

# 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, november 2019, letnik 68, str. 257-284

Izdajatelj:

**Zveza društev gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije (ZDGITS)**, Karlovska 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: **Gorazd Humar**  
**Ana Brunčič**  
**dr. Branko Zadnik**  
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:

**500 tiskanih izvodov**  
**3000 naročnikov elektronske verzije**

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

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

Letno izide 12 števil. Letna naročnina za individualne naročnike znaša 23,16 EUR; za študente in upokojenca 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. V sporočilu mora avtor napisati, kakšna je po njegovem mnenju vsebina članka (pretežno znanstvena, pretežno strokovna) oziroma za katero rubriko je po njegovem mnenju prispevek primeren.

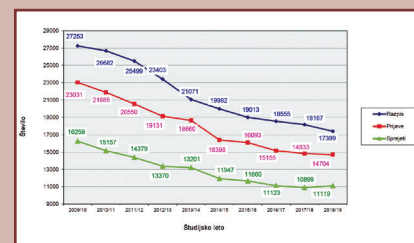
Uredništvo

# Vsebina • Contents

## Članki • Papers

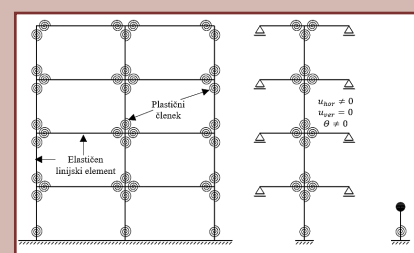
stran **258**

prof. dr. Matjaž Mikoš, univ. dipl. inž. grad.  
**ODPRTE DILEME NOVE GRADBENE ZAKONDAJE  
V SLOVENIJI**  
OPEN DILEMMAS OF THE NEW CONSTRUCTION  
LEGISLATION IN SLOVENIA



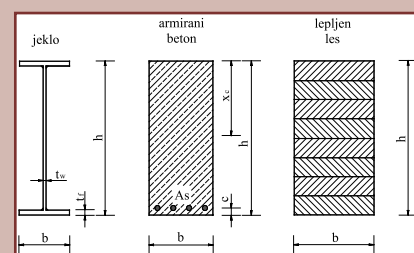
stran **268**

asist. Aleš Jamšek, mag. inž. grad.  
prof. dr. Matjaž Dolšek, univ. dipl. inž. grad.  
**POTRESNA ANALIZA ARMIRANOBETONSKIH STAVB S  
POENOSTAVLJENIMI NELINEARNIMI MODELI**  
SEISMIC ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE  
BUILDINGS WITH SIMPLIFIED NONLINEAR MODELS



stran **279**

doc. dr. Tomaž Žula, univ. dipl. inž. grad.  
prof. dr. Stojan Kravanja, univ. dipl. inž. grad.  
izr. prof. dr. Stane Božičnik, univ. dipl. ekon.  
**OPTIMIZACIJA TRAJNOSTNEGA DOBIČKA,  
USTVARJENEGA PRI PROIZVODNJI NOSILCEV**  
OPTIMIZATION OF THE SUSTAINABILITY PROFIT  
GENERATED BY THE PRODUCTION OF BEAMS



## Novi diplomanti

Eva Okorn

## Koledar prireditev

Eva Okorn

Slika na naslovnici: Gradnja galerije Jelični vrh, foto Gašper Polak

# ODPRTE DILEME NOVE GRADBENE ZAKONODAJE V SLOVENIJI

## OPEN DILEMMAS OF THE NEW CONSTRUCTION LEGISLATION IN SLOVENIA

prof. dr. Matjaž Mikoš, univ. dipl. inž. grad.

matjaz.mikos@fgg.uni-lj.si

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

Strokovni članek

UDK 2-274.2:69(497.4)

**Povzetek** | Prenovljena gradbena zakonodaja, sprejeta leta 2017, je bila v strokovnih krogih deležna številnih kritik, a tudi podpore, odvisno, katera interesna skupina jo je presojala. V prispevku so navedene nekatere odprte dileme nove gradbene zakonodaje, ki zahtevajo argumentirano razpravo, umaknjeno iz medijev in ob sodelovanju različnih udeležencev, ki jim gradbena zakonodaja določa pogoje dela. Med zainteresirane strokovnjake se gotovo uvrščajo gradbeniki, saj je Gradbeni zakon osrednji del prenovljene gradbene zakonodaje. V prispevku so obravnavane izbrane dileme, čeprav se jih je v razburkani strokovni razpravi po uveljavitvi nove gradbene zakonodaje pojavilo kar nekaj, odvisno, v kateri vlogi so se videli razpravljavci: investitorja, projektanta, nadzornika, izvajalca, revidenta, izobraževalca ... V korist vseh strok, ki sodelujejo v kompleksnem prepletu graditve objektov in slovenske družbe v celoti so nujni popravki veljavne gradbene zakonodaje, ki ne bodo le kozmetični, saj bodo morali odpraviti nepotrebne anomalije. Ključne besede: avtorske pravice, Gradbeni zakon, graditev, inženirska zbornica, vodenje projektov

**Summary** | The revised construction legislation in Slovenia adopted in 2017 has received a great deal of criticism, but also support, in expert circles, depending on the stakeholder considering it. The paper outlines some of the open dilemmas of the new construction legislation in Slovenia that require an argumentative discussion, withdrawn from the media and with the participation of various actors, to whom the Construction Act defines working conditions. Among interested professionals there are certainly civil engineers, as the Construction Act is a central part of the revised construction legislation. Selected dilemmas are discussed in the paper, although in the heated professional debate following the enforcement of the new construction legislation, there appeared quite some dilemmas, which varied according to the role of the discussants: investor, designer, supervisor, contractor and construction manager, auditor, educator, etc. For the benefit of all the professions involved in the complex interconnection of building construction sector and the Slovenian society as a whole, corrections to the new construction legislation are necessary, which will not only be cosmetic, as they should eliminate unnecessary anomalies. Key words: chamber of engineers, construction law, construction, copyright, project management

## 1 • UVODNA RAZMIŠLJANJA

Zadnja prenova gradbene zakonodaje se je zgodila v želji po manjši regulaciji strokovnih profilov v Evropi in med izbrane profile je politika uvrstila tudi področje gradbeništva in strokovnjake, ki sodelujejo pri graditvi objektov.

Izvedba prenove gradbene zakonodaje je potekala predvsem politično: brez celovite strokovne analize obstoječe zakonodaje, zakaj je v novi gradbeni zakonodaji ukinjena obveznost revidiranja projektne dokumentacije (predlagana je bila za prvo bistveno zahtevo o mehanski odpornosti in stabilnosti in drugo bistveno zahtevo o varnosti pred požarom) (15. člen, (GZ, 2017)). Glavni motor prenove je bil sicer prezapleten in predolg postopek izdaje gradbenega dovoljenja.

Inženirska zbornica Slovenije (IZS)<sup>1</sup> in Zbor za oživitvev in razvoj slovenskega gradbeništva (ZORG, ustanovljen 2014) sta se aktivno vključila v postopek spreminjanja gradbene zakonodaje in pošiljala pripravljavcu zakona svoje pripombe,<sup>2,3</sup> podobno je storila tudi Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani.<sup>4</sup>

Ministrstvo za okolje in prostor, ki je vodilo pripravo prenove gradbene zakonodaje kot resorno ministrstvo, je po sprejemu nove

gradbene zakonodaje sprejelo obvezno navodilo upravnim enotam,<sup>5</sup> da je vloga vodje projekta (kar sploh ni reguliran poklic) za stavbe izključno namenjena pooblaščenim arhitektom – s tako »razlago« 12. člena ZAID se je postavilo na stran arhitekturne stroke v duhu njene kulturne in umetniške vloge in poslanstva, ki ji namenja poseben status na področju graditve objektov, predvsem stavb. Več o tem »zapletu« v nadaljevanju prispevka.

Spor med arhitekti in (gradbenimi) inženirji, pogojno med Zbornico za arhitekturo in prostor (ZAPS) in Inženirsko zbornico Slovenije (IZS), je moč interpretirati kot interesni boj za prevzemanje vloge in obsega dela na področju graditve objektov, ki je zapadlo v krizo po letu 2009, ko naj bi bili arhitekti zapolnili mesto in praznino, ki je nastala zaradi vpisne suše na gradbenih fakultetah v Sloveniji in potencialnega pomanjkanja gradbenih strokovnjakov v praksi. Več o tem na koncu prispevka.

V času spreminjanja gradbene zakonodaje in ob ponujenih rešitvah se je gradbenikom pogosto ponujalo vprašanje, zakaj govorimo o Gradbenem zakonu in ne o (eno)stanovanjskem zakonu. Mnoge rešitve, ki so našle mesto v novem Gradbenem zakonu, so dobre

rešitve za področje graditve eno- in dvostanovanjskih stavb, a ne tudi nujno dobre rešitve za mnoge druge stavbe in inženirske objekte. Prav tako ni jasno, kaj je bil vzrok preimenovanja starega Zakona o graditvi objektov (ZGO) v Gradbeni zakon (GZ) – morda se sliši ironično, a prenovljeni in preimenovani Gradbeni zakon je naletel na precej odklonilnih mnenj prav pri gradbenikih.

Po sprejetju nove gradbene zakonodaje (t. i. zakonskega trojčka) so se v medijih začela prerekanja med udeleženci graditve objektov o tem, kdo je kaj pridobil in/ali kaj izgubil – odprle so se še stare zamere. Medijska vojna ne pelje nikamor, polni stolpce medijev, a na odločevalca (politiko, vlado in parlament) vpliva bolj malo.

Kljub vsemu se ne moremo znebiti občutka, da je določena sprememba pravkar prenovljene gradbene zakonodaje nujna. To bo sicer sprejel slovenski parlament, stroka pa mora pri tem argumentirano razpravljati in ščititi svoje interese v okviru spoštovanja sožitja ter znanja in kompetenc drugih, ki sodelujejo v postopkih ustvarjanja grajenega okolja.

V nadaljevanju bom navedel nekatere odprte dileme nove gradbene zakonodaje, ki jih vidim kot pooblaščen inženir s področja gradbeništva ter kot dekan Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani.

## 2 • ALI SO ARHITEKTI ŠE INŽENIRJI?

### Arhitekti v novi gradbeni zakonodaji

Začnimo z dilemo v naslovu poglavja, ki se odpira kar sama, saj je v večjem delu nove gradbene zakonodaje uporabljeno poimenovanje »arhitekti in inženirji«, recimo že v naslovu Zakona o arhitekturni in inženirski dejavnosti (ZAID, 2017). Odgovor na zgornje vprašanje je precej jase – in sicer je negativen, saj imamo vsi vtis, da je po tem zakonu arhitekt nekaj več in seveda tudi in predvsem nekaj drugega kot inženir.

Nova gradbena zakonodaja se torej vrti okoli arhitektov in inženirjev, pri čemer so arhitekti skupaj s krajinskimi arhitekti in prostorskimi načrtovalci združeni v Zbornici za arhitekturo

in prostor (ZAPS, [www.zaps.si](http://www.zaps.si)) inženirji zelo različnih strok, ne le gradbeni inženirji, pa delujejo združeni in Inženirski zbornici Slovenije (IZS, [www.izs.si](http://www.izs.si)). Obe zbornici sta samostojni od leta 2004, pred tem so tudi arhitekti delovali v IZS. Zbornici delujeta po dveh različnih principih, in sicer so v ZAPS organizirane tri sekcije: arhitektov, krajinskih arhitektov in prostorskih načrtovalcev, odločanje je po sistemu »vsak član ima en glas«, v IZS pa je sekcij šest, prevladuje sekcija gradbenih inženirjev, odločanje pa je blizu proporcionalnega, »vsaka sekcija ima enako število glasov« v škodo največje sekcije gradbenih inženirjev. Ne pozabimo tudi na dejstvo, da so na Univerzi v

Ljubljani bili arhitekti skupaj z gradbeniki in geodeti del Fakultete za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo (FAGG) vse do leta 1995, ko so stopili na samostojno pot na Fakulteti za arhitekturo Univerze v Ljubljani (UL FA).

ZAPS v veliki meri svoje poslanstvo izpolnjuje z organiziranjem (razpisovanjem) natečajev, to je postopkov za izbiro najustreznejših arhitekturnih, krajinskoarhitekturnih in urbanističnih rešitev. Dokument »Arhitekturna politika Slovenije: arhitektura za ljudi«<sup>6</sup> (Žižič, 2018) v poglavju 2. Pametna rast arhitekturnim in urbanističnim natečajem namenja pomembno vlogo pri zagotavljanju ciljev arhitekturne politike – druga poglavja tega za arhitekto zelo pomembnega dokumenta, so še: 1. Kakovostna arhitektura; 3. Trajnostni razvoj in 4. Vključujoča arhitektura.

<sup>1</sup> Osnutek gradbenega zakona za stroko nesprijemljiv, Delo in Dom, št. 40, leto 23, str. 25, 30. 12. 2015.

<sup>2</sup> Zapisnik sestanka odbora ZORG z dne 5. 1. 2016.

<sup>3</sup> Sporočilo za javnost z dne 12. januarja 2016 – ZORG: Ministrstvo naj Gradbeni zakon spiše na novo.

<sup>4</sup> Dopis UL FGG št. 017-1/2016 z dne 6. 1. 2016; ministrici ga. Majcen (MOP) o stališču UL FGG do predloga nove prostorsko-načrtovalske in gradbene zakonodaje.

<sup>5</sup> Zadnje navodilo z dne 12. 6. 2019, poslano vsem upravnim enotam, ZAPS in IZS.

<sup>6</sup> Arhitekturno politiko Slovenije pod naslovom »Arhitektura za ljudi« je sprejela Vlada Republike Slovenije na seji 31. 8. 2017.

Arhitekturna politika je razumljena kot okvir za dolgoročno razpravo o nacionalni arhitekturni politiki in kot podlaga za sprejem zakonodaje, ki bo imela neposreden vpliv na kakovostno oblikovan prostor in arhitekturo. Cilji arhitekturne politike so tudi skladni z deklaracijo iz Davosa z naslovom Za kakovostno kulturo gradnje (Baukultur).<sup>7</sup> Ministrstvo za kulturo na svojih spletnih straneh navaja, da se cilji deklaracije skoraj v celoti odražajo tudi v slovenski arhitekturni politiki »Arhitektura za ljudi«, zato pričakujejo, da bodo vse te aktivnosti tudi v slovenskem prostoru pripomogle k razmisleku o našem grajenem prostoru in konstruktivnem delovanju vseh nas, da na različnih ravneh in po svojih zmožnostih prispevamo k izboljšanju stanja našega grajenega prostora. Arhitekt je torej tisti strokovnjak, ki zagotavlja izvajanje arhitekturne politike v duhu Baukultur – kulture gradnje.<sup>8</sup>

nica 1) in tako za ZAPS med drugim določa, da ZAPS deluje na področju prostorskega načrtovanja, arhitekture in krajinske arhitekture, tudi arhitekturnega in krajinskoarhitekturnega projektiranja ter strokovnih izpitov za odgovorno projektiranje načrtov arhitekture in krajinske arhitekture. ZAPS tudi sprejema kodeks poklicne etike pooblaščenih arhitektov, pooblaščenih krajinskih arhitektov in pooblaščenih prostorskih načrtovalcev ((Kodeks, 2005), (Krajcar, 2018)). O graditvi posebnih zadolžitev ZAPS ni imel. ZAPS je tudi imel zakonsko določilo, da »predlaga ministru, pristojnemu za prostorske in gradbene zadeve, izdajo pravilnika o izvedbi javnih natečajev za pridobivanje strokovnih rešitev v prostorskih aktih ter za urbanistične, krajinske in arhitekturne rešitve nameravanih gradenj«. V domeni ZAPS so bile arhitekturne, krajinske in urbanistične rešitve nameravanih gradenj, ne

pozabimo, da je ZGO-1 bil zakon o graditvi objektov, ki je graditev specifično delil na tri faze ali področja dela, in sicer na: a) projektiranje, b) gradnjo in c) vzdrževanje.

### Arhitekti in univerza

Habilitacijska merila Univerze v Ljubljani ponujajo delni odgovor na zastavljeno vprašanje, ali so arhitekti še inženirji. Na UL FA poznajo 4 habilitacijska področja: *Arhitektura, Urbanizem, Oblikovanje in Arhitekturna tehnologija*. Na UL FGG poznajo 3 habilitacijska področja: *Geodezija in geoinformatika, Gradbeništvo in okoljsko inženirstvo, Načrtovanje in urejanje prostora*. Iz zapisnikov Habilitacijske komisije Univerze v Ljubljani je razvidno, da želi UL FA že več let doseči spremembo interpretacije meril UL FA, ki jih potrjuje Habilitacijska komisija UL in Senat UL. Iz razpoložljive dokumentacije<sup>9</sup> sledi, da si UL FA prizadeva omogočiti izvolitev v naziv visokošolskega učitelja po pretežno znanstveni oziroma pretežno umetniški poti, pri čemer naj bi se habilitacijska merila na UL FA razlikovala za znanstveno-tehnično področje (*Arhitekturne tehnologije*) in znanstveno-družboslovna področja (*Arhitektura, Urbanizem, Oblikovanje*). Web of Science (Clarivate Analytics) uvršča področje *Arhitekture, Oblikovanja in Urbanistično oblikovanje* v indeks Art & Humanities (A&HCI), torej na področje humanistike in družboslovja, *Urbanistično planiranje* v indeks Social Sciences (SSCI), torej med družboslovne znanosti, in *Arhitekturno tehnologijo* v indeks Science (SCI), torej na področje znanosti. Morda je zato bila izražena na Univerzi v Ljubljani tudi želja, da bi bilo mogoče na UL FA pridobiti habilitacijo celo po kombinirani poti – s kombinacijo znanstvene in umetniške poti kandidata (v poljubnem razmerju?). Na osnovi zgornje razprave je težko razumeti, zakaj naj bi znanje magistrstrov inženirjev arhitekture na področju projektiranja stavb bistveno presega lo znanje magistrstrov inženirjev gradbeništva. UL FA meni, da zato, ker naj bi bili študijski programi UL FGG »usmerjeni predvsem v vodenje nadzora, stremijo pa tudi po tem, da obvladujejo vodenje gradnje, v kolikor ta pojem zakonodaja sploh vpelje«.<sup>10</sup>

Posledica te dualnosti pri habilitiranju učiteljev na UL FA je ta, da ima samo polovica visokošolskih učiteljev opravljen doktorat zna-

| ZAPS  | IZS  |
|---|--|
| določa strokovna načela na področju prostorskega načrtovanja, arhitekture in krajinske arhitekture  | določa strokovna načela na področju <b>graditve objektov</b>   |
| predlaga ministru, pristojnemu za prostorske in gradbene zadeve, izdajo pravilnika o izvedbi javnih natečajev za pridobivanje strokovnih rešitev v prostorskih aktih ter za urbanistične, krajinske in arhitekturne rešitve nameravanih gradenj | predlaga ministru, pristojnemu za prostorske in gradbene zadeve, izdajo pravilnika o izvedbi javnih natečajev za pridobivanje konstrukcijskih, tehnoloških in drugih inženirskih rešitev nameravanih gradenj   |
| skrbi za strokovno izpopolnjevanje na področju prostorskega načrtovanja, <b>arhitekturnega in krajinskega projektiranja</b> ter sodeluje pri pripravi izobraževalnih programov  | skrbi za strokovno izpopolnjevanje na področju <b>gradbenega in drugega projektiranja</b> ter opravljanja geodetske dejavnosti in sodeluje pri pripravi izobraževalnih programov                               |
| skrbi za strokovni razvoj in neodvisnost prostorskega načrtovanja ter <b>arhitekturnega in krajinsko-arhitekturnega projektiranja</b> ...   | skrbi za strokovni razvoj in neodvisnost <b>gradbenega in drugega projektiranja, revidiranja projektne dokumentacije, vodenja del in opravljanja nadzora pri graditvi objektov</b> ter geodetskih storitev ... |
| sprejema kodeks poklicne etike pooblaščenih arhitektov, pooblaščenih krajinskih arhitektov in pooblaščenih prostorskih načrtovalcev   | sprejema kodeks poklicne etike pooblaščenih inženirjev   |

Preglednica 1 • Primerjava nalog ZAPS in IZS pred sprejetjem nove gradbene zakonodaje (vir: ZGO-1 NPB16, 2019; 110. člen). Opomba: okrepjeno in podčrtano besedilo je avtorjev poudarek.

110. člen ZGO-1 (ZGO-1-NPB16, 2019) opredeljuje delovno področje ZAPS in IZS (pregled-

pa tudi gradnja sama kot tudi ne gradbeno projektiranje katerihkoli objektov po ZGO-1. Ne

<sup>7</sup> Deklaracija je bila sprejeta v Davosu januarja 2018, dostopno na: [https://www.gov.si/assets/ministrstva/MK/DEDISCINA/ARHITEKTURA/a53a40671e/Davos\\_Deklaracija\\_koncna.pdf](https://www.gov.si/assets/ministrstva/MK/DEDISCINA/ARHITEKTURA/a53a40671e/Davos_Deklaracija_koncna.pdf).

<sup>8</sup> Nekako mešamo izraza »graditev« in »gradnja«, ki sta del procesa graditve.

<sup>9</sup> Zapisnik 13. seje Habilitacijske komisije Univerze v Ljubljani z dne 24. 4. 2019.

<sup>10</sup> Dopis UL FA št. 071-3/2019-5 z dne 10. 8. 2019 – odgovor dekana UL FA na članek »Je vodja gradnje arhitekt ali gradbeni inženir«, časopis DELO, 10. 8. 2019.



nosti, vendar ne nujno na področju naravoslovja in tehnike, temveč tudi humanistike in družboslovja. Zanimivo vprašanje je, zakaj ima potemtakem diplomant/-ka tega študija

naziv magister inženir/-ka arhitekture (mag. inž. arh.). Po uveljavitvi umetniškega doktorata bo meja med družboslovjem in inženirstvom (tehniko) na področju arhitekture in zaradi

prenovljene gradbene zakonodaje tudi na področju graditve objektov (stavb in inženirskih objektov) vse bolj zabrisana ali vsaj zamegljena.

### 3 • POKLICNE NALOGE POOBLAŠČENIH ARHITEKTOV IN INŽENIRJEV

V 4. členu Zakon o arhitekturni in inženirski dejavnosti (ZAID, 2017) opredeljuje poklicne naloge pooblaščenih arhitektov in inženirjev (začetek citata).

(1) Poklicne naloge **pooblaščenega arhitekta** so arhitekturno projektiranje objektov, zlasti stavb in odprtega prostora, vodenje izdelave občinskih podrobnih prostorskih načrtov kakor tudi sodelovanje pri izdelavi drugih prostorskih izvedbenih aktov v delu, ki se nanaša na urbanizem in strokovno področje arhitekture.

(2) Poklicne naloge **pooblaščenega inženirja** so gradbeno-tehnično projektiranje objektov, sodelovanje pri izdelavi prostorskih aktov v delu, ki se nanaša na njegovo strokovno področje, ter izvajanje gradbenih, obrtniških in inštalacijskih del, pri čemer se:

– poklicne naloge pooblaščenega inženirja s področja **gradbeništva** nanašajo na strokovno področje gradbene stroke, zlasti na izdelavo načrtov gradbenih, geotehničnih, voziščnih in podobnih konstrukcij stavb in drugih objektov ter drugih posegov v prostor in njihovo izvedbo, izdelavo gradbenih načrtov gradbenoinženirskih objektov, izdelavo statičnih in potresnih analiz, študij potresne ogroženosti objektov in geološko-geomehanskih analiz temeljnih tal ter preskušanje gradbenega materiala;

– poklicne naloge pooblaščenega inženirja s področja **elektrotehnike** se nanašajo na strokovno področje elektrotehniške stroke, zlasti na sisteme, postroje, opremo, naprave in inštalacije proizvodnje, prenosa, distribucije, transformacije in akumuliranja električne energije, uporabe električne energije, zaščite pred delovanjem strele in drugih prenapetosti, zaščite pred negativnimi učinki delovanja električne energije, razsvetljave, upravljanja, regulacije, avtomatizacije, meritev, krmiljenja, signalizacije in nadzorov, protieksplzijskega, požarnega in tehničnega varovanja, medijskih tehnologij, telekomunikacij in informacijskih tehnologij;

– poklicne naloge pooblaščenega inženirja s področja **strojništva** se nanašajo na strokovno področje strojne stroke, zlasti na

področje energetike in inštalacij v stavbah in gradbenoinženirskih objektih, tehnološke opreme in postrojenja, hidro-, termo- in nuklearnoenergetskih postrojenj ter prenosnih in distribucijskih cevovodov;

– poklicne naloge pooblaščenega inženirja s področja **tehnologije** se nanašajo na strokovno področje tehnoloških strok, zlasti na področje kemije in kemijske tehnologije, živilske, farmacevtske, lesarske in tekstilne tehnologije, metalurgije, sanitarnega inženirstva, zootehnike, biotehnologije, tehnologije tehniških proizvodov ter na področje gozdarstva in varnosti in zdravja pri delu;

– poklicne naloge pooblaščenega inženirja s področja **požarne varnosti** se nanašajo na načrtovanje ukrepov požarne varnosti in

– poklicne naloge pooblaščenega inženirja s področja **geotehnologije in rudarstva** se nanašajo na strokovno področje geotehnologije in rudarstva, zlasti na področje geotehničnih konstrukcij, geotehnologije ter izkopov in podgradnje za podzemne objekte.

(3) Poklicne naloge pooblaščenega inženirja s področja **geodezije** se nanašajo na strokovno področje izvajanja geodetske dejavnosti, ki zajema izvajanje geodetskih nalog v skladu s predpisi, ki urejajo evidentiranje nepremičnin, geodetsko izmero in naloge v skladu s predpisi o državnem geodetskem referenčnem sistemu, geodetske meritve, povezane s projektiranjem, gradnjo in uporabo objektov, zakoličbo objektov, izdelavo geodetskih načrtov, kontrolnih opazovanj in izdelavo deformacijskih analiz, transformacije podatkov med različnimi državnimi koordinatnimi sistemi in kartiranje, obdelavo, analizo in interpretacijo prostorskih podatkov.

(4) Poklicne naloge pooblaščenega inženirja s področja **prometnega inženirstva** se nanašajo na strokovno področje prometa, zlasti na dimenzioniranje horizontalnih elementov prometnih površin, načrtovanje in izdelovanje tehnoloških načrtov v prometu, izdelavo prometnih študij in prometnih modelov ter mobilnostnih načrtov, načr-

tovanje prometne signalizacije, prometnih omrežij, ki temeljijo na prometnih modelih in prometnih napovedih, prometnih zapor, omrežja javnega potniškega prometa in konceptualnih zasnov prestopnih točk (postajališč), zasnov območij za pešce in umirjenega prometa, načrtovanje in izvajanje ukrepov za povečanje prometne varnosti, načrtovanje prometne infrastrukture, načrtovanje, razvoj in implementacijo transportnih tehnologij in inteligentnih transportnih sistemov.

(5) Poklicne naloge pooblaščenega **krajinkega arhitekta** so krajinsoarhitekturno projektiranje objektov, krajin in odprtega prostora ter sodelovanje pri izdelavi prostorskih izvedbenih aktov, v delu, ki se nanaša na strokovno področje krajinke arhitekture.

(6) Poklicne naloge pooblaščenega **prostorskega načrtovalca** so vodenje izdelave prostorskih izvedbenih aktov.

(7) Med poklicne naloge pooblaščenega arhitekta, pooblaščenega inženirja in pooblaščenega krajinkega arhitekta sodijo tudi nadzor nad gradnjo, izdelava izvedenskih mnenj, elaboratov in študij s strokovnega področja, za katerega so pooblaščeni, kot tudi svetovanje in zastopanje naročnika ter vodenje investicije.

(konec citata)

Prebiranje poklicnih nalog hitro privede do sklepa, da je ta člen spisan nehomogeno, saj so naloge pri posameznih področjih spisane različno, nekatere zelo podrobno, druge bolj pregledno. Nujna bi bila prevetritev 4. člena (ZAID, 2017) v smislu navajanja strokovnih nalog, ki jih inženirji res pridobijo v ustreznih študijskih programih, kjer z uspešnim zaključkom študija pridobijo strokovne nazive, ki se uporabljajo v ZAID. Problematične se zdijo opredelitve:

– področja prometnega inženirstva (angl. traffic engineering) kot posebnega poklica izven gradbeništva (angl. civil engineering), usmerjenega bolj v logistiko in promet, manj pa v prometno inženirstvo (konstrukcije) in prometno infrastrukturo;

– navajanje geotehničnih konstrukcij med poklicne naloge na področju geotehnologije in rudarstva;

– navajanje možnosti, da pooblaščeni krajinke arhitekt izvaja nadzor nad gradnjo.

Pozitivna stran podrobnega navajanja kompetenc (poklicnih nalog) reguliranih poklicev (PA, PI, PKA in PPN) in za pooblaščenca inženirje še podrobneje kompetenc (poklicnih nalog) inženirjev posameznih strok je dejstvo, da lahko

navedene naloge opravlja samo ta poklic in ne kateri koli drug poklic. V alineji 7 4. člena ZAID je tako navedeno, da je npr. izdelava izvedenskih mnenj, elaboratov in študij s strokovnega področja, za katero so inženirji

pooblaščen, sestavni del njihovih nalog in ne nalog drugih poklicev. Izjema so sodni izvedenci, ki niso pooblaščen inženirji in pišejo izvedenska mnenja, nujna bi bila uskladiitev z normami nove gradbene zakonodaje.

#### 4 • VODJA GRADNJE KOT REGULIRANI POKLIC?

V 1. členu (področje uporabe) (ZGO-1, 2002) je določeno: »(3) *Graditev objekta po tem zakonu obsega projektiranje, gradnjo in vzdrževanje objekta.*« Zakon se je torej nanašal na graditev objektov, kjer je gradnja ob projektiranju in vzdrževanju objekta ena od treh sestavnih delov procesa graditve objektov. Zakon o graditvi objektov je leta 2002 (ZGO-1, 2002) v 2. členu tudi definiral naslednje pojme (začetek citata):

- *objekt je s tlemi povezana stavba ali gradbeni inženirski objekt, narejen iz gradbenih proizvodov in naravnih materialov skupaj z vgrajenimi inštalacijami in tehnološkimi napravami;*
- *stavba je objekt z enim ali več prostori, v katere človek lahko vstopi in so namenjeni prebivanju ali opravljanju dejavnosti;*
- *nestanovanjska stavba, namenjena javni rabi, je stavba, katere raba je pod enakimi pogoji namenjena vsem, kot so hotel, motel, gostilna in podobna nastanitvena stavba, banka, pošta, urad in podobna poslovna stavba, stavba za trgovino in storitve, stavba železniške in avtobusne postaje, letališča in pristaniškega terminala, postaja žičnice, garažna stavba in podobne stavbe za promet in komunikacije, stavba za razvedrilo, muzej, knjižnica, šolska stavba in druge stavbe za izobraževanje, stavba za bolnišnično ali zavodsko oskrbo, športna dvorana, stavba za čiščenje in opravljanje verskih dejavnosti in podobna nestanovanjska stavba;*
- *gradbeni inženirski objekt je objekt, namenjen zadovoljevanju tistih človekovih materialnih in duhovnih potreb ter interesov, ki niso prebivanje ali opravljanje dejavnosti v stavbah.*

(konec citata)

Vpogled na splet (ZGO-1- NPB16, 2019) pokaže, da se zgoraj navedeni pojmi s spremembo zakonodaje ((ZGO-1A, 2004), (ZGO-1B, 2007), (ZGO-1C, 2009)) niso spreminjali. Ob-

jekti se torej delijo na inženirske objekte (ti niso namenjeni prebivanju in ne gre za opravljanje dejavnosti v stavbah) in stavbe, te pa naprej na stanovanjske stavbe (stavbe, namenjene prebivanju) in nestanovanjske stavbe, namenjene opravljanju dejavnosti. Te izraze lahko preverimo v Gradbenem zakonu (GZ, 2017), ki opredeljuje naslednje pojme (začetek citata):

1. *bisvene zahteve so gradbenotehnične lastnosti, ki jih morajo izpolnjevati objekti za zagotavljanje njihove varne in učinkovite rabe;*
2. *dokončanje gradnje je konec izvajanja del, ki zagotavlja izpolnjevanje bistvenih zahtev in minimalno komunalno oskrbo objekta;*
3. *drugi gradbeni poseg je posledica gradbenih del, ni stavba ali gradbeni inženirski objekt, ter pomeni poseg v fizične strukture na zemeljskem površju in pod njim ter trajno spreminja podobo ali rabo prostora;*
4. *enostavni objekt je objekt tako majhnih dimenzij, da se v njem ne more zadrževati večje število oseb, konstrukcijsko enostaven in prostorsko manj zaznaven;*
5. *gradbeni inženirski objekt je objekt, ki ni stavba in ni drug gradbeni poseg; in sicer so to objekti prometne infrastrukture (ceste, železniške proge, letališke steze, mostovi, viadukti, predori in podhodi, pristanišča, plovne poti, pregrade in jezovi ter drugi vodni objekti), cevovodi, komunikacijska omrežja in elektroenergetski vodi, industrijski gradbeni kompleksi, športna igrišča in drugi gradbenoinženirski objekti;*
6. *gradnja je izvedba gradbenih in drugih del, povezanih z gradnjo, ki obsega novogradnjo, rekonstrukcijo, vzdrževanje objekta, vzdrževalna dela v javno korist, odstranitev in spremembo namembnosti;*

...

25. *objekt je stavba, gradbeni inženirski objekt ali drug gradbeni poseg, narejen z gradbenimi, zaključnimi gradbenimi ali inštalacijski-*

*mi deli, sestavljen iz gradbenih proizvodov, proizvodov ali naravnih materialov, skupaj s trajno vgrajenimi inštalacijami in napravami v objektu, ki so namenjene delovanju objekta.* (konec citata)

V Zakonu o graditvi objektov (ZGO-1, 2002) ni bilo določbe o odgovornem vodji projekta z zahtevo o prevladujoči stroki. Tudi sprememba zakonodaje leta 2004 tega ni spremenila (ZGO-1A, 2004). Leta 2007 spremembe in dopolnitve zakonodaja doda zahtevo o odgovornem vodji projekta iz prevladujoče stroke, in sicer 45. člen (odgovorni projektant) dobesedno določa: »(3) *Kot odgovorni vodja projekta nastopa odgovorni projektant iz stroke, ki pri nameravani gradnji glede na namen objekta prevladuje.*« (ZGO-1B, 2007)

V praksi so to vlogo po spremembi leta 2007 še naprej prevzemali tako arhitekti kot tudi inženirji. V medijih se je večkrat pojavilo mnenje, da je to bilo narobe in da je sedaj po uveljavitvi nove gradbene zakonodaje čas, da se leta 2007 uveljavljena sprememba vendarle začne spoštovati, in to predvsem pri stavbah, kjer naj bi vloga vodje projekta pripadla izključno pooblaščenim arhitektom.

Novi Gradbeni zakon (GZ, 2017) je povzel tako določilo, a ne dobesedno. GZ tako glede projektanta v 12. členu določa: »(3) *Projektant mora za vodenje izdelave projektne dokumentacije določiti pooblaščenega arhitekta ali pooblaščenega inženirja iz stroke, ki glede na namen gradnje prevladuje (v nadaljnjem besedilu: vodja projekta) in ki zanj opravlja poklicne naloge v eni od predpisanih oblik v skladu z zakonom, ki ureja arhitekturno in inženirsko dejavnost. Vodja projekta koordinira izdelavo projektne dokumentacije in jo potrdi.*«

V čem vidim problematičnost zapisa:

- Pri odločanju o prevladujoči stroki se v GZ uporabi izraz »namen gradnje« in ne več »namen objekta«, kot je to bilo določeno v ZGO-1C, in se vseeno govori o kontinuiteti opredelitvi o prevladujoči stroki, češ da je zapisana od leta 2007, a se samo ni izvajala.<sup>11</sup> Mešanje obeh izrazov je vidno tudi v obveznem navodilu MOP iz junija 2019

<sup>11</sup> Morda gre res samo za podrobnost, a hudič se skriva prav v njih; ali je zakonodajalec želel vnesti pomensko razliko pri opredelitvi prevladujoče stroke, ne vemo, se pa v medijskih zapisih stalno ponavlja opredelitev prevladujoče stroke glede na namen objekta, in ne, kot je pravilno, glede na namen gradnje – zadnji tak primer je odziv predsednika ZAPS g. Tomaža Krištofa v PP, 12. 10. 2019.



(povzeto po IZS, 2019, kjer je dodan kritični komentar IZS na to navodilo).

- Po temeljitim razmisleku se ne moremo znebiti občutka, da je namen objekta povezan z vrsto in uporabo objekta (stanovajska stavba recimo), medtem ko je pojem »namen gradnje« nedvomno ločen od namena objekta, ampak govori o gradnji sami – namen gradnje je lahko le dokončanje gradnje, torej sploh ne gre za projektiranje, ampak gradnjo samo.
- Zahteva je zapisana pri projektantu in njegovi obveznosti, da za vodenje izdelave projektne dokumentacije določi pooblaščenega arhitekta ali pooblaščenega inženirja iz stroke, ki glede na namen gradnje prevladuje.
- Gre za zapis, ki očitno omogoča različna tolmačenja, kar gotovo ni dobro, saj omogoča nagibanje tehničarja v eno ali drugo smer.<sup>12</sup>

Mnenje MOP, da je vodja del za stavbo lahko le pooblaščen arhitekt, ne zdrži presoje. Za razumevanje zapišimo, da je (ZGO-1, 2002) graditev objektov razdelil na projektiranje, gradnjo in vzdrževanje objektov, GZ pa navaja, da se

namen zakona uresničuje s projektiranjem, dovoljevanjem, gradnjo, uporabo, vzdrževanjem in inšpekcijskim nadzorom.

Če je imel MOP v mislih določbo iz leta 2007, ki enakopravno govori o odgovornih projektantih iz stroke, ki **prevladuje glede na namen objekta**, bi za stavbe morda to bilo še razumljivo (predvsem le za eno- in dvostanovanjske stavbe), da arhitektura kot stroka prevladuje pri teh vrstah stanovanjskih stavb. Če pa gre za gradnjo zahtevnejših objektov (tudi v primeru stavb), postajajo vse bolj pomembne bistvene zahteve za objekte, ki jih zakon določa »*kot gradbenotehnične lastnosti, ki jih morajo izpolnjevati objekti za zagotavljanje njihove varne in učinkovite rabe*« (3. člen, (GZ, 2017)). Ali so pri nestanovanjskih stavbah (bolnišnicah, letališčih, muzejih, hotelih, žičniških stavbah itd.) pooblaščen inženirji gradbene stroke res neprevladujoča stroka **glede na namen gradnje** (dokončanje gradbenih del in izvedba konstrukcije, ki izpolnjuje bistvene zahteve) v primerjavi s pooblaščenimi arhitekti?

Vodenje projekta je odgovorna naloga, čeprav GZ v svojem 12. členu daje vodji projekta le

nalogo koordinacije izdelave projektne dokumentacije in obveznost njene potrditve. V zakonskem besedilu ni opredeljene nobene odgovornosti, ki bi izhajala iz te koordinacije. Tukaj je zakonodajalec zavedel vse stroke, ki sodelujejo pri graditvi objektov, da eni vidijo v imenu vodje projekta resnično vodenje in s tem odgovornost za rezultat, drugi pa razumejo še besedilo naprej, ki pove, da je to vodenje pravzaprav koordinacija in podpis. Mnenje, da je vodja projekta glavni odločevalec pri projektu,<sup>13</sup> je na trhljih nogah, saj zakonodajalec ni zapisal, da vodja projekta koordinira in odloči, res pa je, da izdelek podpiše in si zanj skladno z razumevanjem svoje vloge kot arhitekt v primeru stavbe pripiše avtorstvo izdelka (na osnovi svoje arhitekturne zasnove). Nujno je torej razrešiti vlogo vodje projekta skozi oči ne le prevladujoče stroke in kako jo razumemo, temveč tudi prevzemanje odgovornosti za vodenje (koordinacijo in podpisovanje) projektne dokumentacije in prilaščanje avtorskih pravic pri tem brez pravne osnove (IZS, 2019). Izdelovalci projektne dokumentacije ne bi smeli imeti odgovornosti, vodja projekta pa zasluži in apriornih avtorskih pravic (Kranjc, 2014).

### **javnost na področju družboslovja in humanistike.**

UL FGG je bila na osnovi zgoraj navedenih dejavnosti (Priloga 2, (Statut, 2019)) in na osnovi ustrezne vloge na Inženirsko zbornico Slovenije (IZS) avgusta 2019 skladno s 14. členom Gradbenega zakona vpisana na seznam gospodarskih subjektov, ki opravljajo arhitekturno in inženirsko dejavnost (Seznam, 2019g), pod evidenčno številko podjetja 3058<sup>14</sup> med 1211 vpisanimi podjetji na IZS. Med njimi ne najdemo Fakultete za arhitekturo Univerze v Ljubljani (UL FA). Zakaj ne?

Senat Univerze v Ljubljani je maja 2018 sprejel seznam dejavnosti UL FGG, marca 2019 pa še seznam dejavnosti UL FA skladno s Pravilnikom o izogibanju nasprotjem interesov in delu izven Univerze v Ljubljani (Pravilnik, 2018) – seznam povzemamo s seznama dejavnosti članic UL (priloga v (Pravilnik, 2018)):

a) UL FA:<sup>15</sup> M 72 Znanstvena raziskovalna in razvojna dejavnost – M 72.1 Raziskovalna

## **5 • UNIVERZE IN GRADITEV OBJEKTOV**

Ali lahko zaposleni na univerzah sodelujejo pri graditvi objektov, in če, kako? Ali lahko univerza projektira, in če da, ali le za svoje potrebe ali tudi na trgu?

Statut Univerze v Ljubljani, v okviru katere kot članici delujeta Fakulteta za arhitekturo (UL FA) in Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (UL FGG), v svoji prilogi 1 ((Statut, 2019) str. 59) določa študijska področja svojih članic – dodana je šifra po KLASIUS-klasifikaciji in v oklepaju študijski programi na posameznem področju:

- a) Fakulteta za arhitekturo: (58) arhitektura in gradbeništvo (arhitektura in urbanizem);
- b) Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: (44) fizikalne in kemijske vede; (58) arhitektura in gradbeništvo (gradbeništvo, prostorsko in urbanistično planiranje); (52) tehniške vede (geodezija); (85) varstvo okolja (varstvo okolja).

Statut Univerze v Ljubljani v svoji prilogi 2 (Statut, 2019; str.61) določa dejavnosti univerze in svojih članic – dejavnosti, ki jih opravljajo članice univerze v svojem imenu in za svoj račun, so:

- a) UL FA: M 71.111 Arhitekturno projektiranje, M 71.112 Krajsko arhitekturno, urbanistično in drugo projektiranje, M 71.129 Druge inženirske dejavnosti in tehnično svetovanje, M 71.190 Raziskovalna in razvojna dejavnost na drugih področjih naravoslovja in tehnologije.
- b) UL FGG: M 71.111 Arhitekturno projektiranje, M 71.112 Krajsko arhitekturno, urbanistično in drugo projektiranje, M 71.129 Druge inženirske dejavnosti in tehnično svetovanje, M 71.190 Raziskovalna in razvojna dejavnost na drugih področjih naravoslovja in tehnologije, **M 72.200 Raziskovalna in razvojna de-**

<sup>12</sup> Razumevanje razlike med izrazoma »namen objekta« in »namen gradnje« je tako, kot ga vidim sam – zakonodajalec bi moral biti mnogo jasnejši, predvsem če trdi, da ni spremembe med ZGO-1 in GZ kljub zapisani razliki ter precej podrobno zapisanim definicijam v 2. členu GZ (2017).

<sup>13</sup> Recimo v mnenju predsednika ZAPS g. Tomaža Krištofa v PP29, časnik DELO, 12. 10. 2019.

<sup>14</sup> Dopis IZS št. 0147-0691/2019-2 z dne 14. 8. 2019.

<sup>15</sup> UL FA ne šteje med konkurenčno dejavnost R 90.030 Umetniško ustvarjanje, če so izvedena umetniška dela ali stvaritve nujne za razvoj stroke ali pedagoškega dela posameznika.

in razvojna dejavnost na drugih področjih naravoslovja in tehnologije,<sup>16</sup> M 72.2 Raziskovalna in razvojna dejavnost na področju družboslovja in humanistike.<sup>17</sup>

b) UL FGG: **M 71.111 Arhitekturno projektiranje, M 71.112 Krajinsko arhitekturno, urbanistično in drugo projektiranje**, M 72.190 Raziskovalna in razvojna dejavnost na drugih področjih naravoslovja in tehnologije, M 72.200 Raziskovalna in razvojna dejavnost na področju družboslovja in humanistike.

Zanimivo, da UL FA arhitekturnega projektiranja (M 71.111) ter krajinskoarhitekturnega, urbanističnega in drugega projektiranja (M 71.112) ne navaja med dejavnostmi, ki bi bile v nasprotju interesov, čeprav druge članice UL to izrecno navedejo kot dejavnost pri sebi – ne le UL FGG (M 71.111 in M 71.112), temveč tudi

UL BF (M 71.111 in M 71.112) in UL FF (le M 71.112). Morda je to tudi razlog, da se UL FA ni vpisala na seznam gospodarskih subjektov, ki opravljajo arhitekturno in inženirsko dejavnost, kot je to storila UL FGG.

Facit: profesorji, zaposleni na UL FA, lahko projektirajo in izvajajo dejavnosti po GZ (2017), le da tega ne opravljajo preko fakultete, čeprav je UL FA registrirana za tako dejavnost, ampak se UL FA ni dala vpisati na seznam gospodarskih družb pri IZS in zato te dejavnosti ni na UL uvrstila na seznam dejavnosti, ki bi bile v konfliktu interesov. Zanimiva rešitev, ki kliče po ustrezni spremembi ureditve konflikta interesov na Univerzi v Ljubljani na področju dejavnosti povezanih z graditvijo objektov. Še toliko bolj, ker vlogo vodje projekta, ki je »sporna« v novi gradbeni zakonodaji, pooblaščen gradbeni

inženir, zaposlen na Univerzi v Ljubljani, mora opravljati preko univerze zaradi siceršnjega konflikta interesov, zaposleni magistri arhitekture pa lahko taka dela opravijo izključno drugje, torej tudi v lastnih zasebnih podjetjih. Na vprašanje, ali so integriteta, avtonomija in avtoriteta pooblaščenega arhitekta ali pooblaščenega inženirja bolje ohranjene, če je strokovnjak zaposlen v javnem sektorju ali v lastnem privatnem podjetju, pa bomo morali še odgovoriti. Odgovor se skriva tudi v zavarovanju poklicne odgovornosti (odgovornosti za škodo v zvezi z opravljanjem svoje dejavnosti) pooblaščenih arhitektov in pooblaščenih inženirjev (14. člen (GZ, 2017)), predvsem v primeru kritja škode zaradi malomarnosti, napake ali opustitve dolžnosti. Tukaj imajo univerze kar nekaj dela, da uredijo to področje enako za vse.

## 6 • ANALIZA ŠTEVILA DIPLOMANTOV ARHITEKTURE IN GRADBENIŠTVA V OBDOBJU 2012–2018

Kriza v gospodarstvu in posledično (a še mnogo močnejše) v gradbeništvu po letu 2009 se je močno poznala tudi v vpisni suši v gradbeništvu, na katero smo začeli opozarjati zgodaj.<sup>18</sup> Lahko bi podrobno analizirali vpisna mesta na univerzah v Sloveniji na področju arhitekture in gradbeništva in ugotavljali zmanjševanje vpisnih mest na področju gradbeništva in ohranjanje vpisnih mest na področju arhitekture, kar je posledica tudi zanimanja

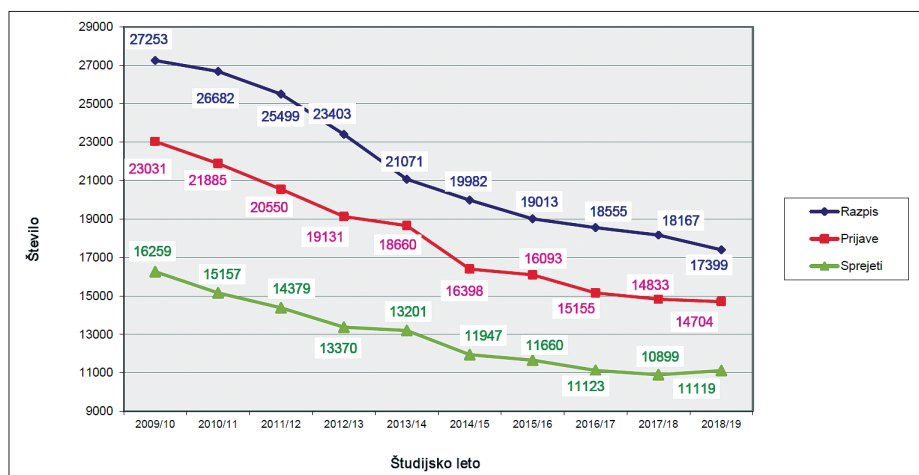
za poklice in zmanjševanja generacije, ki se je vpisovala v terciarno izobraževanje (UL, 2019).

Iz zadnje objavljene analize vpisov na študijske programe v Sloveniji za študijsko leto 2018/2019 povzemamo primerjavo razpisanih vpisnih mest, števila prijav in števila sprejetih v prvem prijavnem roku (slika 1). Razpisana vpisna mesta za študij na univerzah v Sloveniji so se v zadnjih 10 letih zmanjšala s 27.253

(2009/10) na 17.399 (2018/19) oziroma za dobro tretjino, število sprejetih v prvem prijavnem roku (kar kaže na največji interes za izbranim študijskim programom) pa se je zmanjšalo s 16.259 (2009/10) na 11.119 (2018/19) oziroma za slabo tretjino.

Ker je za trg dela bolj pomembno, koliko diplomantov je končalo posamezni študijski program, pogledimo porazdelitev števila diplomantov predbolonjskih in bolonjskih študijskih programov na področju arhitekture (in urbanizma) ter gradbeništva (in vodarstva) na dveh največjih ponudnikih tovrstnih študijskih programov v Sloveniji: Univerze v Ljubljani (Fakultete za arhitekturo – UL FA in Fakultete za gradbeništvo in geodezijo – UL FGG) in Univerze v Mariboru (Fakultete za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo – UM FGPA oziroma njene predhodnice do 2016, tj. Fakultete za gradbeništvo – UM FG) (preglednici 2 in 3).

Komentarja menim, da ni treba dajati, saj številke govorijo same za sebe. Število magistrstov inženirjev arhitekture – mag. inž. arh. (skupaj z magistri inženirji arhitekti urbanisti: mag. inž. arh. urb.) v zadnjih desetih letih močno prehitava število magistrstov inženirjev gradbeništva – mag. inž. grad. (tudi skupaj z magistri inženirji okoljskega gradbeništva – mag. inž. okol. grad. in



Slika 1 • Primerjava razpisanih vpisnih mest, števila prijav in števila sprejetih v prvem prijavnem roku (povzeto po (UL, 2019) grafikon 16).

<sup>16</sup> Dejansko gre za M 71.190 Raziskovalna in razvojna dejavnost na drugih področjih naravoslovja in tehnologije.

<sup>17</sup> Dejansko gre za M 72.200 Raziskovalna in razvojna dejavnost na področju družboslovja in humanistike – te dejavnosti v Prilogi 2 Statuta UL pri UL FA ne zasledimo.

<sup>18</sup> Prispevek v časniku DELO dne 4. 9. 2012 z naslovom »Po hidrološki še vpisna suša« je obravnaval zmanjšanje vpisa na študij vodarstva in komunalnega inženirstva.

| leto zaključka            | 543 arhitektura (modul arhitektura) | 543 arhitektura (modul urbanizem) | 543 arhitektura (modul notranje oblikovanje) | 1375 arhitektura | 337 arhitektura | 17180 urbanizem |
|---------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|--|------------------|-----------------|-----------------|
|                           | UL FA                               | UL FA                             | UL FA  | UL FA            | UM (FG)PA       | UL FA           |
| 2012                      | 81                                  | 9                                 | 12   | 39               | 2               | 0               |
| 2013                      | 93                                  | 11                                | 8  | 22               | 4               | 0               |
| 2014                      | 56                                  | 5                                 | 5  | 75               | 4               | 0               |
| 2015                      | 32                                  | 4                                 | 10   | 98               | 32              | 0               |
| 2016                      | 140                                 | 17                                | 34   | 107              | 26              | 0               |
| 2017                      | 0                                   | 0                                 | 0  | 107              | 22              | 0               |
| 2018                      | 0                                   | 0                                 | 0  | 128              | 25              | 9               |
| vsota                     | 402                                 | 46                                | 69   | 576              | 115             | 9               |
| <b>skupaj arhitektura</b> |                                     | <b>1093</b>                       |  |                  |                 |                 |
| <b>skupaj urbanizem</b>   |                                     | <b>55</b>                         |  |                  |                 |                 |

magistri inženirji stavbarstva – mag. inž. stavb.). Se potem lahko vprašamo, ali ni zadnja prenova gradbene zakonodaje v Sloveniji v veliki meri tudi posledica tega stanja in posledično poskusa arhitekturne stroke ob njeni močni kulturni in umetniški podstati prevzeti določeno vlogo inženirstva in posebej gradbeništva, ker se razmerja na trgu delovne sile spreminjajo med arhitekti in (gradbenimi) inženirji. Kdor bo želel odgovoriti na to vprašanje, bo moral še analizirati trg brezposelnih in potrebe slovenskega gospodarstva po arhitektih in gradbenikih.

Preglednica 2 • Pregled števila diplomantov predbolonjskih in bolonjskih študijskih programov na področju arhitekture in urbanizma v obdobju od 2012 do 2018 (vir: MIZŠ, eVŠ).

| leto zaključka             | 550 gradbeništvo | 879 gradbeništvo | 592 gradbeništvo | 62 VKI | 533 VOI oz. okoljsko gradbeništvo | 880 stavbarstvo | 335 gradbeništvo |
|----------------------------|------------------|------------------|------------------|--------|-----------------------------------|-----------------|------------------|
|                            | UL FGG           | UL FGG           | UM (FG)PA        | UL FGG | UL FGG                            | UL FGG          | UM (FG)PA        |
| 2012                       | 77               | 0                | 27               | 17     | 0                                 | 0               | 0                |
| 2013                       | 88               | 2                | 9                | 23     | 0                                 | 1               | 8                |
| 2014                       | 58               | 2                | 8                | 32     | 1                                 | 2               | 15               |
| 2015                       | 48               | 12               | 2                | 19     | 5                                 | 3               | 15               |
| 2016                       | 76               | 25               | 18               | 62     | 10                                | 7               | 23               |
| 2017                       | 0                | 42               | 0                | 0      | 16                                | 7               | 26               |
| 2018                       | 0                | 30               | 0                | 0      | 19                                | 12              | 25               |
| vsota                      | 347              | 113              | 64               | 153    | 51                                | 32              | 112              |
| <b>skupaj gradbeništvo</b> | <b>636</b>       |                  |                  |        |                                   |                 |                  |
| <b>skupaj vodarstvo</b>    | <b>204</b>       |                  |                  |        |                                   |                 |                  |
| <b>skupaj stavbarstvo</b>  | <b>32</b>        |                  |                  |        |                                   |                 |                  |

VOI – vodarstvo in okoljsko inženirstvo

Preglednica 3 • Pregled števila diplomantov predbolonjskih in bolonjskih študijskih programov na področju gradbeništva, vodarstva in stavbarstva v obdobju od 2012 do 2018 (vir: MIZŠ, eVŠ).



## 7 • SKLEP

Če sprejemamo nov Gradbeni zakon v duhu njegovega imena, da gre res za zakon o graditvi objektov v novi preobleki in ne le za stavbni zakon, so nujni popravki prenovljene gradbene zakonodaje:

- Prenehati z medsebojnim obtoževanjem (predvsem po medijih), saj je nujna argumentirana izmenjava mnenj, kjer naj konstruktivno (!) vlogo prevzame ZAPS in IZS, MOP pa nepristransko (!) vlogo predlagatelja spremembe gradbene zakonodaje in odločevalca s strokovnimi argumenti ter prepoznavno politično odgovornostjo za predlagane zakonodajne rešitve v dobro vseh strok in slovenske družbe. V tem duhu bi moral MOP nemudoma preklicati obvezno navodilo upravnim enotam, kdo je lahko vodja projekta za stavbe iz junija 2019, saj nima pravne osnove (laik bi rekel, da je nezakonit).
- Za vodjo projekta imenovati enakovredno pooblaščenega arhitekta ali pooblaščenega inženirja, brez navedbe o prevladujoči stroki glede na namen gradnje, ter tako omogočati vsem strokam, ki so dejansko že do sedaj opravljale to vlogo, prevzeti vlogo vodje projekta tudi po novi gradbeni zakonodaji brez omejevanja na posamezne vrste stavb in inženirskih objektov. Name-

sto izključevanja in omejevanja omogočati arhitektom in inženirjem enakovredno sodelovanje ob striktni odgovornosti vseh deležnikov in zakonsko poudarjeni vlogi projektanta, ki imenuje vodjo projekta. Tukaj ne moremo zaobiti zahteve po primerni ravni strokovnega znanja naročnika in projektanta, ki ga naročnik izbere!

- Istočasno z brisanjem določbe o prevladujoči stroki uveljaviti spremembo zakonodaje, ki bo vodji projekta naložila tudi odgovornost ob usklajevanju izdelave projektne dokumentacije, ki je sicer naložena pooblaščenim inženirjem, izdelovalcem posamezne vrste projektne dokumentacije. Vzporedno s to spremembo tudi doreči odprto vprašanje avtorskih pravic vodje projekta v odnosu do avtorske pravice izdelovalcev posameznih načrtov (tudi projektov arhitekture).
- V gradbeno zakonodajo ponovno umestiti proces revidiranja projektov (projektne dokumentacije).
- V terciarno izobraževanje čim prej umestiti interdisciplinarni magistrski študijski program, ki bo izobraževal za potrebe vodenja projektov v skladu z najnovejšimi trendi in tehnologijami na področju graditve objektov in ki bo postopoma prevzemal

vlogo vodenja projektov od pooblaščenih arhitektov in pooblaščenih inženirjev skladno s svojimi znanji in odgovornostjo, kar bi seveda zahtevalo formalno regulacijo tega poklica – danes reguliranega poklica »vodja projekta« ne poznamo!

- Spremeniti opis poklicnih nalog pooblaščenih inženirjev (4. člen, ZAID, 2017) na način, da bodo opisi medsebojno usklajeni glede na raven in podrobnost opisa med posameznimi profili pooblaščenih inženirjev.
- Razmisliti o zahtevanih kompetencah (kompetenčni profil) za posamezno področje dela pooblaščenega inženirja, da ne bo to le spisek predmetov (predmetnih področij) na študijskih programih prve in druge bolonjske stopnje (oziroma enoviti magistrski študijski programih), temveč k temu dodati opis kompetenc in znanj, ki jih morajo izkazovati pooblaščeni inženirji posameznega področja. Dobra osnova za tak opis so lahko referenčni okviri, ki so jih za bolonjske študijske programe na področju gradbeništva razvili v Nemčiji (ASBau, 2018). Za magistrske študijske programe druge stopnje takih referenčnih okvirov ne načrtujejo in študijski programi so v tem smislu deregulirani in lahko ponudijo na velikem nemškem izobraževalnem trgu zelo različne (in specializirane) profile magistrstov gradbeništva.

## 8 • ZAHVALA

Krajša različica prispevka je bila predstavljena na 5. dnevih gradbenega prava 14. novembra 2019 v Laškem in je izšla v zborniku tega strokovnega srečanja, ki ga je pripravil Urad-

ni list Republike Slovenije. Za njihovo delno podporo pri pripravi strokovnega gradiva, prikazanega v tem prispevku, se avtor prispevka najlepše zahvaljuje Uradnemu listu RS.

## 9 • LITERATURA

ASBau, Akkreditierungsverbund für Studiengänge des Bauwesens, e.V., Referenzrahmen für Studeingänge des Bauingenieurwesens (Bachelor), Berlin. 36 str. [https://www.asbau.org/dl/ASBau\\_RR\\_2018\\_dl.pdf](https://www.asbau.org/dl/ASBau_RR_2018_dl.pdf), 2018.

GZ, Gradbeni zakon. Uradni list RS št. 61/17 z dne 2. 11. 2017.

IZS, Inženirska zbornica Slovenije, Komentar k izdanemu pojasnilu MOP za vodenje projektiranja, <http://www.izs.si/izpostavljena-novica/komentar-k-izdanemu-pojasnilu-mop-za-vodenje-projektiranja-2577/>, 1. 7. 2019.

Krajcar, Š., Kryžanowski, Š., Starec, M. (2018) Ravnanje v primeru poseganja v obstoječe avtorsko delo (shematsko) – Priloga h kodeksu ZAPS, Zbornica za arhitekturo in prostor Slovenije, Ljubljana, 3 str., 2018.

Kranjc, S., Avtorska pravica v arhitekturi, Zbornica za arhitekturo in prostor, Ljubljana, 32 str., [https://www.zaps.si/img/admin/file/avtorska%20pravica/Zaps\\_avtorske%20pravice%20v%20arh-2014-spread-2.pdf](https://www.zaps.si/img/admin/file/avtorska%20pravica/Zaps_avtorske%20pravice%20v%20arh-2014-spread-2.pdf), 2014.

- Kodeks, Kodeks poklicne etike arhitektov, krajinskih arhitektov in prostorskih načrtovalcev, [https://www.zaps.si/img/admin/file/AKTI%20ZAPS/2\\_Kodeks%20ZAPS\\_URL%206-2005.pdf](https://www.zaps.si/img/admin/file/AKTI%20ZAPS/2_Kodeks%20ZAPS_URL%206-2005.pdf), Uradni list RS št. 6/05 z dne 21. 1. 2005.
- Pravilnik, Pravilnik o izogibanju nasprotjem interesov in pogojih za opravljanje dela izven Univerze v Ljubljani – neuradno prečiščeno besedilo, 7. str., <https://www.uni-lj.si/mma/npbdeloiizvenul11052018/2018051110390377/>, 2018.
- Seznam, Seznam gospodarskih subjektov, ki opravljajo arhitekturno in inženirsko dejavnost. Inženirska zbornica Slovenije, <http://www.izs.si/imeniki-seznami/seznam-gospodarskih-subjektov-ki-opravljajo-arhitekturno-in-inzenirsko-dejavnost/>, 2019.
- Statut, Statut Zbornice za arhitekturo in prostor Slovenije, <https://www.uradni-list.si/glasilo-uradni-list-rs/vsebina/2018-01-3898/statut-zbornice-za-arhitekturo-in-prostor-slovenije>, Uradni list RS št. 81/18 z dne 14. 12. 2018.
- Statut, Statut Univerze v Ljubljani – čistopis, neuradno prečiščeno besedilo. 77 str., [https://www.uni-lj.si/mma/statut\\_ul\\_\\_cistopis,\\_neuradno\\_precisceno\\_besedilo\\_z\\_dne\\_27\\_7\\_2019/2019072609004168/](https://www.uni-lj.si/mma/statut_ul__cistopis,_neuradno_precisceno_besedilo_z_dne_27_7_2019/2019072609004168/), 2019.
- UL, Univerza v Ljubljani, visokošolska prijavno-informacijska služba, Analiza prijave in vpisa, Študijsko leto 2018/2019, 536 str., februar 2019.
- Vrhovec, A., Naj bo vodja gradnje arhitekt ali gradbeni inženir? <https://www.delo.si/mnenja/gostujoce-pero/naj-bo-vodja-gradnje-arhitekt-ali-gradbeni-inzenir-232152.htm>, Delo, str. 3, 29. 9. 2019.
- ZAID, Zakon o arhitekturni in inženirski dejavnosti, [https://www.uradni-list.si/\\_pdf/2017/Ur/u2017061.pdf](https://www.uradni-list.si/_pdf/2017/Ur/u2017061.pdf), Uradni list RS št. 61/17 z dne 2. 11. 2017.
- ZGO-1, Zakon o graditvi objektov, Uradni list RS, št. 110/02 z dne 18. 12. 2002.
- ZGO-1A, Zakon o spremembah in dopolnitvah Zakona o graditvi objektov, Uradni list RS št. 47/04 z dne 30. 4. 2004.
- ZGO-1B, Zakon o spremembah in dopolnitvah Zakona o graditvi objektov, Uradni list RS št. 126/07 z dne 31. 12. 2007.
- ZGO-1C, Zakon o spremembah in dopolnitvah Zakona o graditvi objektov. Uradni list RS št. 108/09 z dne 28. 12. 2009.
- ZGO-1-NPB16, Zakon o graditvi objektov – neuradno prečiščeno besedilo, <https://zakonodaja.com/zakon/zgo-1>, 2019.
- Žižič, B. (ur.), Arhitektura za ljudi: arhitekturna politika Slovenije, Ministrstvo za kulturo Republike Slovenije, Ljubljana, 44 str., [https://www.gov.si/assets/ministrstva/MK/DEDISCINA/ARHITEKTURA/df0797cb33/Arhitektura\\_za\\_ljudi\\_SLO\\_2018-05-21.pdf](https://www.gov.si/assets/ministrstva/MK/DEDISCINA/ARHITEKTURA/df0797cb33/Arhitektura_za_ljudi_SLO_2018-05-21.pdf), 2018.

# POTRESNA ANALIZA ARMIRANOBETONSKIH STAVB S POENOSTAVLJENIMI NELINEARNIMI MODELI

## SEISMIC ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE BUILDINGS WITH SIMPLIFIED NONLINEAR MODELS

asist. Aleš Jamšek, mag. inž. grad.

ales.jamsek@fgg.uni-lj.si

prof. dr. Matjaž Dolšek, univ. dipl. inž. grad.

matjaz.dolsek@fgg.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo  
in geodezijo

Katedra za konstrukcije in potresno inženirstvo  
Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana

Znanstveni članek

UDK 624.042.7:691.328

**Povzetek** | V prvem delu prispevka predstavimo izboljššan model ribje kosti (model IFB) za potresno analizo pretežno tlorisno simetričnih okvirnih armiranobetonskih (AB) stavb in razvijemo poenostavljen nelinearni model enostavne AB-stenasto-okvirne stavbe, ki poleg modela IFB vključuje še model konzolne stene. Model IFB je glede na konfiguracijo elementov enak osnovnemu modelu ribje kosti, ki je določen s stebrom, na katerega sta v vsaki etaži priključeni še dve gredi. Izboljšava osnovnega modela ribje kosti se nanaša na postopek za določitev lastnosti konstrukcijskih elementov, s katerim lahko na približen način upoštevamo pomembnost konstrukcijskih elementov na potresni odziv stavbe. V drugem delu prispevka analiziramo sposobnost poenostavljenih nelinearnih modelov za potresno analizo. Najprej pokažemo, da je model IFB dovolj natančen za simulacijo etažnih parametrov potresnega odziva štirietažne okvirne AB-stavbe, saj so dobljeni rezultati zelo podobni rezultatom psevdodinamičnega testa in rezultatom potresne analize, ki smo jo izvedli s konvencionalnim nelinearnim modelom AB-stavbe. Sledi še analiza primernosti poenostavljenih nelinearnih modelov za potresno analizo AB-stavb, pri kateri smo obravnavali štirietažno okvirno stavbo, osemetažno okvirno stavbo in osemetažno stenasto-okvirno stavbo. Ugotovili smo, da so uporabljeni poenostavljeni modeli dovolj natančni za izračun potisnih krivulj in poškodovanosti konstrukcijskih elementov na ravni etaž. Uporaba predstavljenih poenostavljenih nelinearnih modelov je trenutno omejena na potresno analizo tlorisno simetričnih stavb z obtežbo le v eni horizontalni smeri.

Ključne besede: model ribje kosti, poenostavljen nelinearni model, model MDOF, armiranobetonska stavba, psevdodinamični test, potisna analiza

**Summary** | In the first part of the paper, we present the improved fish-bone (IFB) model for the seismic analysis of predominantly plan-symmetrical reinforced concrete frame buildings and develop a simplified nonlinear model for the analysis of a simple reinforced concrete (RC) wall-frame building, consisting of the IFB model and a model of a cantilever wall. The configuration of structural elements of the IFB model is equal to that of the basic fish-bone model, which is determined by a column to which beams are connected at both sides and in all storeys. The improvement of the basic fish-bone model refers to a new procedure for the estimation of the parameters of the structural



elements, which allows to approximately account for the effect of the structural elements on the seismic response of a building. In the second part of the paper, we analyse the ability of simplified nonlinear models for seismic analysis. First, we show that the IFB model is sufficiently accurate to simulate the storey-based engineering demand parameters of a four-storey reinforced-concrete frame building, since the obtained results do not differ significantly from the results of the pseudo-dynamic test and the results of the seismic analysis performed with the conventional nonlinear model of RC building. Then follows the analysis of the capability of the simplified nonlinear models for pushover analysis of symmetric RC buildings, where we considered a four-storey RC frame building, an eight-storey frame building and an eight-storey wall-frame building. We found that the simplified models used in the analysis are sufficiently accurate for the calculation of the pushover curves and the storey-based damage assessment of structural elements. The use of the presented simplified nonlinear models is currently limited to the seismic analysis of plan-symmetrical buildings subjected to seismic excitation in one horizontal direction only.

Key words: fish-bone model, simplified nonlinear model, MDOF model, reinforced concrete building, pseudo-dynamic test, pushover analysis

## 1 • UVOD

Za nelinearno potresno analizo armirano-betonskih (AB) stavb se pogosto uporabljajo konvencionalni nelinearni modeli z več prostostnimi stopnjami (MDOF) (angl. *multiple-degree-of-freedom*), kjer se z enim končnim elementom modelira steber, grede ali steno v posamezni etaži. Velik delež stavb sestavlja na stotine konstrukcijskih elementov, zato so nelinearne potresne analize realnih stavb izjemno kompleksne, kar otežuje uporabo nelinearne potresne analize v praksi, še posebej če je treba določiti potresno tveganje portfelja stavb. Pri kompleksnih nelinearnih modelih je problematičen ne le računski čas, temveč tudi slaba konvergenca numeričnega algoritma za izračun odziva. Zaradi tega je bilo razvitih mnogo poenostavljenih nelinearnih MDOF-modelov (npr. (Kilar, 1994), (Nakashima, 2002), (Miranda, 2006), (Kuang, 2011)) in modelov z eno prostostno stopnjo SDOF ((Fajfar 2000), (Gupta, 2000), (Chopra, 2002), (Hatzigeorgiou, 2009)).

Poenostavljeni nelinearni modeli MDOF-stavb se lahko klasificirajo na modele generičnega okvira GF (angl. *generic frame*) in modele ribje kosti FB (angl. *fish-bone*) (slika 1b) ((Ogawa, 1999), (Nakashima, 2002), (Luco, 2003), (Khaloo, 2013)) ter na kontinuirne modele (angl. *continuous model*), kjer sta strižni in upogibni nosilec

povezana s togimi palicami na nivoju etaž ((FEMA 440, 2005), (Miranda, 2006), (Ramirez, 2009), (Kuang, 2011)). Čeprav so poenostavljeni nelinearni modeli računsko učinkoviti, je treba uporabnost teh modelov za potresno analizo še raziskati, saj so razviti z upoštevanjem več predpostavk. Zmanjšanje števila prostostnih stopenj predstavlja prvi izvor negotovosti pri rezultatih poenostavljenih modelov. Drugi izvor negotovosti pa je posledica postopkov za določitev vhodnih parametrov konstrukcijskih elementov poenostavljenih nelinearnih modelov.

Poenostavljeni nelinearni modeli predstavljajo vmesno stopnjo med konvencionalnimi modeli MDOF in modeli z eno prostostno stopnjo SDOF (angl. *single-degree-of-freedom*). Modeli SDOF se uporabljajo večinoma v kombinaciji z modeli MDOF (Fajfar, 2000), saj je direktna določitev vhodnih parametrov modelov SDOF precej negotova. Poleg tega z modelom SDOF simuliramo le osnovni plastični mehanizem (Abdelnaby, 2015), pri čemer se vpliv te predpostavke lahko približno ovrednoti s korekcijskimi faktorji (Kreslin, 2012).

Če je treba analizirati portfelj stavb, imajo poenostavljeni nelinearni modeli stavb lahko določeno prednost pred ostalimi modeli, saj njihove lastnosti določimo di-

rektno, brez uporabe modelov MDOF, poleg tega so ti modeli sposobni simulirati še nekatere pomembne plastične mehanizme višjega reda.

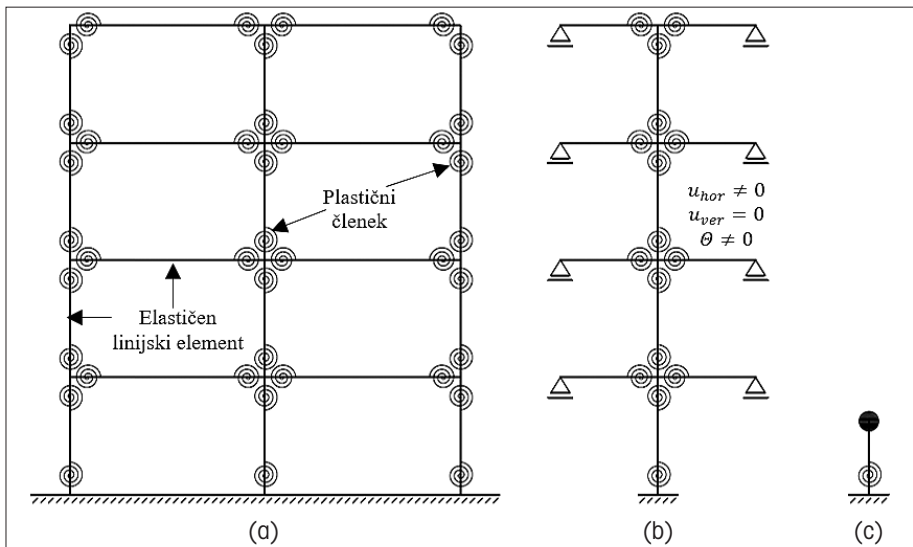
V prvem delu prispevka predstavimo konvencionalni nelinearni model za potresno analizo AB-stavb (model MDOF) in izboljšan model ribje kosti (IFB) za analizo odziva okvirnih AB-stavb. Nato definiramo še poenostavljen nelinearni model za analizo enostavne stenasto-okvirne stavbe, ki vključuje model IFB in konzolno steno. V tem primeru je nelinearni model konstrukcije sestavljen iz makroelementov, in sicer na podoben način, kot je bil uporabljen pri določitvi psevdomatematičnega modela za poenostavljeno nelinearno statično analizo s programom NEAVEK ((Kilar, 1994), (Kilar, 1996)). V drugem delu članka ocenimo sposobnost modela IFB za potresno analizo AB-stavb tako, da rezultate odziva primerjamo z rezultati psevdo-dinamičnega testa štirietažne armiranobetonske florisno simetrične okvirne stavbe, ki je bila preizkušena v naravnem merilu. Dodatno prikažemo še primerjavo z rezultati potresne analize modela MDOF. Poleg tega razvijemo poenostavljene nelinearne modele za štirietažno in osemetažno okvirno stavbo ter za osemetažno stenasto-okvirno stavbo, ki jih nato uporabimo za potresno analizo in ocene poškodovanosti po stavbi za izbrana mejna stanja. Rezultate poenostavljenih modelih primerjamo z rezultati modelov MDOF. V sklepu izpostavimo glavne ugotovitve študije.

## 2 • OPIS MODELOV MDOF IN POENOSTAVLJENIH NELINEARNIH MODELOV

### 2.1 Opis lastnosti in predpostavk konvencionalnega modela MDOF

Za definicijo modela MDOF (slika 1a) je treba pridobiti informacije o geometriji konstrukcijskih elementov stavbe v tlorisu in po višini, armaturne načrte, podatke o projektiranih ali vgrajenih materialih, mase etaž in gravitacijske obtežbe. Upošteva se koncentrirana plastičnost na koncu konstrukcijskih elementov (slika 1a). Pri definiciji ovojnic plastičnih členkov gred in stebrov predpostavimo, da se za analizo odnosa moment-ukrivljenost posameznega prečnega prereza privzame formulacija odnosa napetost-deformacija po

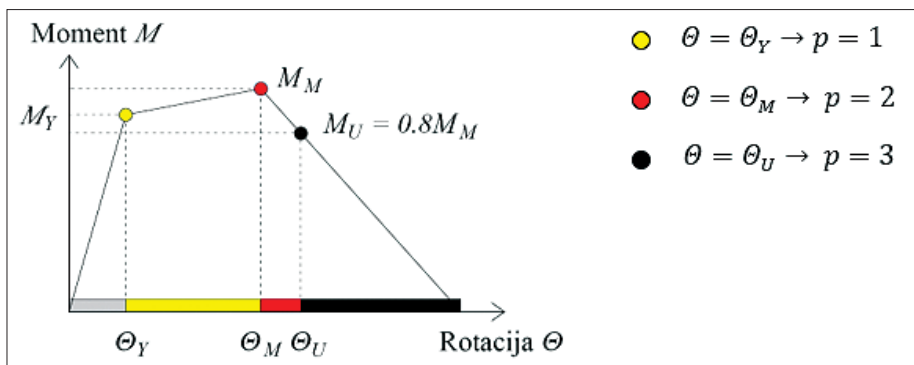
2) ((Fajfar, 2006), (Haselton 2007), (Dolšek 2010)). Ta odnos se lahko definira s tremi karakterističnimi točkami ( $p=1, 2, 3$ ), ki ustrezajo momentu na meji tečenja armature  $M_Y$ , momentu pri doseženi upogibni nosilnosti prečnega prereza  $M_M$  (angl. *max*) in momentu pri mejni rotaciji  $M_U$  (angl. *ultimate*), ki je definiran pri 20-% padcu upogibne nosilnosti. Tako določenim karakterističnim momentom ustrezajo karakteristične rotacije  $\theta_Y$ ,  $\theta_M$  in  $\theta_U$ . Karakteristična upogibna momenta  $M_Y$  in  $M_M$  smo določili z analizami moment-ukrivljenost prečnih prerezov, pri čemer smo upoštevali povprečno trdnost materiala in Evrokodov



Slika 1 • Shema (a) modela okvira z več prostostnimi stopnjami (MDOF) in (b) izboljšanega modela ribje kosti (IFB) ter (c) modela z eno prostostno stop-njo (SDOF).

Evrokodu 2 (CEN, 2004a). Nadalje upoštevamo še, da se lahko ovojnice plastičnega članka definirajo kot trilinearni odnos (slika

model za odvisnost med napetostjo in deformacijo betona in jekla (CEN, 2004a). Za izračun upogibnih momentov  $M_Y$  in  $M_M$  v



Slika 2 • Trilinearni odnos moment-rotacija s tremi karakterističnimi točkami, potrebnimi za njegovo definicijo.

stebrih upoštevamo osne sile zaradi gravitacijske obtežbe na konstrukcijo, medtem ko se v gredah zanemari vpliv osnih sil. Za model sodelujoče širine pasnic gred uporabimo model v skladu z Evrokodom 2 (CEN, 2004a), efektivno upogibno togost elementov določimo približno, in sicer z upoštevanjem polovičnih vrednosti elastične togosti nerazpokanih konstrukcijskih elementov, kot to dopušča Evrokod 8 (CEN, 2004b).

Rotacijo na meji tečenja armature  $\theta_Y$  smo določili z upoštevanjem linearne ukrivljenosti vzdolž konstrukcijskega elementa. Upoštevamo še, da imajo spreminjajoče se osne sile v konstrukcijskih elementih med analizami relativno majhen vpliv na odziv modela stavbe in da se ničelni upogibni momenti pojavijo na polovici dolžine posameznega elementa (Fajfar, 2006).

Za določitev karakterističnih rotacij gred  $\theta_U$  smo uporabili standard EC8-3 (CEN, 2005b), karakteristično rotacijo  $\theta_M$  pa smo nato izračunali iz ocenjene vrednosti 3,5 med rotacijo pri popolni porušitvi  $\theta_{TC}$  ( $M \approx 0$ ) in rotacijo  $\theta_M$ . Karakteristične rotacije  $\theta_M$  in  $\theta_U$  stebrov smo izračunali z metodo CAE (angl. *conditional average estimator*), ki je bila predlagana za določitev karakterističnih rotacij za pravokotne AB-stebre iz široke baze eksperimentalnih rezultatov (Peruš, 2006). Nelinearno obnašanje vozlišč in strižno obnašanje v analizah zanemarimo, kar pa bi lahko dodatno približno upoštevali z modifikacijo odnosa moment-rotacija (Celarec, 2013). Predpostavimo, da so plošče toge v svoji ravnini. V analizah upoštevamo vpliv efekta P-delta. Čeprav konvencionalni modeli MDOF temeljijo na več predpostavkah, je bilo večkrat potrjeno, da so dovolj natančni za simulacijo potresnega odziva stavb v območju do mejnega stanja blizu porušitve (npr. (Haselton, 2008), (Dolšek, 2009)).

Opisani modeli MDOF so bili največkrat uporabljeni za potresno analizo okvirnih AB-stavb, vendar se podoben princip uporablja tudi za modeliranje mešanih sistemov AB-stavb, kjer se poleg okvirov v stavbi pojavljajo še konzolne stene ali AB-jedra. V primeru, da je stena dimenzionirana po standardu Evrokod, se model konzolne stene običajno poenostavi tako, da je materialna nelinearnost upoštevana le s plastičnim členkom ob vpetju stene v temelj.

Za konzolno steno osemetažne stavbe z mešanimi konstrukcijskim sistemom (Lazar Sinković, 2018), ki jo obravnavamo v nadalje-

vanju, smo plastične členke upoštevali v vsaki etaži tik nad ploščo (Kosič, 2014).

## 2.2 Definicija modela IFB za primer okvirne stavbe

Model IFB je glede na konfiguracijo konstrukcijskih elementov enak modelu FB ((Ogawa, 1999), (Luco, 2003)), slika 1b. Za definicijo modela IFB je v splošnem potreben enak nabor podatkov kot za konvencionalni model MDOF.

Glede na predpostavke modela MDOF je treba pri definiciji modela IFB vpeljati dodatne predpostavke, ki se nanašajo na definicijo togosti stebrov in gred modela IFB, v nadaljevanju stebrov IFB in gred IFB, ter na definicijo odnosa moment-rotacija plastičnih členkov stebrov IFB in gred IFB. Začetna togost modela IFB je določena z dolžinami konstrukcijskih elementov modela IFB, efektivnimi ploščinami prečnih prereзов in vztrajnostnimi momenti. Za določitev dolžine stebrov IFB smo uporabili višino etaž stavb, medtem ko smo vztrajnostni moment stebra IFB,  $I_{c,i}^F$ , določili kot seštevek vztrajnostnih momentov vseh stebrov v  $i$ -ti etaži okvirja (Nakashima, 2002):

$$I_{c,i}^F = \sum_{j=1}^m I_{c,i,j}^F, \quad (1)$$

kjer je  $I_{c,i,j}^F$  vztrajnostni moment  $j$ -tega stebra (oznaka  $c$  – angl. column) v  $i$ -ti etaži,  $m$  predstavlja število stebrov v  $i$ -ti etaži, indeks  $F$  pa ponazarja, da se vztrajnostni moment nanaša na model IFB (slika 1b). Prečni prezek stebrov IFB in gred IFB definiramo po analogiji enačbe (1).

Ker se lahko dolžine gred v posamezni smeri analizirane stavbe precej razlikujejo, smo za dolžino grede IFB,  $L_{b,i}^F$ , upoštevali povprečno dolžin gred etaž za obravnavano smer obtežbe:

$$L_{b,i}^F = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{n} (\sum_{k=1}^n L_{b,i,k}), \quad (2)$$

kjer je  $L_{b,i,k}$  dolžina  $k$ -te grede (oznaka  $b$  – angl. beam) v  $i$ -ti etaži,  $n$  pa število vseh gred v obravnavani smeri obtežbe. Pri določitvi dolžine gred IFB smo tako upoštevali, da se le-te podprejo na polovici dolžine s podporami, ki preprečujejo le vertikalne pomike, s čimer smo upoštevali predpostavko o ničelnem momentu na polovici njihovih dolžin (slika 1b).

Vpliv različnih dolžin gred etaž smo upoštevali tudi pri definiciji vztrajnostnih momentov gred IFB,  $I_{b,i}^F$ :

$$I_{b,i}^F = \sum_{k=1}^n I_{b,i,k} \cdot \frac{2L_{b,i}^F}{L_{b,i,k}}, \quad (3)$$

kjer  $I_{b,i,k}$  predstavlja vztrajnostni moment  $k$ -te grede v  $i$ -ti etaži.

Gravitacijsko obtežbo na model IFB smo definirali kot točkovno obtežbo v vozliščih gred

in stebrov in kot enakomerno porazdeljeno obtežbo na gredah IFB po analogiji definiranja obtežb za model MDOF. Točkovne sile na  $i$ -ti steber IFB smo definirali kot seštevek točkovnih sil na stebre  $i$ -te etaže analizirane okvirne stavbe. Določitev enakomerne porazdeljene obtežbe  $q_{b,i}^F$  gred IFB  $i$ -te etaže ni tako trivialna, saj moramo upoštevati vpliv prerazporeditve obremenitve zaradi podpore gred IFB, ki preprečuje vertikalne pomike, in plastičnega členka na drugi strani gred IFB. Zaradi tega vpliva se enakomerno porazdeljena obtežba gred IFB določi kot:

$$q_{b,i}^F = c_q^F \frac{q_i \cdot A_i}{L_{b,i}^F}, \quad (4)$$

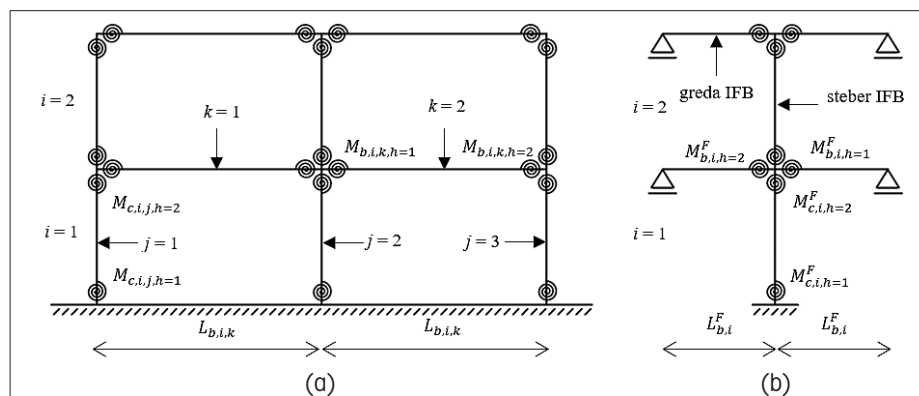
kjer  $q_i$  predstavlja enakomerno zvezno obtežbo po plošči,  $A_i$  vplivno površino obtežbe na grede  $i$ -te etaže stavbe, ki se upoštevajo pri določitvi obravnavane grede IFB, in  $c_q^F$  koeficient prerazporeditve obtežbe na obravnavano grede IFB. Ta koeficient je enak 8/9 za primer, ko je začetna togost plastičnega členka grede IFB enaka začetni togosti grede IFB. V primeru,

Za nelinearno potresno analizo je pomemben predvsem postopek za določitev lastnosti plastičnih členkov stebrov in gred IFB. Odnos moment-rotacija stebrov in gred IFB smo določili s trilinearim odnosom (slika 2), ki se uporabi tudi za stebre in grede modela MDOF. Določitev vrednosti karakterističnih momentov je precej trivialen  $p$ -ti karakteristični moment  $h$ -tega plastičnega členka v  $i$ -ti etaži stebra IFB,  $M_{c,i,h,p}^F$  oziroma grede IFB,  $M_{b,i,h,p}^F$ , se določi kot seštevek ustreznih karakterističnih momentov plastičnih členkov stebrov oziroma gred v posamezni etaži:

$$M_{c,i,h,p}^F = \sum_{j=1}^m M_{c,i,j,h,p}^F, \quad (5)$$

$$M_{b,i,h,p}^F = \sum_{k=1}^n M_{b,i,k,h,p}^F, \quad (6)$$

kjer sta  $M_{c,i,j,h,p}^F$  in  $M_{b,i,k,h,p}^F$   $p$ -ta karakteristična momenta  $h$ -tega plastičnega členka  $j$ -tega stebra oziroma  $k$ -te grede v  $i$ -ti etaži okvirja. Za boljšo preglednost smo vse indekse prikazali na sliki 3, kjer je prikazan primer modela MDOF za dvoetažni okvir z dvema poljema in primer modela IFB tega okvirja.



Slika 3 • Prikaz indeksov plastičnih členkov stebrov in gred ter dolžin gred za (a) model MDOF in za (b) model IFB.

da bi bila začetna togost ( $k_{zacc} = M_y/\theta_y$ ) plastičnega členka grede IFB relativno zelo nizka oziroma visoka, bi bil koeficient  $c_q^F$  enak 1,0 oziroma 0,8. Kot obrazložitev koeficienta  $c_q^F$  lahko navedemo primer, kjer bi bila začetna togost plastičnega členka grede IFB relativno zelo majhna. V tem primeru lahko grede IFB idealiziramo s prostoležečim nosilcem. Zato bi bil  $c_q^F = 1,0$ . V drugem skrajnem primeru bi bila začetna togost plastičnega členka grede IFB relativno zelo velika, kar posledično pomeni, da bi togost grede IFB lahko modelirali z nosilcem, ki je togo vpet na eni strani in členkasto podprt na drugi strani. V tem primeru se več obtežbe prenese na stran vpete podpore. Zato bi bilo treba pri določitvi obtežbe na grede upoštevati redukcijo obtežbe s koeficientom  $c_q^F = 0,8$ .

Pri določitvi karakterističnih rotacij elementov modela IFB moramo opozoriti, da se lahko karakteristične rotacije kot tudi karakteristični momenti stebrov in gred v posamezni etaži precej razlikujejo od stebra do stebra in od grede do grede. Za sodobne okvirne stavbe, ki so obravnavane v tej študiji, je upogibna nosilnost stebrov večja od upogibne nosilnosti gred, zato je dovolj natančno, da se vpliv variabilnosti gred oziroma stebrov upošteva le pri določitvi karakterističnih rotacij gred IFB oziroma stebrov IFB. Tako smo določili karakteristične rotacije plastičnih členkov stebrov IFB,  $\theta_{c,i,h,p}^F$ , in gred IFB  $\theta_{b,i,h,p}^F$  kot utežena povprečja karakterističnih rotacij ustreznih plastičnih členkov stebrov in gred obravnavane etaže stavbe:



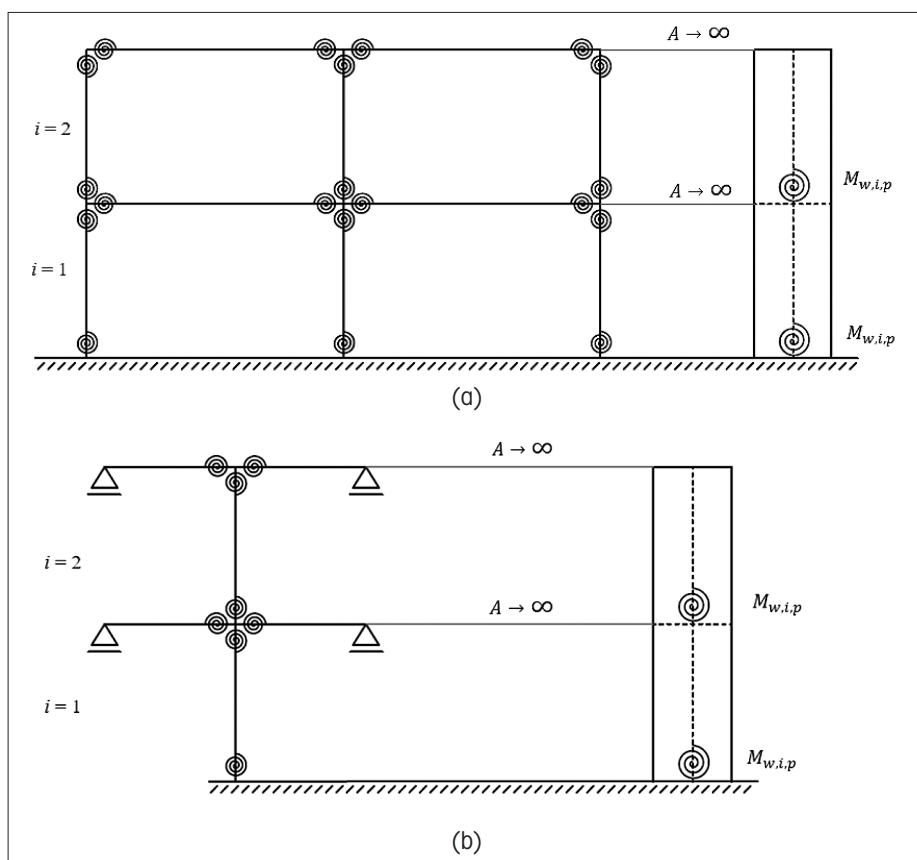
$$\theta_{c,i,h,p}^F = \frac{\sum_{j=1}^m (M_{c,i,j,h,p} \cdot \theta_{c,i,j,h,p})}{\sum_{j=1}^m M_{c,i,j,h,p}} \quad (8)$$

$$\theta_{b,i,h,p}^F = \frac{\sum_{k=1}^n (M_{b,i,k,h,p} \cdot \theta_{b,i,k,h,p})}{\sum_{k=1}^n M_{b,i,k,h,p}}, \quad (9)$$

kjer sta  $\theta_{c,i,j,h,p}$  in  $\theta_{b,i,k,h,p}$   $p$ -ti karakteristični rotaciji za  $h$ -ti plastični členek  $j$ -tega stebra oziroma  $k$ -te grede v  $i$ -ti etaži analizirane stavbe. Za uteži upoštevamo ustrezne karakteristične momente stebrov  $M_{c,i,j,h,p}$  oziroma gred  $M_{b,i,k,h,p}$ . Upoštevanje uteži pri modeliranju karakterističnih rotacij stebrov IFB in gred IFB je posledica dejstva, da je tudi za plastične členke modela IFB privzet trilinearni odnos moment-rotacija.

### 2.3 Definicija poenostavljenega nelinearnega modela za primer stenasto-okvirne stavbe

Pri definiciji poenostavljenega nelinearnega modela stenasto-okvirne stavbe upoštevamo lastnosti in predpostavke modela IFB za okvirje, za konzolne stene pa iste lastnosti, kot smo jih definirali za model MDOF, kjer upoštevamo en plastični členek na dnu posamezne etaže za konzolne stene ( $M_{w,i,p}$ ) (Kosič, 2014). Enako kot za model MDOF tudi za poenostavljen nelinearni model upoštevamo toge diafragme na ravni etaž, kar pomeni, da vozlišča stebrov in gred IFB povežemo z zelo togimi palicami ( $A \rightarrow \infty$ ) z vozlišči konzolne stene na koti etaž (slika 4).



Slika 4 • Model MDOF, sestavljen iz modela okvirja in konzolne stene, (a) in poenostavljen nelinearni model, sestavljen iz modela IFB za okvir in konzolne stene (b) za primer dvoetažne stenasto-okvirne stavbe.

## 3 • OPIS ANALIZIRANIH STAVB

V študiji obravnavamo tri stavbe, ki so pretežno pravilne po florisu (slika 5). Osnovni podatki o stavbah in načinu projektiranja so prikazani v preglednici 1. Štirietažna armiranobetonska stavba 4F je bila psevdodinamično preizkušena v naravnem merilu ((Negro, 1996), (Fardis, 1996)). Projektirana je bila za visoko stopnjo duktilnosti (DCH,  $q=5$ ) v skladu s predstandardom Evrokoda 8, z upoštevanjem projektnega pospeška tal (PGA) 0,3 g ((Fardis, 1996), (Negro, 1996)). Pri modeliranju smo upoštevali izmerjene vrednosti trdnosti materiala. Tlačna trdnost betona je precej variirala (med 32 MPa in 56 MPa), za armaturno jeklo pa smo na osnovi izmerjenih vrednosti trdnosti jekla predpostavili povprečno trdnost na meji tečenja (580 MPa). Predpostavili smo enake mase, kot so bile uporabljene v psevdodinamičnem eksperimentu (Dolšek, 2010). Potresno analizo smo izvedli za enak akcelrogram, kot je bil predpisan za psevdodinamični

test. Z nelinearno dinamično analizo smo simulirali oba testa, in sicer za največji pospešek tal PGA 0,12 g (prvi test), ki mu je sledil test za največji pospešek tal PGA 0,45 g (drugi test). Elastični spekter pospeškov uporabljenega akcelrograma se je približno ujemal z Evrokodovim elastičnim spektrom pospeškov. Stavba je bila analizirana v smeri Y (slika 5a). Vpliv viskoznega dušenja smo

zanemarili, kot je bilo upoštevano v psevdodinamičnem testu (Fardis, 1996).

Naslednja analizirana stavba je florisno simetrična osemetažna armiranobetonska okvirna stavba (8F, slika 5b) (Lazar Sinkovič, 2018). Projektirana je bila v skladu z Evrokodi ((CEN, 2004a), (CEN, 2004b)) za srednjo stopnjo duktilnosti. Stavba je nepravilna po višini, ker je višina spodnjih dveh etaž dosti višja kot višina preostalih (slika 5b). V analizah smo upoštevali srednje vrednosti tlačnih trdnosti betona, ki po stan-

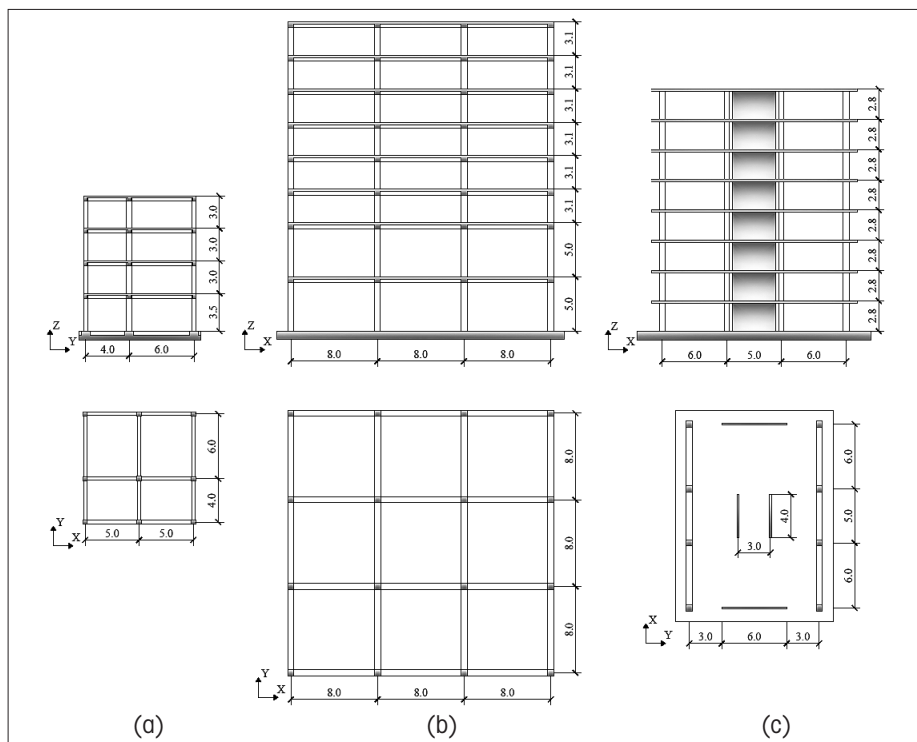
| Stavba | Projektirano v skladu s/z | Pravilnost           | Beton, jeklo za armaturo | $a_{gR}$ (g) |
|--------|---------------------------|----------------------|--------------------------|--------------|
| 4F     | preEC8, DCH               | po florisu in višini | C25/30, Temp-core B500   | 0,30         |
| 8F     | EC8, DCM                  | po florisu           | C30/37, B500B            | 0,25         |
| 8D     | EC8, DCM                  | po florisu in višini | C30/37, B500B            | 0,25         |

Preglednica 1 • Osnovni podatki o analiziranih stavbah, načinu projektiranja in referenčni največji pospešek tal  $a_{gR}$  za tip tal A (CEN, 2004b).

dardu za predpisano beton znašajo 38 MPa (CEN, 2004a), in srednje vrednosti trdnosti jekla na meji tečenja, ki smo jih ocenili na 575 MPa (CEN, 2005a). Vse analize smo izvedli v smeri X.

Analizirali smo tudi osemetažno stavbo z mešanim konstrukcijskim sistemom (8D, slika 5c) ((Kosič, 2014), (Lazar, 2014), (Lazar Sinkovič, 2018)). Stavba je sestavljena iz dveh okvirjev v smeri X in dveh konzolnih sten v vsaki glavni translatorski smeri. Projektirana je bila v skladu z Evrokodi za srednjo stopnjo duktilnosti DCM ((CEN, 2004a), (CEN, 2004b)). Predpisano material je ustrezal materialu stavbe 8F. Analizo smo izvedli v X-smeri.

Vse modele analiziranih stavb smo razvili v programu Opensees (McKenna, 2011) v kombinaciji s PBEE Toolboxom (Dolšek, 2010) in Matlabom (MathWorks, 2016), ki sedaj podpira definicijo modelov IFB. Modele konzolnih sten smo definirali PBEE Toolbox (Kosič, 2014), v katerem so dodatne skripte in funkcije za analizo konzolnih sten.



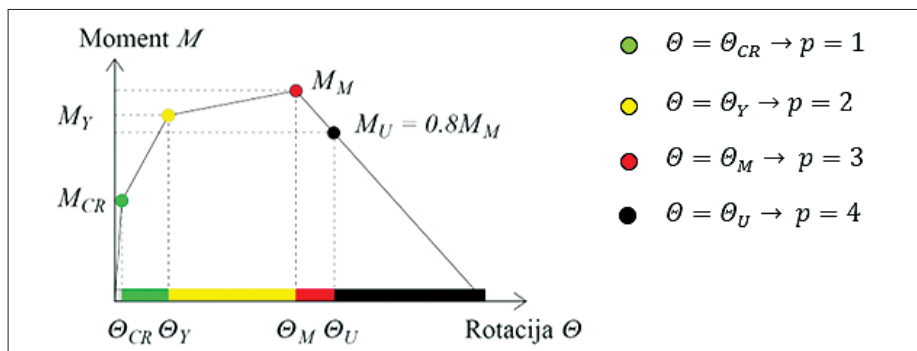
Slika 5 • Prečni prerezi in tlorisi analiziranih stavb: (a) 4F, (b) 8F, (c) 8D.

#### 4 • SIMULACIJA PSEUDO-DINAMIČNEGA TESTA ŠTIRIETAŽNE ARMIRANOBETONSKE STAVBE

Za namen simulacije pseudo-dinamičnega testa smo stavbo 4F modelirali z modelom IFB in modelom MDOF, ki smo ga razvili neodvisno, ampak z enakimi predpostavkami, kot so bile upoštevane v predhodni študiji (Dolšek, 2010). Pripravili smo dva modela MDOF. Prvi model upošteva trilinearni odnos moment-rotacija v plastičnih členkih (slika 2), kot je definirano v poglavju 2. Drugi model MDOF je nekoliko izboljššan, saj je predstavljen štiriliniarni odnos moment-rotacija v členkih konstrukcijskih elementov. Z dodatno karakteristično točko (angl. *cracking* – CR) smo simulirali pojav razpok v betonskem prerezu ((Fajfar, 2006), (Dolšek, 2010)) (slika 6), kjer karakteristični upogibni moment  $M_{CR}$  ustreza stanju, ko napetosti na robu betonskega prereza presegajo nazadnje trdnost betona, pripadajoča rotacija  $\theta_{CR}$  pa je določena enako kot v primeru  $\theta_Y$ , pri čemer je upoštevana le nižja vrednost obremenitve (tj.  $M_{CR}$  namesto  $M_Y$ ). Posledično je začetna togost drugega modela večja, saj se pri prvem modelu (slika 2) upošteva efektivna začetna

togost, ki znaša približno polovico togosti, določene na osnovi nerazpokanih prerezo. Določitev lastnosti plastičnih členkov

sliki 7, in sicer za 2. etažo stavbe 4F, kjer so se pojavile največje poškodbe stavbe. Ugotovimo, da so rezultati modela IFB in MDOF zelo podobni. Ker je v teh modelih upoštevana efektivna začetna togost, se izkaže, da so zamiki iz prvega pseudo-dinamičnega testa precenjeni za več kot 170 % (Dolšek, 2010), kar je posledica



Slika 6 • Štiriliniarni odnos moment-rotacija s štirimi karakterističnimi točkami, potrebnimi za njegovo definicijo.

stebrov IFB in gred IFB za štiriliniarni odnos moment-rotacija je ekvivalenten opisanemu postopku za trilinearni odnos.

##### 4.1 Rezultati za model s trilinearnimi ovojnicami plastičnih členkov

Odnos etažna prečna sila-etažni zamik in časovni potek etažnih zamikov je prikazan na

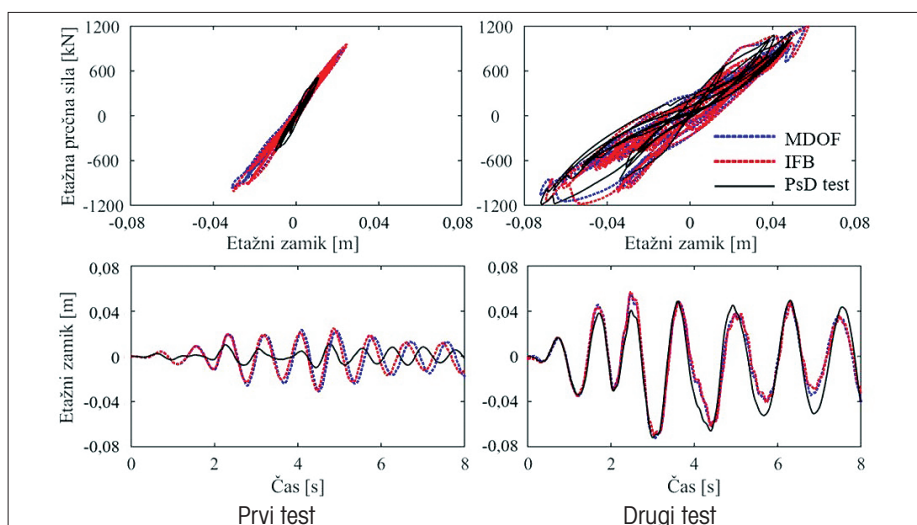
prevelike začetne podajnosti modela. Ta poenostavitev nima bistvenega vpliva za simulacijo odziva drugega testa, saj oba modela precej dobro simulirata odziv 2. etaže obravnavane stavbe.

Primerjave za preostale etaže kažejo, da je natančnost modela IFB podobna za

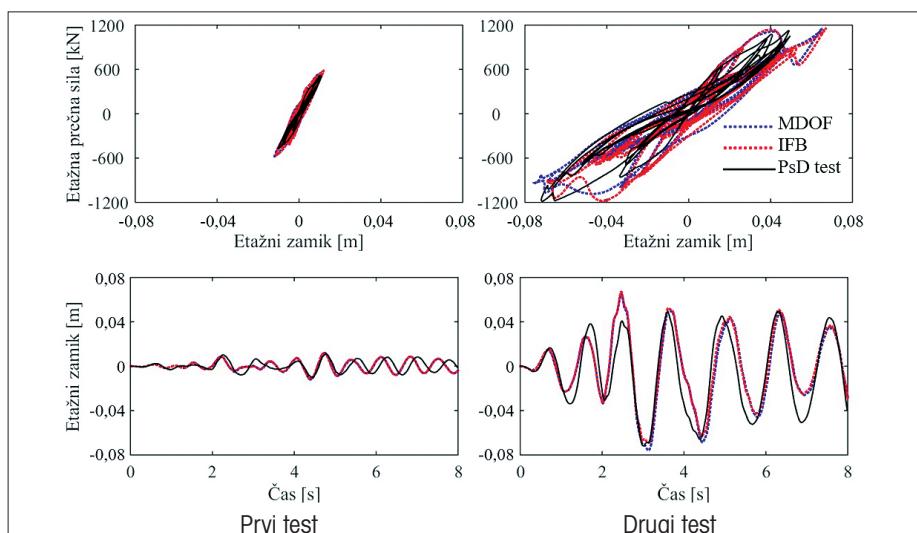
vse etaže stavbe 4F. Velikostni red etažnih zamikov v 1. etaži je podoben tistim iz 2. etaže, medtem ko so deformacije 3. in 4. etaže bistveno manjše. Relativna napaka modela IFB za maksimalen etažni zamik znaša za prvi test manj kot 5% v primerjavi z odzivom modela MDOF. Za drugi test pa znaša relativna napaka etažnih zamikov in prečnih sil modela IFB manj kot 5% v primerjavi z odzivom modela MDOF in rezultati psevdo-dinamičnega testa. To kaže, da je model IFB verjetno dovolj natančen za simulacijo globalnega odziva stavbe 4F v primeru močnega potresa (drugi test), za primere šibkejših potresov (prvi test) pa je preveč podajen, vendar se podoben problem pojavi tudi pri modelu MDOF (slika 7).

#### 4.1 Rezultati za model s štirilinerarnimi ovojnicami moment-rotacija

Za drugi model MDOF in model IFB upoštevamo štirilinerarne ovojnice moment-rotacija (slika 6). Tudi v tem primeru lahko ugotovimo, da so rezultati modela IFB in MDOF zelo podobni, pri čemer je izboljšana simulacija za prvi test. Nekoliko slabša je napoved potresnega odziva stavbe za drugi test (slika 8). Primerjave relativnih napak maksimumov etažnih zamikov in prečnih sil modela IFB znaša za oba testa manj kot 9% v primerjavi z modelom MDOF in manj kot 8% v primerjavi z rezultati psevdo-dinamičnega testa.



Slika 7 • Etažna prečna sila v odvisnosti od etažnega zamika in časovni potek etažnih zamikov 2. etaže za model IFB in MDOF s trilinearnimi ovojnicami ter pripadajoči rezultati psevdo-dinamičnega (PsD) testa.



Slika 8 • Etažna prečna sila v odvisnosti od etažnega zamika in časovni potek etažnih zamikov 2. etaže za model IFB in model MDOF s štirilinerarnimi ovojnicami ter pripadajoči rezultati psevdo-dinamičnega (PsD) testa.

## 5 • POTISNE ANALIZE IN MEJNA STANJA POŠKODOVANOSTI ZA IZBRANE ARMIRANOBETONSKE STAVBE

Sposobnost poenostavljenih nelinearnih modelov za potresno analizo smo testirali tudi s potisno analizo. V tem primeru smo uporabili le modele s trilinearno ovojnico moment-rotacija (slika 2). Obravnavamo vse tri stavbe: 4F, 8F in 8D.

Poškodovanost opišemo s tremi globalnimi mejnimi stanji poškodovanosti LS1, LS2, LS3 (angl. limit-state), ki so neposredno povezani s

karakterističnimi rotacijami stebrov (oz. sten) poenostavljenega nelinearnega modela ali modela MDOF. Pri definiciji mejnih stanj za okvirni stavbi smo upoštevali, da je eno od treh globalnih mejnih stanj v modelu IFB ( $L-Sp^p$ ) doseženo, ko prvi plastični členek stebra IFB doseže eno od treh karakterističnih rotacij ( $p = 1, 2, 3$ )  $\theta_Y, \theta_M$  in  $\theta_U$ . Ker model IFB nima možnosti direktnega določanja poškodovanosti posameznih elementov stavbe, smo

mejna stanja modela MDOF ( $LSp$ ) prav tako definirali na ravni etaže. Na ta način lahko obravnavamo nastop in razvoj različnih porušnih mehanizmov na ravni etaž, nastop katerih se je preučevalo pri analizah okvirjev s pseudomatematičnim modelom v programu NEAVEK ((Kilar, 1994), (Kilar, 1996)).

Privzeli smo, da je mejno stanje doseženo, ko uteženo povprečje rotacij za spodnje ( $h = 1$ ) ali zgornje ( $h = 2$ ) plastične členke stebrov doseže ali preseže uteženo povprečje karakterističnih rotacij za izbrano mejno stanje ( $p = 1, 2, 3$ ) v stebrih modela MDOF. Za lažje razumevanje prikazujemo še matematičen



zapis pogoja za pojav mejnega stanja za model IFB in model MDOF:

$$\theta_{c,i,h,D}^F \geq \theta_{c,i,h,p}^F \rightarrow LSp^F \quad (10)$$

$$\frac{\sum_{j=1}^m (M_{c,i,j,h,D} \cdot \theta_{c,i,j,h,D})}{\sum_{j=1}^m M_{c,i,j,h,D}} \geq \frac{\sum_{j=1}^m (M_{c,i,j,h,p} \cdot \theta_{c,i,j,h,p})}{\sum_{j=1}^m M_{c,i,j,h,p}} = \theta_{c,i,h,p}^F \rightarrow LSp, \quad (11)$$

kjer je  $\theta_{c,i,h,D}^F$  dosežena rotacija v  $h$ -tem plastičnem členu  $i$ -tega stebra IFB,  $\theta_{c,i,h,p}^F$  je pripadajoča karakteristična rotacija za  $p$ -to mejno stanje ( $p = 1, 2, 3$ ),  $M_{c,i,j,h,D}$  in  $\theta_{c,i,j,h,D}$  sta dosežen moment in rotacija v  $h$ -tem plastičnem členu  $j$ -tega stebra v  $i$ -ti etaži modela MDOF,  $M_{c,i,j,h,p}$  in  $\theta_{c,i,j,h,p}$  pa sta pripadajoči karakteristični momenti in rotacije za  $p$ -to mejno stanje. Če sta pogoja v enačbah (10) in (11) izpolnjena, se pojavi  $p$ -to globalno mejno stanje v modelu IFB ( $LSp^F$ ) in modelu MDOF ( $LSp$ ).

Zgornji kriterij za mejna stanja uporabimo tudi za stenasto-okvirne stavbe. Ker je konzolna stena modela IFB in modela MDOF enaka, v tem primeru uporabimo enak kriterij za določitev mejnega stanja na steni (tj. po analogiji z enačbo (10)). Nadalje upoštevamo, da je globalno mejno stanje stenasto-okvirne stavbe doseženo takrat, ko je lokalno mejno stanje doseženo bodisi v okvirju bodisi v steni.

### 5.1 Potisne analize in dosežena globalna mejna stanja

Potisne analize smo izvedli le za eno smer potresne obtežbe, in sicer za stavbo 4F v smeri Y, v isti smeri, v kateri je bil izveden psevdo-dinamični test, za stavbi 8F in 8D pa v smeri X. Potisne analize smo izvedli za modalno razporeditev sil. Prijemališče horizontalnih sil v posamezni etaži je bil za model MDOF definiran v centru mas, za model IFB pa v vozlišču gred in stebrov IFB.

Na osnovi prikazanih rezultatov (slika 9) sklepamo, da je model IFB dovolj natančen za določitev potisnih krivulj in karakterističnih točk, ki določajo globalna mejna stanja poško-

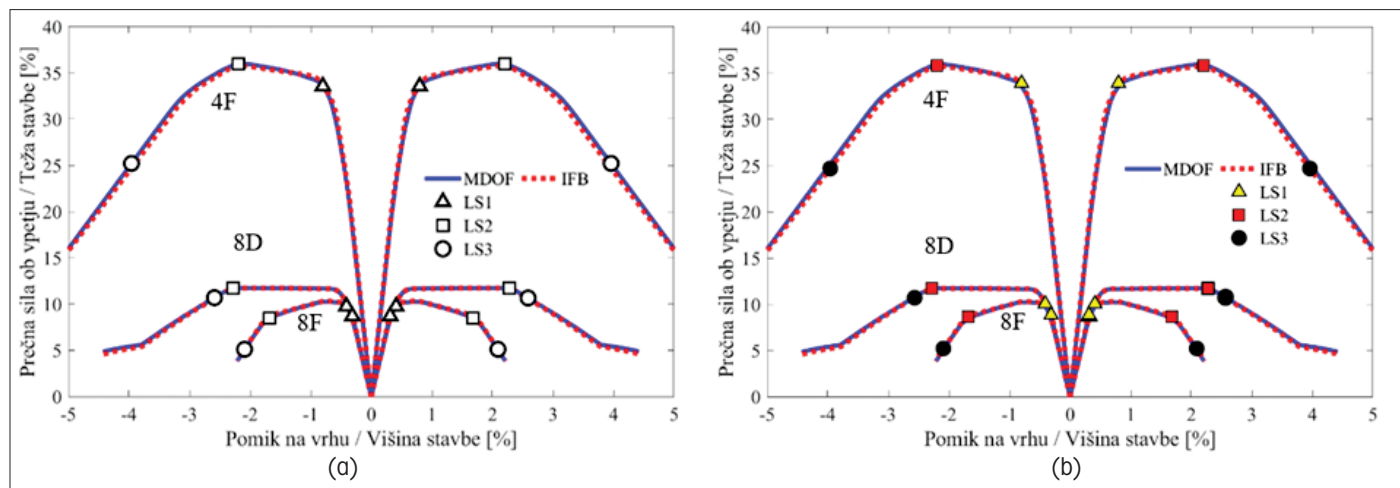
dovanosti. Za kvantitativno primerjavo smo izračunali še relativno napako med parametri potresnega odziva modela IFB in modela MDOF, ki je prikazana v preglednicah 2 in 3.

| Stavba | $T_1$ (s) | $T_1^f$ (s) | Relativna napaka (%) | $F/W$ (%) | Relativna napaka (%) |
|--------|-----------|-------------|----------------------|-----------|----------------------|
| 4F     | 0,80      | 0,79        | -1 %                 | 36 %      | -0 %                 |
| 8F     | 1,76      | 1,77        | +1 %                 | 10 %      | +1 %                 |
| 8D     | 1,27      | 1,26        | +1 %                 | 12 %      | -0 %                 |

Preglednica 2 • Osnovni nihajni časi in razmerje med nosilnostjo in težo za modele IFB in MDOF za stavbe 4F, 8F in 8D ter pripadajoče relativne napake modela IFB v primerjavi z rezultati modela MDOF.

|    | Mejno stanje | Zamik etaže (/) |        |                      | Pomik na vrhu stavbe (m) |       |                      |
|----|--------------|-----------------|--------|----------------------|--------------------------|-------|----------------------|
|    |              | IFB             | MDOF   | Relativna napaka (%) | IFB                      | MDOF  | Relativna napaka (%) |
| 4F | LS1          | 1,1 %           | 1,1 %  | +1 %                 | 0,10                     | 0,10  | 0 %                  |
|    | LS2          | 3,3 %           | 3,2 %  | +1 %                 | 0,28                     | 0,28  | 0 %                  |
|    | LS3          | 6,7 %           | 6,7 %  | +0 %                 | 0,50                     | 0,50  | 0 %                  |
| 8F | LS1          | 0,82 %          | 0,82 % | +0 %                 | 0,12                     | 0,12  | 0 %                  |
|    | LS2          | 4,2 %           | 4,2 %  | +0 %                 | 0,48                     | 0,48  | 0 %                  |
|    | LS3          | 5,6 %           | 5,6 %  | +0 %                 | 0,59                     | 0,59  | 0 %                  |
| 8D | LS1          | 0,37 %          | 0,37 % | +0 %                 | 0,070                    | 0,070 | 0 %                  |
|    | LS2          | 2,5 %           | 2,5 %  | +0 %                 | 0,55                     | 0,55  | 0 %                  |
|    | LS3          | 3,1 %           | 3,1 %  | +0 %                 | 0,68                     | 0,68  | 0 %                  |

Preglednica 3 • Največji zamiki etaž in pomiki na vrhu stavbe za vsa tri globalna mejna stanja modela IFB in modela MDOF za vse obravnavane stavbe ter pripadajoče relativne napake modela IFB v primerjavi z rezultati modela MDOF.



Slika 9 • Potisne krivulje za stavbe 4F, 8F in 8D s prikazanimi karakterističnimi točkami, ki določajo globalna mejna stanja poškodovanosti LS1, LS2, LS3, za (a) model MDOF in (b) model IFB.

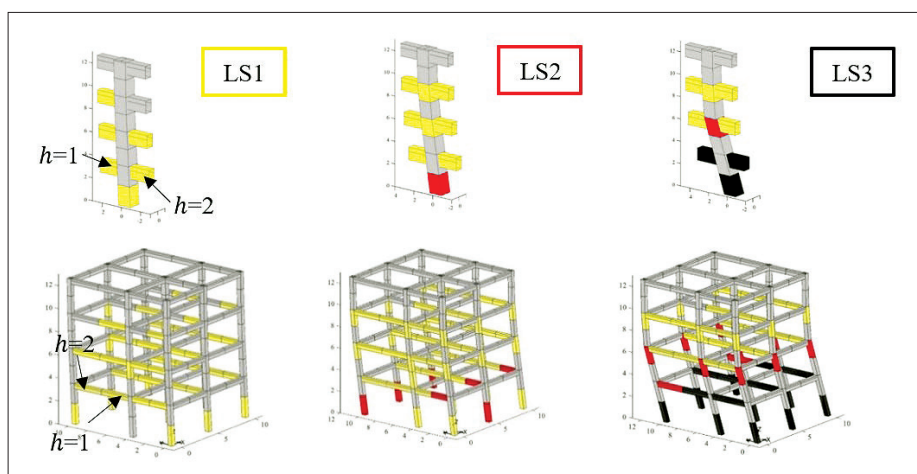
Poleg osnovnih nihajnih časov modela MDOF  $T_1$  in modela IFB  $T_1^f$  smo v tej primerjavi prikazali še napako za razmerje med nosilnostjo in težo stavbe ( $F/W$ ) (preglednica 2) in največji relativni zamik etaže ter pomik na vrhu pri dosežnih globalnih mejnih stanjih LS1, LS2 in LS3 (preglednica 3). Relativna napaka modela IFB je praktično zanemarljiva za vse obravnavane parametre odziva (etažni zamiki, pomiki na vrhu, prečne sile ob vpetju), manjša odstopanja se pojavijo le pri največjih zamikih etaž modela IFB, vendar so te napake zelo majhne, manj kot 1 %.

## 5.2 Analiza poškodovanosti stavb pri doseženih mejnih stanjih

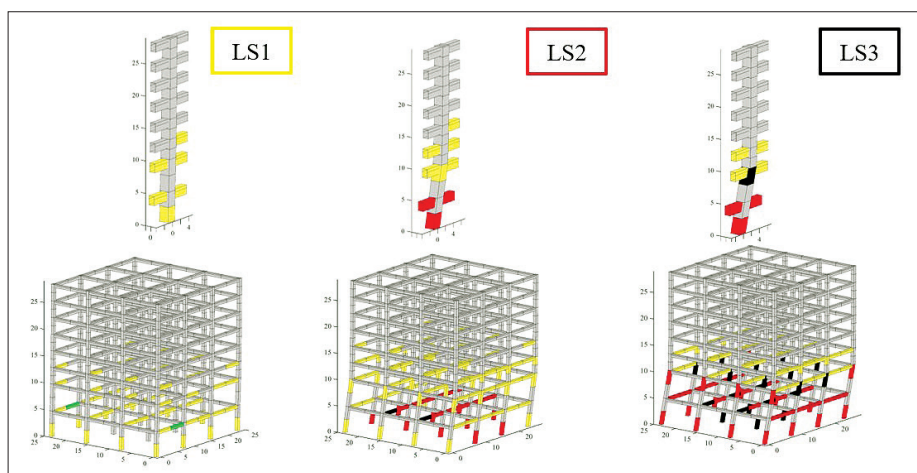
Poškodovanost obravnavanih stavb, ki je bila določena s potisno analizo pri doseženih mejnih stanjih, je prikazana na slikah 10, 11 in 12. Poškodbe stavbe so nazorno pokazane na modelu MDOF, medtem ko poškodovanost modela IFB za stavbi 4F in 8F in poenostavljenega nelinearnega modela za stavbo 8D prikazuje le poškodovanost na nivoju etaže. Ne glede na to lahko ugotovimo, da je poškodovanost na poenostavljenih nelinearnih modelih podobna poškodovanosti, ki je določena z modeli MDOF.

Čeprav smo definirali globalna mejna stanja za poenostavljene nelinearne modele in prav tako za modele MDOF le z upoštevanjem poškodovanosti stebrov (oz. sten), lahko z modelom IFB približno simuliramo tudi poškodovanost gred na ravni etaž. Za stavbo 4F lahko opazimo (slika 10), da model IFB simulira poškodovanosti stebrov in gred IFB ekvivalentne poškodovanostim konstrukcijskih elementov modela MDOF za vsa tri globalna mejna stanja. Za globalno mejno stanje LS1 lahko v 1. etaži opazimo manjšo poškodovanost ( $p = 1$ , rumena barva) stebrov in gred IFB (slika 10), za mejno stanje LS2 večjo poškodovanost ( $p = 2$ , rdeča barva) stebrov IFB v 1. etaži in za mejno stanje LS3 poškodovanost stebrov in gred IFB blizu porušitve ( $p = 3$ , črna barva) v 1. etaži. Ekvivalentno poškodovanost na ravni konstrukcijskih elementov modela IFB pri doseženih globalnih mejnih stanjih LS1, LS2 in LS3 lahko opazimo v večini stebrov in gred modela MDOF v vseh etažah (slika 10).

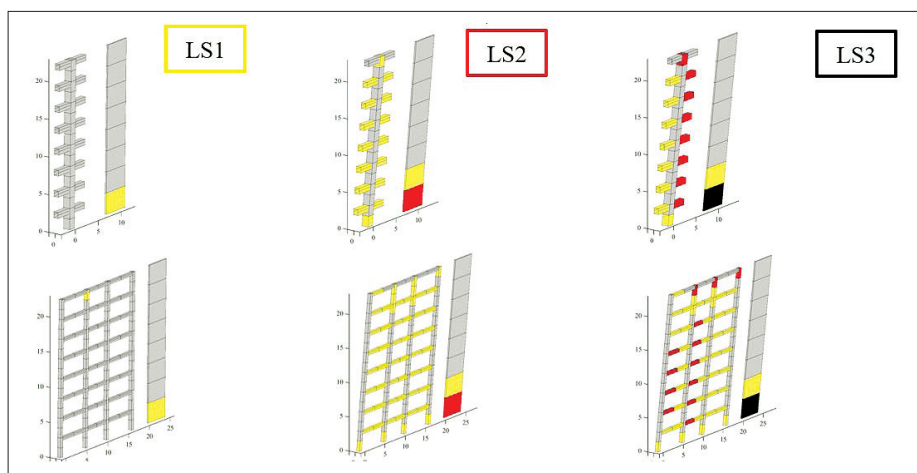
Podobno dobro ujemanje poškodovanosti konstrukcijskih elementov modelov MDOF in IFB lahko opazimo tudi za tri globalna mejna stanja LS1, LS2 in LS3 za stavbo 8F (slika 11) in za model MDOF in poenostavljen nelinearni model za stavbo 8D (slika 12).



Slika 10 • Poškodovanost konstrukcijskih elementov modela IFB in modela MDOF pri doseženih mejnih stanjih LS1, LS2, LS3 za stavbo 4F.



Slika 11 • Poškodovanost konstrukcijskih elementov modela IFB in modela MDOF pri doseženih mejnih stanjih LS1, LS2, LS3 za stavbo 8F.



Slika 12 • Poškodovanost konstrukcijskih elementov poenostavljenega nelinearnega modela in modela MDOF pri doseženih mejnih stanjih LS1, LS2, LS3 za stavbo 8D.

## 6 • SKLEP

Predstavili smo model IFB za potresno analizo okvirnih stavb in demonstrirali njegove zmožnosti za simulacijo potresnega odziva stavb. Rezultati raziskav so pokazali, da je natančnost modela IFB za potresne analize primerljiva z natančnostjo modelov MDOF, če je cilj potresne analize ugotavljanje potresnega odziva na nivoju etaže. Za štirietažno

okvirno stavbo, ki je bila psevdo-dinamično preizkušena v naravnem merilu, smo pokazali, da so modeli IFB sposobni dovolj natančno napovedati tudi nelinearni dinamični odziv stavb na nivoju etaže.

Model IFB smo uporabili v kombinaciji z modelom konzolne stene. S tem poenostavljenim nelinearnim modelom smo izvedli

potresno analizo stenasto-okvirne stavbe. Za obravnavani primer sklepamo, da je model IFB dovolj natančen za modeliranje okvirja, četudi je stena narekovala odziv obravnavane stenastookvirne stavbe. Glede na izsledke raziskave in glede na to, da so predstavljeni modeli računsko učinkoviti in robustni, bi bilo smiselno opraviti dodatne raziskave s ciljem razširitve poenostavljenega nelinearnega modela na 3D-stavbe z upoštevanjem potresa v obeh horizontalnih smereh stavbe.

## 7 • ZAHVALA

Zahvaljujemo se Mirku Kosiču, ki je za potrebe prikazanih raziskav prispeval modele MDOF stavb 8F in 8D. Iskrena zahvala tudi Javni agenciji za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije, ki je financirala prikazane raziskave.

## 8 • LITERATURA

- Abdelnaby, A. E., Elnashai, A. S., Numerical modeling and analysis of RC frames subjected to multiple earthquakes, *Earthquakes and Structures*, 9 (5): 957–981, 2015.
- Celarec, D., Dolšek, M., Practice-oriented probabilistic seismic performance assessment of infilled frames with consideration of shear failure of columns, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 42: 1339–1360, 2013.
- CEN, European standard EN 1992–1-1: 2004a. Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2004b.
- CEN, European standard EN 1998–1: 2004b. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part 1: General rules, seismic action and rules for buildings, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2004a.
- CEN, European standard EN 1998-2: 2005a. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part 2: Bridges, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2005.
- CEN, European standard EN 1998–3: 2005b. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part 3: Assessment and retrofitting of buildings, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2005.
- Chopra, K., Goel, R. K., A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 31: 561–582, 2002.
- Dolšek, M., Incremental dynamic analysis with consideration of modelling uncertainties, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 38: 805–825, 2009.
- Dolšek, M., Development of computing environment for the seismic performance assessment of reinforced concrete frames by using simplified nonlinear models, *Bulletin of Earthquake Engineering* 8: 1309–1329, 2010.
- Fajfar, P., A Nonlinear Analysis Method for Performance Based Seismic Design. *Earthquake Spectra*, 16 (3): 573–592, 2000.
- Fajfar, P., Dolšek, M., Marušić, D., Stratan, A., Pre- and post-test mathematical modelling of a plan-asymmetric reinforced concrete frame building, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 35: 1359–1379, 2006.
- Fardis, M. (ur.), Experimental and numerical investigations on the seismic response of R.C. infilled frames and recommendations for code provisions. ECOEST/PREC8, Rep. No. 6, LNEC, Lisbon, 1996.
- FEMA 440, Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures, Federal Emergency Management Agency, Washington (DC), 2005.
- Gupta, A., Krawinkler, H., Estimation of seismic drift demands for frame structures, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 29: 1287–1305, 2000.
- Haselton, C. B., Deierlein, G. G., Assessing Seismic Collapse Safety of Modern Reinforced Concrete Moment Frame Buildings, Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University. Report No. 156, 2007.



- Haselton, C. B., Goulet, C. A., Mitrani-Reiser, J., Beck, J. L., Deierlein, G. G., Porter, K. A., Stewart, J. P., Taciroglu, E., An Assessment to Benchmark the Seismic Performance of a Code-Conforming Reinforced Concrete Moment-Frame Building, PEER Report 2007/12, 2008.
- Hatzigeorgiou, G. D., Beskos, D. E., Inelastic displacement ratios for SDOF structures subjected to repeated earthquakes. *Engineering Structures* 31: 2744–2755, 2009.
- Khaloo, R., Khosravi, H., Modified fish-bone model: A simplified MDOF model for simulation of seismic responses of moment resisting frames, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 55: 195–210, 2013.
- Kilar, V., Fajfar P., Poenostavljena metoda za nelinearno statično analizo stavb pri horizontalni obtežbi. Zbornik 16. Zborovanja gradbenih konstrukterjev Slovenije, Bled 8-9. september 1994, Društvo gradbenih konstrukterjev, Društvo za potresno inženirstvo, 1994.
- Kilar, V., Fajfar, P., 1996. Simplified Push-over Analysis of Building Structures. Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 1001, Acapulco, Mexico, June 23th-28th, 1996.
- Kosič, M., Določanje raztrosa potresnega odziva armiranobetonskih stavb, Doktorska disertacija, Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani, 2014.
- Kreslin, M., Fajfar, P., The extended N2 method considering higher mode effects in both plan and elevation, *Bulletin of Earthquake Engineering* 10: 695–715, 2012.
- Kuang, J. S., Huang, K., Simplified multi-degree-of-freedom model for estimation of seismic response of regular wall-frame structures, *The Structural Design of Tall and Special Buildings* 20: 418–423, 2011.
- Lazar, N., Dolšek, M., Incorporating intensity bound for assessing the seismic safety of structures: Does it matter? *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 43: 717–738, 2014.
- Lazar Sinković, N., Dolšek, M., Žižmond, J., Impact of the type of the target response spectrum for ground motion selection and of the number of ground motions on the pushover-based seismic performance assessment of buildings, *Engineering Structures* 175: 731–742, 2018.
- Luco, N., Mori, Y., Funahashi, Y., Cornell, C. A., Nakashima, M., Evaluation of predictors of non-linear seismic demands using 'fishbone' models of SMRF buildings, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 32: 2267–2288, 2003.
- MathWorks, MATLAB the Language of Technical Computing, <http://www.mathworks.com/>, 2016.
- McKenna, F., OpenSees: A Framework for Earthquake Engineering Simulation, *Computing in Science & Engineering* 13 (4): 58–66, 2011.
- Miranda, E., Akkar, S. D., Generalized Interstory Drift Spectrum, *Journal of Structural Engineering* 132: 840–852, 2006.
- Nakashima, M., Ogawa, K., Inoue, K., Generic frame model for simulation of earthquake responses of steel moment frames, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 31: 671–692, 2002.
- Negro, P., Colombo, A., Irregularities induced by nonstructural masonry panels in framed buildings, *Engineering Structures* 19 (7): 576–585, 1996.
- Ogawa, K., Kamura, H., Inoue, K., Modeling of moment resisting frame to fishbone-shaped frame for response analysis, *Journal of Structural and Construction Engineering, Architectural Institute of Japan (v japonskem jeziku)* 521: 119–126, 1999.
- Peruš, I., Poljanšek, K., Fajfar, P., Flexural deformation capacity of rectangular RC columns determined by the CAE method. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 35, 12: 1453–1470, 2006.
- Ramirez, M., Miranda, E., Building-Specific Loss Estimation Methods & Tools for Simplified Performance-Based Earthquake Engineering, Technical Report No. 171, John A. Blume Earthquake Engineering Center: Stanford, California, 2009.

# OPTIMIZACIJA TRAJNOSTNEGA DOBIČKA, USTVARJENEGA PRI PROIZVODNJI NOSILCEV

## OPTIMIZATION OF THE SUSTAINABILITY PROFIT GENERATED BY THE PRODUCTION OF BEAMS

**doc. dr. Tomaž Žula, univ. dipl. inž. grad.**

tomaz.zula@um.si

**prof. dr. Stojan Kravanja, univ. dipl. inž. grad.**

stojan.kravanja@um.si

**izr. prof. dr. Stane Božičnik, univ. dipl. ekon.**

stane.bozicnik@um.si

Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo,  
prometno inženirstvo in arhitekturo

**Znanstveni članek**

UDK 624.012.3:69.057

**Povzetek** | V prispevku predstavljamo optimizacijo trajnostnega dobička, pridobljenega pri proizvodnji prefabriciranih gradbenih elementov. V tej študiji je prikazan izračun optimizacije določenega števila enakih prostoležečih nosilcev. Nosilci so lahko izdelani iz treh različnih alternativnih materialov: iz konstrukcijskega jekla, armiranega betona in lepjenega lesa. Razvili smo optimizacijske modele za vsak material posebej. Poleg tega smo modelom za vsako materialno alternativo določili dve namenski funkciji: ekonomski dobiček in trajnostni dobiček. Slednji vključuje ekološke stroške globalnega segrevanja. Predlagani namenski funkciji sta podvrženi pogojem iz statike konstrukcij in dimenzioniranja v skladu s standardi Evrokod 2, 3 in 5. Optimizacijo prostoležečih nosilcev smo izvedli z mešanim celoštevilskim nelinearnim programiranjem (MINLP). Naloga optimizacije je izračunati najvišji možni ekonomski in trajnostni dobiček, najugodnejši material in prerez nosilcev. Na koncu članka prikazujemo računski primer optimizacije prostoležečih nosilcev, kjer rezultati jasno kažejo, da izkazujejo armiranobetonski nosilci največji ekonomski dobiček, leseni nosilci dajejo največji trajnostni dobiček, izvedba nosilcev v jeklu pa bi generirala izgubo.

Ključne besede: optimizacija, mešano celoštevilsko nelinearno programiranje, MINLP, ekonomski dobiček, trajnostni dobiček, prefabricirani elementi

**Summary** | The paper presents the optimization of the sustainability profit generated by the manufacturing of prefabricated elements in the area of civil engineering. In the study, the optimization of equal simply supported beams is considered. A number of beams are defined to be designed from three different material alternatives: from structural steel, from reinforced concrete and from laminated timber. For this reason, three optimization models of beams are developed for the three materials. In addition, two different objectives are defined for each different material alternative: for the economic profit and for the sustainability profit (which includes environmental costs of the global warming). The proposed objective functions are subjected to the design, resistance and deflection constraints of the beams, determined in accordance with the Eurocode 2, 3 and 5 specifications. The optimizations of beams are performed by the mixed-integer non-linear programming (MINLP) approach. The task of the optimization is to find the highest possible economical and sustainable profits, the most advantageous material and the most optimal cross-section alternative for the beams. The numerical example, presented at the end of the paper, clearly shows that the reinforced concrete beams exhibit the highest economic profit, the timber beams give the highest sustainability profit, whereas the steel beams generate loss.

Key words: optimization, mixed-integer non-linear programming, MINLP, economical profit, sustainable profit, prefabricated elements

## 1 • UVOD

Različne optimizacijske metode postajajo vse bolj prepoznavne kot ključna orodja za trajnostno optimizacijo na vseh področjih tehnike, tudi v gradbeništvu. Na primer Zaforteza idr. (Zaforteza, 2009) so uporabili algoritem simulirano hlajenje (simulated annealing algorithm, SA) za optimizacijo armiranobetonskega objekta, pri čemer je bil namen minimiranje nastalih emisij CO<sub>2</sub>. Camp in Huq (Huq, 2013) sta za optimalno zasnovo armiranobetonskih okvirjev uporabila hibridni algoritem velikega trka in velikega krča (hybrid big bang-big crunch algorithm, BB-BC). Namen je bil zmanjšati skupne stroške ali emisije CO<sub>2</sub>. Alonso in Berdasco (Alonso, 2015) sta predstavila ogljični odtis žaganih lesenih izdelkov. Li in sodelavci (Li, 2017) so z uporabo metode izboljšane osnovne strukture (improved ground structure method, IGSM) dobili najboljši možni dizajn škatlastega jeklenega nosilca z najmanjšo oddano količino toplogrednih plinov. Gradbeništvu je eden glavnih sektorjev, ki proizvajajo toplogredne pline. V ta namen so Liu in sodelavci (Liu, 2013) naredili študijo, ki bi gradbincem pomagala pri iskanju optimalne rešitve med stroški gradnje in pri tem nastalimi toplogrednimi

plini. Za optimizacijo so uporabili algoritem roja delcev (particle swarm algorithm, PSA).

V pričujočem članku predstavljamo optimizacijo ekonomskega dobička in trajnostnega dobička, ki ju dobimo s proizvodnjo prostoležečih nosilcev. Cilj optimiranja je izračunati največja možna omenjena dobička. Medtem ko je ekonomski dobiček med gradbinci poznan izraz in ga je treba pri vsakem produktu izračunati, izračun trajnostnega dobička v splošnem ni v navadi ter ga računajo samo v ekološko naprednih proizvodnjah in okoljih. Trajnostni dobiček dobimo tako, da od ekonomskega dobička odštejemo stroške obremenjevanja okolja zaradi emisij CO<sub>2</sub>, to je ekološke stroške globalnega segrevanja, ki smo jih dobili pri proizvodnji produktov. Vsak produkt sestoji iz različnih materialov, ki izkazujejo svojstven ogljični odtis (faktor) v CO<sub>2</sub> eq./kg. Višji ko je faktor ogljičnega odtisa nekega materiala, bolj ta material obremenjuje okolje. Tako ima jeklo bistveno višji faktor ogljičnega odtisa kot les, saj pri proizvodnji jekla nastaja bistveno več CO<sub>2</sub> kot pri lesu. Zato je jeklo okoljsko bolj potraten material. V članku želimo na primeru proizvodnje enakih prostoležečih nosilcev

pokazati, kako različni materiali, kot so jeklo, armirani beton in lepljen les, vplivajo na višino trajnostnega dobička.

Optimiranje nosilcev smo izvedli z mešanim celoštevilskim nelinearnim programiranjem (MINLP). Ker je optimizacijski problem prostoležečega nosilca diskretno/zvezen, nekonveksen in nelinearen, optimiranje poteka v treh korakih. V prvem koraku se izvede generacija mehanske superstrukture različnih alternativ materialov in zaokroženih dimenzij. Drugi korak obsega razvoj modelne formulacije MINLP. Zadnji korak pa predstavlja rešitev definirane optimizacijskega problema MINLP. Namenska ekonomska funkcija in trajnostna funkcija sta podvrženi pogojnim (ne)enačbam, poznanim iz statične analize in dimenzioniranja nosilcev. Obravnavani prostoležeči nosilci so lahko izdelani iz jeklenega varjenega l-prereza ali armiranobetonskega ali lepljenega lesenega pravokotnega prereza. Pogoji dimenzioniranja so definirani v skladu s standardi Evrokod 2 (Evrokod 2, 2005) za armiranobetonski nosilec, Evrokod 3 (Evrokod 3, 2005) za jekleni nosilec in Evrokod 5 (Evrokod 5, 2005) za lepljen nosilec. Zadovoljeni so vsi pogoji mejnih stani nosilnosti in uporabnosti. Za reševanje optimizacijskega problema smo uporabili program GAMS/DICOPT (Grossmann, 2002).

## 2 • OPTIMIZACIJSKI MODELI SSB OPT

Diskretno optimiranje MINLP lahko rešujemo na splošno z naslednjimi metodami MINLP in algoritmi: metoda posplošene Bendersove dekompozicije (Generalized Benders Decomposition method) (Geoffrion, 1972), metoda razširjenega rezanja ravnine (Extended Cutting-Plane method) (Westerlund, 1998), algoritem vejiranja in omejevanja (Branch and Bound algorithm) (Tawarmalani, 2004) in algoritem zunanje aproksimacije (Outer Approximation algorithm) (Duran, 1986, 1987).

### 2.1 Splošna modelna formulacija MINLP

Splošno modelno formulacijo MINLP lahko zapišemo v naslednji obliki:

$$\begin{aligned} \max z &= f(\mathbf{x}, \mathbf{y}), \\ \text{pri pogojih } g_p(\mathbf{x}, \mathbf{y}) &\leq 0 \quad p \in P, \\ \mathbf{x} \in X &= \{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n : \mathbf{x}^{\text{LO}} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}^{\text{UP}}\}, \\ \mathbf{y} \in Y &= \{0, 1\}^m, \end{aligned}$$

pri čemer je funkcija  $f(\mathbf{x}, \mathbf{y})$  namenska funkcija  $z$  in  $g_p(\mathbf{x}, \mathbf{y})$  je množica pogojnih enačb in neenačb. Vse funkcije so nelinearne, zvezne in zvezno odvedljive. Vektor  $\mathbf{x}$  je vektor zveznih spremenljivk, definiran na definicijskem ob-

močju  $X$  in  $\mathbf{y}$  je vektor diskretnih binarnih spremenljivk, ki lahko zavzamejo vrednost 0 ali 1.

V pričujočem članku namenska funkcija predstavlja ekonomski dobiček ali trajnostni dobiček pri proizvodnji nosilcev. Z namenom, da bi dosegli največji možni dobiček, v optimizaciji iščemo maksimum namenske funkcije.

### 2.2 Optimizacijski modeli

Na osnovi prikazane splošne modelne formulacije MINLP smo za prostoležeči nosilec razvili šest optimizacijskih modelov MINLP SSB OPT (Simply Supported Beam OPTimization), ki jih dobimo s kombinacijo med:

- 3 različnimi materiali za prerez nosilca:
  - jekleni varjeni prerez oblike I,
  - armiranobetonski pravokotni prerez,
  - lepljeni leseni pravokotni prerez,
- 2 različnima namenskima funkcijama:
  - ekonomska funkcija,
  - trajnostna funkcija.

Optimizacijske modele prostoležečega nosilca smo zapisali v višjem algebrskem modelnem jeziku GAMS (General Algebraic Modeling System) (Brooke, 1988). Vsak model vsebu-

#### OPTIMIZACIJSKI MODELI SSB OPT

Namenska funkcija  $\max z = f(\mathbf{x}, \mathbf{y})$   
pri pogojih  
 $g_p(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \leq 0$

Pogoje (ne)enačbe statične analize in dimenzioniranja  
*mejno stanje nosilnosti:*

- upogibna odpornost nosilca,
- odpornost na strig.

*mejno stanje uporabnosti:*

- kontrola navpičnih upogibov nosilca,
- kontrola razpok armiranobetonskega nosilca.

Logične pogoje (ne)enačbe

- standardni materiali (trdnosti betona in jekla),
- standardne debeline pločevin, prerez armaturnih palic,
- zaokrožene dimenzije prečnih prerezov.

Vhodni podatki (konstante)

- razpon, obtežba, parcialni faktorji, cene materialov itd.

Zvezne spremenljivke  $\mathbf{x}$

- neodvisne: višina nosilca, širina, napetost tečenja jekla, tlačna trdnost betona itd.,
- odvisne: stroški, lastna teža, upogibki itd.

Binarne spremenljivke  $\mathbf{y}$

- za izračun standardnega materiala, debelin pločevin, prereza armaturnih palic, zaokroženih dimenzij itd.

Slika 1 • Struktura modelov (programa) SSB OPT.

je namensko funkcijo, pogoje (ne)enačbe, vhodne podatke (konstante) in spremenljivke, glej sliko 1.

### 2.3 Namenski funkciji ekonomskega in trajnostnega dobička

Za dva različna namena optimizacije smo razvili dve namenski funkciji. Prvi namen



optimizacije vključuje maksimiranje ekonomskega dobička ( $P_E$  (€)). Ekonomski dobiček izračunamo tako, da od prodajne cene odštejemo stroške materiala za izdelavo, stroške dela ter režijske stroške (režija, amortizacija, vračilo kreditov itd.), glej enačbo (1).

$$\max P_E = N \cdot (C_S - C_{M_i} \cdot \rho_i \cdot V_i - C_{L_j} \cdot t_j \cdot f_o) \quad (1)$$

Namenska funkcija je bila določena za tri različne materiale.  $N$  je število nosilcev,  $C_S$  (€) je prodajna cena prostoležečega nosilca,  $C_{M_i}$  (€/kg) je cena materiala za ( $i \in I$ , armiranobetonski nosilec: beton, armatura in opažne plošče; jekleni nosilec: konstrukcijsko jeklo, elektrode za varjenje, plin in protikorozijska zaščita; ter leseni nosilec: lepljeni les, impregnacija in barva za zaščito lesa),  $\rho_i$  (kg/m<sup>3</sup>) je gostota pripadajočega materiala in  $V_i$  (m<sup>3</sup>) je prostornina. Medtem ko  $C_{L_j}$  (€/h) predstavlja strošek delovne ure, je  $t_j$  (h) čas, potreben za ( $j \in J$ ; armiranobetonski nosilec: vgrajevanje, strjevanje in vibriranje betona, rezanje, polaganje armature in opaževanje; jekleni nosilec: rezanje, varjenje in nanos protikorozijske zaščite; leseni nosilec: impregniranje in barvanje) ter faktor režijskih stroškov  $f_o$  ( $f_o=2$ ). Podrobneje je ekonomska namenska funkcija opisana v člankih (Jelušič, 2017) in (Kravanja, 2017).

Drugi namen optimizacije je maksimiranje trajnostnega dobička ( $P_{SUS}$  (€)), ki ga izračunamo tako, da od ekonomskega dobička odštejemo okoljske stroške globalnega segrevanja (EVR, 2018) in (Bogataj, 2019), glej enačbo (2).

$$\max P_{SUS} = P_E + N \cdot (-C_{GW} \cdot f_{CFEFk} \cdot \rho_k \cdot V_k) \quad (2)$$

Namenska funkcija je bila razvita za tri različne materiale.  $C_{GW}$  (€/kg CO<sub>2</sub> eq.) je strošek globalnega segrevanja 0,116 €/kg CO<sub>2</sub> eq. (EVR, 2018),  $\rho_k$  (kg/m<sup>3</sup>) in  $V_k$  (m<sup>3</sup>) sta gostota in prostornina za pripadajoči material ter  $f_{CFEFk}$  je faktor emisij ogljičnega odtisa za ( $k \in K$ ; armiranobetonski nosilec, jekleni nosilec in leseni nosilec). Pripomniti velja, da omenjeni strošek globalnega segrevanja 0,116 €/kg CO<sub>2</sub> eq. predstavlja eno od možnih ocen tega stroška, ki se z leti spreminja. Faktor emisij ogljičnega odtisa, ki smo ga uporabili v raziskavi, znaša za beton 0,11–0,16 kg CO<sub>2</sub> eq./kg (odvisno od tlačne trdnosti betona), za armaturene palice 2,43 kg CO<sub>2</sub> eq./kg, za konstrukcijsko jeklo 1,72 kg CO<sub>2</sub> eq./kg ter za les 0,69 kg CO<sub>2</sub> eq./kg. Omenjeni faktorji emisij ogljičnega odtisa so dobljeni iz reference (EVR, 2018).

#### 2.4 Pogojne (ne)enačbe

Namenska ekonomska funkcija in namenska trajnostna funkcija sta podvrženi pogojnim

(ne)enačbam, poznamim iz statične analize in dimenzioniranja nosilcev. Pogojne (ne)enačbe dimenzioniranja prostoležečega nosilca so definirane v skladu s standardi Evrokod 2 za armiranobetonski nosilec, Evrokod 3 za jekleni nosilec in Evrokod 5 za leseni nosilec. Zadovaljeni so vsi pogoji po mejnem stanju nosilnosti (MSN) in po mejnem stanju uporabnosti (MSU). Slika 2 prikazuje prostoležeči nosilec, obtežen z zvezno obtežbo, slika 3 pa različne alternative prečnega prereza protoležečega nosilca za tri različne materiale.

$f_y$  je napetost tečenja jekla,  $W_{el}$  je elastični odpornostni moment prereza in  $\gamma_{M1}$  je delni faktor odpornosti (1,0).

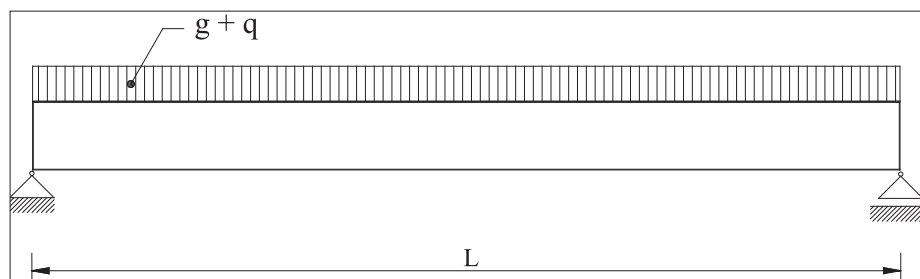
$$M_{Ed} \leq M_{b,Rd}, \quad (3)$$

kjer je:

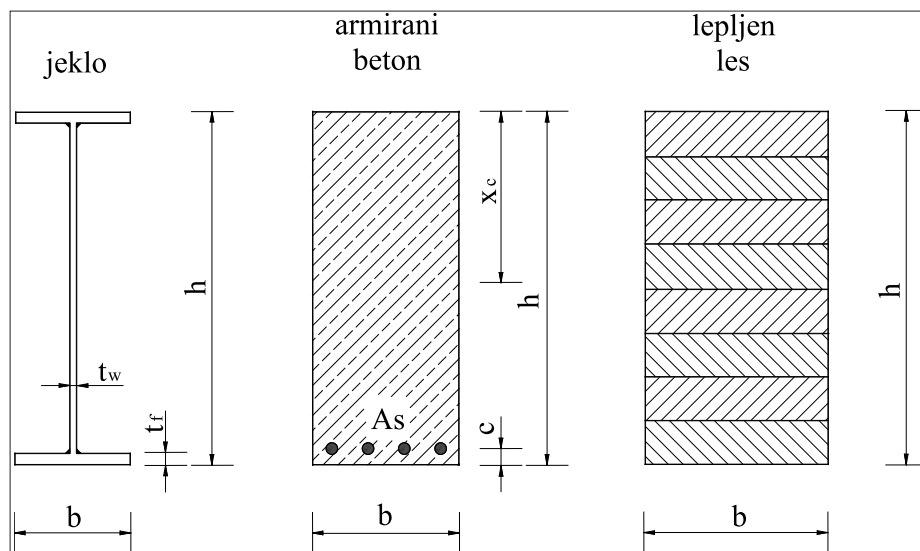
$$M_{Ed} = \frac{q_{Ed} \cdot L^2}{8}, \quad (4)$$

$$q_{Ed} = (\gamma_g \cdot g + \gamma_q \cdot q), \quad (5)$$

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot \frac{W_{el} \cdot f_y}{\gamma_{M1}}. \quad (6)$$



Slika 2 • Prostoležeči nosilec, obtežen z zvezno obtežbo.



Slika 3 • Prečni prerezi nosilca.

Enačba (3) prikazuje pogoj za nosilnost jeklenega nosilca na bočno zvrnitev, kjer je  $M_{Ed}$  projektni upogibni moment,  $M_{b,Rd}$  je projektna upogibna nosilnost pri bočni zvrnitvi. Projektni upogibni moment izračunamo z enačbo (4), z enačbo (5) pa projektno zvezno obtežbo  $q_{Ed}$ . V enačbah predstavlja  $L$  razpon nosilca,  $\gamma_g$  je delni faktor za stalno obtežbo,  $\gamma_q$  je delni faktor za spremenljivo obtežbo,  $g$  je lastna teža nosilca in stalna obtežba ter  $q$  je spremenljiva koristna obtežba. Projektno upogibno nosilnost jeklenega nosilca pri bočni zvrnitvi prikazuje enačba (6),  $\chi_{LT}$  je redukcijski faktor pri bočni zvrnitvi,

Enačbi (7) in (9) opisujeta odpornost nosilca na strig, kjer je upoštevana nevarnost lokalnega izbočenja stojine zaradi striga.  $V_{Ed}$  je projektna strižna sila, glej enačbo (8),  $V_{b,Rd}$  je projektna strižna nosilnost z upoštevanjem lokalnega izbočenja stojine,  $\chi_w$  je redukcijski faktor pri izbočenju stojine,  $W_{el}$  je elastični odpornostni moment prereza okoli močnejše osi,  $h$  je višina prereza,  $t_f$  je debelina pasnice in  $t_w$  je debelina stojine prereza, glej sliko 3.

$$V_{Ed} \leq V_{b,Rd}, \quad (7)$$

kjer je:

$$V_{Ed} = \frac{q_{Ed} \cdot L}{2}, \quad (8)$$

$$V_{b,Rd,cb} = \frac{\gamma_w \cdot f_y \cdot (h-2 \cdot l_f) \cdot l_w}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{MI}} \quad (9)$$

V nadaljevanju enačbe (10)–(15) predstavljajo pogojne (ne)enačbe upogibne nosilnosti armiranobetonskega nosilca.  $M_{Ed}$  in  $M_{c,Rd}$  označujeta projektni upogibni moment in upogibno nosilnost prereza armiranobetonskega nosilca,  $f_{ck}$  je karakteristična tlačna trdnost betona,  $b$  je širina prereza nosilca, glej sliko 3,  $h$  je višina prereza armiranobetonskega nosilca,  $c$  je debelina krovnega sloja betona,  $x_c$  je oddaljenost nevtralne osi od zgornjega roba betonskega nosilca,  $f_{sk}$  je karakteristična vrednost napetosti tečenja armaturnega jekla,  $A_s$  je prerez armature,  $\gamma_c$  je delni faktor varnosti odpornosti za beton in  $\gamma_s$  je delni faktor varnosti odpornosti za armaturno jeklo. Z enačbo (12) smo določili najmanjši prerez armature za omejitev širine razpok, kjer je  $A_{s,min}$  najmanjši potreben prerez armature,  $A_{s,max}$  je največji dovoljeni prerez armature,  $A_{ct}$  je ploščina natezne cone betona,  $\sigma_s$  je absolutna vrednost največje dovoljene napetosti armature takoj po nastanku razpoke,  $k_c$  je koeficient, ki upošteva razporeditev napetosti prereza neposredno pred nastankom razpok in vpliv spremembe ročice notranjih sil,  $k_1$  je koeficient, ki omogoča upoštevanje učinkov neenakomernih samouravnateženih napetosti, ki zmanjšujejo sile zaradi preprečenih ali vsiljenih deformacij,  $f_{ct,eff}$  je povprečna vrednost natezne trdnosti sodelujočega betona v času, ko je pričakovan nastanek prvih razpok, in  $f_{ctm}$  je srednja vrednost osne natezne trdnosti betona.

$$M_{Ed} \leq M_{c,Rd} \quad (10)$$

$$M_{c,Rd} = \frac{0,48 \cdot 0,85 \cdot f_{ck} \cdot b \cdot x_c^2}{\gamma_c} + \frac{A_s \cdot b \cdot (h - c - x_c) \cdot f_{sk}}{\gamma_s} \quad (11)$$

$$A_{s,min} \cdot \sigma_s = k_c \cdot k_1 \cdot f_{ct,eff} \cdot A_{ct} \quad (12)$$

$$A_{s,min} \geq 0,26 \cdot f_{ctm} / f_{sk} \cdot b \cdot (h - c), \quad (13)$$

$$A_{s,min} \geq 0,0013 \cdot b \cdot (h - c), \quad (14)$$

$$A_{s,max} \leq 0,04 \cdot b \cdot h. \quad (15)$$

Strižno nosilnost armiranobetonskega nosilca prikazujejo enačbe (16)–(19), kjer je  $V_{Ed}$  projektna strižna sila in  $V_{Rd,c}$  je projektna strižna odpornost prereza.  $\sigma_{cp}$  je tlačna napetost betona zaradi osne sile ( $\sigma_{cp} = 0$ ),  $\rho_1$  je stopnja armiranja z vzdolžno armaturo,  $A_{sl}$  je ploščina prereza natezne armature, ki jo je treba voditi za ( $l_{bd} + d$ ) preko obravnavanega prečnega prereza,  $l_{bd}$  je projektna sidrna dolžina in  $d$  je statična višina prečnega prereza.

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,c} \quad (16)$$

$$V_{Rd,c} = \left( \frac{0,18}{\gamma_c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} + 0,15 \cdot \sigma_{cp} \right) \cdot b \cdot d, \quad (17)$$

kjer je:

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0, \quad (18)$$

$$\rho_1 = \frac{A_{sl}}{b \cdot d} \leq 0,02. \quad (19)$$

Pri lesenem nosilcu morajo biti največje normalne napetosti manjše od projektne upogibne trdnosti, glej enačbo (20). Pogoj za kontrolo lesenega nosilca na bočno zvrnitev opisujeta enačbi (21) in (22).  $W$  označuje odpornostni moment prereza okoli močnejše osi,  $k_{mod}$  je modifikacijski faktor za trajanje obtežbe in vlažnost,  $f_{m,k}$  je karakteristična upogibna trdnost,  $\gamma_M$  je delni faktor varnosti odpornosti za lastnost materiala,  $\sigma_{m,crit}$  je kritična upogibna napetost,  $l_{ef}$  je efektivna dolžina nosilca,  $E_{0,05}$  je 5. centil vrednosti modula elastičnosti,  $b$  je širina prereza lepljenega lesa in  $h$  je višina prereza lepljenega lesa, glej sliko 3.

$$\frac{M_{Ed}}{W} \leq k_{mod} \frac{f_{m,k}}{\gamma_M}, \quad (20)$$

$$\sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} \leq 0,75, \quad (21)$$

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0,78 \cdot b^2}{l_{ef} \cdot h} \cdot E_{0,05}. \quad (22)$$

Kontrolo lesenega prereza na strižno silo izvedemo z enačbo (23), kjer predstavlja faktor  $k_{cr} = 0,67$  vrednosti za lepljeni les, medtem ko je  $f_{v,d}$  projektna strižna trdnost lepljenega lesa.

$$\frac{3 \cdot V_{Ed}}{2 \cdot k_{cr} \cdot b \cdot h} \leq f_{v,d} \quad (23)$$

Neenačba (24) definira projektno tlačno napetost na kontaktni površini pravokotno na vlakna  $\sigma_{c,90,d}$  kjer je  $f_{c,90,d}$  projektna tlačna trdnost pravokotno na vlakna in  $k_{c,90}$  je faktor, s katerim se v računu upoštevajo razporeditev obtežbe, možnost cepitve in stopnja tlačne deformacije.

$$\sigma_{c,90,d} \leq k_{c,90} \cdot f_{c,90,d} \quad (24)$$

Pogojne (ne)enačbe za mejno stanje uporabnosti so definirane z enačbami (25)–(31). Navpični upogibek jeklenega nosilca preverimo s pomočjo enačb (25)–(26), kjer je  $\delta_{max}$  upogibek prostoležečega nosilca zaradi zvezne celotne obtežbe  $g$  in  $q$ ,  $E$  je elastični modul jekla in  $I$  je vztrajnostni moment varjenega prereza okoli močnejše osi.

$$\delta_{max} \leq L/250, \quad (25)$$

$$\delta_{max} = \frac{5 \cdot (g+q) \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I}. \quad (26)$$

Navpični upogibek armiranobetonskega nosilca določajo neenačba (25) in enačbe od (27)

do (30), kjer je  $\delta_I$  upogibek armiranobetonskega nosilca zaradi celotne obtežbe pri upoštevanju nerazpokanega prereza in  $\delta_{II}$  je upogibek armiranobetonskega nosilca zaradi celotne obtežbe pri upoštevanju razpokanega prereza.  $\zeta$  je koeficient porazdelitve,  $\sigma_{sr}$  je napetost v natezni armaturi razpokanega prereza pri obtežnih pogojih nastanka prvih razpok,  $\sigma_s$  je napetost v natezni armaturi pri razpokanem prerezu,  $E_{c,eff}$  je efektivni modul elastičnosti betona,  $E_{cm}$  je sekantni modul elastičnosti betona,  $I_u$  je vztrajnostni moment prereza nerazpokanega nosilca,  $I_c$  je vztrajnostni moment prereza razpokanega armiranobetonskega nosilca.

$$\delta_{max} = \zeta \cdot \delta_{II} + (1 - \zeta) \cdot \delta_I, \quad (27)$$

$$\zeta = 1 - 0,5 \cdot (\sigma_{sr} / \sigma_s)^2, \quad (28)$$

$$\delta_I = \frac{5 \cdot L^4}{384 \cdot I_u} \cdot \left( \frac{g}{E_{c,eff}} + \frac{q}{E_{cm}} \right), \quad (29)$$

$$\delta_{II} = \frac{5 \cdot L^4}{384 \cdot I_c} \cdot \left( \frac{g}{E_{c,eff}} + \frac{q}{E_{cm}} \right). \quad (30)$$

Kontrola navpičnega upogibka lesenega nosilca je izvedena z enačbama (25) in (31).  $E_{mean}$  definira povprečno vrednost modula elastičnosti,  $I$  je vztrajnostni moment lesenega prereza,  $k_{def}$  označuje deformacijski faktor, medtem ko  $\psi_2$  predstavlja faktor za navidezno stalno vrednost spremenljivega vpliva.

$$\delta_{max} = \frac{5 \cdot L^4}{384 \cdot E_{mean} \cdot I} \cdot [(1 + k_{def}) \cdot g + (1 + k_{def} \cdot \psi_2) \cdot q]. \quad (31)$$

## 2.5 Logične pogojne (ne)enačbe

Z logičnimi pogojnimi (ne)enačbami računamo: diskretne nominalne vrednosti materialov  $d^{mat}$  (trdnosti jekla in betona), glej enačbi (32) in (33); standardne dimenzije  $d^{st}$  (standardne debeline jeklenih pločevin za stojino in pasnici, prereze armaturnih palic), glej enačbi (34) in (35); zaokrožene dimenzije  $d^{rd}$  (širina in višina varjenih jeklenih nosilcev, armiranobetonskih nosilcev in lepljenih lesenih nosilcev), glej enačbi (36) in (37).

$$d^{mat} = \sum_{s \in S} q_s \cdot y_s^{mat}, \quad (32)$$

$$\sum_{s \in S} y_s^{mat} = 1, \quad (33)$$

$$d^{st} = \sum_{k \in K} q_k \cdot y_k^{st}, \quad (34)$$

$$\sum_{k \in K} y_k^{st} = 1, \quad (35)$$

$$d^{rd} = \sum_{r \in R} q_r \cdot y_r^{rd}, \quad (36)$$

$$\sum_{r \in R} y_r^{rd} = 1. \quad (37)$$

### 3 • PRIMER OPTIMIZACIJE PROSTOLEŽEČIH NOSILCEV

V članku predstavljamo računski primer optimizacije ekonomskega dobička in trajnostnega dobička pri proizvodnji in prodaji sto enakih prostoležečih nosilcev ( $N=100$ ) razpona 8,0 m, obremenjenih z lastno obtežbo, enakomerno zvezno stalno obtežbo  $g = 15$  kN/m in zvezno spremenljivo obtežbo  $q = 12$  kN/m. Nosilci se lahko izdelajo v treh alternativah različnih materialov: iz jekla (varjeni I-prerez), iz armiranega betona ali iz lepljenega lesa. Nosilci se prodajajo po prodajni ceni 1600,00 €/kos. Ugotoviti moramo, katera izvedba nosilcev izkazuje največji ekonomski in trajnostni dobiček pri prodaji.

Za optimizacijo nosilcev smo uporabili razvite optimizacijske modele MINLP SSOPT. Modeli vsebujejo ekonomsko in trajnostno namensko funkcijo, ki zajemata razliko med prodajno ceno nosilcev in stroški materiala, energije, dela ter okoljskimi stroški globalnega segrevanja. Podrobneje je ekonomska namenska funkcija opisana v člankih (Jelušič, 2017) in (Kravanja, 2017), medtem ko je trajnostna namenska funkcija prikazana v enačbi (2), glej tudi (Bogataj, 2019). Stroški materiala in dela za izdelavo nosilcev so prikazani v preglednici 1. Za matematično modeliranje smo uporabili GAMS (General Algebraic Modelling System),

(Brooke, 1988). Ker je optimizacijski problem nosilcev diskreten in nelinearen, smo optimizacijo izvedli s programom GAMS/DICOPT (Grossmann, 2002). Na ta način smo izvedli sočasno optimiranje MINLP ekonomskega ali trajnostnega dobička, diskretnih materialov, standardnih dimenzij in zaokroženih dimenzij nosilcev.

Za varjene jeklene nosilce superstrukturo tvorijo možne kombinacije: 8 standardnih debelin pločevin, posebej za stojino in pasnici (6 mm, 8 mm, 10 mm, 12 mm, 15 mm, 20 mm, 25 mm in 30 mm), 1051 zaokroženih dimenzij za širino nosilca, 1301 zaokrožena dimenzija za višino nosilca (širino in višino nosilca smo zaokroževali na 1 mm) in 3 trdnosti konstrukcijskega jekla (S235, S275 in S355).

V primeru, ko so prostoležeči nosilci armiranobetonski, superstrukturo predstavlja množica konstrukcijskih alternativ, dobljenih s kombinacijo: 101 možnost zaokroženih dimenzij za širino nosilca, 131 zaokroženih dimenzij za višino nosilca (širino in višino nosilca smo zaokroževali na 1 cm), 13 različnih standardnih prerezov armaturnih palic (za debelino armaturne palice  $\Phi 28$  mm do  $13 \cdot \Phi 28$  mm) in 7 trdnostnih razredov betona (od C20/25 do C50/60).

Superstruktura nosilcev iz lepljenega lesa je sestavljena iz kombinacije alternativ: 101 možnost zaokroženih dimenzij za širino nosilca in 131 zaokroženih dimenzij za višino nosilca (širino in višino nosilca smo zaokroževali na 1 cm) in en trdnostni razred lesa GL24.

Skupno je definiranih 1 204 021 različnih konstrukcijskih alternativ za armiranobetonski nosilec, 262 531 392 za jekleni nosilec in 13 231 različnih konstrukcijskih alternativ za lepljeni nosilec. Ena od teh alternativ je optimalna pri izračunu največjega možnega ekonomskega dobička in ena pri določitvi največjega trajnostnega dobička.

Dobljeni rezultati optimizacije MINLP sto enakih prostoležečih nosilcev kažejo, da no-

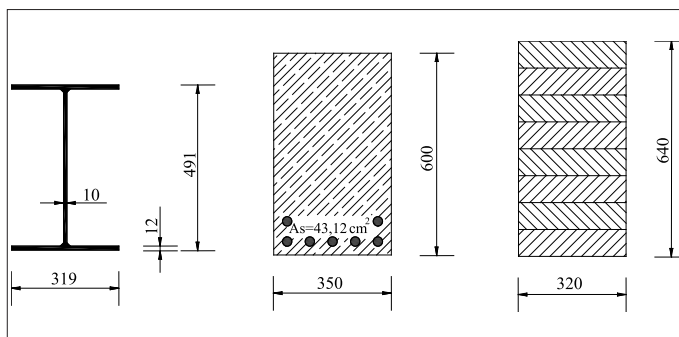
|             |   |                                    |
|-------------|---|------------------------------------|
| $c_{M,s}$   | Cena konstrukcijskega jekla S 235 za 8 mm debelo jekleno pločevino:   | $c_s = 1,25$ €/kg                  |
|             | $c_{M,s} = c_s \cdot (a_1 \cdot f_y^2 + a_2 \cdot t^2 + a_3 \cdot f_y \cdot t + a_4 \cdot f_y + a_5 \cdot t + a_6)$ (€/kg);<br>$a_1 = -3,7313 \times 10^{-4}$ ; $a_2 = -1,7170 \times 10^{-2}$ ; $a_3 = -4,9858 \times 10^{-4}$ $a_4 = 2,8962 \times 10^{-2}$<br>$a_5 = 1,2934 \times 10^{-1}$ $a_6 = 4,4147 \times 10^{-1}$ $f_y$ (kN/cm <sup>2</sup> ); $t$ (cm) debelina pločevine |                                    |
| $c_{M,c}$   | Cena betona C 20/25:  | $c_c = 85,00$ €/m <sup>3</sup>     |
|             | $c_{M,c} = c_c \cdot (k_1 \cdot f_{ck}^2 + k_2 \cdot f_{ck} + k_3)$ (€/kg);<br>$k_1 = -3,2220 \times 10^{-2}$ ; $k_2 = 4,0571 \times 10^{-1}$ ; $k_3 = 1,8829 \times 10^{-1}$ $f_{ck}$ (kN/cm <sup>2</sup> )  |                                    |
| $c_{M,f}$   | Materialni strošek prefabriciranih opažnih plošč:   |                                    |
|             | $c_{M,f} = c_{M,f} \cdot 1/n_{uc} \cdot A_{cs}$<br>$c_{M,f}$ cena prefabriciranih opažnih plošč;<br>$n_{uc}$ število ciklov uporabe opažnih plošč, od 10 do 100; $n_{uc} = 30$<br>$A_{cs}$ površina opaža na nosilec  | $c_{M,f} = 30,00$ €/m <sup>2</sup> |
| $c_{M,gl}$  | Cena lepljenega lesa:   | $c_{M,gl} = 650$ €/m <sup>3</sup>  |
| $c_{M,r}$   | Cena armaturnega jekla B 500  | 0,70 €/kg                          |
| $c_{M,e}$   | Cena elektrod   | 1,70 €/kg                          |
| $c_{M,ac}$  | Cena antikorozijskega zaščitnega premaza  | 0,85 €/m <sup>2</sup>              |
| $c_{M,fp}$  | Cena protipožarnega zaščitnega premaza R 30   | 9,00 €/m <sup>2</sup>              |
| $c_{M,tc}$  | Cena končnega zaščitnega premaza  | 0,65 €/m <sup>2</sup>              |
| $c_{M,ng}$  | Cena naravnega plina  | 0,50 €/m <sup>3</sup>              |
| $c_{M,oxy}$ | Cena kisika   | 1,60 €/m <sup>3</sup>              |
| $c_p$       | Cena električne energije  | 0,10 €/kWh                         |
| $c_{M,imp}$ | Cena impregnacije lesa  | 125,00 €/m <sup>3</sup>            |
| $c_{M,bz}$  | Cena barve za zaščito lesa  | 1,0 €/m <sup>2</sup>               |
| $c_L$       | Stroškovna urna postavka delavca  | 20,00 €/h                          |

\* napetost tečenja jekla, \*\* tlačna trdnost betona

Preglednica 1 • Stroški materiala in dela za izdelavo.

|    | Dobiček                       | Jeklo S 275    | Armirani beton C 50/60 | Les GL24h     |
|----|-------------------------------|----------------|------------------------|---------------|
|    | <b>Ekonomski dobiček (€)</b>  | <b>-16 678</b> | <b>26 577</b>          | <b>22 195</b> |
| 1. | b (mm)                        | 319            | 350                    | 320           |
|    | h (mm)                        | 491            | 600                    | 640           |
|    | <b>Trajnostni dobiček (€)</b> | <b>-28 733</b> | <b>10 658</b>          | <b>16 181</b> |
| 2. | b (mm)                        | 319            | 350                    | 320           |
|    | h (mm)                        | 491            | 600                    | 640           |

Preglednica 2 • Optimalni rezultati prostoležečega nosilca.



Slika 4 • Optimalni prečni prerezi prostoležečega nosilca (enote v mm).



silci v armiranobetonski izvedbi prinašajo največji ekonomski dobiček v višini 26.577 €, medtem ko največji trajnostni dobiček daje izvedba nosilcev iz lepljenega lesa v višini 16.181 €, glej preglednico 2. Jekleni nosilci izkazujejo najslabša rezultata za oba na-

mena. Negativni predznak pri jeklu pove, da bi proizvodnja jeklenih nosilcev pri prodaji 1600,00 €/kos predstavljala izgubo.

Omeniti velja, da so nosilec poleg optimalnega ekonomskega in trajnostnega dobička izračunani še optimalni standardni in

zaokroženi prerezi nosilcev in najugodnejše trdnosti materialov, glej sliko 4. Dobljene optimalne dimenzije prečnih prerezov so, tako pri optimizaciji ekonomskega kakor tudi trajnostnega dobička, enake.

optimiranju nosilcev so bili uporabljeni dve namenski funkciji (ekonomski dobiček in trajnostni dobiček) in trije materiali za izdelavo le-teh (konstrukcijsko jeklo, armirani beton in lepljeni les). Na koncu članka je predstavljen računski primer optimizacije izdelave enakih prostoležečih nosilcev, kjer rezultati jasno kažejo, da izkazujejo armiranobetonski nosilci največji ekonomski dobiček, medtem ko leseni nosilci dajejo največji trajnostni dobiček. Izvedba nosilcev iz jekla v tem primeru generira izgubo.

## 4 • ZAKLJUČEK

V članku je predstavljena optimizacija ekonomskega in trajnostnega dobička pri proizvodnji prostoležečih nosilcev, pri čemer hkrati izračunamo optimalni izbor materiala in dimenzije prereza. Trajnosten dobiček dobimo tako, da od ekonomskega dobička odštejemo stroške obremenjevanja okolja zaradi emisij CO<sub>2</sub>, to

je okoljske stroške globalnega segrevanja, ki bi nastali pri proizvodnji nosilcev. Optimiranje je bilo izvedeno z mešanim celoštevilskim nelinearnim programiranjem (MINLP). Naloga optimizacije je najti najvišji možni ekonomski in trajnostni dobiček, najugodnejši material in optimalni prerez prostoležečih nosilcev. Pri

## 5 • LITERATURA

- Alonso, C. M., Berdasco, L., Carbon footprint of sawn timber products of Castanea sativa Mill. in the north of Spain, *Journal of Cleaner Production*, 102, 127–135, 2015.
- Bogataj, M., Čuček, L., Žula, T., Kravanja, S., Kravanja, Z., Sustainable synthesis and optimization of engineering systems, High performance and optimum design of structures and materials III, Third International Conference on High performance and optimum design of structures and materials, HPSM/OPTI 2018, (WIT transactions on the built environment vol. 175), Southampton; Boston: WIT Press. cop., 185–194, 2019.
- Brooke, A., Kendrick, D., Meeraus, A., GAMS - A User's Guide, Scientific Press, Redwood City, CA, 1988.
- Camp, C. V., Huq, F., CO2 and cost optimization of reinforced concrete frames using a big bang-big crunch algorithm, *Engineering Structures*, 48, 363–372, 2013.
- Duran, M. A., Grossmann, I. E., An outer approximation method for a class of mixed-integer nonlinear programs, *Math. Program.*, 36, 307–339, 1986.
- Eurocode 2, Design of concrete structures. European Committee for Standardization, Brussels, 2005.
- Eurocode 3, Design of steel structures. European Committee for Standardization, Brussels, 2005.
- Eurocode 5, Design of timber structures. European Committee for Standardization, Brussels, 2005.
- EVR, The Model of the Eco-costs / Value Ratio, Delft University of Technology, [www.ecocostsvalue.com/](http://www.ecocostsvalue.com/). Accessed on: 23 Mar 2018.
- Geoffrion, A. M., Generalized benders decomposition, *J. Optim. Theory*, 10, 237–262, 1972.
- Grossmann, I. E., Viswanathan, J., DICOPT - Discrete and Continuous Optimizer. Engineering Design Research Center (EDRC) at Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, 2002.
- Jelušič, P., Kravanja, S., Optimal design of timber-concrete composite floors based on the multi-parametric MINLP optimization. *Composite structures*, 179, 285–293, 2017.
- Kocis, G. R., Grossmann, I. E., Relaxation strategy for the structural optimization of process flow-sheets, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 26, 1869, 1987.
- Kravanja, S., Žula, T., Klanšek, U., Multi-parametric MINLP optimization study of a composite I beam floor system, *Engineering structures*, 130, 316–335, 2017.
- Kravanja, Z., Challenges in sustainable integrated process synthesis and the capabilities of an MINLP process synthesizer MipSyn, *Comput. chem. eng.*, 34, 1831–1848, 2010.
- Li, B., Hong, J., Liu, Z., A novel topology optimization method of welded box-beam structures motivated by low-carbon manufacturing concerns, *Journal of Cleaner Production*, 142, 2792–2803, 2017.
- Liu, S., Tao, R., Tam, C. M., Optimizing cost and CO2 emission for construction projects using particle swarm optimization, *Habitat International*, (37), 155–162, 2013.
- Tawarmalani, M., Sahinidis, N. V., Global optimization of mixed-integer non-linear programs: A theoretical and computational study, *Math. Program., Ser. A* 99, 563–591, 2004.
- Westerlund, T., Pettersson, F., An extended cutting plane method for a class of non-convex MINLP problems, *Comput. Chem. Eng.*, 22 (Suppl.), 357, 1998.
- Zaforteza, I. P., Yepes, V., Hospitaler, A., Vidosa, F.G., CO2-optimization of reinforced concrete frames by simulated annealing, *Engineering Structures*, 31, 1501–1508, 2009.
- Žula, T., Kravanja, S., Klanšek, U., MINLP optimization of a composite I beam floor system. *Steel and composite structures*, 22(5), 1163–1192, 2016.

# NOVI DIPLOMANTI

## UNIVERZA V LJUBLJANI, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO IN GEODEZIJO

### I. STOPNJA – UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI PROGRAM GRADBENIŠTVO

**Leon Mačak**, Vpliv notranje nege na tlačno trdnost betona visoke trdnosti, mentor doc. dr. Drago Saje; <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=112644>

### II. STOPNJA – MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM STAVBARSTVO

**Katarina Černe**, Difuzija vodne pare skozi zunanjo steno s toplotno izolacijo na notranji strani, mentor prof. dr. Zvonko Jagličič, somentor asist. dr. David Antolinc; <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=112658>

### II. STOPNJA – MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM VODARSTVO IN OKOLJSKO GRADBENIŠTVO

**Stevan Gajić**, Analiza delovanja CČN Domžale-Kamnik s pomočjo programskega orodja Aqua Designer, mentor doc. dr. Mario Krzyk, somentorica dr. Marjetka Levstek; <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=112566>

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

### I. STOPNJA – VISOKOŠOLSKI STROKOVNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

**Bojan Lauko**, Organizacija gradbišča in tehnološki procesi rekonstrukcije slovenskega inštituta za kakovost in meroslovje v Ljubljani, mentor izr. prof. dr. Uroš Klanšek, somentor red. prof. dr. Andrej Štrukelj; <https://dk.um.si/lzpisGradiva.php?id=74813&lang=slv>

### II. STOPNJA – MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM GRADBENIŠTVA

**Jani Knuplež**, Uporaba BIM modela pri projektiranju v visokogradnji z vidika projektanta gradbenih konstrukcij, mentor doc. dr. Milan Kuhta, somentorja Matic Ledinek in Tadej Mirkac; <https://dk.um.si/lzpisGradiva.php?id=74547>

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

# KOLEDAR PRIREDITEV

**17.-19.12.2019**

**JIC Smart Cities – 1st Joint International Conference on Design and Construction of Smart City Components**

Kairo, Egipt  
[www.jicsmartcities.com/](http://www.jicsmartcities.com/)

**17.-20.01. 2020**

**ICCBM 2020 - 4th International Conference on Civil and Building Materials**

Okinava, Japonska  
<http://iccbm.org/>

**7.-9.4.2020**

**S.ARCH 2020 – 7th International Conference on Architecture and Built Environment with AWARDS**

Tokio, Japonska  
[www.s-arch.net/](http://www.s-arch.net/)

**28.-29.4.2020**

**AMCONF 2020 - Advanced Materials for Construction**

Manchester, Anglija  
[www.amconf.com/](http://www.amconf.com/)

**11.-14.5.2020**

**14th Congress INTERPRAEVENT 2020**

Bergen, Norveška  
[www.interpraevent.at/?tpl=termine.php&kategorie=1&id=187](http://www.interpraevent.at/?tpl=termine.php&kategorie=1&id=187)

**12.-14.5.2020**

**2020 International Symposium on Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering**

Perth, Avstralija  
[www.slopestability2020.com/](http://www.slopestability2020.com/)

**18.-21.5.2020**

**ICCUE 2020 - 7th International Conference on Civil and Urban Engineering**

Dunaj, Avstrija  
[www.iccue.org/](http://www.iccue.org/)

**9.-11.6.2020**

**BEYOND 2020 – World Sustainable Built Environment Conference**

Göteborg, Švedska  
<https://beyond2020.se/>

**11.-13.6.2020**

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

Göteborg, Švedska  
<https://beyond2020.se/>

**15.-18.6.2020**

**Deep Mixing Conference 2020**

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

**16.-18.6.2020**

**“Structural Faults + Repair-2020” & “European Bridge Conference-2020”**

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

**22.-27.6.2020**

**EURO-MED-SEC-3 – 3rd European and Mediterranean Structural Engineering and Construction Conference**

Limassol, Ciper  
[www.isec-society.org/EURO\\_MED\\_SEC\\_03/](http://www.isec-society.org/EURO_MED_SEC_03/)

**28.-30.6.2020**

**ICSCER 2020 - 4th International Conference on Structure and Civil Engineering Research**

Budimpešta, Madžarska  
[www.icscer.org/](http://www.icscer.org/)

**7.-11.9.2020**

**6th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterisation**

Budimpešta, Madžarska  
[www.isc6-budapest.com/](http://www.isc6-budapest.com/)

**2.-6.11.2020**

**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)