panelih nov postopek dimenzioniranja vodi do nekoliko konservativnih rezultatov, vendar je treba poudariti, da je v teh primerih tudi postopek za ravne ojačane panele precej konservativen. V vseh primerih predstavlja nov postopek bolj ustrezen način za dimenzioniranje ukrivljenih panelov v primerjavi z obstoječim postopkom za ravne panele.



Slika 22 • Geometrijski parametri iz enačb (13) in (14).



Slika 23 • Primerjava numeričnih rezultatov, novih pravil za dimenzioniranje in obstoječih pravil za ravne pločevine za nekaj reprezentativnih primerov ojačanih ukrivljenih pločevin.

## 6 • SKLEP

V prispevku je obravnavana stabilnost ojačanih ukrivljenih panelov v nosilcih mostov na podlagi eksperimentalnih testov in numeričnih analiz. Predstavljeni sta sistematična numerična študija ukrivljenih pločevin z ojačitvami zaprtega prereza, ki zajema širok razpon geometrijskih parametrov v okviru tipičnih dimenzij mostnih nosilcev ter celovita študija vpliva oblik začetnih geometrijskih nepopolnosti na mejno nosilnost ukrivljenih pločevin. Na podlagi eksperimentalnih in numeričnih rezultatov je mogoče poudariti štiri

glavne prednosti, ki jih ima ukrivljenost na nosilnost pločevinastih elementov:

- ojačane ukrivljene pločevine so manj občutljive za obliko začetnih nepopolnosti kot ravne pločevine;
- z ukrivljenimi pločevinami dosežemo večjo nosilnost v primerjavi z ravnimi. Večja kot je ukrivljenost, večja je mejna nosilnost.
- pri visokih ukrivljenostih razdalja med prečnimi ojačitvami ne vpliva bistveno na mejno nosilnost;

- pri visokih ukrivljenostih lahko zmanjšamo velikost vzdolžnih ojačitev, ne da bi pri tem pomembno vplivali na mejno nosilnost.

Izpeljana je splošna oblika koeficienta za ortotropne lupine, ki je skladna z izpeljavo za ortotropne plošče iz Dodatka A, EN 1993-1-5. Predlagan je nov postopek za dimenzioniranje vzdolžno ojačanih, ukrivljenih pločevin, izpostavljenih enakomernim tlačnim napetostim, ki predstavlja razširitev obstoječih pravil za dimenzioniranje pločevinastih konstrukcij iz EN 1993-1-5.

## 7 • ZAHVALA

Raziskava je bila finančno podprta pri Evropski komisiji v okviru projekta RFCS OUTBURST (št. pogodbe 709782) in Agenciji za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije v sklopu raziskovalnega programa P2-0158.

## 8 • LITERATURA

Biscaya da Graça, A., Oliveira Pedro, J., Martins, J.P., Reis, A., Estado da arte em pontes incluindo painéis metálicos cilíndricos na secção transversal. XI Congresso de Construção Metálica e Mista. Coimbra, Portugal, 2017.

CEN, European standard EN 1993-1-1: 2005. Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1-1: General rules and rules for buildings. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2005.

CEN, European standard EN 1993-1-5: 2006. Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1-5: Plated Structural Elements, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2006.

CEN, European standard EN 1993-1-6: 2007. Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1-6: Strength and Stability of Shell Structures, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2007.

Cho, S. R., Park, H.Z., Kim, H.S., Seo, J.S., Experimental and numerical investigations on the ultimate strength of curved stiffened plates, Proceeding 10th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures, Huston, Texas, USA, 2007.

Corriere Della Sera, Nuovo ponte di Genova, concluso il varo, <https://www.corriere.it>, 2020.

Grigillo, D., Snoj, J., Dolšek, M., Fotogrametrično merjenje deformacij pri preizkusih mehanske odpornosti konstrukcijskih elementov, Geodetski vestnik, 60, 13–27, 2016.

Martins, J. P., Simões Da Silva, L. and Reis, A., Eigenvalue analysis of cylindrically curved panels under compressive stresses - Extension of rules from EN 1993-1-5, Thin-Walled Structures, 68, 183–194, 2013.

Martins, J. P., Simões Da Silva, L. and Reis, A., Ultimate load of cylindrically curved panels under in-plane compression and bending - Extension of rules from EN 1993-1-5, Thin-Walled Structures, 77, 36–47, 2014.

Martins, J. P., Beg, D., Sinur, F., Simões Da Silva, L. and Reis, A., Imperfection sensitivity of cylindrically curved steel panels, Thin-Walled Structures, 89, 101–115, 2015.

Massard, F, Pont Renault (Boulogne-Billancourt), <http://www.marine-marchande.net/groupe-mar-mar/Documents/F.Massard/Pont-Renault/index.htm>, 2019

Morgese, M., Ansari, F., Domaneschi, M., Cimellaro, G., Post-collapse analysis of Morandi's Polcevera viaduct in Genoa Italy, Journal of Civil Structural Health Monitoring, 10, 69–85, 2020.

Ney & Partners BXL, Footbridge 'De Lichtenlijn', Knokke, Belgium, 2008, <https://www.ney.partners/project/footbridge-de-lichtenlijn.html>, 2020.

Park, J.-S., Iijima, K. and Yao, T., Buckling/ultimate strength and progressive collapse behaviour comparison of unstiffened and stiffened curved plates subjected to axial compression, International Journal of Computer Applications in Technology, 41, 60–72, 2011.

Piculin, S., Sinur, F. and Može, P., Analysis of stiffened curved panels in compression: A preliminary numerical study for experimental tests, Proceedings of Eurosteel 2017. Copenhagen, Denmark, 2017.

Piculin, S., Može, P., Experimental and numerical analysis of stiffened curved plates as bottom flanges of steel bridges, Journal of Constructional Steel Research, 164, 2020a.

Piculin, S., Stability of stiffened curved steel plates in bridge girders, Doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani, Ljubljana, Slovenia, 2020b.

Sinur, F., Zizza, A., Kuhlmann, U., Beg, D., Buckling interaction of slender plates-Experimental and numerical investigations, Thin-Walled Structures, 61, 121–131, 2012.

Sinur, F. and Beg, D., Moment-shear interaction of stiffened plate girders-Tests and numerical model verification, Journal of Constructional Steel Research, 85, 116–129, 2013.

Timmers, R., Lener, G. Collapse mechanisms and load–deflection curves of unstiffened and stiffened plated structures from bridge design, *Thin-Walled Structures*, 106, 448–458, 2016.

Timmers, R. Schwienbacher, M., Lang, R., Lener, G., Proposal and validation of a simplified numerical buckling check for stiffened plated elements, *Eight International Conference on Thin-Walled Structures - ICTWS 2018*, Lisbon, Portugal, 2018.

Tran, K. L., Davaine, L., Douthe, C., Sab, K., Stability of curved panels under uniform axial compression, *Journal of Constructional Steel Research*, 69, 30–38, 2012.

Tran, K. L., Douthe, C., Sab, K., Dallot, J., Davaine, L., Buckling of stiffened curved panels under uniform axial compression, *Journal of Constructional Steel Research*, 103, 140–147, 2014.

# UPORABA PLATFORME RAČUNALNIŠTVA V MEGLI PRI RAZVOJU APLIKACIJ ZA PAMETNO IN VARNO GRADNJO

## THE USE OF A FOG COMPUTING PLATFORM FOR THE DEVELOPMENT OF APPLICATIONS FOR SMART AND SAFE CONSTRUCTION

Janez Brežnik, univ. dipl. inž. arh.  
Petar Kochovski, mag. inž. rač. in inf.  
izr. prof. dr. Vlado Stankovski, univ. dipl. inž.  
rač. in inf.

vlado.stankovski@fri.uni-lj.si  
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za računalništvo  
in informatiko  
Večna pot 113, 1000 Ljubljana

Znanstveni članek  
UDK 004.7:69(497.4)

**Povzetek** | Sodobne informacijske tehnologije in tehnologije umetne inteligence si nezadržno utirajo pot v gradbeništvu in arhitekturi ter počasi spreminjajo obstoječe delovne procese, njihovo dinamiko in zanesljivost. V tem delu smo uporabili platformo računalništva v megli DECENTER pri izdelavi novega koncepta aplikacij za pametno in varno gradnjo. V članku so predstavljene naše izkušnje s platformo DECENTER ter z realizacijo aplikacije v kontekstu gradbišča Šumi v Ljubljani.

Ključne besede: računalništvo v megli, aplikacije za pametno in varno gradnjo

**Summary** | Modern information technologies and Artificial Intelligence are paving their way in the areas of construction and architecture, slowly changing the existing working processes, their dynamics and dependability. In this article we apply the DECENTER fog computing platform in the development of a new concept of applications for smart and safe construction. The article presents our experience with the DECENTER platform and the realisation of an application in the context of the Šumi construction site in Ljubljana.

Key words: fog computing, smart and safe construction

## 1 • UVOD

Sodobne informacijske tehnologije in tehnologije umetne inteligence si nezadržno utirajo pot v gradbeništvu in arhitekturi ter počasi spreminjajo obstoječe delovne procese, njihovo dinamiko in zanesljivost. Poleg izrednega napredka pri načrtovanju, predvsem pri informacijskem modeliranju stavb (ang. Building Information Modelling, BIM), pa ne gre spregledati velikega potenciala z uvedbo novih tehnologij na področju izvajanja gradenj, njihov prispevek k varnosti, kakovosti, trajnosti ter časovni učinkovitosti.

V preteklem delu (Štefanič, 2019) smo ugotovili področja možnih izboljšav. Poročali smo o analizi trendov, priložnostih in izzivih pametne gradnje s pregledom nedavno objavljenih znanstvenih člankov. Z razvojem t. i. pametnih gradbenih aplikacij je mogoče izpopolniti vodenje in organizacijo gradbišč, na primer povečati nadzor in sledljivost delovnih procesov gradnje, strojev in opreme ter zlasti s pravočasnim obveščanjem o morebitnih nesrečah pri delu izboljšati varnost ljudi in premoženja na gradbišču.

Izboljšanje varnosti ljudi spada med najpomembnejše izzive pametne gradnje. V Sloveniji se po zadnjih podatkih Inšpektorata Republike Slovenije (IRSD, 2018) iz leta 2018 gradbeništvu uvršča med najbolj nevarne gospodarske dejavnosti, po številu smrtnih nesreč pa je v vrhu. Statistika je bila neugodna že v preteklih obdobjih in se v zadnjem obdobju ni bistveno izboljšala, podobna pa je slika tudi v širšem geografskem kontekstu Evropske unije kot tudi v ZDA (OSHA). Poglavitni vzroki za nastanek nezgod so izguba nadzora nad delovno opremo, zdrsi, spotiki in padci delavcev ter padec bremena na delavca.

Po podatkih iz zadnjega poročila o delu inšpektorata RS za delo za leto 2018 so inšpektorji opravili nadzor na 314 gradbiščih in 51 deloviščih, na katerih so se večinoma opravljala kratkotrajna dela na višini. V desetletnem obdobju, od kar opravljajo celoletne akcije nadzora izvajanja predpisov o varnosti in zdravju pri delu na začasnih in premičnih gradbiščih, so opravili 1419 pregledov pri 950 subjektih. Izsledki kažejo, da se povprečno obdobje, v katerem se opravljajo dela na gradbiščih, podaljšuje ter da se povečuje število gradbišč, na katerih se gradijo zahtevni objekti. Ugotovili so 367 nepravilnosti v zvezi z zagotavljanjem osebne varovalne opreme in njene uporabe ter neuporabe s strani posameznih delavcev, 71 kršitev glede vozil in delovne opreme na gradbiščih ter 27 kršitev glede varovanja gradbišča proti okolici v smislu onemogočanja dostopa nezaposlenim osebam na gradbišča. Velik problem v zadnjem obdobju predstavlja tudi dejstvo, da imajo srednje velika in majhna gradbena podjetja, ki so po propadu velikih podjetij prevzela gradbeni trg, nezadostne kapacitete ustrezno izobraženih strokovnih delavcev, ki bi skrbeli za izvajanje rednih pregledov po gradbiščih v zvezi z zagotavljanjem ukrepov varnosti pri delu, pri manjših delodajalcih pa teh profilov najpogosteje sploh ni.

S pomočjo sodobnih tehnologij in vključitvijo umetne inteligence je tako že mogoče zaznavati uporabo varnostne opreme, kot so na primer zaščitne čelade ali varnostnega telovnika, ter spremljati zaloge gradiv, delovne opreme, naprav in strojev. Skupaj z različnimi senzorji, napravami nosljivega računalništva in brezpilotnih letalnikov pa je mogoče v real-

nem času in pravočasno predvideti kritične situacije na delovišču.

Tehnologije interneta stvari, umetne inteligence in računalništva v oblaku ponujajo nove priložnosti za pametne aplikacije v številnih panogah. S hkratnim pospešenim razvojem, kjer se vztrajno izboljšujeta izurjenost in natančnost tehnologij umetne inteligence, in uvedbo novih standardov varovanja osebnih podatkov pa se pojavljajo novi izzivi zajemanja in upravljanja osebnih podatkov udeležencev pri gradnji. Potencialne koristi vključujejo izboljšanje industrijskih procesov, izdelkov in storitev, večjo zanesljivost in nižje operativne stroške.

Projekt DECENTER prispeva k uresničitvi vizije pametne gradnje, mest, domov in industrije 4.0. Cilj projekta je razviti decentralizirano platformo računalništva v megli (Bonomi, 2012), ki pokriva celoten nabor možnih pametnih storitev in naprav, od oblaka do interneta stvari, ter omogoča orkestracijo pametnih aplikacij in oskrbovanje z računskimi viri. Računalništvo v megli je računalništvo v oblaku, ki zadosti najvišjim zahtevam po zanesljivosti, varnosti, zasebnosti in zaupanju pri delovanju programskih storitev oziroma aplikacij. Platforma DECENTER izboljša kakovost storitev pri uporabi globokih nevronske mreže, omogoča razvoj pametnih aplikacij računalništva v megli ter upravljanje zasebnih podatkov. Rezultati projekta so za primer področja gradbeništvu zelo zanimivi, zato smo si pri našem delu zastavili cilj, da platformo DECENTER uporabimo na konkretnem primeru razvoja aplikacije za pametno in varno gradnjo.

V nadaljevanju je predstavljena analiza trenutnega stanja, predstavljeni so konkretni problemi, ki smo jih naslovili pri našem delu, arhitekturo nove DECENTER-platforme računalništva v megli ter naši dosežki pri razvoju aplikacije za pametno in varno gradnjo.

obdelavo časovnih serij in videotokov, metod umetne inteligence za pridobivanje informacij, združitvev podatkov in programske opreme za vizualizacije. Poleg tega so potrebna posebna orodja za upravljanje nefunkcionalnih lastnosti aplikacij, vključno z njihovo zanesljivostjo, varnostjo in zasebnostjo.

Številne pametne gradbeniške aplikacije so časovno kritične in jih je treba načrtovati z upoštevanjem teh zahtev. V skladu s tem bo vsako novo pametno gradbišče, ki vključuje številne pametne aplikacije, treba načrtovati vnaprej. Oblikovanje časovno kritičnih pametnih aplikacij je še posebej zahtevno zaradi

## 2 • ANALIZA TRENUTNEGA STANJA

Tehnologije interneta stvari, umetne inteligence in računalništva v oblaku ponujajo nove priložnosti za pametne aplikacije na številnih področjih. Potencialne koristi vključujejo izboljšanje varovanja in varnosti, industrijskih procesov, izdelkov in storitev, večjo zanesljivost in nižje operativne stroške. Čeprav so pametne aplikacije že prisotne v različnih industrijskih panogah, je splošen vtis, da gradbeno področje zaostaja, kar izkazuje pomanjkanje študij, ki bi vključevale integrirano uporabo interneta

stvari, umetne inteligence, tehnologij računalništva v oblaku in tehnologij veriženja blokov.

Razvoj pametnih aplikacij na opredeljenih problematičnih področjih (nadzor in sledljivost delovnih procesov gradnje, strojev in opreme, pravočasno obveščanje o morebitnih nesrečah pri delu, izboljšanje varnosti ljudi in premoženja na gradbišču) zahteva integracijo zapletenih fizičnih in programskih virov, od senzorjev in kamer do programske opreme za

dinamične narave gradbišča – vsak projekt je svojstven, po velikosti, načinu in dinamični gradnje, opremi in strojih, delavcih in ne nazadnje težavah, ki jih je treba rešiti med gradnjo. Poleg tega so nekatere zahteve končnega uporabnika po naravi lahko nasprotujoče – na primer, hitro delovanje aplikacije je lahko v nasprotju z zahtevo po nizkih obratovalnih stroških ali pa so lahko zahteve glede združitve podatkov v nasprotju z zahtevami glede zasebnosti podatkov.

Na žalost analitičnih platform velikih podatkov, ki jih pogosto uporabljata finančna in farmacevtska industrija, ni mogoče neposredno uporabiti na področju gradbeništva. Potreben bi bil dodaten cikel razvoja in integracije tehnologije, da bi omogočili tok za velike podatke, začevši z dinamično spreminjajočimi se pametnimi gradbenimi okolji.

Eden od načinov za reševanje različnih težav je uporaba sodobnih programskih meril za časovno kritične aplikacije v oblaku. Z njimi in s sledenjem gibanja DevOps (Ebert C., 2016) bo kmalu mogoče nemoteno integrirati naprave interneta stvari in lastne funkcije (na primer metode umetne inteligence) in umeščati pametne aplikacije med ponudnike storitev v oblaku in megle na način, ki obravnava kritične zahteve.

Nastajajoča vizija je, da bodo podatki, ki prihajajo iz polj senzorjev, vključno z videotočkovi, najprej obdelani in združeni v napravah računalništva v megli, ki so geografsko blizu dejanskemu gradbišču. Ta pristop bi obravnaval pomembne zahteve glede zanesljivosti in varnosti. Z uporabo računalništva v megli se bodo bistveno izboljšale mrežne meritve kakovosti storitve, kot so pasovna širina, latenca,

pretres in izguba paketov (Kochovski, 2018). Uporaba virtualizacije na vsebnikih bo omogočila tudi uporabo in upravljanje različnih algoritmov umetne inteligence in programske opreme bližje podatkovnim tokom, s čimer se bodo zmanjšale zahteve po velikem omrežnem prometu in obravnavi zahtev glede zasebnosti in varnosti podatkov, ki so potrebne za delovanje pametnih gradbenih okolij.

Pregled znanstvenih prispevkov je na eni strani razkril velik uporabni potencial za gradbeniško področje in na drugi zelo nizko rabo najnovejše tehnologije. Od integracije interneta stvari, umetne inteligence in tehnologij oblaka se še vedno pričakujejo velike koristi, vključno z visoko stopnjo zanesljivosti, zmogljivosti, razpoložljivosti, zanesljivosti, avtomatizacije, varnosti podatkov in zasebnosti, reševanja časovno pomembnih vidikov, izboljšane energetske učinkovitosti ter zmanjšanja operativnih stroškov.

### 3 • APLIKACIJSKI SCENARIJI

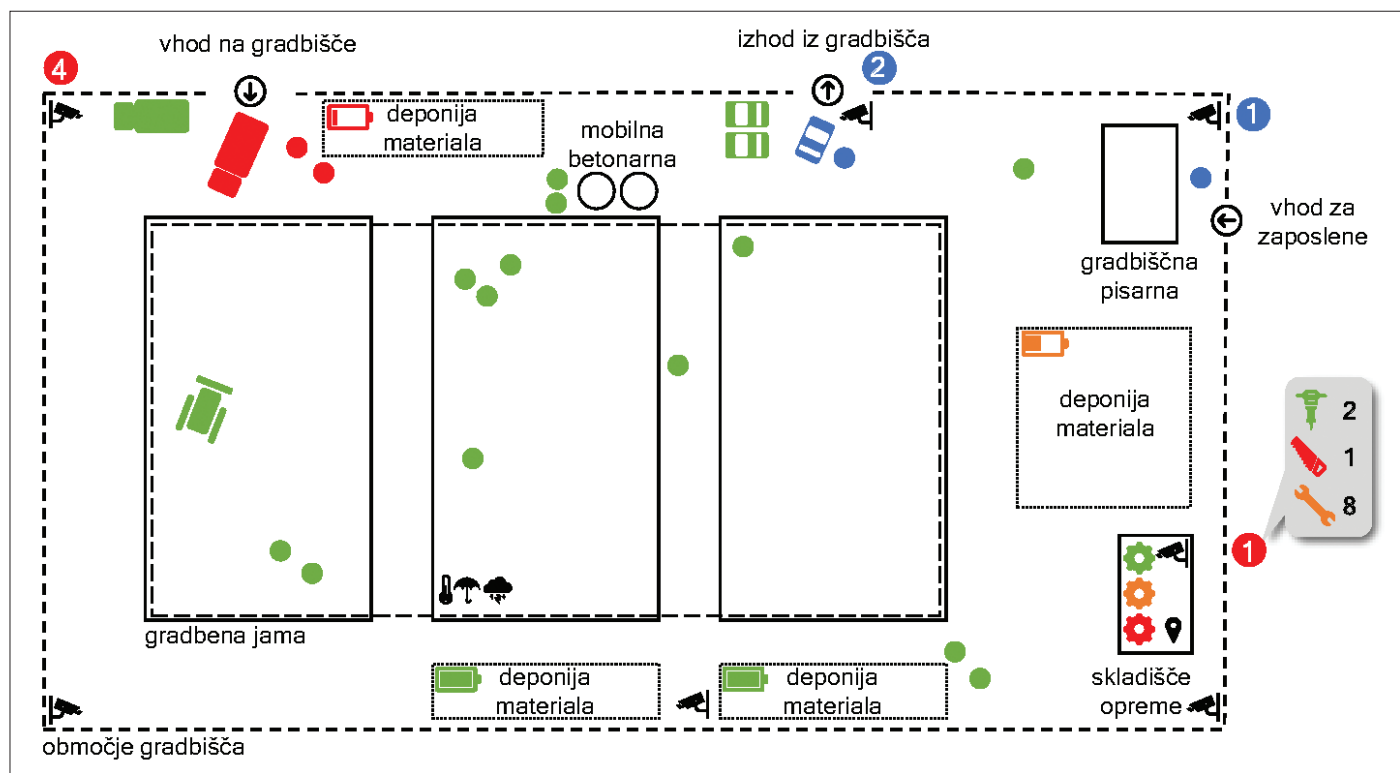
V nadaljevanju smo se ukvarjali z definicijo aplikacijskih scenarijev in smo tako ugotovili nekaj ciljev za preizkus novih tehnologij. Pri našem delu smo vključili scenarije za nadzor, spremljanje gradnje, varnost pri delu, zgodnje opozarjanje pred nesrečami in upravljanje

virov in sredstev, ki so predstavljeni v nadaljevanju.

Naši dodatni cilji pa so tudi uporabiti tehnologijo DECENTER pri načrtovanju pametnih aplikacij in izvedba vseh korakov tehnične izvedbe s kamerami, priklopljenimi na inter-

net. Cilj je tudi preizkusiti izbrane scenarije na konkretnem primeru gradbišča Šumi v Ljubljani, na sliki 1, kar je tudi predstavljeno v nadaljevanju članka.

V **scenariju 1 (prepoznavanje vozil)** je kamera nameščena v območju gradbišča, na drugo ali servisnem objektu na višini 3,0 m ob dovozni poti nasproti vhoda ter zajema sliko vhoda na gradbišče. V kadru so zajeti prizori gibljivih objektov, vozil in ljudi, ki se



Slika 1 • Konceptualna shema enega od možnih scenarijev na primeru gradbišča Šumi v Ljubljani.

pojavi na vhodu gradbišča. Zajeti podatki, video oziroma skupek slik, so analizirani s pomočjo orodij umetne inteligence z namenom prepoznave in identifikacije vozil, ki dostopajo na gradbišče. S slik prepoznavamo tip, barvo in registrsko številko vozila. Iz priučene baze podatkov opredelimo, ali je vozilo, ki se pojavi na vhodu, upravičeno do vstopa na gradbišče oz. dostopa na gradbišče vozilo, ki je vpisano v podatkovni bazi kot preverjen tip objekta. V primeru dostopa neznanega vozila se aktivira opozorilni signal.

V **scenariju 2 (prepoznavanje ljudi in uporabe varnostne opreme)** kamera zajema sliko delovišča na gradbišču. Zajeti podatki se, na enak način kot v scenariju 1, analizirajo z namenom identifikacije uporabe določene pred-

pisane varnostne opreme oseb, ki se gibajo na delovišču gradbišča. S slik prepoznavamo, ali se na gradbišču pojavi oseba in ali oseba nosi zaščitno čelado in varnostni telovnik. Iz priučene baze podatkov opredelimo, ali se oseba, ki se pojavi na delovišču, lahko giba na delovišču gradbišča ali ne. V primeru zaznave nepooblaščenega gibanja oseb in oseb brez predpisane varnostne opreme se aktivira opozorilni signal.

Vremenska postaja, nameščena na strehi gradbiščne pisarne ali na konstrukciji delovnega odra na delovišču v **scenariju 3 (detekcija škodljivih delovnih pogojev)**, z različnimi tipali spremlja vremenske delovne pogoje v časovnem intervalu 30 minut, tipalo gibanja pa prisotnost oseb. Zajeti podatki: temperatura,

vлага, zračni tok – veter, zračni pritisk, nivo hrupa in koncentracija CO2 skupaj s prepoznavo prisotnosti osebe (gradbiščnega delavca) so analizirani z namenom takojšnje prepoznave in predvidevanja človeku škodljivih in nevarnih delovnih pogojev.

V **scenariju 4 (prepoznavanje predmetov)** kamera, nameščena v skladišču opreme ali na deponiji gradbišča, zajema prizor prostora, namenjenega shranjevanju delovnega orodja, strojev ter gradiv, ki predstavljajo veliko mero tveganja odtujitve. Namen prepoznave je identifikiranje predmetov in njihove prisotnosti v časovnem odnosu ter aktiviranje opozorilnega signala v primeru manjkajočega predmeta po preteku določenega časovnega okvira oziroma po uporabi.

## 4 • PLATFORMA RAČUNALNIŠTVA V MEGLI DECENTER

Dandanes obstaja veliko platform, ki uporabljajo metodologijo DevOps (npr. DECENTER, SWITCH, fabric8). Vendar je platforma računalništva v megli DECENTER posebej razvita za podporo celotnega življenjskega cikla aplikacij umetne inteligence. Platforma računalništva v megli in posredovanje virov DECENTER združuje tehnologije interneta stvari, umetne inteligence, veriženja blokov in računalništva v oblaku z namenom lažjega ustvarjanja pametnih aplikacij, kjer se računalniški viri, ki zajemajo infrastrukture od oblaka do roba in vire interneta stvari, npr. senzorje, aktuatorje, lahko orkestrirajo v dinamično ustvarjenih in združenih okoljih.

Ključne novosti platforme so naslednje:

- omogoča orkestracijo mikrostoritev, ki vsebujejo metode umetne inteligence, v odvisnosti od kakovosti storitev na podlagi aplikacijskih zahtev;
- podpira regulacijo čezmejno posredovanih virov, ki temelji na tehnologiji veriženja blokov in pametnih pogodb;
- poenostavi vpeljavo inteligence v internet stvari, ki temelji na algoritmičnih globokih nevronske mreže za pridobivanje kontekstnih informacij iz podatkov interneta stvari;
- preferira uporabo hibridnih decentraliziranih modelov umetne inteligence, ki izkoriščajo in obravnavajo potrebe po lokaciji podatkov in časovno kritične vidike problema velepodatkov (ang. Big Data).

Platformo DECENTER sestavljajo trije glavni sloji: infrastrukturni, platformni in aplikacijski sloj. Infrastrukturni sloj sestavljajo računal-

niška in omrežna oprema, naprave interneta stvari in naprave za shranjevanje podatkov. Platformno plast sestavljajo logične komponente za odkrivanje, posredovanje in orkestracijo virov iz celotnega kontinuuma od oblaka do interneta stvari. Aplikacijski sloj se uporablja za sestavljanje aplikacij za izkoriščanje različnih metod in modelov umetne inteligence. V nadaljevanju so posamezni sloji podrobneje opisani.

### A. Infrastrukturni sloj

Nove aplikacije umetne inteligence so časovno kritične, zato je treba obravnavati njihove zahteve glede kakovosti storitev, npr. visoka in hitra odzivnost, velika pasovna širina in hitri izračuni. Za reševanje takšnih zahtev je bil infrastrukturni sloj platforme DECENTER zasnovan za orkestracijo mikrostoritev od oblaka do roba omrežja. Več računskih stopenj od oblaka do roba se večinoma razlikuje med lastnostmi, kot so računski zmogljivost, zmogljivost omrežja in geolokacija. Oblak je sestavljen iz podatkovnih centrov, ki ponujajo odlično računalniško moč in velike zmogljivosti za shranjevanje podatkov. Megla se dojema kot računalniški viri, ki obstajajo med oblakom in robom. Računalništvo na robu je visoko porazdeljeno računalniško okolje, sestavljeno iz naprav z majhno močjo, ki omogoča izvajanje preprostih računskih nalog v neposredni bližini fizičnih naprav, to je kamer in senzorjev.

Platforma DECENTER predvideva scenarije, kjer lahko ponudniki infrastrukture medsebojno komunicirajo in združujejo svoje vire za

zagotavljanje storitev uporabnikom. Vendar platforma DECENTER ne predstavlja le napredka na nivoju infrastrukture, temveč se osredotoča tudi na obstoječo strojno opremo za zagotavljanje računalniških zmogljivosti računalništva v megli.

### B. Platformni sloj

Platformni sloj je postavljen med plastjo infrastrukture in aplikacije in omogoča več funkcionalnosti: (1) nastavitve in upravljanje visoko porazdeljenih in heterogenih računalniških okolij, (2) sestavljanje aplikacij v oblaku iz vsebnih mikroservisov in definiranje zahtev kakovosti storitev, (3) namestitve in orkestracija aplikacij, (4) posredovanje in pogajanja virov, ki spadajo v različne administrativne domene.

Za doseganje potrebnih funkcionalnosti je platforma sestavljena iz dveh podslojev:

- Platforma računalništva v megli, ki je odgovorna za sestavljanje aplikacij, razvrščanje virov in orkestracijo od oblaka do roba. Aplikacija je specifična na podlagi standarda OASIS TOSCA (Binz T., 2013) in posredovana orkestratorju FogAtlas. Orkestrator upošteva trenutno stanje razpoložljive infrastrukture, sproži algoritme odločanja in izvede postopek orkestracije po sprejeti odločitvi.
- Platforma za posredovanje je mehanizem, ki omogoča izmenjavo računalniških virov od oblaka do roba. Zlasti platforma za posredovanje omogoča, da ponudniki infrastrukture registrirajo svoje vire na verigi blokov (ang. Blockchain) Ethereum, medtem ko lahko uporabniki izberejo vir, ki bo ustrezal zahtevam po kakovosti storitev njihove aplikacije. Posto-

pek registracije in izbire virov se izvede z izvajanjem pametnih pogodb na verigi blokov.

### C. Sloj aplikacij

Aplikacijski sloj vključuje dve vrsti entitet, ki ponujajo dopolnilne funkcije: aplikacije in aplikacijske storitve. Aplikacije, ki uporab-

ljajo metode in modele globokih nevronskih mrež, uporabljajo vire od oblaka do stvari (ang. Cloud-to-Things) za izvajanje natančno opredeljenih poslovnih nalog in jih oblikujejo razvijalci aplikacij. Po drugi strani aplikacijske storitve zagotavljajo nekatere splošne namene, ne pa aplikacijsko specifične funkcije, ki jih lahko uporabljajo

jo različne aplikacije. Na primer, uporaba metode ekstrakcije funkcij iz videotokov, npr. za odkrivanje delavcev, ki nosijo varnostno opremo, so na voljo kot aplikacijske storitve. Razvijalci aplikacij jih lahko uporabijo za izvajanje poslovne logike aplikacij, ne da bi morali za začetek izvajati njihove funkcionalnosti.

## 5 • NAČRT APLIKACIJE ZA PAMETNO IN VARNO GRADNJO

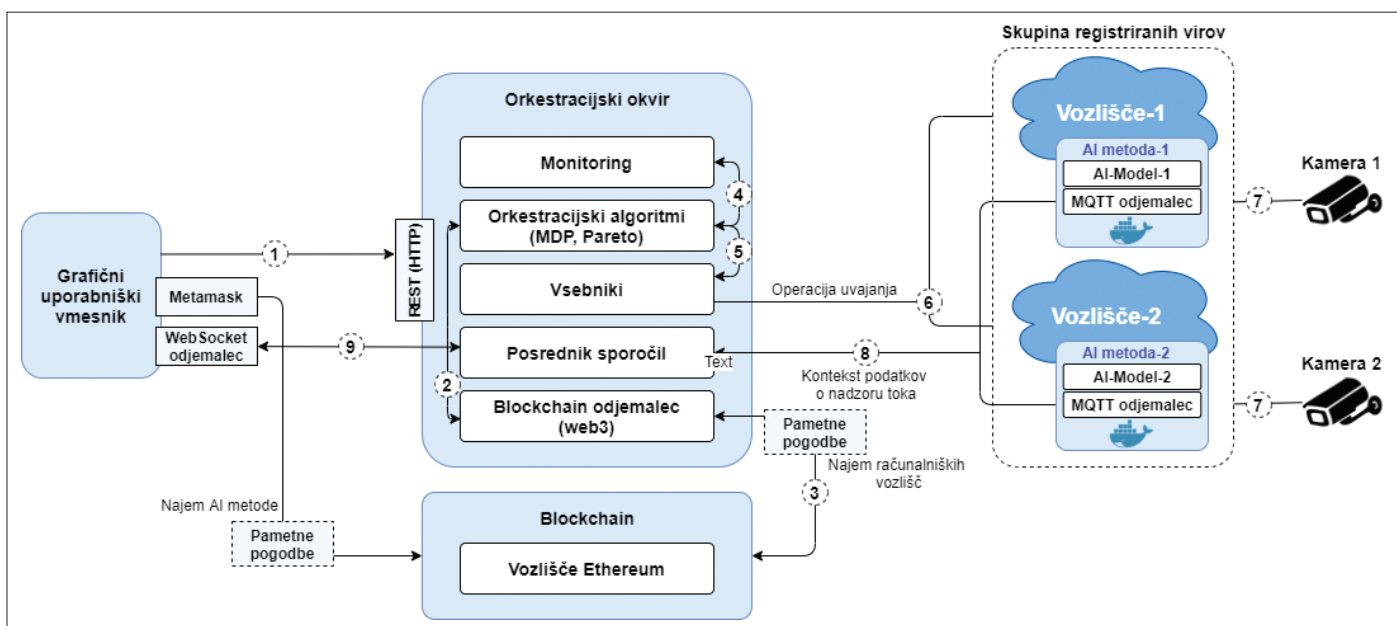
V tem delu predlagamo dvotirno zasnovano aplikacije za pametno in varno gradnjo, ki uporablja metode globokih nevronskih mrež za obdelavo podatkov videonadzora. Aplikacija, ki jo predlaga ta članek, ponuja dve glavni funkcionalnosti, ki sta: (1) registriranje modelov globokih nevronskih mrež v verigi blokov in (2) izvajanje avtomatizirane orkestracije aplikacij umetne inteligence z zaupanjem vrednih računalniških vozlišč. Sama platforma DECENTER omogoča začasni najem modelov umetne inteligence za določen čas njihove uporabe. Arhitektura predlagane aplikacije, ki ponuja potek dela obeh funkcij, je prikazana na sliki 2.

Prva funkcionalnost bo uporabnikom omogočala registracijo svojih storitev v verigi blokov. To bo omogočilo delovanje sistema samo z zaupanja vrednimi storitvami, kjer je mogoče slediti ponudnikom storitev ter transakcije med potrošniki in ponudniki mogoče izvajati pregledno. Za registracijo modela umetne nevron-

ske mreže na verigi blokov ponudnik storitev uporablja grafični uporabniški vmesnik, ki integrira denarnico Metamask. Ko ponudnik storitev vnese vse potrebne metapodatke o storitvi (npr. vrsto modela, ceno, lokacijo, dostopni URL in podobno), prek Metamask izvede pametno pogodbo. Ko je pametna pogodba uspešno izvedena, bo storitev registrirana na verigi blokov, kjer je status registracije mogoče kadarkoli preveriti.

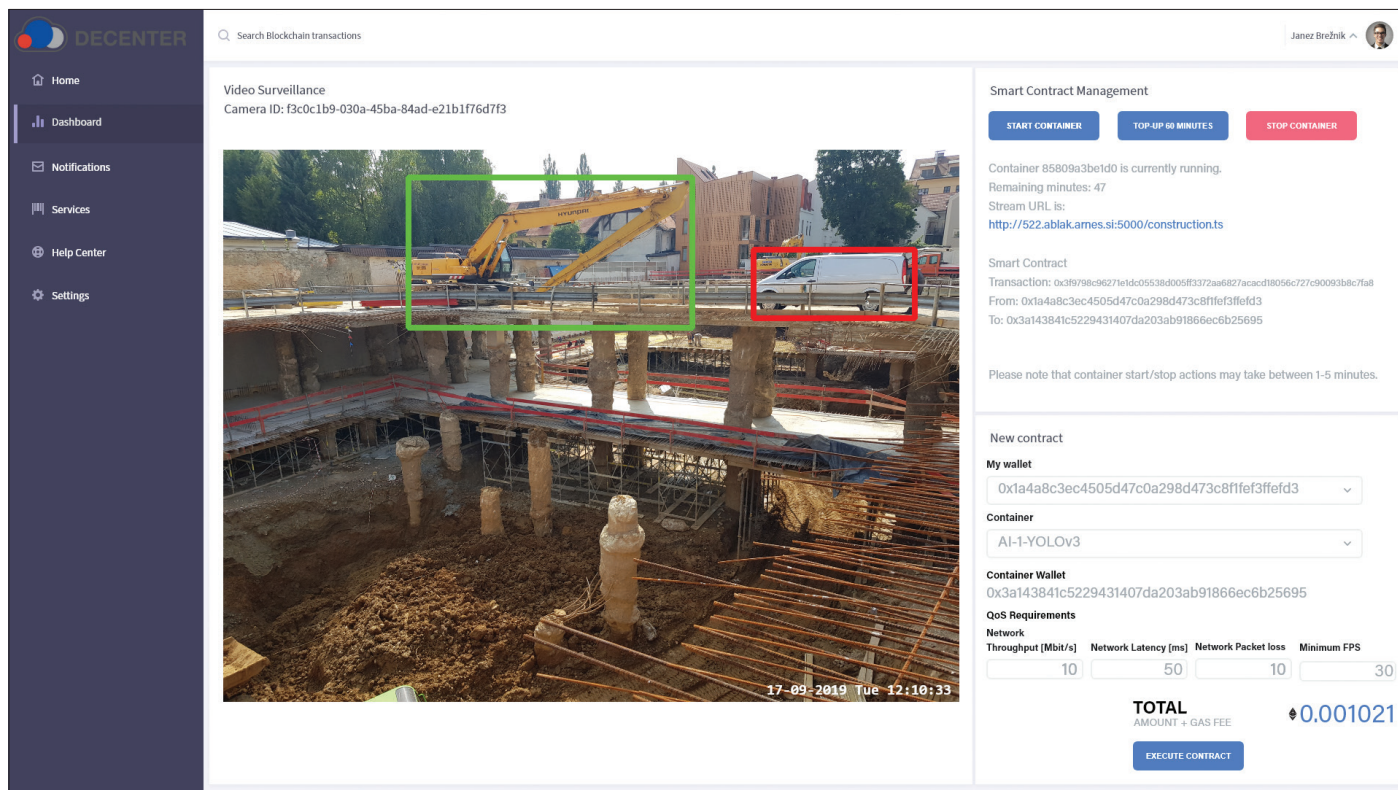
Druga funkcionalnost je nekoliko bolj zapletena in je sestavljena iz 9 zaporednih korakov. (1) Uporabnik storitve nastavi možnost kakovosti storitve, npr. prepustnost omrežja, zakasnitev omrežja, izguba paketov in minimalno število sličic na sekundo (ang. Frame Per Second, FPS) za možnost uvajanja, izbere model globoke nevronske mreže za najem in izbere svojo javno denarnico. Te informacije se posredujejo orkestratorju. (2) Algoritem za orkestracijo (Kochovski, 2019) prejme zahtevo in vzpostavi stik z odjemalcem verige blokov,

ki izvede pametno pogodbo in pridobi dostop do zahtevanega modela globoke nevronske mreže. (3) Če je pametna pogodba uspešno izvedena (Gec S., 2018), bo sprožila operacijo uvajanja, po kateri algoritem orkestracije pridobi nadzorne metrike iz nadzornega sistema (4) in navodilo za namestitve v obliki YAML-datoteke posreduje orkestratorju Kubernetes (5). Ko so komponente aplikacije razporejene na optimalnih vozliščih (6), začnejo sprejemati podatke iz videonadzornega toka (7). Podatki videonadzora se nato nenehno obdelujejo za odkrivanje predmetov in identifikacijo osebe. Če Tensorflow metoda globoke nevronske mreže (Abadi, 2016) na videoposnetku zazna kakšno kršitev, npr. zazna vozilo ali osebo na omejenih območjih ali identificira neznano osebo v prostorih gradbišča, (8) posreduje kontekstne podatke posredniku sporočil, na primer Apache Kafka (Thein, 2014), ki bo takoj posredoval obvestilo naročenemu uporabniku (9). Ko potrošnik storitve porabi predplačilo za dostop do modela globoke nevronske mreže, bo o njem obveščen, da bo plačal račun ali pa bo pametna pogodba storitev prekinila.



Slika 2 • Grafična upodobitev arhitekture aplikacije.





Slika 3 • Grafični uporabniški vmesnik aplikacije DECENTER.

Grafični uporabniški vmesnik aplikacije sledi sodobnim smernicam tovrstnih vmesnikov, da bi omogočal uporabniku čim bolj intuitivno in pregledno uporabniško izkušnjo z uporabo enostavnih grafičnih elementov, razporejenih v vertikalno ortogonalno mrežo oken. Na sliki 3 je prikazan osnutek vmesnika v angleškem jeziku, ki je v osnovi razdeljen na tri vertikalne pasove: navigacijski pas, osrednji grafični pas ter pas z podrobnejšimi numeričnimi in besedilnimi informacijami, slednja na vrhu povezuje iskalna pasica z identifikacijsko sliko in spustnim menijem za preklap med uporabniki. Navigacijski pas z logotipom na levi strani uporabniku omogoča pregledno opravilno navigacijo med vsebinami aplikacije, ki so opremljene z

značilnimi piktogrami: na vrhu je povezava do začetne strani aplikacije (Home), sledi nadzorna plošča (Dashboard), ki predstavlja glavni opravilni vir, nato povezava do obvestil uporabniku (Notifications), povezava do različnih storitev (Services), povezava do centra za pomoč uporabnikom (Help Center) in na koncu nastavitve (Settings). Slika 3 prikazuje primer videza nadzorne plošče, kjer je v osrednjem delu slika iz videovira z gradbišča, opremljena z značilnimi mejnimi pravokotniki (bounding boxes), ki jasno in kontrastno označujejo zaznane objekte ter njihov avtorizacijski status. Z grafične opreme slike je mogoče takoj ugotoviti, da sta z analizo videa prepoznana dva objekta, v zelenem okvirju avtoriziran, v rdečem

pa objekt, ki ne ustreza postavljenim zahtevam. Nad sliko je še referenčna številka kamere oz. videovira, v desnem kotu slike pa še osnovni časovni podatki zajete slike. V desnem pasu so vertikalno, po sklopih, razdeljeni različni besedilni in numerični podatki pametne pogodbe (referenčna številka pogodbe, naslov uporabnika in izvajalca storitve), s katero omogočimo izvršitev aplikacijskih funkcionalnosti, skupaj z gumbi upravljanja vklopa določenih časovno plačljivih storitev. Spodnji del levega pasu prikazuje razpoložljiva sredstva uporabnika v odnosu s časom, ki se prikazujejo v okencih metra ali odštevalnika prenesenih podatkov, mogoče pa je spremljati tudi hitrost prenosa, pretočnost, izgube in število sličic na minuto.

## 6 • SKLEP

Razvoj pametnih aplikacij na opredeljenih problematičnih področjih zahteva integracijo kompleksnih računskih in programskih virov, od senzorjev in kamer do programske opreme za obdelavo časovnih serij in videotokov, metod umetne inteligence za pridobivanje funkcij, zlivanje podatkov in vizualizacijsko programsko opremo. Poleg tega so potrebna posebna orodja za upravljanje nefunkcio-

nalnih lastnosti aplikacij, vključno z njihovimi zanesljivostjo, varnostjo in zasebnostjo.

Številne pametne gradbene aplikacije so časovno kritične in jih je treba oblikovati ob upoštevanju te zahteve (glej sliko 2). V skladu s tem bo vsako novo pametno gradbišče, ki vključuje potencialno več sto pametnih aplikacij, treba načrtovati vnaprej. Oblikovanje časovno kritičnih pametnih aplikacij je še

posebej zahtevno zaradi dinamične narave konstrukcije – vsak projekt ima svoje edinstvene cilje, velikost, opremo, delavce, podatke in težave, ki jih je treba rešiti.

Eden od načinov za reševanje različnih težav je uporaba sodobnih programskih okolij za časovno kritičnih aplikacij v oblaku. Z njimi in s sledenjem kulture DevOps bo kmalu mogoče nemoteno integrirati IoT-naprave in lastne funkcije (na primer metode umetne inteligence) in umeščati pametne aplikacije med ponudnike oblakov in megle na način, ki obravnava kritične zahteve.

Nastajajoča vizija je, da bodo podatki, ki prihajajo iz senzorjev, vključno z videotokovi, najprej obdelani v napravah na robu omrežja, ki so geografsko blizu dejanskemu gradbišču. Ta pristop bi obravnaval pomembne zahteve glede zanesljivosti, varnosti in zasebnosti. Z uporabo pristopa računalništva v megli se bodo bistveno izboljšale meritve kakovosti storitve, ki temeljijo na omrežju, kot so pasovna širina, zamuda, trepetanje in izguba paketov (Kochovski, 2018). Uporaba virtualizacije na vsebnikih bo omogočila tudi uporabo

in upravljanje različnih algoritmov umetne inteligence in programske opreme bližje podatkovnim tokom, s čimer se bo zmanjšala potreba po velikem prometu po omrežju in obravnavali zahteve glede zasebnosti in varnosti podatkov, ki so potrebne za delovanje pametnih gradbenih okolij.

Naše delo na eni strani razkriva velik uporabni potencial na področju gradbeništva in na drugi zelo nizek izkoristek najnovejših tehnologij. Od integracije interneta stvari, umetne inteligence in tehnologij računalni-

štva v oblaku se še vedno pričakujejo velike koristi, vključno z visoko stopnjo zanesljivosti, zmogljivosti, razpoložljivosti, zanesljivosti, avtomatizacije, varnosti podatkov in zasebnosti, reševanja časovno pomembnih vidikov, izboljšane energetske učinkovitosti in zmanjševanje operativnih stroškov. Prihodnje delo avtorjev bo osredotočeno na zasnovano in izvedbo enotnega pametnega gradbišča, ki bo obravnavalo več opredeljenih problematičnih področij.

## 7 • ZAHVALA

Ta projekt je financiran od raziskovalno-inovacijskega programa Obzorje 2020 Evropske unije na podlagi pogodbe št. 815141 (DECENTER: Decentralised technologies for orchestrated Cloud-to-Edge intelligence). Avtorji se zahvaljujemo podjetju CGP Novo mesto za dostop do realnega gradbišča Šumi pri obravnavi primerov uporabe aplikacij za pametno in varno gradnjo.

## 8 • LITERATURA

Abadi, M., Barham, P., Chen, J., Chen, Z., Davis, A., Dean, J., Devin, M., Ghemawat, S., Irving, G., Isard, M., Kudlur, M., Levenberg, J., Monga, R., Moore, S., Murray, D. G., Steiner, B., Tucker, P., Vasudevan, V., Warden, P., Wicke, M., Yu, Y., Zheng, X., Tensorflow: A system for large-scale machine learning, 12th USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation, pp. 265-283, 2016.

Bonomi, F., Milioto, R., Zhu, J., Addepalli, S., Fog computing and its role in the internet of things, Proceedings of the first edition of the MCC workshop on Mobile cloud computing, ACM, pp. 13–16, 2012.

Binz, T., Breitenbücher, U., Haupt, F., Kopp, O., Leymann, F., Nowak, A., Wagner, S., OpenTOSCA—a runtime for TOSCA-based cloud applications, International Conference on Service-Oriented Computing, Springer, Berlin, Heidelberg, 2013.

Ebert, C., Gallardo, G., Hernantes, J., Serrano, N., DevOps, IEEE Software Volume: 33, Issue: 3, May-June 2016.

Gec, S., Lavbič, D., Bajec, M., Stankovski, V., Smart contracts for container based video conferencing services: Architecture and implementation, Springer, Cham, pp. 219-233, 2018.

Kochovski, P., Drobintsev, P. D., Stankovski, V., Formal Quality of Service assurances, ranking and verification of cloud deployment options with a probabilistic model checking method Information and Software Technology, vol. 109, pp.14-25, 2019.

Kochovski, P., Stankovski, V., Supporting smart construction with dependable edge computing infrastructures and applications, Automation in Construction, vol. 85, pp. 182-192, 2018.

RS MDDSZ IRSD, Poročilo o delu inšpektorata rs za delo za leto 2018; spletna objava: <https://zsssaupnikvzd.us18.list-manage.com/track/click?u=9b99f82b0ebbeb44a108af8a2&id=2f96e129eb&e=c72a99aec2>, 2019.

Štefanič, M., Stankovski, V., A review of technologies and applications for smart construction, Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Civil Engineering, vol. 172 Issue 2, pp. 83-87, 2019.

Thein, K. M. M., Apache kafka: Next generation distributed messaging system, International Journal of Scientific Engineering and Technology Research, vol. 3 Issue 47, pp. 9478-9483, 2014.

# SPLETNI SEMINAR GBC SLOVENIJA

Slovensko združenje za trajnostno gradnjo GBC Slovenija je v juniju zaradi velikega zanimanja na temo energetske učinkovitih ovojev stavb organiziralo dva spletna seminarja z naslovom *Projektiranje fasad*, strokovnega izpopolnjevanja pa se je 19. in 23. junija skupaj udeležilo več kot 130 slovenskih arhitektov in projektantov. Izobraževanje, ki so ga izvajali priznani strokovnjaki z dolgoletnimi izkušnjami, je bilo namenjeno projektiranju novih in obnovi dotrajanih fasad. Udeleženci so s predstavitvijo mnogih koristnih informacij in rešitev, ki jim lahko pri snovanju ali sanaciji fasadnih ovojev pomembno olajšajo delo, pridobili vrsto strokovnih in tehničnih informacij na temo diagnostike, popisov del ter ustreznih analiz, ki morajo biti izvedeni še pred pripravo projektne dokumentacije. Predavanja, ki so vsebovala tudi določila spremljajoče zakonodaje ter opise pogojev za pridobitev subvencij, so prispevali družba JUB, Knauf Insulation in slovenski okoljski Eko sklad.

»S takimi izobraževanji in usposabljanji deležnikom nakazujemo pravo pot do trajnostnih rešitev v gradbeništvu ter se tako skupaj z njimi tudi odgovorno vključujemo v krožno gospodarstvo,« je udeležence uvodoma nagovoril dr. Iztok Kamenski, predsednik UO GBC Slovenija. »Seminar smo pripravili z namenom, da bi se pri novih ali pri obnovi dotrajanih fasad pojavljalo čim manj napak. Naložbe v fasadne ovoje so že tako veliko finančno breme, zato si zaradi nedoslednih izvedb in slabega nadzora investitorji ne želijo še dodatnih stroškov. V gradbeništvu morajo biti projektanti, nadzorniki, izvajalci in proizvajalci gradbenih materialov in izdelkov ves čas povezani, za uspešno izvedbo pa je nujen projektni pristop, ki združuje raznolika znanja in usklajevanja vpletenih strokovnjakov ter izkušnje izvajalcev,« je poudaril predsednik združenja Kamenski.

Kamenski kot JUB-ov strokovnjak za fasadne sisteme opozarja, da je še pred



projektiranjem novih ali za sanacijo poškodovanih in degradiranih fasadnih ovojev treba pridobiti vse podatke o objektu – od celovitih načrtov do tehničnih skic posameznih detajlov. Z ogledom objekta je mogoče oceniti, koliko projektnih faz bo

potrebni za izvedbo sanacije fasadnega ovoja ali obnovo posameznih fasadnih odprtin, pri tem pa dosledno upoštevati vse aktualne tehnične in požarne smernice in gradbeno zakonodajo. Za pripravo analize je treba ugotoviti, kje na objektu





so pogoste tudi pri zaprtih in odprtih balkonih, kjer pogosto prihaja do poškodb v materialih, do nastanka toplotnih mostov, zamakanja na fugah in prebojih ter težav z vdorom vode zaradi napak pri vgradnji ograj, neustrezno vpetih v fasado. Arhitektom, projektantom, izvajalcem, nadzornikom in ponudnikom materialov Kovač priporoča, naj pred izdelavo projekta pozornost posvetijo natančni analizi objekta – fazi diagnosticiranja za ugotovitev napak ter fazi podrobne izdelave popisov za izvedbo del, ki je z natančno oceno finančne strukture naložbe glavno vodilo investitorjem.

Domen Ivanšek iz družbe Knauf Insulation je udeležencem predstavil veljavno zakonodajo na področju gradnje ter

se pojavljajo težave s toplotnimi mostovi, kakšna je obstoječa požarna varnost objekta, kako je z dotrajanostjo oken, morebitnim zamakanjem strehe, hidroizolacijo balkonov in izvedbo drugih vgrajenih detajlov, kot so na primer senčila. Z diagnostiko objekta se torej ugotavlja, ali je bil fasadni ovoj tehnično ustrezno izveden ali ne. Na podlagi izračunov in testov poteka analiza, kakšen sistem sidranja zahteva posamezna kontaktna fasada. Poleg naštetega se na objektu preverja oprijem ter predvidi mesta, kjer lahko nastanejo poškodbe oziroma razpoke fasadnega ovoja, preverjajo pa se tudi pomanjkljivosti, ki povzročajo toplotne izgube. Opravljajo se še meritve vlage v zidni konstrukciji ter preverjanje prisotnosti plesni, na degradiranih betonskih površinah pa se prav tako ugotavljajo vzroki za nastale napake. Strokovnjak za JUBIZOL fasade Aleš Kovač je pripravil obsežno analizo na področju izvedb fasadnih ovojev ter se posvetil zlasti neustreznim rešitvam, kritičnim točkam in izvedbenim pomanjkljivostim, ki jih zadnjih pet let zaznava na slovenskem trgu. Opozoril je na težave zaradi zamakanja streh, neustreznega tesnjenja ter pereče kapilarne vlage v podzidkih. Toplotni mostovi in nabiranje kondenza na objektih so pogosto posledica slabe izvedbe dilatacijskih stikov pri okenskih policah, napuščnih, frčadah in pri vgradnji fasadnih senčil. Težave



glavne tehnične smernice za pravilno izvedbo toplotnoizolacijskih fasadnih sistemov. Te se nanašajo na požarno varnost v stavbah, učinkovito rabo energije ter zaščito pred hrupom. Opozoril je na pravilno izbiro materialov, s katero je mogoče bistveno vplivati na stanje varnosti objektov različnih višin, ter predstavil aktualne smernice in predpise za različne vrste fasad. Za ničenergijske stavbe je omenil določila energetskega zakona (EZ-1), ki predvideva zaostrovanje pogojev pri toplotni izolativnosti materialov ter znižuje dovoljeno potrebno toploto za njihovo ogrevanje. Slovenija naj bi do leta 2030 prenovila kar 26 milijonov m<sup>2</sup> stavbnih površin, kar bi bilo mogoče doseči prav s pomočjo subvencij Eko sklada. Opozoril

je na novo tehnično smernico GIZ PFSTI, gospodarskega interesnega združenja proizvajalcev fasadnih sistemov in toplotnih izolacij, ki bo že v kratkem prinesla nova pravila in zvišanje standardov pri vgradnji fasadnih sistemov, s čimer bi ob manjših potrebah po vzdrževanju na dolgi rok izboljšali varnost in trajnost fasade ter stavbe v celoti.

Maja Vrezovnik iz Eko sklada se je osredotočila na pogoje in standarde, ki jih skladno z veljavnimi pravilniki in zakonodajo za pridobitev subvencije določajo v javnem okoljskem skladu. Spodbude Eko sklada so v obliki javnih pozivov odprte tako za občane, javna podjetja, NVO-je, občine in društva, nanašajo pa se na toplotne izolacije fasad, streh

in kleti, optimizacijo sistema ogrevanja in vgradnjo prezračevanja z vračanjem toplote odpadnega zraka. Vsa projektna dokumentacija za izvedbo gradnje (PZI) mora biti v skladu z veljavnimi pravilniki, trenutno veljavno zakonodajo in s pravili stroke, pri čemer mora biti pri izvedbi zagotovljen nadzor, kot ga določa Gradbeni zakon in nove tehnične smernice za požarno varnost v stavbah, ki so v veljavi od 1. 7. 2019. Vloga, ki jo odda investitor s podpisom odgovornega vodje projekta, mora biti oddana pred zaključkom del za izvedbo naložbe, priložiti pa ji je treba tudi vrsto dokazil, od računov izvajalcev in podizvajalcev do fotografij, ki so bile izdelane med gradnjo in ob zaključku sanacije fasadnega ovoja.

**Miša Hrovat**

Foto: arhiv GBC, JUB in Knauf Insulation



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

**ZADNJI PRIPRAVLJALNI SEMINAR IN IZPITNI ROK ZA STROKOVNE IZPITE ZA GRADBENO STROKO V LETU 2020**

SEMINAR	IZPIT
5. - 7. 10. 2020	24. in 25. 11. 2020 (po potrebi še 26.)

**A. PRIPRAVLJALNI SEMINARJI:**

Seminarje organizira **Zveza društev gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije (ZDGITS), Karlovška cesta 3, 1000 Ljubljana;**

Telefon: (01) 52-40-200; Fax: (01) 52-40-199;

e-naslov: gradb.zveza@siol.net; gradbeni.vestnik@siol.net.

**Uradne ure:**

od ponedeljka do četrтка od 09.00 do 14.00 ure; v petek ni uradnih ur za stranke.

Pripravljalni seminar bo za:

1. **Pooblaščen inženirje gradbene stroke** (to je za kandidate, ki imajo končano najmanj drugo bolonjsko stopnjo gradbeništva, oziroma univerzitetni diplomirani inženirji gradbeništva, ter za kandidate, ki izpolnjujejo pogoje po 58. členu Zakona o arhitekturni in inženirski dejavnosti)
2. **Vodje del za področje gradbene stroke** (to je za vse kandidate, ki izpolnjujejo pogoje izobrazbe iz gradbene stroke za izvajalce po 4. točki prve in druge alineje 14. člena Gradbenega zakona)

Predavanja bodo iz naslednjih predmetov izpitnega programa:

1. **Predpisi s področja graditve objektov, urejanja prostora, arhitekturne in inženirske dejavnosti, zborničnega sistema ter osnov varstva okolja in splošnega upravnega postopka**
2. **Investicijski procesi in vodenje projektov**
3. **Varstvo zdravja in življenja ljudi ter varstvo okolja pri graditvi objektov**
4. **Področni predpisi in standardizacija s področja graditve objektov**

**Cena** za udeležbo na seminarju in za literaturo znaša 623,22 EUR. Kandidati lahko poslušajo tudi zgolj posamezna predavanja v okviru rednih seminarjev, cena za obisk posameznega predavanja je 89,10 EUR. V cenah je vključen DDV.

**Kotizacijo za seminar je treba nakazati ob prijavi** na poslovni račun ZDGITS: **SI56 0201 7001 5398 955.**

Prijavo je treba posredovati organizatorju (ZDGITS) na e-naslov gradb.zveza@siol.net najkasneje **7 dni pred začetkom** seminarja. Prijavni obrazec je objavljen na spletni strani ZDGITS (<http://www.zveza-digits.si>).

Izvedba seminarja je odvisna od števila prijav (najmanj 20).

V primeru ponovne prepovedi zbiranja večjega števila ljudi na dogodkih v zaprtih javnih prostorih z namenom omejitve širjenja virusa covid-19, bo seminar izveden preko spleta.

**B. STROKOVNI IZPITI**

potekajo pri **Inženirski zbornici Slovenije (IZS), Jarška 10-B, 1000 Ljubljana.** Informacije o strokovnih izpiti in izpitnih programih je mogoče dobiti na spletni strani IZS ([www.izs.si](http://www.izs.si)), po telefonu (01) 547-33-19 (uradne ure: ponedeljek, sredi, četrtek, petek od 10.00 do 12.00 ure; v torek od 14.00 do 16.00 ure) ali osebno na sedežu IZS (uradne ure: ponedeljek, sredi, četrtek, petek od 08.00 do 12.00 ure; v torek od 12.00 do 16.00 ure).

# NOVI DIPLOMANTI

## UNIVERZA V LJUBLJANI, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO IN GEODEZIJO

### I. STOPNJA – VISOKOŠOLSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM GRADBENIŠTVO

**Aleš Križanič**, Analiza in korekcija terminskega plana ter njegovo posodabljanje, mentor doc. dr. Aleksander Srdić; <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=117040>

### II. STOPNJA - MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM GRADBENIŠTVO

**Enej Truden**, Pristop BIM za železniško infrastrukturo s primerom projekta odseka Brezovica–Presejre, mentor doc. dr. Tomo Cerovšek, somentorica asist. dr. Darja Šemrov; <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=117167>

**Urban Bračko**, Mestna prometna infrastruktura v dobi avtonomnih vozil, mentor doc. dr. Peter Lipar; <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=117042>

**Matej Lenarčič**, Primerjava potresne odpornosti armiranobetonske stavbe projektirane po obstoječi in novi različici standarda Evrokod 8, mentor prof. dr. Matjaž Dolšek, somentor asist. dr. Anže Babič; <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=116854>

**Andraž Starc**, Vodenje in uporaba tehnologij BIM na primeru energetskega objekta, mentor doc. dr. Tomo Cerovšek, somentor dr. Franc Sinur; <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=117166>

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

### I. STOPNJA – VISOKOŠOLSKI STROKOVNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

**Tomo Rantaša**, Analiza vplivov in primerjava matematičnih modelov na primeru aktivne hiše Jelovica, mentorica doc. dr. Erika Kozem Šilih, somentor dr. Boštjan Ber; <https://dk.um.si/lzpisGradiva.php?id=75988&lang=slv>

**Klavdija Ramšak**, Razvojni potencial umeščanja malih vetrnih elektrarn v urbanem okolju, mentor izr. prof. dr. Peter Šenk, somentorica viš. pred. mag. Bernardka Jurič; <https://dk.um.si/lzpisGradiva.php?id=76543&lang=slv>

### II. STOPNJA – MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM GRADBENIŠTVA

**Lucia Boršič**, Postopki načrtovanja mikro tunelov, mentor doc. dr. Primož Jelušič, somentor izr. prof. dr. Bojan Žlender; <https://dk.um.si/lzpisGradiva.php?id=76208&lang=slv>

**Mitja Črnec**, Odsevnost prometnih znakov na javnih cestah v občini Pesnica, mentor izr. prof. dr. Marko Renčelj; <https://dk.um.si/lzpisGradiva.php?id=76510&lang=slv>

**Matjaž Leskovar**, Ureditev hudournika Blažovnica z vidika poplavne varnosti naselja Limbuš, mentorica doc. dr. Janja Kramer Stajnik, somentor Rok Ferme; <https://dk.um.si/lzpisGradiva.php?id=76564&lang=slv>

**Martin Štrumbelj**, Parametrična analiza voziščne konstrukcije z metodo končnih elementov, mentor izr. prof. dr. Bojan Žlender, somentor doc. dr. Primož Jelušič; <https://dk.um.si/lzpisGradiva.php?id=75979&lang=slv>

## UNIVERZA V MARIBORU, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO, PROMETNO INŽENIRSTVO IN ARHITEKTURO – EKONOMSKO POSLOVNA FAKULTETA

### INTERDISCIPLINARNI ŠTUDIJSKI PROGRAM GOSPODARSKEGA INŽENIRSTVA

#### I. STOPNJA – UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI PROGRAM – SMER GRADBENIŠTVO

Študij je z diplomskim izpitom zaključila:  
**Saša Sobočan**

#### II. STOPNJA – MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM – SMER GRADBENIŠTVO

**Monika Cestnik**, Primerjava toplotnih izgub in okoljske deklaracije proizvoda obstoječega montažnega objekta in objekta zasnovanega iz konopljinega betona, mentorja doc. dr. Anita Prapotnik Brdnik - FGPA in izr. prof. dr. Matjaž Denac – EPF; <https://dk.um.si/lzpisGradiva.php?id=76540>

Rubriko ureja • Eva Okorn, [gradb.zveza@siol.net](mailto:gradb.zveza@siol.net)

# KOLEDAR PRIREDITEV

**18.-20.10.2020**

**ICSECT'20 - 5th International conference on Structural Engineering and Concrete Technology**

Lizbona, Portugalska  
<https://icsect.com/>

**12.-14.11.2020**

**ICCSTE'20 - 5th International Conference on Civil, Structural and Transportation Engineering**

Niagarski slapovi, Kanada  
<https://iccste.com/>

**19.-20.11.2020**

**CRRB — 22nd International Conference on Rehabilitation and Reconstruction of Buildings**

Brno, Češka  
<http://crrb.wta.cz>

**18.-20.1.2021**

**NGM2021 — 18th NGM Nordic Geotechnical Meeting**

Helsinki, Finska  
[www.ril.fi/en/events/ngm-2020.html](http://www.ril.fi/en/events/ngm-2020.html)

**6.-8.4.2021**

**BMCT Dubai 2021 - International Conference and Exhibition on Building Materials and Construction Technologies**

Dubaj, Združeni arabski Emirati  
<https://bmctdubai.org/>

**20.-22.4.2021**

**"Structural Faults + Repair-2020" & "European Bridge Conference-2020"**

Edinburg, Škotska  
[www.structuralfaultsandrepair.com/](http://www.structuralfaultsandrepair.com/)

**7.-9.6.2021**

**Mediterranean Symposium on Landslides**

Neapelj, Italija  
<https://medsymplandslides.wixsite.com/msl2021>

**17.-19.6.2021**

**EGRWSE-2020 — 3rd International Conference on Environmental Geotechnology, Recycled Waste Materials and Sustainable Engineering**

Izmir, Turčija  
<https://egrwse2021.com/>

**21.-25.6.2021**

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

Šanghaj, Kitajska  
[www.icossar2021.org/](http://www.icossar2021.org/)

**27.-30.6.2021**

**ICSGE'21 — 1st International Conference on Sustainability in Geotechnical Engineering – Geodiversity & Resilience**

Lizbona, Portugalska  
<http://icsge.lnec.pt/>

**4.-7.7.2021**

**11th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar**

Valletta, Malta  
[www.iwagpr2021.eu/](http://www.iwagpr2021.eu/)

**5.-8.7.2021**

**DFI Deep Mixing Conference 2021**

Gdansk, Poljska  
[www.dfi.org/dfieventlp.asp?13330](http://www.dfi.org/dfieventlp.asp?13330)

**2.-6.11.2021**

**5th World Landslide Forum**

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

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