





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

UDK-UDC 05 : 625; ISSN 0017-2774

Ljubljana, junij 2016, letnik 65, str. 117-136

Izdajatelj:

**Zveza društev gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije (ZDGITS)**, Karlovška cesta 3, 1000 Ljubljana, telefon 01 52 40 200; faks 01 52 40 199 v sodelovanju z **Matično sekcijo gradbenih inženirjev Inženirske zbornice Slovenije (MSG IZS)**, ob podpori **Javne agencije za raziskovalno dejavnost RS, Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani, Fakultete za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo Univerze v Mariboru in Zavoda za gradbeništvo Slovenije**

Izdajateljski svet:

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

Glavni in odgovorni urednik:

**prof. dr. Janez Duhovnik**

Lektor:

**Jan Grabnar**

Lektorica angleških povzetkov:

**Romana Hudin**

Tajnica:

**Eva Okorn**

Oblikovalska zasnova:

**Mateja Goršič**

Tehnično urejanje, prelom in tisk:

**Kočevski tisk**

Naklada:

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

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

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

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

Poslovni račun ZDGITS pri NLB Ljubljana:  
SI56020170015398955

## Navodila avtorjem za pripravo člankov in drugih prispevkov

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

Uredništvo

# Vsebina • Contents

## Članki • Papers

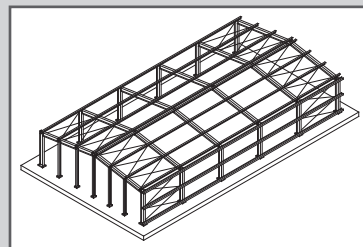
stran **118**

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

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

### **OPTIMIRANJE KONSTRUKCIJE JEKLENE HALE Z MINLP**

MINLP OPTIMIZATION OF A SINGLE STOREY STEEL BUILDING  
STRUCTURE



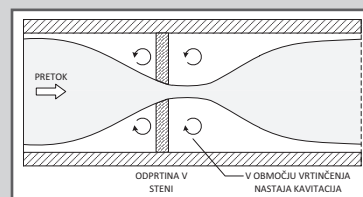
stran **128**

Martina Cvetković, mag. ing. pp. tp.

prof. dr. Franci Steinman, univ. dipl. inž. grad.

### **RAZVOJ NAPRAVE ZA OBDELAVO BALASTNIH VODA NA PLOVILIH S HIDRODINAMSKO KAVITACIJO**

DEVELOPMENT OF A HYDRODYNAMIC CAVITATION SYSTEM FOR  
THE TREATMENT OF BALLAST WATER ON SHIPS



## Novi diplomanti

stran **138**

Eva Okorn

## Koledar prireditev

Eva Okorn

Slika na naslovnici: Severni portal predora Sten na obvoznici Škofja Loka; foto Uroš Lausegar

# OPTIMIRANJE KONSTRUKCIJE JEKLENE HALE Z MINLP

## MINLP OPTIMIZATION OF A SINGLE STOREY STEEL BUILDING STRUCTURE

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

tomaz.zula@um.si

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

stojan.kravanja@um.si

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

**Znanstveni članek**

UDK 006.82/.83:624.014.2

**Povzetek** | V prispevku predstavljamo optimiranje mase konstrukcije jeklene hale, izdelane iz jeklenih standardnih vroče valjanih I-prerezov. Konstrukcijo sestavljajo glavni okvirji, na katere so pritrjeni lege, prečke in fasadni stebri. Optimiranje je opravljeno z mešanim celoštevilskim nelinearnim programiranjem (MINLP). Pri MINLP optimiranju poteka diskretno optimiranje topologije, materiala in standardnih dimenzij hkrati z računom zveznih parametrov. Razvit je optimizacijski model, kjer je namenska funkcija mase konstrukcije podvržena pogojem iz analize konstrukcije in dimenzioniranja. Pogoji dimenzioniranja so definirani v skladu z Eurokodom 3. Za reševanje nekonveksnega, nelinearnega in kombiniranega diskretno zveznega optimizacijskega problema jeklenih okvirjev smo uporabili modificirani algoritem zunanje aproksimacije s sprostivjo enačb (Modified OA/ER). Poleg izračunane optimalne mase hale so bili dobljeni še optimalna topologija, trdnost materiala in standardne dimenzije uporabljenih I-prerezov. V prispevku sta predstavljena teoretični opis problema in praktični primer z rezultati optimiranja.

Ključne besede: optimizacija, optimiranje topologije, optimiranje standardnih materialov, optimiranje diskretnih dimenzij, mešano celoštevilsko nelinearno programiranje, MINLP, jeklena hala

**Summary** | The paper presents the mass optimization of a single-storey steel building structure. The structure consists of main portal frames, which are mutually connected with purlins, rails and façade columns. All structural elements are proposed to be built up of standard hot rolled I sections. The structural optimization is performed by the Mixed-Integer Non-linear Programming approach, MINLP. The MINLP performs a discrete optimization of topology, material and standard dimensions, while continuous parameters are calculated simultaneously inside the continuous space. The optimization model is generated, in which the mass objective function of the structure is subjected to structural analysis and dimensioning constraints. The dimensioning constraints are defined in accordance with Eurocode 3. Since the discrete/continuous optimization problem of steel frames is non-convex and highly non-linear, the Modified Outer-Approximation/Equality-Relaxation (OA/ER) algorithm was used for the optimization. Alongside the optimal structure mass, the optimal topology, structural steel grade and standard I sections were obtained. The paper includes the theoretical basis and a practical example with the results of the optimization.

Key words: Optimization, Topology optimization, Standard material optimization, Discrete sizing optimization, Mixed-integer non-linear programming, MINLP, Single storey steel building

## 1 • UVOD

Enoetažne jeklene okvirne konstrukcije gradimo za industrijske, športne in komercialne objekte. Za doseg optimalnih oblik okvirjev so raziskovalci v preteklih letih razvili številne uporabne metode optimiranja, ki so primerne za zvezno kot tudi diskretno optimiranje. O'Brien in Dixon (O'Brien, 1997) sta predlagala za optimalen projekt portalnih okvirjev pristop linearnega programiranja. Guerlement idr. (Guerlement, 2001) so predstavili praktično metodo, pri kateri so minimizirali maso jeklene hale z uporabo Eurokoda 3, del 1-1 (EN 1993-1-1, 2005). Saka (Saka, 2003), McKinstry idr. (McKinstry, 2015) so z uporabo genetskega algoritma dosegli optimalni projekt jeklenega okvirja. Z mešanim celoštevilskim nelinearnim programiranjem MINLP sta Kravanja S. in Žula (Kravanja S., 2010) optimirala izdelavne stroške konstrukcije jeklene hale brez prečk in fasadnih

stebrov. Pred kratkim so avtorji Kravanja S. idr. (Kravanja S., 2013) predstavili parametrično optimiranje jeklenih industrijskih hal. Eden izmed zadnjih raziskovalnih prispevkov na tem področju je delo McKinstry idr. (McKinstry, 2016), v katerem avtorji dosežejo optimalno obliko glavnega okvirja pri minimalni masi.

V prispevku predstavljamo optimiranje mase, topologije, materiala in standardnih dimenzij jeklene konstrukcije hale. Optimiranje konstrukcije je izvedeno z metodo mešanega celoštevilskega nelinearnega programiranja MINLP. MINLP je kombinirana diskretno zvezna metoda optimiranja, pri kateri se lahko hkrati izvaja diskretno optimiranje topologije (število in razporeditev okvirjev, leg in prečk), diskretno optimiranje materiala (trdnostnega razreda) in standardnih dimenzij (standardnih jeklenih prerezov stebrov, nosilcev, leg, prečk

in fasadnih stebrov) ter optimiranje zveznih parametrov (mase, cene, notranjih statičnih količin, deformacij itd.).

Kombinirani diskretno zvezni MINLP optimizacijski problem konstrukcije hale je obsežen, nekonvexen in nelinearen. Optimiranje zato poteka v treh korakih. V prvem koraku se izvede generacija mehanske superstrukture različnih alternativ topologije, materiala in standardnih dimenzij. Drugi korak obsega razvoj MINLP modelne formulacije. Zadnji korak pa predstavlja rešitev definirane MINLP optimizacijskega problema.

Namen optimiranja je določiti minimalno maso hale. Namenska masna funkcija je podvržena pogojnim (ne)enačbam, poznamim iz analize in dimenzioniranja jeklenih konstrukcij. Pogoji dimenzioniranja jeklenih elementov so definirani v skladu s standardom Eurokod 3. Optimiranje konstrukcije je izvedeno z modificiranim algoritmom zunanje aproksimacije s sprostitvijo enačb (Modified OA/ER algoritem), ((Kravanja Z., 1994), (Kravanja S., 1998a), (Kravanja S., 1998b)).

## 2 • SUPERSTRUKTURA JEKLENE HALE

V prispevku obravnavamo optimizacijo jeklene konstrukcije enonadstropne hale, sestavljene iz enakih glavnih okvirjev, na katere so pritrjeni lege, prečke in fasadni stebri, glej sliko 1. Nosilci, stebri, lege, prečke in fasadni stebri so izdelani iz standardnih vroče valjanih jeklenih IPE- ali HEA-profilov. Glavni okvirji so definirani kot nepomični okvirji ( $\alpha_{cr} \geq 10$ ).

Superstrukturo konstrukcije hale predstavlja množica različnih topoloških/konstrukcijskih alternativ:

- zaporedja in binarne spremenljivke za topologijo:

$n$  zaporedje števila portalnih okvirjev (stebri in nosilci),  $n \in N$

$m$  zaporedje števila leg,  $m \in M$

$r$  zaporedje števila prečk,  $r \in R$

$y_n$  binarna spremenljivka, dodeljena  $n$ -ti,  $n \in N$ , alternativni portalni okvirjev

$y_m$  binarna spremenljivka, dodeljena  $m$ -ti,  $m \in M$ , alternativni leg

$y_r$  binarna spremenljivka, dodeljena  $r$ -ti,  $r \in R$ , alternativni prečk

- zaporedja in binarne spremenljivke za standardne dimenzije:

$i$  zaporedje standardnih dimenzij stebrov,  $i \in I$

$j$  zaporedje standardnih dimenzij nosilcev,  $j \in J$

$k$  zaporedje standardnih dimenzij leg,  $k \in K$

$l$  zaporedje standardnih dimenzij prečk,  $l \in L$

$p$  zaporedje standardnih dimenzij fasadnih stebrov,  $p \in P$

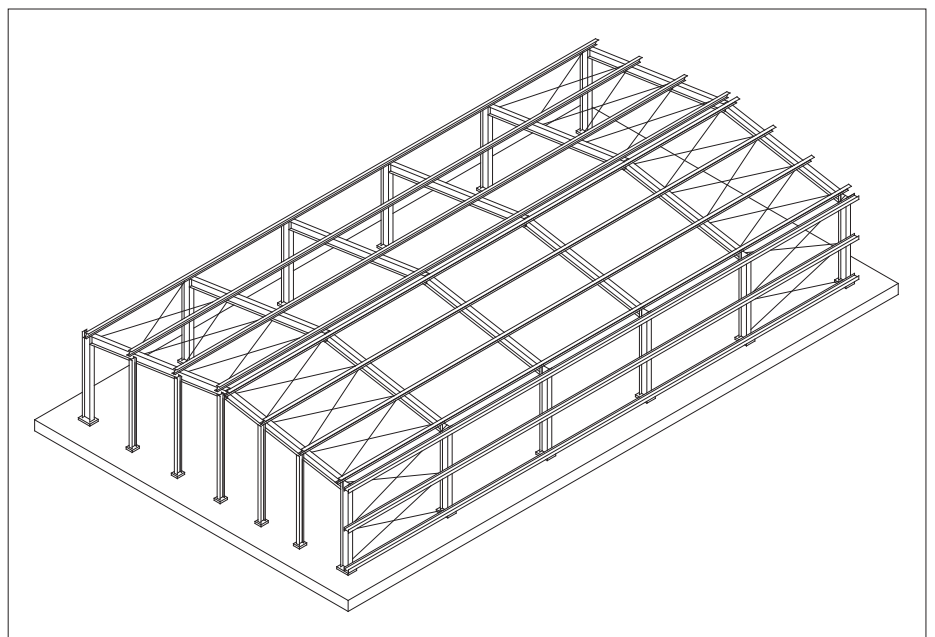
$y_i$  binarna spremenljivka, dodeljena  $i$ -ti,  $i \in I$ , alternativni standardnega prereza stebra

$y_j$  binarna spremenljivka, dodeljena  $j$ -ti,  $j \in J$ , alternativni standardnega prereza nosilca

$y_k$  binarna spremenljivka, dodeljena  $k$ -ti,  $k \in K$ , alternativni standardnega prereza lege

$y_l$  binarna spremenljivka, dodeljena  $l$ -ti,  $l \in L$ , alternativni standardnega prereza prečke

$y_p$  binarna spremenljivka, dodeljena  $p$ -ti,  $p \in P$ , alternativni standardnega prereza fasadnega stebra



Slika 1 • Konstrukcija jeklene hale

- zaporedja in binarne spremenljivke za standardne materiale:
- zaporedje standardnih materialov,  $s \in S$
- $y_s$  binarna spremenljivka, dodeljena  $s$ -ti,  $s \in S$ , alternativni standardnega materiala

Optimiranje obravnavane konstrukcije opravimo pri začetni geometrijski imperfekciji ob kombiniranem delovanju lastne teže elementov okvirja in navpični enakomerni zvezni spre-

menljivi obtežbi (sneg in veter) ter vodoravni koncentrirani spremenljivi obtežbi vetra, locirani na vrhu stebrov. Notranje statične količine so izračunane po elastični teoriji prvega reda. Dimenzioniranje elementov jeklenega okvirja je izvedeno v skladu z Eurokodom 3, pri čemer so zadovoljeni vsi pogoji za mejno stanje nosilnosti (MSN) in mejno stanje uporabnosti (MSU). Pri MSN so elementi preverjeni na osno uklonsko nosilnost, strižno nosilnost, upo-

gibno nosilnost ter na interakcijo upogibnega momenta in tlačne/uklonske osne sile. Pri MSU so bili navpični končni upogibki  $w_{r,max}$  in upogibki zaradi spremenljive obtežbe  $w_3$  omejeni pod priporočenima mejnima vrednostma: razpon/200 in razpon/250. Preverili smo tudi vodoravni upogibek fasadnega stebra  $u_3$  zaradi spremenljive obtežbe. Zadoščeno je bilo tudi vodoravnemu pomiku portalnega okvirja, ki ni presegel mejne vrednosti višina/150.

### 3 • MINLP MODELNA FORMULACIJA ZA MEHANSKO SUPERSTRUKTURO

Po tem ko je MINLP mehanska superstruktura definirana, sintezo nadaljujemo z razvojem MINLP modelne formulacije mehanskih superstruktur, MINLP-G. Splošni nelinearni, nekonveksni in kombinirani diskretno zvezni MINLP optimizacijski problem (MINLP-G) lahko zapišemo v obliki:

$$\min z = \mathbf{c}^T \mathbf{y} + f(\mathbf{x})$$

$$\text{p.p. } \mathbf{h}(\mathbf{x}) = \mathbf{0}$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0}$$

$$\mathbf{B}\mathbf{y} + \mathbf{C}\mathbf{x} \leq \mathbf{b}$$

$$\mathbf{x} \in X = \{\mathbf{x} \in R^n : \mathbf{x}^{LO} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}^{UP}\}$$

$$\mathbf{y} \in Y = \{0, 1\}^m,$$

(MINLP-G)

pri čemer je  $\mathbf{x}$  vektor zveznih spremenljivk, definiran na definicijskem območju  $X$ , in  $\mathbf{y}$  je vektor diskretnih binarnih spremenljivk, ki lahko zavzamejo vrednost 0-1. Vsakemu alternativnemu konstrukcijskemu elementu superstrukture je dodeljena binarna spremenljivka  $y$ . Element je izbran, kadar je izračunana pripadajoča binarna spremenljivka ena ( $y=1$ ), in iz superstrukture izločen, kadar je izračunana binarna spremenljivka nič ( $y=0$ ). Funkcija  $f(\mathbf{x})$  je namenska funkcija,  $\mathbf{h}(\mathbf{x})$  je množica pogojnih enačb,  $\mathbf{g}(\mathbf{x})$  pa je množica pogojnih neenačb. Vse funkcije  $f(\mathbf{x})$ ,  $\mathbf{h}(\mathbf{x})$  in  $\mathbf{g}(\mathbf{x})$  so nelinearne, zvezne in zvezno odvedljive. Dodan je tudi sistem linearnih enačb in neenačb  $\mathbf{B}\mathbf{y} + \mathbf{C}\mathbf{x} \leq \mathbf{b}$ , ki vsebuje tako zvezne kot diskretne spremenljivke.

Na osnovi splošne modelne formulacije MINLP-G smo razvili posebno MINLP modelno formulacijo mehanskih struktur MINLP-MS. Glede na splošno MINLP-G modelno formulacijo je MINLP-MS formulacija precej bolj obsežna in

specifična, predvsem v pogledu spremenljivk in pogojnih (ne)enačb. Zapišemo jo lahko v naslednji obliki:

$$\min z = \mathbf{c}^T \mathbf{y} + f(\mathbf{x})$$

$$\text{p.p. } \mathbf{h}(\mathbf{x}) = \mathbf{0}$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0}$$

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{a}$$

$$\mathbf{E}\mathbf{y} \leq \mathbf{e}$$

$$\mathbf{D}\mathbf{y}^e + \mathbf{R}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{r}$$

$$\mathbf{K}\mathbf{y}^e + \mathbf{L}(\mathbf{d}^{cn}) \leq \mathbf{k}$$

$$\mathbf{P}\mathbf{y} + \mathbf{M}(\mathbf{d}^{mat}) \leq \mathbf{m}$$

$$\mathbf{P}\mathbf{y} + \mathbf{N}(\mathbf{d}^{st}) \leq \mathbf{n}$$

$$\mathbf{x} \in X = \{\mathbf{x} \in R^n : \mathbf{x}^{LO} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}^{UP}\}$$

$$\mathbf{y} \in Y = \{0, 1\}^m.$$

(MINLP-MS)

MINLP modelna formulacija mehanskih superstruktur vsebuje:

- Zvezne spremenljivke  $\mathbf{x} = \{\mathbf{d}, \mathbf{p}\}$  in diskretne binarne 0-1 spremenljivke  $\mathbf{y} = \{\mathbf{y}^e, \mathbf{y}^{mat}, \mathbf{y}^{st}\}$ . Zvezne spremenljivke so razdeljene na dimenzijske (določene pri projektiranju) spremenljivke  $\mathbf{d} = \{\mathbf{d}^{cn}, \mathbf{d}^{mat}, \mathbf{d}^{st}\}$  in na izvedbene (določene pri izvedbi) spremenljivke  $\mathbf{p}$ . Pri tem podvektorji  $\mathbf{d}^{cn}$ ,  $\mathbf{d}^{mat}$  in  $\mathbf{d}^{st}$  označujejo zvezne dimenzije, diskretne materiale in standardne dimenzije. Vektor binarnih spremenljivk  $\mathbf{y}^e$ ,  $\mathbf{y}^{mat}$  in  $\mathbf{y}^{st}$  označujejo potencialni izbor konstrukcijskih elementov za topologijo, diskretne materiale in standardne dimenzije.
- Masno namensko funkcijo  $z$ , ki vsebuje maso, definirano z linearnim izrazom  $\mathbf{c}^T \mathbf{y}$ , kakor tudi dimenzijsko pogojeno maso, zapisano v nelinearnem izrazu  $f(\mathbf{x})$ .

- Nelinearne in linearne pogojne (ne)enačbe  $\mathbf{h}(\mathbf{x}) = \mathbf{0}$ ,  $\mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0}$  in  $\mathbf{A}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{a}$  predstavljajo sistem omejitev, ki so potrebne za statično analizo in dimenzioniranje konstrukcije.
- Celoštevilске linearne pogojne enačbe in neenačbe  $\mathbf{E}\mathbf{y} \leq \mathbf{e}$  opisujejo logične relacije med binarnimi spremenljivkami.
- Mešane linearne pogojne enačbe in neenačbe  $\mathbf{D}\mathbf{y} + \mathbf{R}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{r}$  vzpostavijo medsebojne povezave med začasno izbranimi alternativnimi konstrukcijskimi elementi ali pa brišejo relacije med začasno zavrnjenimi, t. i. izločenimi elementi znotraj definirane superstrukture.
- Mešane linearne omejitve  $\mathbf{K}\mathbf{y} + \mathbf{L}(\mathbf{d}^{cn}) \leq \mathbf{k}$  definirajo zvezne dimenzije za vsak obstoječi konstrukcijski element. Prostor je definiran samo, kadar obstaja ustrezen konstrukcijski element ( $y^e = 1$ ), drugače je zavrnjen.
- Mešane linearne omejitve  $\mathbf{P}\mathbf{y} + \mathbf{M}(\mathbf{d}^{mat}) \leq \mathbf{m}$  definirajo diskretne materiale  $\mathbf{d}^{mat}$ . Posamezen diskretni material  $d^{mat}$  je definiran kot skalarni produkt med vektorjem  $s$ ,  $s \in S$  diskretnih številskih vrednosti alternativ materiala  $\mathbf{q} = \{q_1, q_2, q_3, \dots, q_s\}$  in vektorjem pridruženih binarnih spremenljivk  $\mathbf{y}^{mat} = \{y_{1,1}^{mat}, y_{2,1}^{mat}, \dots, y_{s,j}^{mat}\}$ , enačba (1). Izračunana je samo ena vrednost standardnega materiala, ker je vsota binarnih spremenljivk enaka 1, glej enačbo (2);

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

$$\sum_{s \in S} y_s^{mat} = 1 \quad (2)$$

- mešani linearni pogoji  $\mathbf{P}\mathbf{y} + \mathbf{N}(\mathbf{d}^{st}) \leq \mathbf{n}$  definirajo standardne dimenzije  $\mathbf{d}^{st}$ . Posamezna standardna dimenzija  $d^{st}$  je definirana kot skalarni produkt med vektorjem  $j$ ,  $j \in J$  alternativ standardnih dimenzij  $\mathbf{q} = \{q_1, q_2, q_3, \dots, q_j\}$  in vektorjem pridruženih binarnih spremenljivk  $\mathbf{y}^{st} = \{y_{1,1}^{st}, y_{2,1}^{st}, y_{3,1}^{st}, \dots, y_{j,j}^{st}\}$ , glej enačbo (3). Samo ena diskretna vrednost je lahko izbrana za posamezno standardno

dimenzijo, ker je vsota vrednosti binarnih spremenljivk enaka 1, enačba (4).

$$d^{st} = \sum_{j \in J} q_j y_j^{st} \quad (3)$$

$$\sum_{j \in J} y_j^{st} = 1 \quad (4)$$

## 4 • OPTIMIZACIJSKI MODEL FRAMEOPT

Za optimiranje jeklene hale je bil razvit MINLP optimizacijski model FRAMEOPT (FRAME OPTimization). Model je bil razvit na osnovi predstavljene MINLP modelne formulacije mehanskih superstruktur. Optimizacijski model konstrukcije hale smo zapisali v višjem algebrskem modelnem jeziku GAMS (General Algebraic Modeling System) (Brooke, 1988). Uporabljen optimizacijski model vsebuje masno namensko funkcijo, pogojne (ne)enačbe, celoštevilске in mešane celoštevilске pogojne (ne)enačbe, vhodne podatke (konstante) in spremenljivke. V optimizacijskem modelu FRAMEOPT se računajo notranje statične količine in deformacije na ravninskih statičnih modelih za vsak konstrukcijski element posebej, glavni okvir, strešno lego, fasadno prečko in fasadni steber.

### 4.1 Masna namenska funkcija

Masna namenska funkcija je definirana kot seštevek produktov površine prečnega prereza IPE- ali HEA-profilov, števila elementov, dolžine elementov in njihove gostote za vsak steber, nosilec, lego, prečko in fasadni steber, enačba 5.  $A_C$ ,  $A_B$ ,  $A_P$ ,  $A_R$  in  $A_{FC}$  predstavljajo površino prečnega prereza IPE- ali HEA-profila za steber, nosilec, lego, prečko in fasadni steber.  $H_C$  označuje višino stebra,  $L_B$  dolžino nosilca ter  $L_{TOT}$  dolžino jeklene hale (leg in prečk),  $H_{FC}$  pa višino fasadnih stebrov, glej sliko 2. *NOFRAME* predstavlja število portalnih okvirjev, *NOPURLIN* označuje število leg, *NORAIL* predstavlja število prečk in  $\rho$  je prostorninska masa jekla.

$$MASS = 2 \cdot (A_C \cdot H_C \cdot \rho) \cdot NOFRAME + 2 \cdot (A_B \cdot L_B \cdot \rho) \cdot NOFRAME + (A_P \cdot L_{TOT} \cdot \rho) \cdot NOPURLIN + (A_R \cdot L_{TOT} \cdot \rho) \cdot NORAIL + 2 \cdot (A_{FC} \cdot H_{FC} \cdot \rho) \cdot NOPURLIN - 1 \quad (5)$$

Enačbe (6)–(11) definirajo izračun števila portalnih okvirjev *NOFRAME*, števila leg *NOPURLIN*, števila prečk *NORAIL*. Posledično so

<b>PROGRAM FRAMEOPT</b> <b>za optimiranje konstrukcije hale iz standardnih jeklenih vroče valjanih I-profilov</b>
<i>Masna namenska funkcija:</i> $\min z = \mathbf{c}^T \mathbf{y} + f(\mathbf{x})$
pri pogojih: $\mathbf{h}(\mathbf{x}) = \mathbf{0}$ $\mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0}$ $\mathbf{B}\mathbf{y} + \mathbf{C}\mathbf{x} \leq \mathbf{b}$
<p><i>izračun notranjih statičnih količin</i> <i>Pogojne (ne)enačbe mejnega stanja nosilnosti (MSN):</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• odpornost prereza na upogibni moment</li> <li>• nosilnost prereza v tlaku</li> <li>• uklonska nosilnost stebra in fasadnega stebra</li> <li>• nosilnost na strig stebra, nosilca, lege, prečke in fasadnega stebra</li> <li>• nosilnost na bočno zvrnitev stebra</li> <li>• nosilnost na uklon + bočno zvrnitev stebra</li> </ul> <p><i>izračun deformacij</i> <i>Pogojne (ne)enačbe mejnega stanja uporabnosti (MSU):</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– kontrola deformacij nosilca, lege, prečke in fasadnega stebra</li> <li>– kontrola vodoravnega pomika okvirja</li> </ul> <p><i>Logične pogojne (ne)enačbe optimiranja topologije:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– izračun števila okvirjev, leg in prečk</li> </ul> <p><i>Logične pogojne (ne)enačbe diskretnih materialov:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– izračun standardnega materiala</li> </ul> <p><i>Logične pogojne (ne)enačbe standardnih dimenzij:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– izračun standardnih prerezov</li> <li>– karakteristike standardnega prereza za steber, nosilec, prečko, lego in fasadni steber (površina, odpornostni moment, vztrajnostni moment, torzijski moment in vbočitveni torzijski moment)</li> </ul> <p><i>Vhodni podatki (konstante):</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• razpon, način podpiranja, obtežba, faktorji varnosti, elastični modul, prostorninska masa itd.</li> </ul> <p><i>Zvezne spremenljivke: <math>\mathbf{x} \in X</math></i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Neodvisne: višina profila, meja plastičnosti jekla, razdalja med nosilci in legami itd.</li> <li>• Odvisne: geometrijske karakteristike prereza, lastna teža, nosilnost itd.</li> </ul> <p><i>Binarne spremenljivke: <math>\mathbf{y} \in Y</math></i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• za izračun topologije, standardnega materiala in jeklenih profilov</li> </ul>

izračunani medsebojni razmaki med legami  $e_p$ , prečkami  $e_r$  in fasadnimi stebri  $e_{pr}$ , glej sliko 2.  $MINNO^{frame}$  in  $MAXNO^{frame}$  predstavljata najmanjše in največje število portalnih okvirjev,  $MINNO^{purlin}$  in  $MAXNO^{purlin}$  predstavljata najmanjše in največje število leg, medtem ko  $MINNO^{rail}$  in  $MAXNO^{rail}$  označujeta najmanjše in največje število prečk.

$$NOFRAME = \sum_n y_n \quad (6)$$

$$MINNO^{frame} \leq NOFRAME \leq MAXNO^{frame} \quad (7)$$

$$NOPURLIN = 2 \cdot \sum_m y_m \quad (8)$$

$$MINNO^{purlin} \leq NOPURLIN \leq MAXNO^{purlin} \quad (9)$$

$$NORAIL = 2 \cdot \sum_r y_r \quad (10)$$

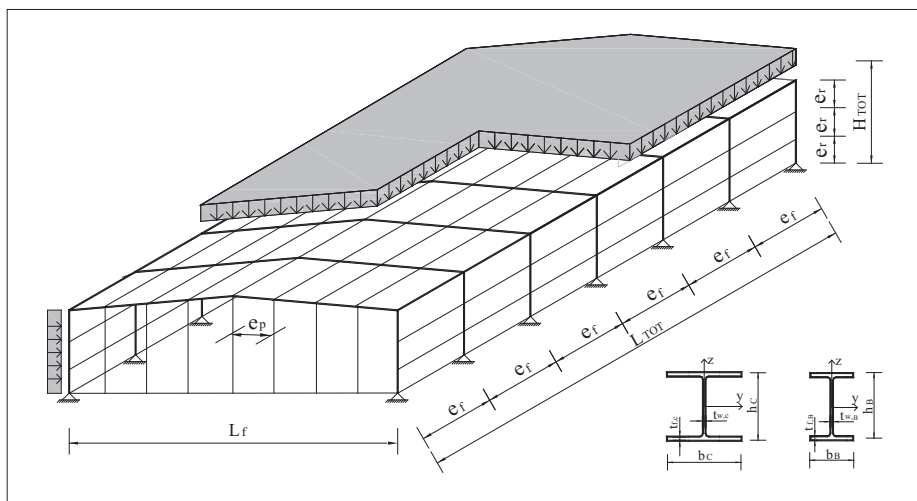
$$MINNO^{rail} \leq NORAIL \leq MAXNO^{rail} \quad (11)$$

#### 4.2 Pogojne (ne)enačbe

Pogojne (ne)enačbe dimenzioniranja jeklene konstrukcije hale so definirane skladno s standardom Eurokod 3. Razdeljene so v dve skupini: pogojne (ne)enačbe mejnega stanja nosilnosti in pogojne (ne)enačbe mejnega stanja uporabnosti. V optimizacijskem modelu so bile upoštevane naslednje predpostavke:

- glavni okvir je bil računat kot bočno podprt ravninski okvir (podprt s strešnimi legami, fasadnimi prečkami in vezmi), glej sliko 1; stebri so preverjeni na tlačnouklonsko odpornost okoli obeh osi in na zvrnitev, nosilci pa na upogibni moment v ravnini okvirja (zvrnitev zaradi vodoravnega podpiranja s strešnimi vezmi ni merodajna),
- uklonske dolžine stebrov so računane za nepomično uklonsko obliko okvirja v ravnini okvirja (uklon okoli osi  $y$ - $y$ ), v pravokotni smeri so enake vertikalnemu razmaku med fasadnimi prečkami (uklon okoli osi  $z$ - $z$ ),
- uklonske dolžine fasadnih stebrov so računane okoli šibkejši osi  $z$ - $z$ ,
- v skladu z Eurokodom 3, del 1-1, poglavje 6.3.4, smo za preverjanje nosilnosti elementov ravninskih okvirjev uporabili enačbo (6,66), kjer ni treba računati interakcijskih faktorjev.

V nadaljevanju so prikazane le nekatere pomembnejše pogojne (ne)enačbe.



Slika 2 • Konstrukcija jeklene hale

Pogojne (ne)enačbe mejnega stanja nosilnosti:

- Odpornost proti upogibnemu momentu nosilca, stebra, lege, prečke in fasadnega stebra:

$$M_{Ed} \leq M_{el,Rd} \quad (12)$$

$$M_{el,Rd} = \frac{W_{el} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (13)$$

kjer je  $M_{Ed}$  računski upogibni moment,  $M_{el,Rd}$  je elastična upogibna odpornost prereza,  $f_y$  je meja plastičnosti jekla,  $W_{el}$  je elastični odpornostni moment in  $\gamma_{M0}$  je faktor varnosti.

- Odpornost na osno silo prereza nosilca, stebra in fasadnega stebra:

$$N_{Ed} \leq N_{pl,Rd} \quad (14)$$

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (15)$$

kjer je  $N_{Ed}$  računaska osna sila,  $N_{pl,Rd}$  je plastična odpornost prereza na osno silo,  $A$  je površina prereza,  $\gamma_{M0}$  je varnostni faktor.

- Uklonska nosilnost stebra in fasadnega stebra:

$$N_{Ed} \leq N_{b,Rd} \quad (16)$$

$$N_{b,Rd} = \chi \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \quad (17)$$

kjer je  $N_{b,Rd}$  uklonska odpornost elementa,  $\chi$  je brezdimenzionalni koeficient uklonske nosilnosti in  $\gamma_{M1}$  je faktor varnosti.

- Odpornost proti strižni sili prereza nosilca, stebra, lege, prečke in fasadnega stebra:

$$V_{Ed} \leq V_{pl,Rd} \quad (18)$$

$$V_{pl,Rd} = A_v \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{\gamma_{M0}} \quad (19)$$

kjer je  $V_{Ed}$  računaska strižna sila,  $V_{pl,Rd}$  je plastična strižna odpornost prereza,  $A_v$  je strižna površina.

- Interakcija med osno silo in upogibnim momentom:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} + \frac{M_{Ed}}{M_{el,Rd}} \leq 1,0 \quad (20)$$

- Interakcija med uklonsko nosilnostjo in nosilnostjo na bočno zvrnitev:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot A \cdot f_y / \gamma_{M1}} + \frac{M_{Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{el} \cdot f_y / \gamma_{M1}} \leq 1,0 \quad (21)$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot A \cdot f_y / \gamma_{M1}} + \frac{M_{Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{el} \cdot f_y / \gamma_{M1}} \leq 1,0 \quad (22)$$

kjer je  $\chi_y$  brezdimezionalni koeficient uklonske nosilnosti okoli osi  $y$ - $y$ ,  $\chi_z$  je brezdimezionalni koeficient uklonske nosilnosti okoli osi  $z$ - $z$  in  $\chi_{LT}$  je brezdimezionalni koeficient pri bočni zvrnitvi.

Pogojne (ne)enačbe mejnega stanja uporabnosti:



- Preveritev upogibkov nosilca, lege, prečke in fasadnega stebra

$$w_{\max,Lf} \leq \frac{L_f}{200} \quad w_{\max,ef} \leq \frac{e_f}{200} \quad (23)$$

$$w_{3,Lf} \leq \frac{L_f}{250} \quad w_{3,ef} \leq \frac{e_f}{250} \quad (24)$$

$$w_{3,FS} \leq \frac{H_{TOT}}{250}, \quad (25)$$

kjer je  $w_{\max,Lf}$  navpični končni upogibek nosilca,  $w_{\max,ef}$  je navpični končni upogibek lege in prečke,  $w_{3,lf}$  je navpični upogibek nosilca,  $w_{3,ef}$  je navpični upogibek lege in prečke za spremenljivo obtežbo ter  $w_{3,FS}$  je vodoravni upogibek fasadnega stebra kot posledica spremenljive obtežbe.

- Preveritev vodoravnih pomikov portalnega okvirja:

$$\Delta \leq \frac{H_C}{150}, \quad (26)$$

kjer je  $H_C$  višina stebra.

## 5 • OPTIMIRANJE

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

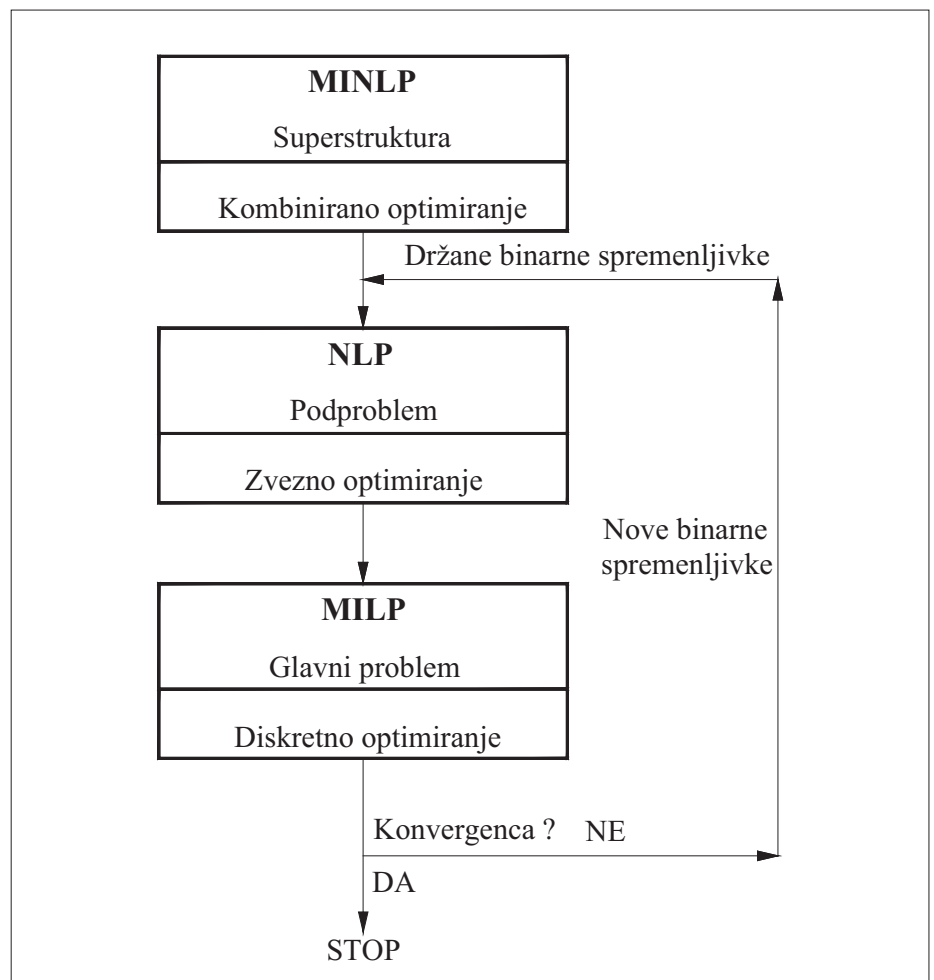
Optimiranje konstrukcije jeklene hale je izvedeno z modificiranim algoritmom zunanje aproksimacije s sprostitvijo enačb (Modified OA/ER), (Kravanja Z., 1994). Algoritem OA/ER je bil razvit iz metode zunanje aproksimacije (Outer-Approximation, OA) (Duran, 1986) z namenom, da bi bilo v MINLP problemih možno eksplicitno izraziti tudi pogojne enačbe  $\mathbf{h}(\mathbf{x}) = \mathbf{0}$ , česar OA-metoda ni omogočala. Modificirani OA/ER-algoritem izmenično rešuje zaporedje optimizacijskih podproblemov nelinearnega programiranja (NLP) in glavnih problemov mešanega celoštevilskega linearnega programiranja (MILP), glej sliko 3. Reševanje posameznega NLP podproblema predstavlja optimiranje zveznih parametrov konstrukcije hale pri držani topologiji, standardnih materialih in standardnih dimenzijah. Rešitev posameznega NLP podproblema predstavlja trenutno zgornjo mejo namenski funkciji, ki jo minimiziramo. Rešitev posameznega MILP glavnega problema pomeni spodnjo mejo namenski funkciji. MILP vsebuje globalno linearno aproksimacijo superstrukturnih alternativ in identificira novo topologijo, standardne materiale in nove standardne dimenzije, tako da spodnja meja ne preseže najboljše zgornje meje. Izmenično reševanje zaporedja NLP podproblemov in MILP glavnih problemov se pri konveksnih problemih ustavi, ko napovedana

spodnja meja preseže najboljšo zgornjo mejo. Nekonveksni problemi so izračunani, kadar se vrednost NLP podproblemov več ne izboljšuje. OA/ER-algoritem zagotavlja za konveksne in kvazikonveksne optimizacijske probleme rešitev globalnega optimuma.

Pri obsežnih nekonveksnih in nelinearnih MINLP problemih z velikim številom diskretnih

odločitev je v splošnem zelo težko doseči optimalno rešitev. Zato uporabimo trifazno MINLP strategijo, kjer opravimo optimiranje v treh zaporednih fazah, kar pospeši konvergenco OA/ER-algoritma oz. omogoči izračun rezultata:

- Reševanje MINLP problema se začne s prvim NLP-jem, kjer so vse spremenljivke zvezne (tudi topologija, material in dimenzije). Dobljeni rezultat predstavlja prvo dobro začetno točko za nadaljnje diskretno optimiranje.



Slika 3 • Koraki OA/ER-algoritma

- V drugi fazi optimiramo topologijo in standardne vrednosti materiala, pri čemer so standardne dimenzije prečnih prereзов trenutno še vedno relaksirane kot zvezne spremenljivke. Optimiranje topologije, materiala in zveznih parametrov je rešljivo (manjša kombinatorika problema) in hkrati akumulira dobro globalno linearno aproksimacijo superstrukture (dobra začetna točka za optimiranje celotnega problema v naslednji fazi).
- Ko sta optimalna topologija in material dosežena, se standardne dimenzije prečnih prereзов v tretji fazi vzpostavijo v izračun in sočasno diskretno optimiranje mase konstrukcije, topologije, materiala in prereзов stebrov, nosilcev, leg, prečk in fasadnih stebrov se nadaljuje, vse dokler ni dosežen optimalni rezultat.

Čeprav so pri uporabi povezane trifazne MINLP strategije binarne spremenljivke definirane v enem samem nizu, so v prvi fazi

deaktivirane. V drugi fazi aktiviramo samo binarne spremenljivke, ki so pridružene topološkim in materialnim alternativam. Binarne spremenljivke alternativ standardnih dimenzij takrat začasno deaktiviramo (postavimo na vrednost nič). Te binarne spremenljivke aktiviramo v tretji fazi. Enako velja za logične pogojne (ne)enačbe diskretnih spremenljivk materialov in standardnih dimenzij. Te so v prvi fazi izključene iz modela. V drugi fazi vključimo v optimiranje logične pogojne (ne)enačbe topologije in diskretnih materialov. Logične pogojne (ne)enačbe standardnih dimenzij so v prvi in drugi fazi neupoštevane, v tretji fazi pa vključene v optimiranje. Inicializacijo vhodnih podatkov in spremenljivk izvedemo samo enkrat, na začetku. Dobra stran te strategije je tudi, da binarnih spremenljivk topologije, materialov in standardnih dimenzij ni treba inicializirati: prva faza predstavlja zvezno optimiranje brez binarnih spremenljivk, prvi NLP podproblem druge faze

vedno prične izvajati v prostoru z nizom samo topoloških in materialnih binarnih spremenljivk, medtem ko tretjo fazo začnemo reševati z MILP glavnim problemom polnega niza vseh definiranih binarnih spremenljivk za sledeči NLP. Omenjena povezana trifazna strategija zagotavlja rešitev globalnega optimuma za konveksne in kvazikonveksne optimizacijske probleme.

Optimizacijski model lahko vsebuje več sto (v določenih primerih tudi več tisoč) binarnih 0-1 spremenljivk. Večina je dodeljena standardnim dimenzijam. Zato je bila razvita specialna procedura presejevanja alternativ, ki avtomatično zmanjša število binarnih spremenljivk na sprejemljivi nivo, kar nato omogoči normalno rešitev MINLP problema. Optimizacija v tretji fazi vsebuje samo tiste 0-1 spremenljivke, ki določajo vrednosti topologije, materialov in standardnih dimenzij v bližnji okolici izračunanih vrednosti, dobljenih v predhodni MINLP fazi.

## 6 • RAČUNSKI PRIMER

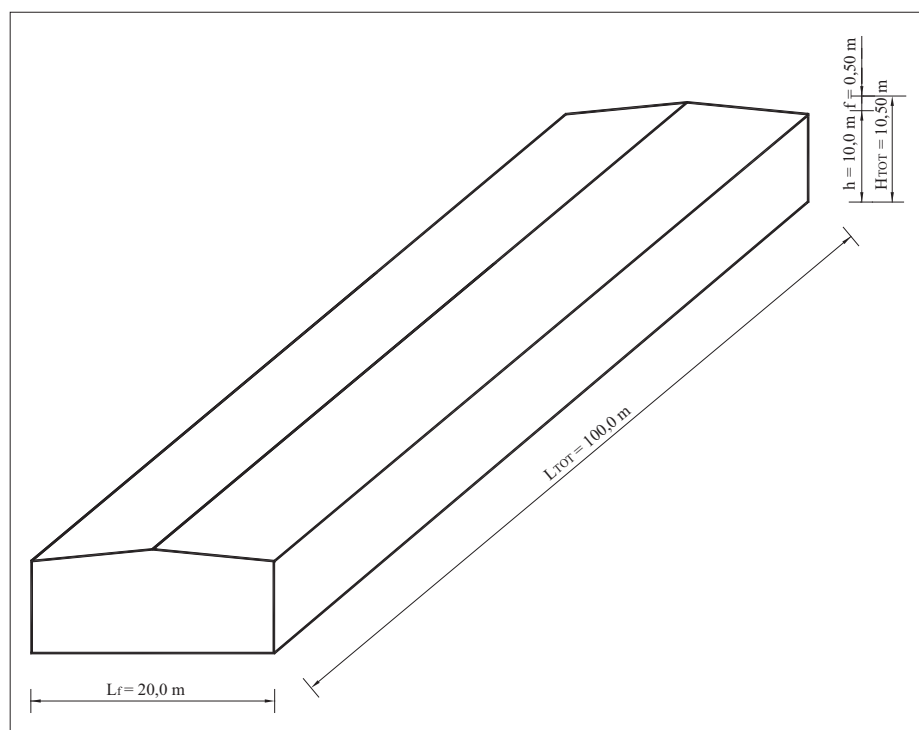
V računskem primeru je predstavljeno sočasno optimiranje mase, topologije, materiala in standardnih profilov jeklene hale dolžine 100 metrov ( $L_{TOT}$ ), širine 20 metrov ( $L_f$ ) ter višine 10,50 metra ( $H_{TOT}$ ), glej sliko 4. Konstrukcija je sestavljena iz nepomičnih jeklenih portalnih okvirjev, na katere so pritrjeni lege, prečke in fasadni stebri. 5 % naklon strešine povzroči nadvišanje nosilca okvirja ( $f$ ) 0,50 metra.

Konstrukcija je obtežena z lastno težo konstrukcije, s kritino, fasadno oblogo in spremenljivo obtežbo, kar predstavlja karakteristično obtežbo. Lastna teža kritine znaša  $m_r = 0,20 \text{ kN/m}^2$ , fasadna obloga pa  $m_f = 0,15 \text{ kN/m}^2$ . Spremenljiva obtežba  $s_n = 2,50 \text{ kN/m}^2$  (sneg) in  $w_n = 0,5 \text{ kN/m}^2$  (vodoravni veter) sta definirani v modelu kot vhodna podatka. Projektna obtežna kombinacija za mejno stanje nosilnosti je  $1,35 \cdot \text{lastna teža} + 1,5 \cdot \text{sneg} + 1,5 \cdot 0,6 \cdot \text{vodoravni veter}$ , medtem ko za mejno stanje uporabnosti znaša  $1,0 \cdot \text{lastna teža} + 1,0 \cdot \text{sneg} + 1,0 \cdot 0,6 \cdot \text{vodoravni veter}$ . Tako vodoravna kot navpična enakomerna zvezna linijska obtežba na nosilec se avtomatsko izračunavata med optimiranjem glede na trenutno izračunani razmak med okvirji.

Definirana superstruktura jeklene hale predstavlja množico različnih topoloških/konstrukcijskih alternativ, dobljenih s kombinacijo

različnega števila okvirjev (največ 70), leg (največ 50) in prečk (največ 20). Superstruktura vsebuje mešan izbor standardnih prereзов za vsak element posebej, vroče valjanih

HEA-prezešov (od HEA 100 do HEA 1000) in vroče valjanih IPE-prezešov (od IPE 80 do IPE 600). V superstrukturo so vključena tudi konstrukcijska jekla (S235, S275 in S355). Tako je za vsak standardni prerez dodeljen vektor diskretnih številčnih vrednosti – alternativ  $\mathbf{q}$ . Na primer: vektorji diskretnih alternativ višine prečnega prereza  $\mathbf{q}_f^{hc}$ ,  $\mathbf{q}_l^{hg}$ ,  $\mathbf{q}_k^{hc}$ ,  $\mathbf{q}_l^{hg}$ ,  $\mathbf{q}_b^{hc}$  za vsako



Slika 4 • Globalna geometrija hale

skupino konstrukcijskih elementov. Stebri in fasadni stebri predstavljajo prvo skupino elementov, kjer poteka izbor izmed 24 različnimi vroče valjanimi HEA-profilii (od HEA 100 do HEA 1000) za vsak element posebej:

$$\mathbf{q}_p^{he} = \mathbf{q}_p^{hc} = \{9,6; 11,4; 13,3; 15,2; 17,1; 19,0; 23,0; 25,0; 27,0; 29,0; 31,0; 33,0; 35,0; 39,0; 44,0; 49,0; 54,0; 59,0; 64,0; 69,0; 79,0; 89,0; 99,0\}$$

Nosilci, lege in prečke so druga skupina elementov, kjer poteka izbor izmed 18 različnimi vroče valjanimi IPE-profilii (od IPE 80 do IPE 600) za vsak element posebej, prikazani so vektorji diskretnih alternativ višine prečnega prereza:

$$\mathbf{q}_l^{he} = \mathbf{q}_k^{he} = \mathbf{q}_l^{hc} = \{8,0; 10,0; 12,0; 14,0; 16,0; 18,0; 20,0; 22,0; 24,0; 27,0; 30,0; 33,0; 36,0; 40,0; 45,0; 50,0; 55,0; 60,0\}$$

Superstrukturo tako sestavlja ( $n$ ) možnih alternativ portalnih okvirjev,  $n \in N$ ,  $N = \{1, 2, 3, \dots, 70\}$ , ( $2m$ ) sodih alternativ leg,  $m \in M$ ,  $M = \{1, 2, 3, \dots, 25\}$  in ( $2r$ ) sodih alternativ prečk,  $r \in R$ ,  $R = \{1, 2, 3, \dots, 10\}$ , ki dajejo  $70 \cdot 25 \cdot 10 = 17500$  različnih topoloških alternativ. Z različnimi:

–  $s$  alternativami standardnega materiala,  $s \in S$ ,  $S = \{1, 2, 3\}$ ,

–  $i$  alternativami standardnega HEA-prereza stebra,  $i \in I$ ,  $I = \{1, 2, 3, \dots, 24\}$ ,  
 –  $j$  alternativami standardnega IPE-prereza nosilca,  $j \in J$ ,  $J = \{1, 2, 3, \dots, 18\}$ ,  
 –  $k$  alternativami standardnega IPE-prereza lege,  $k \in K$ ,  $K = \{1, 2, 3, \dots, 18\}$ ,  
 –  $l$  alternativami standardnega IPE-prereza prečke,  $l \in L$ ,  $L = \{1, 2, 3, \dots, 18\}$  in  
 –  $p$  alternativami standardnega HEA-prereza fasadnega stebra,  $p \in P$ ,  $P = \{1, 2, 3, \dots, 24\}$   
 je skupno definiranih  $n \cdot m \cdot r \cdot s \cdot i \cdot j \cdot k \cdot l \cdot p = 70 \cdot 25 \cdot 10 \cdot 3 \cdot 24 \cdot 18 \cdot 18 \cdot 18 \cdot 24 = 1.7635968 \cdot 10^{11}$  različnih konstrukcijskih alternativ.

Za optimiranje je bil uporabljen predlagani MINLP optimizacijski pristop. Namen optimiranja je bil najti najmanjšo možno maso konstrukcije, optimalno topologijo (optimalno število okvirjev, leg in prečk), optimalno trdnost jekla in optimalne standardne profile elementov.

Optimiranje je bilo opravljeno s programskim paketom MIPSYN, ki je bil izpeljan iz programov PROSYN (Kravanja Z., 1994) in TOP (Kravanja S., 1992). Reševanje MINLP problema hale je bilo opravljeno s trifaznim optimiranjem in z modificiranim OA/ER-algoritmom zunanje aproksimacije s sprostitvijo enačb. Za reševanje NLP podproblemov je bil uporabljen program CONOPT2 (Drudd, 1994) (splošna metoda reduciranih gradientov), za reševanje

MILP glavnih problemov pa Cplex 7.0 (Cplex) (metoda vejanja in omejevanja).

Uporabljena je bila povezana trifazna MINLP strategija. Za prvim zveznim NLP (inicializacija), ki predstavlja prvo fazo, drugo fazo nadaljujemo z diskretnim optimiranjem topologije in standardnih materialov, medtem ko standardne dimenzije začasno sprostimo v zvezne spremenljivke, glej konvergenco modificiranega OA/ER-algoritma, preglednica 1. Na tej stopnji koristimo samo vektorje binarnih spremenljivk topologije in standardnih materialov  $\mathbf{y}_n$ ,  $\mathbf{y}_m$ ,  $\mathbf{y}_l$  in  $\mathbf{y}_s$ , pogojne (ne)enačbe strukturne analize in logične pogojne (ne)enačbe. Ko sta izračunana optimalna topologija in standardni material (142,83 tone pri 3. MINLP iteraciji, vsi naslednji rezultati so slabši), račun nadaljujemo s tretjo fazo, kjer vzpostavimo izračun standardnih dimenzij. V tej fazi so v optimizacijo vključeni vektorji binarnih spremenljivk  $\mathbf{y}_l$ ,  $\mathbf{y}_k$ ,  $\mathbf{y}_r$ ,  $\mathbf{y}_i$  in  $\mathbf{y}_p$  standardnih profilov stebrov, nosilcev, leg, prečk in fasadnih stebrov kakor tudi logične pogojne neenačbe standardnih dimenzij. Končni optimalni rezultat 153,35 tone je bil dobljen v 5. glavni MINLP iteraciji (vsi naslednji rezultati so bili slabši).

Optimalni rezultat predstavlja omenjeno najmanjšo izračunano maso konstrukcije 153,35 tone, dobljeno pri optimalnem številu 19 portalnih okvirjev, 12 legah in 10 prečkah,

MINLP Iteracija	MINLP Podfaza	Rezultat				Standardni prerezi (cm <sup>2</sup> )				
		Masa (ton)	Okvirji	Lege	Prečke	Steber	Nosilec	Lega	Prečka	Fasadni steber
Faza 1: zvezno optimiranje										
1.	1.NLP	140,68	17,45	10,01	10,00	177,13	156,59	26,45	20,26	86,28
Faza 2: diskretno optimiranje topologije in standardnih materialov										
2.	1.MILP	325,05	20	12	10	165,29	138,30	17,24	15,59	74,16
	2.NLP	144,00				168,97	147,30	19,32	16,45	76,41
3.	2.MILP	3335,27	18	12	10	176,33	151,41	22,44	20,15	77,53
	3.NLP	<b>142,83</b>				<b>175,33</b>	<b>154,56</b>	<b>22,16</b>	<b>19,30</b>	<b>76,41</b>
4.	3.MILP	331,91	19	12	10	172,91	147,46	21,78	17,95	77,53
	4.NLP	143,27				172,04	150,78	2064	17,77	76,41
Faza 3: diskretno optimiranje topologije, standardnih materialov in standardnih dimenzij										
5.	4.MILP	341,08	19	12	10	178,00	156,00	23,90	20,10	86,80
	5.NLP	<b>153,35</b>				<b>H 450</b>	<b>I 600</b>	<b>I 180</b>	<b>I 160</b>	<b>H 260</b>
6.	5.MILP	359,93	20	12	10	178,00	156,00	23,90	20,10	86,80
	6.NLP	158,59				H 450	I 600	I 180	I 160	H 260

Standardni material S355 je bil izbran za steber, nosilec, lego, prečko in fasadni steber.

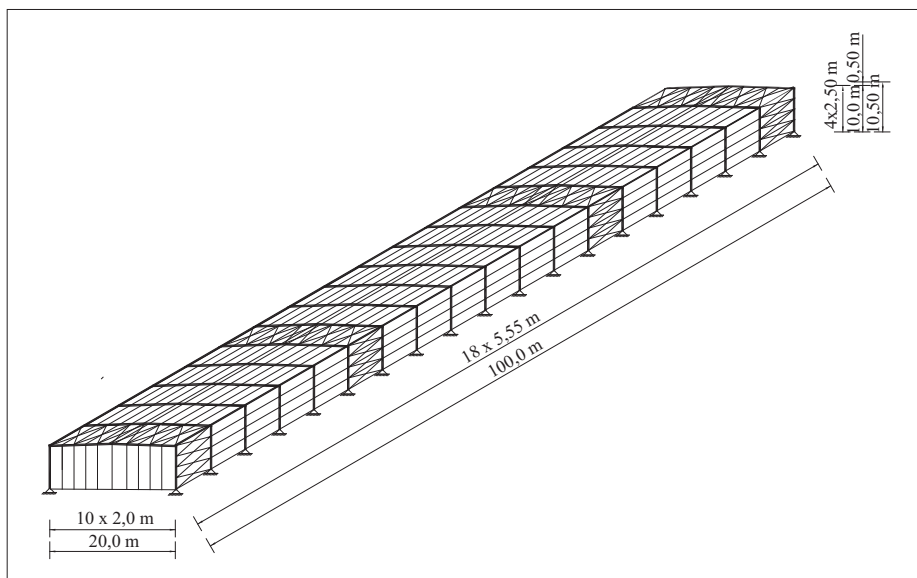
Oznaka H v preglednici 1 pomeni vroče valjeni HEA-prerez.

Oznaka I v preglednici 1 pomeni vroče valjeni IPE-prerez.

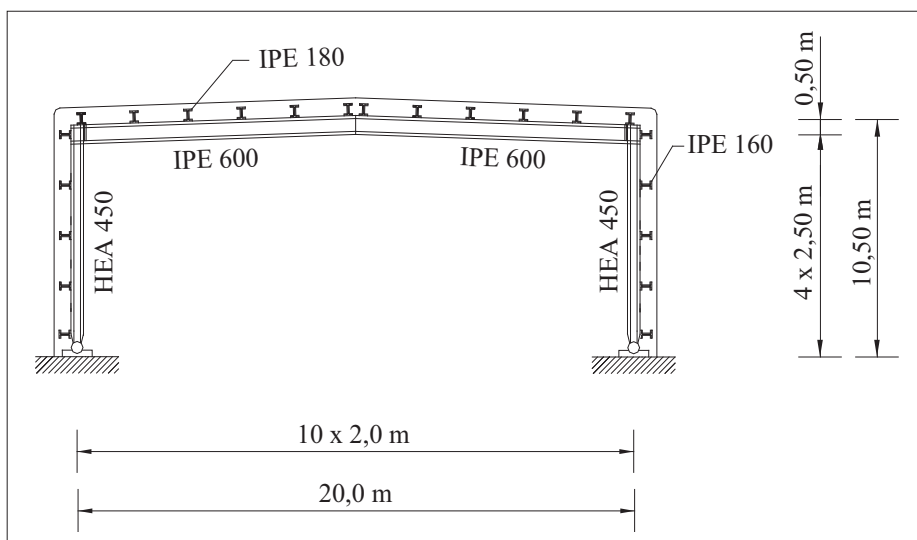
#### Preglednica 1: Konvergenca modificiranega OA/ER-algoritma

glej sliko 5, pri izračunanih optimalnih standardnih profilih stebrov (HEA 450), nosilcev (IPE 600), leg (IPE 180), prečk (IPE 160) in fasadnih stebrov (HEA 260) ter pri materialu S355, glej sliko 6. Dobljena optimalna masa jeklene konstrukcije 153,35 tone je bila izračunana pri 19 nepomičnih glavnih/portalnih okvirjih ( $\alpha_{cr} \geq 10$ ), sestavljenih iz stebrov prereza HEA 450 in lomljenih nosilcev (dvo-kapnica) IPE 600. Za primerjavo smo izvedli tudi optimizacijo mase jeklene konstrukcije hale, ki bi bila sestavljena iz pomičnih portalnih okvirjev ( $\alpha_{cr} < 10$ ). Izračunana optimalna masa konstrukcije hale bi bila v tem primeru za 7 % večja kot pri hali z nepomičnimi okvirji: konstrukcijo bi tvorilo 27 pomičnih portalnih okvirjev, sestavljenih iz stebrov HEA 400 in nosilcev IPE 500.

V tretji fazi je bilo zelo težko doseči optimalni rezultat, saj je število definiranih konstrukcijskih alternativ zelo visoko:  $1.7635968 \cdot 10^{11}$ . Zato je bila uporabljena posebna strategija presejevanja alternativ, ki avtomatično zmanjša število binarnih spremenljivk na sprejemljivi nivo. V tretji fazi optimiranje vsebuje samo tiste 0-1 spremenljivke, ki določajo vrednosti topologije, standardnih materialov in standardnih dimenzij v bližnji okolici izračunanih vrednosti, dobljenih v drugi MINLP fazi. Uporabljene so bile samo 3 binarne spremenljivke (1 pod in 2 nad izračunano vrednostjo iz 2. faze) za topologijo, steber, nosilec, lego, prečko in fasadni steber posebej. Tako smo zmanjšali število 245 binarnih spremenljivk na vsega 27 binarnih spremenljivk. Število  $1.7635968 \cdot 10^{11}$  konstrukcijskih alternativ se je znatno zmanjšalo na  $i \cdot j \cdot k \cdot l \cdot n \cdot m \cdot p \cdot r \cdot s = 3 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3 = 19683$  alternativ, kar je bistveno izboljšalo učinkovitost iskanja rešitve.



Slika 5 • Optimalna konstrukcija jeklene hale



Slika 6 • Optimalna konstrukcija okvirja

## 7 • SKLEP

V prispevku smo predstavili optimiranje mase, topologije, diskretnih materialov in standardnih dimenzij jeklene konstrukcije

hale. Optimiranje je bilo opravljeno z metodo mešanega celoštevilskega nelinearnega programiranja MINLP. Predstavili smo teoretični

opis problema kot tudi praktični primer optimiranja hale. Z računskim primerom smo pokazali, da je metoda MINLP primerna za reševanje diskretno zveznih optimizacijskih problemov konstrukcij hal.

## 8 • LITERATURA

- Brooke, A., Kendrick, D., Meeraus, A., GAMS, A User's Guide, Scientific Press, Redwood City, CA, 1988.  
 CPLEX User Notes, ILOG inc. 2014.  
 Drudd, A. S., CONOPT, A Large-Scale GRG Code, ORSA J. Comput., 6, 207-216, 1994.

- Duran, M. A., Grossmann, I. E., An outer approximation method for a class of mixed-integer nonlinear programs, *Math. Program.*, 36, 307–339, 1986.
- EN 1993-1-1, Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings Design of steel structures, European Committee for Standardization, Brussels, 2005.
- Geoffrion, A. M., Generalized benders decomposition, *J. Optim. Theory*, 10, 237–262, 1972.
- Guerlement, G., Targowski, R., Gutkowski, W., Zawidzka, J. and Zawidzki, J., Discrete minimum weight design of steel structures using EC3 code, *Struct. Multidisc. Optim.*, 22, 322–327, 2001.
- 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., Kravanja, Z., Bedenik, B. S., Faith, S., Simultaneous Topology and Parameter Optimization of Mechanical Structures, *Numerical Methods in Engineering '92, Proceedings of the First European Conference on Numerical Methods in Engineering*, ed. Ch. Hirsch et al., pp. 487–495, Elsevier, Amsterdam, 1992.
- Kravanja, Z., Grossmann, I. E., New Developments and Capabilities in PROSYN - An Automated Topology and Parameter Process Synthesizer, *Computers chem. Eng.*, 18, 1097–1114, 1994.
- Kravanja, S., Kravanja, Z., Bedenik, B. S., The MINLP optimization approach to structural synthesis. Part I: A general view on simultaneous topology and parameter optimization, *Int. J. Numer. Methods Eng.*, 43, 263–292, 1998a.
- Kravanja, S., Kravanja, Z., Bedenik, B. S., The MINLP optimization approach to structural synthesis. Part II: Simultaneous topology, parameter and standard dimension optimization by the use of the Linked two-phase MINLP strategy, *Int. J. Numer. Methods Eng.*, 43, 293–328, 1998b.
- Kravanja, S., Žula, T., Cost optimization of industrial steel building structures, *Advances in engineering software*, 41(3), 442–450, 2010.
- Kravanja, S., Turkalj, G., Šilih, S., Žula, T., Optimal design of single-story steel building structures based on parametric MINLP optimization, *Journal of Constructional Steel Research*, 81, 86–103, 2013.
- McKinstry, R., James, B. P., Lim, Tiku, T., Tanyimboh, Duoc, T., Phanc, W., S., Optimal design of long-span steel portal frames using fabricated beams, *Journal of Constructional Steel Research*, 104, 104–114, 2015.
- McKinstry, R., James, B. P., Lim, T., Tanyimboh, D., T., Phanc, W., S., Comparison of optimal designs of steel portal frames including topological asymmetry considering rolled, fabricated and tapered sections, *Engineering Structures*, 111, 505–524, 2016.
- O'Brien, E. J., Dixon, A. S., Optimal plastic design of pitched roof frames for multiple loading, *Comput. Struct.*, 64, 737–740, 1997.
- Saka, M. P., Optimum design of pitched roof steel frames with haunched rafters by genetic algorithm, *Comput. Struct.*, 81, 1967–1978, 2003.
- 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.

**AQUAPOL**  
*Trajnostno sušenje sten.*

**V sodelovanju z naravo  
 30 let po svetu novo v  
 Sloveniji**

# RAZVOJ NAPRAVE ZA OBDELAVO BALASTNIH VODA NA PLOVILIH S HIDRODINAMSKO KAVITACIJO

## DEVELOPMENT OF A HYDRODYNAMIC CAVITATION SYSTEM FOR THE TREATMENT OF BALLAST WATER ON SHIPS

Martina Cvetković, mag. ing. pp. tp.  
prof. dr. Franci Steinman, univ. dipl. inž. grad.

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo  
Hajdrihova 28, 1000 Ljubljana

Znanstveni članek

UDK 532.5:574.583(26.04)(497.4)

**Povzetek** | Eden glavnih načinov prenosa invazivnih tujerodnih vrst med vodnimi ekosistemi po svetu so balastne vode, zato želimo z različnimi sistemi za obdelavo balastnih voda zmanjšati njihov negativni vpliv oziroma preprečiti širjenje invazivnih organizmov, ki so v njih. Merila za določanje učinkovitosti sistemov so pripravljena v okviru Mednarodne konvencije za nadzor in ravnanje z ladijskimi balastnimi vodami in sedimenti, ki pa še ni začela veljati. Ena od možnosti čiščenja balastnih voda so naprave s hidrodinamsko kavitacijo, v katerih se v glavnem elementu naprave ustvari nenadno zmanjšanje lokalnega tlaka, ki poškoduje ali uniči organizme v pretakajoči se balastni vodi. Predstavili bomo razvoj nove naprave, ki je pri ustvarjanju hidrodinamske kavitacije učinkovitejša kot obstoječe naprave, ki uporabljajo isti proces obdelave vode. S hidravličnimi poskusi smo najprej razvili novo zasnovano z intenzivnim tvorjenjem kavitacije, nato so sledili biološki poskusi z morskovo vodo iz Piranskega zaliva, s katerimi smo preverili še učinek kavitacijske obdelave na morske organizme. Ta je bil ovrednoten z doseženo stopnjo poškodovanosti treh ciljnih morskih organizmov. Preverili smo tudi, ali bi lahko s separacijo, kot predobdelavo morske vode, učinek naprave še izboljšali. Rezultati primerjave kažejo večjo učinkovitost nove naprave na vseh testiranih organizmih in boljše obratovalne lastnosti od obstoječih kavitacijskih sistemov.

Ključne besede: invazivne vrste, balastne vode, Mednarodna konvencija za nadzor in ravnanje z ladijskimi balastnimi vodami in sedimentom, hidrodinamska kavitacija, zooplankton, morske bakterije

**Summary** | Ballast water is one of the most important ways of the transfer of invasive foreign species between the worldwide aquatic ecosystems. With the aim of preventing and decreasing the extent of the spread of invasive organisms, and in accordance with the International Convention for the Control and Management of Ships' Ballast Water and Sediments, different systems for ballast water treatment have so far been developed. Based on a review of existing technologies and their limitations three new designs of hydrodynamic cavitation pilot systems have been developed and consequently optimised. The aim of this investigation was to use hydrodynamic cavitation as the main step in the treatment process and to apply the process of separation as a pre-treatment of ballast water treatment, but only if necessary. In the first phase of the experiments a pilot system, which showed the highest hydraulic efficiency for generating hydrodynamic cavitation, was developed. The aforementioned pilot system was

then chosen in the second, i.e. biological phase of the experiments, the aim of which was to determine the performance of ballast water treatment. The specific criterion for this step was the extent of the destruction of the aimed marine organisms. The results of the biological experiments confirmed that the newly developed system shows a high efficiency on all tested organisms.

Keywords: invasive species, ballast water, International Convention for the Control and Management of Ships' Ballast Water and Sediments, hydrodynamic cavitation, zooplankton, marine bacteria

## 1 • UVOD

Pri tovorni plovbi je zajem balastne vode pogost spremljajoči pojav. Če je plovilo dovolj obremenjeno s tovorom, balast ni potreben, saj tovar zagotavlja stabilnost. Pri plovbi delno polnega ali celo praznega plovila, še posebno v težkih vremenskih razmerah, pa mora plovilo zajeti balastno vodo, da zagotovi stabilnost, zmanjša velikost nagibanja in izboljša ohranjanje smeri plovbe. Ko balastne vode niso več potrebne, se iz plovila izpuščajo v pogosto drugačno okolje, z njimi pa tudi različni organizmi z drugih lokacij. Zato so balastne vode, poleg obrasti na ladijskih trupih in ribogojstva, poglaviti vir oz. način prenašanja tudi invazivnih tujerodnih vrst med različnimi vodnimi ekosistemi po svetu (slika 1) (David, 2013). Invazivna tujerodna vrsta (ITV, angl. non-indigenous species (NIS) oz. invasive alien species (IAS)) je opredeljena za tisto vrsto, ki se pojavi zunaj svojega naravnega okolja, v novem okolju pa njena naselitev in širjenje ogrožata obstoječo biotsko raznovrstnost (ekosisteme, habitate ali vrste) in/ali zdravje ljudi, lahko pa tudi gospodarske dejavnosti. Za Sredozemsko morje in ob tem za Jadransko morje je bilo na seznamu ITV uvrščenih že več kot 980 neavtohtonih vrst, vendar je med njimi le 12 vrst, ki so neposredno povezane z ladijskim prevozom. Domnevamo pa, da bi bilo lahko pomorstvo zaradi balastnih voda oz. zarasti na ladijskih trupih izvor še nadaljnjih 300 tujerodnih vrst, uvrščenih na ta seznam (Zenetos, 2012).

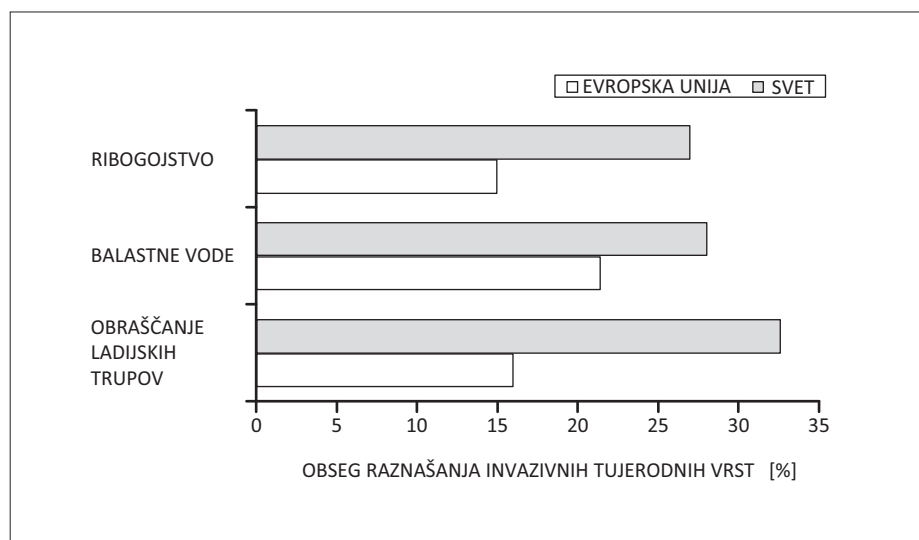
Skupna količina letnih izpustov balastnih voda je bila za leto 2013 ocenjena na približno 3,1 milijarde ton (David, 2014). V njih so doslej zaznali vsaj 10.000 različnih organizmov (Faimali, 2006), med katerimi so tudi različni tujerodni organizmi, kot so vretenčarji, nevretenčarji, rastline, mikroskopske alge in bakterije ((Ruiz, 2000), (Khandeparkar, 2013)). Z večanjem obsega plovbe postaja širjenje organizmov z balastnimi vodami vse bolj nepovraten proces, ki pogosto negativno

vpliva na avtohtone vodne ekosisteme ((Gollasch, 2007), (Kang, 2010)), hkrati pa so balastne vode vir nevarnosti tudi zaradi prisotnih človeških patogenov, kot je npr. *Vibrio cholerae* (Seiden, 2014).

Da bi zmanjšali vir nevarnosti zaradi ITV, je Mednarodna pomorska organizacija (IMO – angl.: International Maritime Organisation) pripravila Konvencijo za nadzor in ravnanje z ladijskimi balastnimi vodami in sedimenti (t. i. konvencija BWM, angl.: Ballast Water Management, v nadaljevanju besedila: konvencija). Z njo želi urediti tako dovoljene načine izpuščanja balastnih voda kot tudi predpisati potrebne oz. dovoljene načine ravnanja oz. obdelave balastnih voda in z njimi povezanih sedimentov ((IMO, 2004), (Lloyd register, 2014)). Konvencija bo začela veljati eno leto po izpolnitvi pogoja, da jo ratificira najmanj 30 držav oziroma toliko držav, ki imajo skupaj vsaj 35 % tonaže svetovnega trgoveškega ladijskega prometa. Doslej je konvencijo ratifici-

ralo 49 držav, ki pa imajo skupaj le 34,82 % trgoveške ladijske tonaže (IMO, 2016), zato konvencija še vedno ni začela veljati. Tako še vedno ostaja najpogostejši način zgolj običajna zamenjava balastnih voda z ladijskim tovorom, pri čemer pa je izpust v morje nekoliko omejen z varnostnimi zahtevami in geografskimi pogoji (lokacija izpuščanja), kar pa seveda ni učinkovit način zaščite vodnih ekosistemov pred ITV.

Čeprav konvencija še ne velja, potekajo intenzivne raziskave različnih tehnologij obdelave balastnih voda, ki bi izpolnile zahteve iz standarda D-2, ki je bil pripravljen v okviru te konvencije. Cilj je, da bi čim bolj zmanjšali vnos ITV v lokalno okolje ali vsaj njihovo možnost širjenja in tako zmanjšali s tem povezana tveganja za okolje. Pregled obstoječih tehnologij oziroma raznolikost uporabljenih procesov v njih podajamo v preglednici 1, kjer je razvidno, da se v želji po večji učinkovitosti obdelave uporabljajo tudi kombinacije tehnologij. Pri slednjih je problematično dodajanje kemikalij, ki so lahko nevarne za posadko ladij ali okolje (Lloyd register, 2014).



Slika 1 • Primerjava virov invazivnih tujerodnih vrst (ITV): obrast na trupih plovil, balastne vode, vzreja morskih organizmov, vse izraženo v odstotkih za EU in za cel svet (prirejeno po (Gollasch, 2007))

PREGLED TEHNOLOGIJ ZA OBDELAVO BALASTNIH VODA			
MEHANSKI PROCES	FIZIKALNA DEZINFEKCIJA	KEMIČNA OBDELAVA	KOMBINACIJE
Filtracija Ciklonsko ločevanje (hidrocikloni) Elektromehanična ločitev	Ultravijolično obsevanje Akustična kavitacija (ultrazvok) Odzračenje (odstranitev raztopljenega kisika) Hidrodinamska kavitacija Toplotna obdelava	Elektro kloriranje/Elektroliza Biocidi Kloriranje Klorid dioksid SeaKleen Peraclean Ocean Ozoniranje Koagulacija/Flokulacija Kemična redukcija (Sulfit/Bisulfit)	Mehanski proces + fizikalna dezinfekcija Mehanski proces + kemična obdelava

Preglednica 1 • Glavne skupine tehnologij za obdelavo balastnih voda in reprezentativni procesi posamezne skupine (prirejeno po (ABS, 2011), (Lloyd register, 2014))

Pri pregledu obstoječih tehnologij smo analizirali njihovo učinkovitost ter njihove prednosti in slabosti. Ocenili smo, da bi

lahko z razvojem nove naprave s hidrodinamsko kavitacijo dosegli višjo stopnjo odstranjevanja ITV iz morske vode in

ugodnejše pogoje delovanja naprave. Rezultati intenzivnih raziskav so pokazali, da so cilji doseženi.

## 2 • HIDRODINAMSKA KAVITACIJA

Hidrodinamska kavitacija je fizikalni pojav, ki poteka na območjih hitrega zmanjšanja tlaka v tekoči vodi, lahko pa tudi v drugi kapljevini ((Jyoti, 2001), (Al-Jubouri, 2010)). Takšne spremembe običajno nastajajo pri naglih geometrijskih spremembah v napravi, kjer tokovne razmere v tekočini povzročijo, da lokalno tekočina preide iz tekočega v plinasto (mehurčkasto) stanje in nato nazaj v tekoče stanje (Arrajo, 2008). Pri teh pretvorbah nastanejo tlačni valovi kot posledica znatnih količin ujete energije, ki se sprošča iz razpadlega mehurčka plinaste faze. Proces je zelo intenziven in ga pogosto obravnavamo kot nezaželen pojav (Knapp, 1970), ki lahko poškoduje različne površine, kot so ladijski propelerji, črpalke, ventili in ostenje cevi ((Brennen, 1995), (Brujan, 2011)), na katerih nastaja erozija, ki jo spremljajo vibracije in hrup (Kuiper, 2012). Tipični primeri, kjer se pojavlja hidrodinamska kavitacija, so različne šobe, odprtine, Venturijeva zožitve ipd. (slika 2).

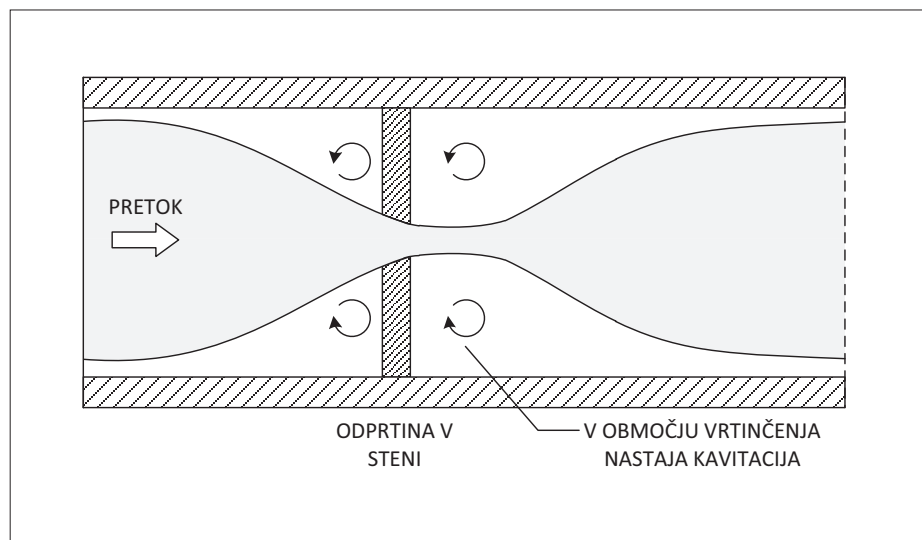
Za obdelavo balastnih voda pa smo v našem primeru hidrodinamsko kavitacijo uporabili za koristen proces, s katerim želimo doseči, da bi bili pri pretakanju balastne vode preko območja kavitacije organizmi (še predvsem ITV) poškodovani oz. uničeni v takšni meri, da se ne bi mogli obnovljati ali množiti in ne bi bili več nevarni za okolje.

Iz številnih študij lahko povzamemo, da so naprave s hidrodinamsko kavitacijo učinkovitejše pri uničevanju ITV in običajno še precej energetsko učinkovitejše v primer-

javi z napravami z akustično kavitacijo, ki jo povzroča prehod ultrazvočnih valov skozi medij ((Chivate, 1993), (Pandit, 1993)). Energetska učinkovitost pri hidrodinamski kavitaciji znaša od 54 % do 60 %, pri različnih akustičnih napravah pa le od 3 % do 43 %. Izračun učinkovitosti je opisan v literaturi ((Arrajo, 2008), (Chivate, 1993), (Jyoti, 2001), (Pandit, 1993)). Poleg energetske učinkovitosti študije prikazujejo druge prednosti hidrodinamske kavitacije pred akustično (Jyoti, 2001), kot so veliko preprostejša oprema, preprostejše vzdrževanje, enostavna nadgradnja naprave

za povečanje zmogljivosti oziroma kombiniranje z dodatno obdelavo.

Hidrodinamska kavitacija, ki uničuje celice enoceličnih ali večceličnih organizmov, je sicer že znana in razširjena metoda (npr. dezinfekcije) v različnih industrijskih procesih ((Sawant, 2008), (Brujan, 2011)). Vendar pa je doslej le nekaj avtorjev ((Kato, 2003), (Sawant, 2008), (Renade, 2009)), in še to le v laboratorijskih pogojih, raziskovalo učinkovitost hidrodinamske kavitacije pri uničevanju različnih morskih organizmov. Tudi mednarodna Uprava za vgradnjo naprav na plovila je doslej za obdelavo balastnih voda odobrila le štiri sisteme, ki uporabljajo hidrodinamsko kavitacijo ((IMO, 2014), (Lloyd register, 2014), (Cvetković, 2015)), pa še



Slika 2 • Pri hitrem toku tekočine skozi odprtino se v območju zožitve pretočnega prereza za odprtino, ki jo tvori iztekajoči curek, lahko pojavi hidrodinamska kavitacija (prirejeno po (Gogate, 2011))



ti jo uporabljajo le kot enega od procesov obdelave balastnih voda, ki se nadgradi z dodajanjem različnih kemikalij, da se poveča učinkovitost obdelave. S tem naprave sicer izpolnjujejo pogoje IMO, vendar pa zaradi do-

dajanja kemikalij negativno vplivajo na okolje (na morske organizme), so negospodarne (visoki stroški vzdrževanja, visoka poraba energije) in lahko vplivajo na varnost pri obratovanju, saj je za ravnanje z napravami in

kemikalijami potrebno posebno izobraževanje posadke (Lloyd Register, 2014). Zaradi zgornjih ugotovitev smo se odločili razviti učinkovitejšo napravo s hidrodinamsko kavitacijo.

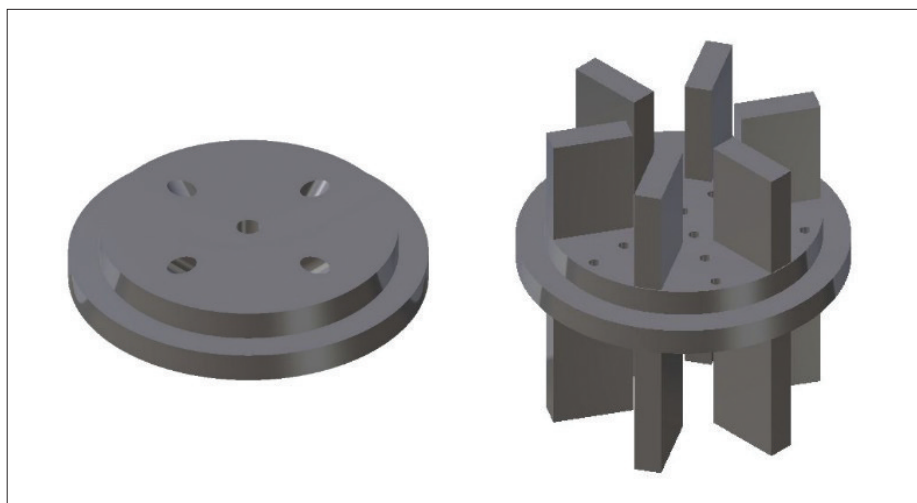
### 3 • RAZVOJ NOVE NAPRAVE IN EKSPERIMENTALNO PREVERJANJE UČINKOVITOSTI KAVITACIJSKE OBDELAVE MORSKE VODE

Cilj raziskav je bil v hidravličnem laboratoriju UL FGG razviti novo napravo in s poskusi s sladko vodo doseči nastajanje čim boljše hidrodinamske kavitacije, nato pa učinek nove naprave preveriti na treh značilnih organizmih v morski vodi severnega Jadrana. Najprimernejšo zasnovo elementov, ki v cevovodu ustvarjajo razmere za razvoj kavitacije, smo določili s preizkušanjem različnih geometrij šob in z različnimi porazdelitvami po prerezu (slika 3), kombinirano z usmerniki curkov. Tako je bilo zasnovano jedro naprave.

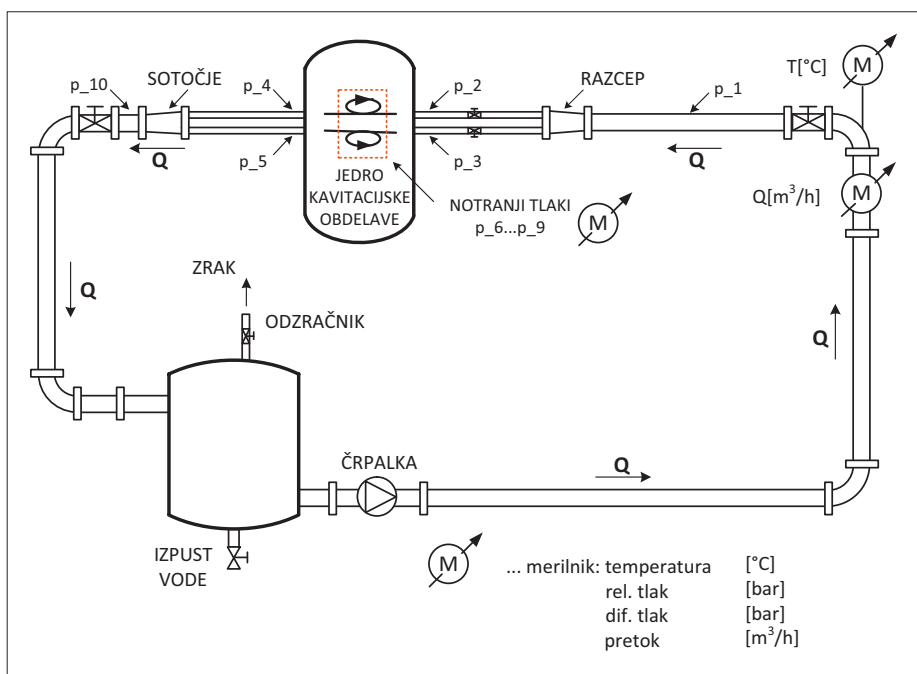
Po razvoju učinkovitega jedra naprave, s katerim se kavitacija kar najboljše ustvarja, smo postopoma zasnovali tri nove konstrukcije pilotnih naprav (oznake: I, II in III), kjer je bilo treba doseči čim večji učinek gradnikov v skupini (šobe, usmerjevalniki ipd.). Preučili smo različne možnosti napeljave cevovodov ter poiskali najprimernejšo konfiguracijo in dimenzije gradnikov v osrednji komori naprave. V vsakem naboru poskusov smo za vse zasnovane naprave merili številne parametre, npr. dejanski pretok ( $Q_0$ ), zračni tlak ( $p_0$ ), temperaturo zraka ( $T_{zraka}$ ) in vode ( $T_{vode}$ ), tlak na vtoku v sistem ( $p_1$ ) in dejanski tlak na ključnih točkah, pomembnih za spremljanje delovanja naprave ( $p_2...p_{10}$ ) (slika 4). Z njimi smo izračunali značilne vrednosti delovanja pilotnih naprav, kot so hitrost vode na značilnih prerezih sistema ( $v$ ), kavitacijsko število ( $\sigma$ ), razlike tlakov ( $\Delta p$ ) in poraba energije ( $P$ ), s katerimi je bilo mogoče dokazati primerljivo oz. boljše delovanje novo razvite naprave od doslej znanih naprav.

Prikazana naprava III je pri poskusi izkazala najboljši hidravlični učinek. Kot kaže shema, ima ta v komori vgrajeni dve nasprotno usmerjeni dotočni cevi, ki imata na ustju nameščeni prečni plošči z odprtini. Iztoki iz odprtini za ploščama ustvarjajo območji kavitacije, ki se zaradi nasprotno usmerjenih dotokov medsebojno še intenzivno prepletata.

Ko so se v napravi III opravljal poskusi z morskovo vodo, v kateri so prisotni organizmi in druge snovi, je v komori potekalo tudi



Slika 3 • Ena od obravnavanih plošč s petimi odprtinami (srednja odprtina je izvrtana pravokotno, preostale štiri pa pod kotom 45°), za katerimi iztekajoči curki ustvarjajo hidrodinamsko kavitacijo, s ploščo pa so kombinirani še različni usmerjevalniki



Slika 4 • Shema instalacije naprave III z merilno opremo in opremo za uravnavanje pretoka. Zgornji osrednji del je komora, tj. jedro, v katerem se ustvarja kavitacija, ko črpalka poganja izbrani pretok po krogotoku

delno centrifugiranje. Voda namreč v komoro doteka tangencialno, zato so v nastalem vrtničnem toku delci z gostoto, večjo od gostote vode, s centrifugalno silo porinjeni k ostenju komore, ob katerem drsijo navzdol, do izpusta na dnu komore. Preostali delci in organizmi v vodi pa potujejo prek območja intenzivne hidrodinamske kavitacije, kjer zaradi znižanega lokalnega

tlaka v komori in višjega notranjega tlaka v organizmih na njih nastanejo poškodbe oz. raztrganje njihovega ovoja (membrane). Ker ni mogoče pričakovati, da bi bili pri enem prehodu območja kavitacije poškodovani vsi organizmi v vodi, smo v drugi fazi poskusov raziskali, koliko prehodov kavitacijske obdelave bi bilo potrebnih, da se doseže zadostni obseg uničenja morskih organizmov.

Raziskave v hidravličnem laboratoriju so bile končane, ko smo z izračunom teoretičnih vrednosti hidravličnega delovanja na pilotni napravi III dokazali večjo učinkovitost, kot jo imajo obstoječe naprave. Sledila je druga (biološka) faza poskusov, tj., da bi z ugotavljanjem poškodovanosti izbranih vrst pri poskusih z morskimi vodami določili dejanski učinek na morske organizme oz. na ITV.

#### 4 • POSKUSI ZA OVREDNOTENJE BIOLOŠKE UČINKOVITOSTI NAPRAVE

Za naslednjo fazo poskusov smo izbrali le najučinkovitejšo napravo III. Postavili smo jo v Morski biološki postaji Piran, saj je bilo tam mogoče zajeti morskimi vodami in v njih prisotne organizme. Pri teh poskusih smo ugotavljali morfološke spremembe in stopnjo preživetja zooplanktona (kopepodov) in čist *Artemia salina*, z odvzemanjem vzorcev v izbranih časovnih presledkih pa smo določali tudi časovno zmanjševanje preostalega ravnega potenciala morskih bakterij.

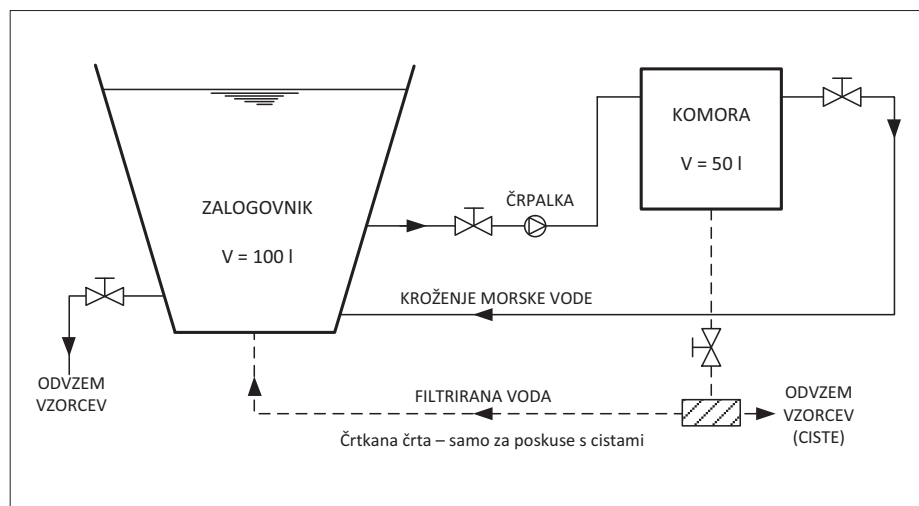
Slika 6 prikazuje zasnovo kroženja vode in spremljajoče instalacije za dovod sveže vode, odvzem za zbiranje čist oz. odvzem vzorcev za ugotavljanje deleža poškodovanih oz. uničenih organizmov. Skupna prostornina morske vode je v enem poskusu v pilotni napravi znašala 150 l (tj. 100 l v zalogovniku in 50 l v komori in v ceveh).

Za kroženje 15 m<sup>3</sup>/h morske vode skozi napravo je bilo treba doseči tlake na vtoku v komoro le v območju od 1,8 do 2,8 bara. Trajanje enega poskusa je bilo izbrano tako, da je celotna prostornina morske vode stokrat zakrožila skozi napravo in je bilo torej (teoretično) doseženih sto prehodov kavitacijskega območja. Vmes so se izvajali odvzemi vzorcev glede na izbrano število kroženj in s tem števila obdelave s kavitacijo. Poskusi so pokazali, da je dosežena intenzivnost hidrodinamske kavitacije tako učinkovita, da bi lahko bila edini proces za obdelavo balastnih voda. Kljub temu smo raziskali še, za koliko bi se povečal biološki učinek naprave, če bi morskimi vodami predhodno obdelali še s separacijo.

Učinkovitost naprave smo preizkušali na izbrani naravni populaciji planktonskih organizmov (zooplankton in heterotrofne morske bakterije) v morskimi vodami ob Morski biološki postaji Piran. Analizo poškodovanosti zooplanktona in čist smo opravili na vzorcih, ki so bili za vsak opravljen poskus odvzeti iz zalogovnika pred začetkom obdelave (to) ter



Slika 5 • Pilotna naprava III pri poskusih z morskimi vodami, postavljena v Morski biološki postaji Piran

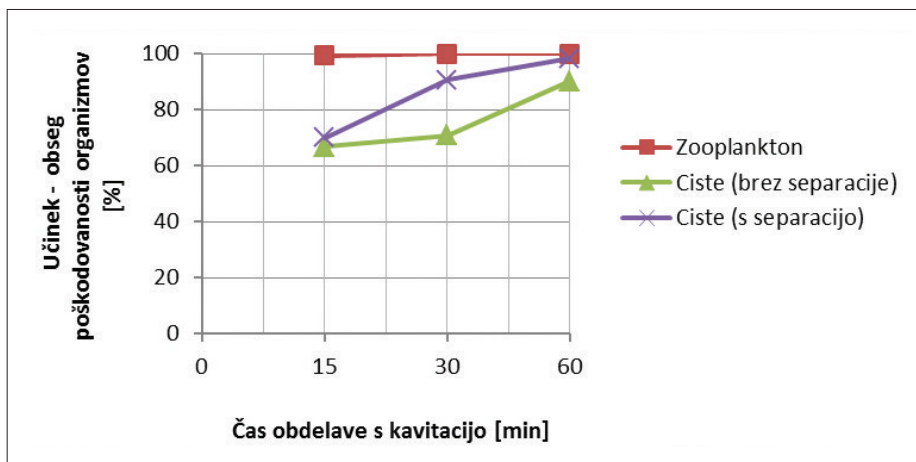


Slika 6 • Shema naprave za obdelavo morske vode in spremljajoče ureditve

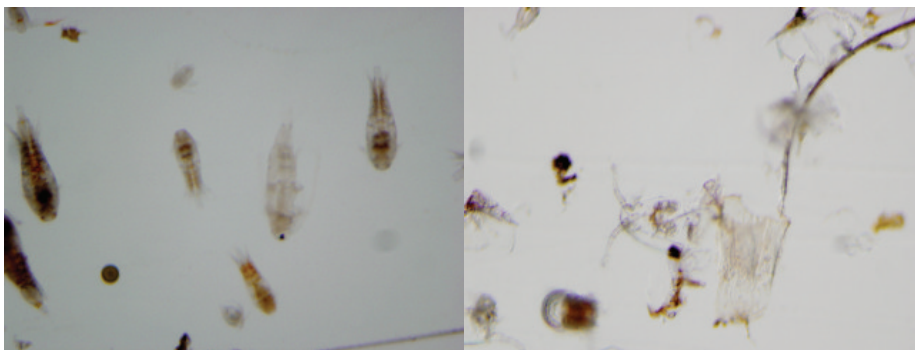
po 15 minutah (t15), po 30 minutah (t30) in po 60 minutah (t60) kavitacijske obdelave. Za bakteriološke analize smo odvzeli vzorce za iste časovne intervale, izpuščen pa je bil odvzem po 15 minutah. Učinkovitost – če se opravi še predobdelava s separacijo (slika 6, črtkana črta) – smo ugotavljali le pri poskusih s cistami, katerih lastna gostota je večja od gostote morske vode (Van Stanpen, 1996). Za preostale testne organizme smo privzeli, da separacija ne bi bila posebej učinkovita – ali ker je lastna gostota organizmov manjša od gostote morske vode ali zaradi njihove plovnosti. Učinkovitost pilotne naprave narašča s časom obdelave, kar bomo prikazali po posameznih organizmih (slika 7).

Za zooplankton je bil kot merilo učinkovitosti upoštevan delež poškodovanega oz. uničenega zooplanktona (kopepodov) po določenem času obdelave. Poskusi so pokazali, da je bilo po zgolj 15 minutah kavitacijske obdelave poškodovanih že do 99,4 % organizmov (slika 8).

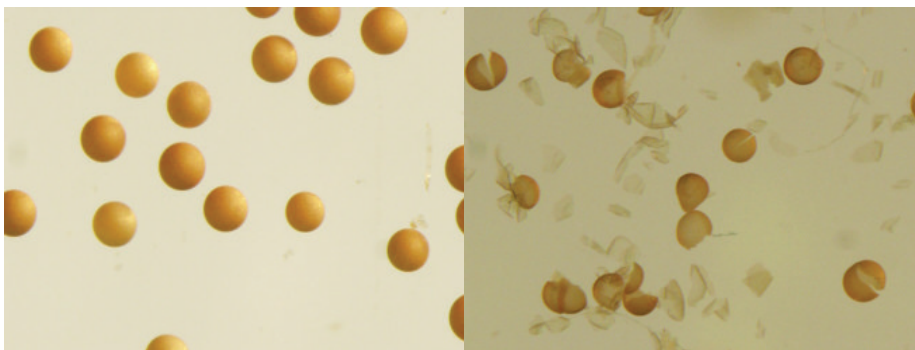
Pri poskusih s cistami je bil po 15 minutah obdelave dosežen obseg do 66,7 % poškodovanih cist, s časom pa se je delež poškodovanosti večal in je po 60 minutah obdelave dosegel 90,2 % poškodovanih cist (slika 9). Ko se je pilotni napravi III dodala še predobdelava vode s separacijo, je bilo po 15 minutah poškodovanih do 69,9 % cist, po 60 minutah obdelave pa kar 98,2 % cist. Ugotovili smo torej, da je naprava III z dodano separacijo še nekoliko učinkovitejša. Po 60 minutah obdelave se je za do 80 % zmanjšalo število morskih bakterijskih celic v preiskanih vzorcih. Zaradi tega preostanka bakterij se je istočasno merila še njihova preostala sposobnost rasti (t. i. BCP). To se je ugotavljalo z dodajanjem 3H-levcina v nosintetizirane proteine v bakterijskih celicah pri odvzetih vzorcih, po postopku, opisanem v literaturi (Kirchman, 1985). Glede na začetno sposobnost rasti nepoškodovanih bakterij smo po 60 minutah obdelave z novo napravo v povprečju izmerili zmanjšanje BCP za 86 %. Rezultati poskusov kažejo, da je le še 1,7 % do največ 30 % preostalih bakterij ohranilo sposobnost rasti, pri čemer je ta razpon v glavnem odvisen od časa trajanja obdelave.



Slika 7 • Učinek obdelave s kavitacijo se je izmeril s stopnjo poškodovanosti organizmov po časovnih intervalih



Slika 8 • Fotografiji vzorca zooplanktona pred obdelavo (levo) in po 60 minutah obdelave s pilotno napravo (desno). Razcefranost organizmov je posledica kavitacijskega procesa



Slika 9 • Fotografija levo kaže ciste *Artemia salina* pred začetkom obdelave (t0), desno pa stanje po 60 minutah obdelave (t60) s pilotno napravo. Poškodbe ovoja so posledica kavitacijske obdelave

## 5 • RAZPRAVA

Rezultati hidravličnih poskusov, ki so bili potrjeni z biološkimi poskusi o doseženem učinku na testne morske organizme, dokazujejo, da je inovativna zasnova nove naprave

zelo uspešna že zgolj z uporabo enega procesa, tj. hidrodinamske kavitacije morske vode. Izkušnje s postopno optimizacijo razvityh naprav kažejo, da sta imela pomemben

vpliv na hidravlično učinkovitost tehnologije tako zasnova naprave kot oblikovanje njenih notranjih gradnikov. To pomeni, da bi lahko z nadaljnimi raziskavami še nekoliko izboljšali tehnologijo ne glede na že dosežene visoke učinke, ki jih kažejo dosedanje raziskave. Primerjava naših dosežkov z lastnostmi obstoječih laboratorijskih pilotnih naprav za

obdelavo balastne vode ((Kato, 2003), (IMO, 2006), (Sawant, 2008), (Ranade, 2009)) je bila težavna, saj nekateri ključni podatki obstoječih sistemov niso dosegljivi. Tako v objavah niso podani podrobnejši obratovni pogoji niti ni mogoča natančna prepoznava njihovih opazovanih organizmov (ker je podan le splošni opis, npr. plankton). Za parametre, ki so dovolj podrobno objavljeni, pa primerjava rezultatov raziskav nedvoumno pokaže pomembne prednosti naše naprave pred drugimi (preglednica 2).

Primerjava s sistemom Sawant pokaže, da je z našo napravo III dosežena približno 17 % večja poškodovanost zooplanktona pri približno enakem trajanju obeh obdelav (po 15 minutah), pri čemer naša naprava omogoča trikrat večje pretoke ob enakih ali celo manjših delovnih tlakih. Primerjava z rezultati sistema Ranade pokaže, da naša naprava za približno 23 % bolj zmanjša številčnost morskih bakterij in obenem enako učinkovito poškoduje zooplankton (več kot 99 % pri obeh sistemih). Najboljši rezultati sistema Ranade kažejo le 46 % zmanjšanje števila bakterijskih celic, za kar je bil potreben tlak 6,9 bara in dosežen pretok 2,95 m<sup>3</sup>/h. Naša naprava pa je skoraj dvakrat uspešnejša pri zmanjšanju števila bakterijskih celic in boljša pri zmanjšanju sposobnosti ponovne bakterijske rasti, vse to pri

SISTEM	Pretok	Tlak na vhodu v sistem	Učinkovitost pri testiranih organizmih
Sistem Sawant (2008)	4,68 m <sup>3</sup> /h	2,9 bara	82 % poškodovanega zooplanktona
Sistem Ranade (2009)	2,95 m <sup>3</sup> /h	6,9 bara	99 % poškodovanega zooplanktona 46 % zmanjšanja bakterijskih celic
Sistem Kato (2003)	1,13 m <sup>3</sup> /h	10 bar	delna učinkovitost pri poškodovanju cist (odstotek učinkovitosti ni bil podan)
<b>Naša naprava</b>	<b>15 m<sup>3</sup>/h</b>	<b>1,8 do 2,8 bara</b>	<b>99,4 % poškodovanega zooplanktona do 80 % zmanjšanja bakterijskih celic 98,2 % poškodovanih cist</b>

Preglednica 2 • Primerjava učinkovitosti naše naprave III z obstoječimi eksperimentalnimi napravami, ki tudi uporabljajo hidrodinamsko kavitacijo

bistveno nižjih delovnih tlakih (do 2,8 bara) in z doseženim petkrat višjim pretokom (15 m<sup>3</sup>/h). Primerjava s sistemom Kato pokaže, da je naša pilotna naprava poškodovala večino cist *Artemia salina* že pri izpostavljenosti trikrat nižjemu vhodnemu tlaku v napravo in ob tem omogočila več kot desetkrat večji pretok. Kato in sodelavci so poročali, da so dosegli le delno poškodovanje cist, žal pa odstotek poškodovanosti ni podan.

Treba je preveriti še, ali nova pilotna naprava že izpolnjuje zahteve standarda D-2 iz konvencije o ravnanju z balastnimi vodami. Prvi cilj je dosežen, saj stopnja poškodovanosti

testiranih organizmov, zlasti kopepodov, že po 30 minutah obdelave doseže to zahtevo iz standarda D-2, vendar pa je treba preveriti še izpolnjevanje drugih zahtev tega standarda. Ena od teh zahtev je, da je treba učinkovitost naprave preveriti pri koncentraciji organizmov v balastnih vodah, ki pa je višja od koncentracije testiranih organizmov v zajeti morski vodi v Piranu. Zato se bo pri nadaljnjih podrobnejših poskusih ugotavljala učinkovitost naprave III še pri višjih koncentracijah različnih mikroorganizmov s posebnim poudarkom na poskusih s fitoplanktonom, zooplanktonom (kopepodi in ciste) ter dodatno s patogenimi bakterijami.

## 6 • SKLEP

Nova naprava III, v kateri smo koristno uporabili hidrodinamsko kavitacijo, izkazuje ugodne obratovne pogoje in dokazano visoke učinke na testirane organizme. Njena pomembna prednost je, da zato ni več potrebno dodajanje okolju in ljudem nevarnih kemikalij, saj je visok učinek dosežen zgolj s hidrodinamsko kavitacijo, učinek pa sicer v

manjši meri lahko še izboljšamo z dodano separacijo. Poskusi z morsko vodo dokazujejo visoko učinkovitost naprave na značilne vrste zooplanktona, cist in morskih bakterij, zato je naprava primerna za obdelavo balastnih voda. Hkrati ne vidimo tehničnih ovir, da ne bi bila ta zasnova uporabna še na drugih področjih, kjer je za sterilizacijo

vode potrebno uničenje različnih mikroorganizmov. Pri nadaljnjem razvoju nove naprave bodo opravljene še raziskave pri drugačnih obratovnih razmerah in poskusi na prototipni velikosti, da bi preverili njeno delovanje še v dejanskih pogojih obratovanja na plovilu, tj. med plovo, v času natovarjanja oz. praznjenja balastnih voda iz rezervoarjev. Prav tako bo treba s prototipnimi poskusi raziskati še najprimernejši čas za kavitacijsko obdelavo balastnih voda in druge pogoje, ki jih bodo prinesla nova pravila ravnanja z njimi.

## 7 • LITERATURA

- ABS, American Bureau of Shipping, Ballast Water Treatment Advisory. 2011. <http://www.eagle.org/eagleExternalPortalWEB/ShowProperty/BEA%20Repository/References/ABS%20Advisories/BWTreatmentAdv>, pridobljeno 7. 2. 2016.
- Al-Juboori, R., Aravinthan, V., Yusaf, T., A review of Common and Alternative Methods for Disinfection of Microorganisms in Water, Southern Region Engineering Conference, Toowoomba, Australia, 2010.
- Arrajo, S., Benito, Y., Tarifa, A. M., A theoretical study of hydrodynamic cavitation. *Ultrasonic Sonochemistry* 15, 203–211, 2008.
- Brennen, C. E., *Cavitation and Bubble Dynamics*, New York, Oxford University Press, 1995.

- Brujan, E.-A., *Cavitation in Non-Newtonian Fluids*, Berlin, Springer-Verlag, 2011.
- Chivate, M. M., Pandit, A. B., Effect of sonic and hydrodynamic cavitation on aqueous polymeric solutions, *Ind. Chem. Engr.* 35, 52–57, 1993.
- Cvetković, M., Kompare, B., Krivograd Klemenčič, A., Application of Hydrodynamic Cavitation in Ballast Water Treatment, *Environmental Science and Pollution Research* 22, 7422–7438, 2015.
- David, M., *Vessels and Ballast Water*, In: David, M., Gollasch, S. (Eds.), *Global Maritime Transport and Ballast Water Management – Issues and Solutions*, Springer Science and Business Media, Vol. 8, 2014.
- David, M., Gollasch, S., Pavliha, M., Global Ballast Water Management and the “Same Location” Concept – A Clear Term or a Clear Issue? *Ecological Application* 23, 331–338, 2013.
- Faimali, M., Garaventa, F., Chelossi, E., Piazza, V., Saracino, O. D., Rubino, F., Mariottini, G.L., Pane, L., A New Photodegradable Molecule as a Low Impact Ballast Water Biocide: Efficacy Screening on Marine Organisms from Different Tropic Levels. *Marine Biology* 149, 7–16, 2006.
- Gogate, P. R., Pandit, A. B., *Cavitation Generation and Usage without Ultrasound: Hydrodynamic Cavitation*, V: Pankaj, Ashokkumar, M. (ur.), *Theoretical and Experimental Sonochemistry Involving Inorganic Systems*, New York: Springer Science Business Media B.V., 69–107, 2011.
- Gollasch, S., Is Ballast Water a Major Dispersal Mechanism for Marine Organisms? In: Nentwig, W. (Ed.), *Ecological Studies - Biological Invasions*, Springer-Verlag, Berlin, 49–57, 2007.
- IMO, International Maritime Organization, *International Convention for the Control and Management of Ships’ Ballast Water and Sediments*, International Maritime Organization, London, 2004.
- International Maritime Organization (IMO), *Status of Conventions*, 2016, <http://www.imo.org/en/About/Conventions/StatusOfConventions/Pages/Default.aspx>, pridobljeno 4. 4. 2016.
- Jyoti, K. K., Pandit, A. B., Water disinfection by acoustic and hydrodynamic cavitation, *Biochemical Engineering Journal* 7, 201–212, 2001.
- Kang, J.-H., Hyun, B.-G., Shin, K., Phytoplankton Viability in Ballast Water from International Commercial Ships Berthed at Ports in Korea, *Marine Pollution Bulletin* 60, 230–237, 2010.
- Kato, H., *Cavitation as a Tool of Environmental Protection*, 2016, <http://flow.me.es.osaka-u.ac.jp/cav2003>, pridobljeno 7. 2. 2016.
- Khandeparker, L., Chandrashekar, A., Association of Bacteria with Marine Invertebrates: Implications for Ballast Water Management, *EcoHealth* 10, 268–276, 2013.
- Kirchman, D., K’Nees, E., Hodson, R., Leucine Incorporation and Its Potential as a Measure of Protein Synthesis by Bacteria in Natural Aquatic Systems, *Applied Environmental Microbiology* 49, 599–607, 1985.
- Knapp, R., Daily, J., Hammit, F., *Cavitation*, McGraw Book Company, NY, 1970.
- Kuiper, G., *Physics of Cavitation: Gas Content and Nuclei*, 2015. <http://ocw.tudelft.nl/courses/marine-technology/cavitation-on-ship-propellers/3-physics-of-cavitation-gas-content-and-nuclei/>, pridobljeno 27. 6. 2015.
- Lloyd’s Register Group Limited, *Understanding Ballast Water Management Guidance for Ship Owners and Operators*, 2014. [http://www.lr.org/Images/Understanding%20Ballast%20Water%20Management\\_0214\\_tcm155-248816.pdf](http://www.lr.org/Images/Understanding%20Ballast%20Water%20Management_0214_tcm155-248816.pdf), pridobljeno 29. 9. 2014.
- Pandit, A. B., Joshi, J. B., Hydrolysis of fatty oils: effect of cavitation, *Chem. Eng. Sci.*, 48, 3440, 1993.
- Ranade, V.V., Bhalchandra, A., Anil, A.C., Sawant, S.S., Ilangoan, D., Madhan, R., Venkat, K.P., Apparatus for Filtration and Disinfection of Sea Water/Ship’s Ballast Water and a Method of Same. Patent: 7, 585, 416 B2, USA, 2009.
- Ruiz, G. M., Rawlings, T. K., Dobbs, F. C., Drake, L. A., Mullady, T., Huq, A., Colwell, R. R., Global Spread of Microorganisms by Ships – Ballast Water Discharged from Vessels Harbours: A Cocktail of Potential Pathogens, *Nature* 408, 49, 2000.
- Sawant, S. S., Anil, A. C., Krishnamurthy, V., Gaonkar, C., Kolwalkar, J., Khandeparker, L., Desai, D., Mahulkar, A. V., Ranade, V. V., Pandit, A. B., Effect of Hydrodynamic Cavitation on Zooplankton: A Tool for Disinfection, *Biochemical Engineering Journal* 42, 320–328, 2008.
- Seiden, J. M., Rivkin, R. B., Biological Controls on Bacterial Populations in Ballast Water during Ocean Transit, *Marine Pollution Bulletin* 78, 7–14, 2014.
- Van Stanpen, G., Artemia, In: Lavens, P., Sorgeloos, P. (Eds.), *Manual on the Production and Use of Live Food for Aquaculture*, Laboratory of Aquaculture and Artemia Reference Center University of Ghent, Belgium, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Roma, 79–250, 1996.
- Zenetos, A., Gofas, S., Morri, A., Rosso, D., Violanti, J. E., Garcia Raso, M. E., Çinar, A., Almongi-Labin, A. S., Ates, E., Azzurro, E., Ballestros, C. N., Bianchi, M., Bilecenglu, M. C., Gambi, A., Giangrande, C., Gravili, O., Hymys-Kaphzan, P. K., Karachle, S., Katsanevekis, L., Lipej, F., Mastrototaro, F., Mineur, M. A., Pancucci-Papadopoulou, A., Ramos Espla, C., Salas, G., San Martin, A., Sfriso, N., Streffaris, N., Verlaque, M. Alien Species in the Mediterranean Sea by 2012., A Contribution to the Application of the European Union’s Marine Strategy Framework Directive (MSFD), Part 2, *Introduction Trends and Pathways*, *Mediterranean Marine Science* 13/2, 328–352, 2012.

# NOVI DIPLOMANTI

## UNIVERZA V LJUBLJANI, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO IN GEODEZIJO

### VISOKI STROKOVNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

**Rok Strušnik**, Idejna zasnova kolesarske povezave okoli Zbiljskega jezera, mentor doc. dr. Peter Lipar, somentor asist. dr. Niko Čertanc

### UNIVERZITETNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

**Marina Filipović**, Mehanizacija za vzdrževanje in gradnjo železniških prog, mentor prof. dr. Bogdan Zgonc, somentorica asist. dr. Darja Šemrov

**Jan Hlade**, Optimizacija postopka upravljanja in vzdrževanja večstanovanjskih stavb, mentorica prof. dr. Jana Šelih, somentor Anže Urevc

**Blaž Klinc**, Vpliv lastnosti temeljnih tal in togosti temeljne plošče na statični izračun objekta, mentor doc. dr. Boštjan Pulko, somentor izr. prof. dr. Sebastijan Bratina

**Urban Selan**, Zasnova obalne konstrukcije tretjega pomola v Luki Koper, mentor izr. prof. dr. Janko Logar, somentor doc. dr. Boštjan Pulko

**Sara Vilhar**, Izvajanje direktive o Energetski učinkovitosti stavb v EU in možnosti izvedbe skoraj nič-energijskih stavb v Sloveniji, mentor doc. dr. Mitja Košir

### UNIVERZITETNI ŠTUDIJ VODARSTVA IN KOMUNALNEGA INŽENIRSTVA

**Samo Brezočnik**, Pregled in uporaba metod določanja sintetičnega histograma padavin, mentorica doc. dr. Mojca Šraj

**Bojana Tomc**, Rekreativni potenciali reke Kolpe, mentor prof. dr. Mitja Brilly, somentor pred. mag. Aleš Golja

**Blaž Barič**, Izdelava zbirke poplavnih dogodkov z uporabo funkcije kopula, mentorica doc. dr. Mojca Šraj, somentor Giovanni Maccioni

**Tadej Bizjak**, Izdelava krivulj GEN za območje JZ Slovenije, mentorica doc. dr. Mojca Šraj, somentorja asist. dr. Mario Krzyk in izr. prof. dr. Jože Panjan

**Matej Dornik**, Standardizirani padavinski indeks - izračun in analiza za Slovenijo, mentorica doc. dr. Mojca Šraj

**Franci Pevc**, Analiza nizkih pretokov vodotokov v Sloveniji s programom DFLOW, mentorica doc. dr. Mojca Šraj

**Gregor Robič**, Vzpostavitev etažne lastnine, mentor izr. prof. dr. Albin Rakar, somentor Anže Urevc

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

**Slavko Dremelj**, Analiza obstoječega dvojno vezanega kozolca po Evrokod standardih, mentor izr. prof. dr. Jože Lopatič

### II. STOPNJA – MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM GRADBENIŠTVA

**Luka Possnig**, Projektiranje armiranobetonskega mostu za vpliv potresne obtežbe in ocena potresnega tveganja, mentorica prof. dr. Tatjana Isaković, somentor prof. dr. Matjaž Dolšek

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

**Gregor Robič**, Hidrološka analiza poplav za porečje Ljubljane, mentorica doc. dr. Mojca Šraj, somentorica asist. dr. Mira Kobold

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

**Špela Jerončič**, Pregled hidrantnega omrežja in požarne ogroženosti objektov v naselju, mentor prof. dr. Franc Steinman, somentor asist. dr. Daniel Kozelj

### II. STOPNJA – MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM PROSTORSKO NAČRTOVANJE

**Brigita Mikulec Bizjak**, Ocenjevanje vrednosti nepremičnin pri umeščanju prostorskih ureditev državnega pomena v prostor, mentorica izr. prof. dr. Maruška Šubic-Kovač

**Gašper Okršlar**, Predlog kategorij dejanske rabe prostora s primerjavo mednarodnih klasifikacij, mentorica doc. dr. Alma Zavodnik Lamovšek, somentorica viš. pred. mag. Mojca Foški

### MAGISTRSKI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

**Matjaž Knapič**, Vpliv spremembe gladinskega vrtilišča v akumulacijskih bazenih na obratovanje hidroelektrarn, mentor prof. dr. Franc Steinman

**Andrej Kumerdej**, Razvoj krmilnikov za avtomatizacijo stanovanjskih in poslovnih stavb, mentor prof. dr. Žiga Turk

### DOKTORSKI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

**Robert Pečenko**, Mehanski odziv ukrivljenih lesenih nosilcev s spremenljivo višino pri požarni obtežbi, mentor doc. dr. Tomaž Hozjan, somentor prof. dr. Goran Turk

**Nejc Bezak**, Povezanost fluvialnega premeščanja suspendiranih snovi z drugimi hidrološkimi procesi, mentor prof. dr. Matjaž Mikoš, somentorica doc. dr. Mojca Šraj

**Klemen Sinkovič**, Ocenjevanje potresne odpornosti obstoječih armiranobetonskih objektov, mentor prof. dr. Peter Fajfar, somentor doc. dr. Iztok Peruš

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

### VISOKOŠOLSKI STROKOVNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

**Veljko Mijatović**, Organizacija gradbišča in tehnološki procesi grajenja poslovno-skladišnega objekta v Mestinju, mentor izr. prof. dr. Uroš Klanšek, somentor izr. prof. dr. Andrej Štrukelj

**Marko Abram**, Energetska sanacija objekta Poklicne gasilske enote Krško, mentor doc. dr. Marko Pinterič

**Branko Bohorč**, Projekt organizacije gradbišča Medgeneracijski izobraževalni center Maribor z analizo terminskega plana, mentor izr. prof. dr. Uroš Klanšek, somentorica Metka Zajc Pogorelčnik

**Miha Gorjanc**, Zelene strehe v praksi, mentor doc. dr. Milan Kuhta

**Dejan Guzej**, Podvrtavanje Poljanske Sore po metodi HDD, mentor viš. pred. Matjaž Nekrep Perc, somentorica asist. Blanka Grajfoner

**Mihael Marinič**, Konstruiranje mostu preko reke Donave v Novem Sadu, mentor doc. dr. Milan Kuhta, somentor Viktor Markelj

**Matej Štingl**, Integralni mostovi in analiza okvirnega armiranobetonskega mostu, mentor doc. dr. Milan Kuhta, somentor Dušan Rožič, univ. dipl. inž. grad.

**Stanislava Vouk**, Pogoji in kriteriji pri priključevanju na javne ceste, mentor red. prof. dr. Tomaž Tollazzi

## UNIVERZITETNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

**David Nežič**, Statična analiza lesene montažne hiše tipa "Lumar" s primerjavo po nacionalnih dodatkih, mentor red. prof. dr. Miroslav Premrov, somentorica asist. Mateja Držečnik

**Jelka Tajnik Andrejc**, Izboljšanje internega komuniciranja v gradbenem podjetju A ob podpori IT orodja Basecamp, mentorica doc. dr. Nataša Šuman, somentor doc. dr. Andrej Tibaut

## I. STOPNJA – UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI PROGRAM GRADBENIŠTVO

Študij je zaključila z diplomskim izpitom:

**Branka Kranvogel**

## 2. STOPNJA – MAGISTRSKI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

**Ana Brunčič**, Idealizacija in modeliranje betonskih konstrukcij za analizo z MKE, mentor doc. dr. Milan Kuhta, somentor Gregor Cipot, univ. dipl. inž. grad.

**Anja Pavličič**, Uporaba programa Vico Office za 4D in 5D informacijsko modeliranje pri izvedbi zunanjih zidov večstanovanjskega objekta v Ljutomeru, mentorica doc. dr. Nataša Šuman

**Maja Tašner**, Analiza različno dolgih statičnih GNSS opazovanj, mentor izr. prof. dr. Boštjan Kovačič, somentor pred. dr. Rok Kamnik

**Matjaž Vrhek**, Določanje etažnih spektrov pospeškov gradbenih konstrukcij, mentor doc. dr. Iztok Peruš, somentor izr. prof. dr. Matjaž Skrinar

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

## I. STOPNJA – UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI PROGRAM GRADBENIŠTVO

Študij je zaključil z diplomskim izpitom:

**Mitja Pungaršek**

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

**Vsem diplomantom čestitamo!**

Skladno z dogovoroma med ZDGITS in FGG-UL ter ZDGITS in FGPA-UM vsi diplomanti oddelkov za gradbeništvo in okoljsko gradbeništvo Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani ter diplomanti Fakultete za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo Univerze v Mariboru prejemajo Gradbeni vestnik (12 števil) brezplačno. Vse, ki bodo želeli po prejemu 12. številke postati redni naročniki, prosimo, naj to čimprej sporočijo uredništvu na naslov: GRADBENI VESTNIK, Karlovška cesta 3, 1000 Ljubljana; telefon: (01) 52 40 200; faks: (01) 52 40 199; e-mail: [gradb.zveza@siol.net](mailto:gradb.zveza@siol.net).

ZDGITS in Uredništvo Gradbenega vestnika

# KOLENDAR PRIREDITEV

17.-22.7.2016

**35th International Conference on Coastal Engineering**

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

27.-29.7.2016

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

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

22.-25.8.2016

**WCTE – World Conference on Timber Engineering**

Dunaj, Avstrija  
<http://wcte2016.conf.tuwien.ac.at/home/>

7.-9.9.2016

**ECPPM 2016 – 11th European Conference on Product and Process Modelling**

Limassol, Ciper  
<http://cyprusconferences.org/ecppm2016/>

19.-21.9.2016

**International Conference on Accelerated Pavement Testing**

San Jose, Kostarika  
[www.apf-conference.com/](http://www.apf-conference.com/)

21.-23.9.2016

**19th IABSE Conference "Challenges in Design and Construction of an Innovative and Sustainable Built Environment"**

Stockholm, Švedska  
[www.iabse.org/stockholm2016](http://www.iabse.org/stockholm2016)

30.9.-1.10.2016

**9th International Conference »Bridges in Danube Basin«**

Žilina, Slovaška  
<http://svf.uniza.sk/kskm/Danubebridges2016/>

5.-6.10.2016

**ICABE 2016 – International Conference on Architecture and Built Environment**

Kuala Lumpur, Malezija  
<https://icabe2016.wordpress.com>

10.-11.10.2016

**11th Conference on Advanced Building Skins**

Bern, Švica  
<http://abs.green/home/>

16.-19.10.2016

**IALCCE2016 – 5th International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering**

Delft, Nizozemska  
[www.ialcce2016.org](http://www.ialcce2016.org)

17.-18.10.2016

**Sabor hrvatskih graditelja 2016: EU i hrvatsko graditeljstvo**

Cavtat, Hrvaška  
<http://sabor.hsgi.org/ocs/index.php/sabor/sabor2016>

17.-19.10.2016

**SBE16 – Thessaloniki International Conference "Sustainable Synergies from Buildings to the Urban Scale"**

Solun, Grčija  
<http://sbe16-thessaloniki.gr/>

19.-20.10.2016

**13. Slovenski kongres o cestah in prometu**

Portorož, Slovenija  
[www.drc.si](http://www.drc.si)

30.11.-1.12.2016

**23rd international conference Concrete Days 2016**

Litomyšl, Češka  
[www.cbsbeton.eu/en/seminars/odborne-akce/23rd-concrete-days-2016-call-for-papers](http://www.cbsbeton.eu/en/seminars/odborne-akce/23rd-concrete-days-2016-call-for-papers)

19.-20.1.2017

**PowerSkin Conference 2017**

München, Nemčija  
[www.powerskin.org/](http://www.powerskin.org/)

15.-18.5.2017

**ICBEST Istanbul – International Conference on Building Envelope Systems and Technologies**

Istanbul, Turčija  
<http://icbestistanbul.com/>

29.5.-2.6.2017

**4. svetovni forum o zemeljskih plazovih**

Ljubljana, Slovenija  
[www.sloged.si/?page\\_id=716](http://www.sloged.si/?page_id=716)

15.-19.7.2017

**GeoMEast 2017 International Conference "Sustainable Civil Infrastructures: Innovative Infrastructure Geotechnology"**

Sharm El-Sheik, Egipt  
[www.geomeast2017.org/](http://www.geomeast2017.org/)

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