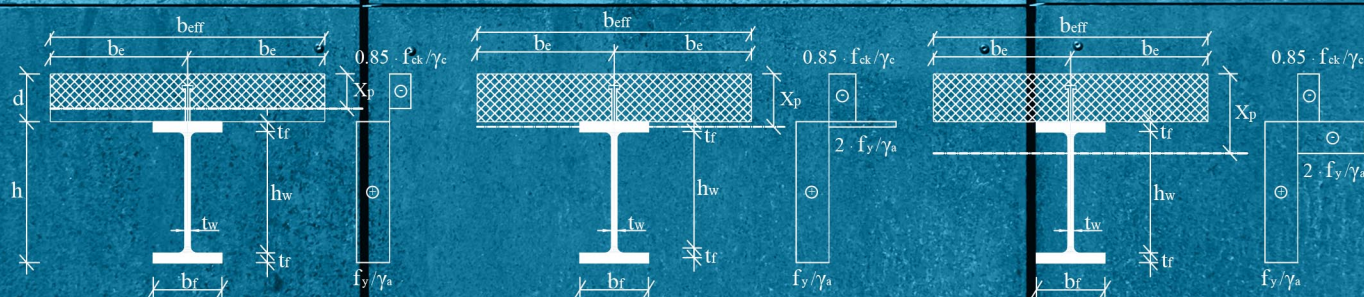


Priročnik za delo s programom za optimiranje sovprežnega stropnega sistema s plastično odpornostjo nosilca z jeklenimi IPE profili

Tomaž
ŽULA

Stojan
KRAVANJA



COMBOPT-PIPE
verzija 1,0



Univerzitetna založba
Univerze v Mariboru



Univerza v Mariboru

Fakulteta za gradbeništvo,
prometno inženirstvo in arhitekturo

Priročnik za delo s programom za optimiranje sovprežnega stropnega sistema s plastično odpornostjo nosilca z jeklenimi IPE profili

COMBOPT-PIPE, verzija 1,0

Avtorja

Tomaž Žula

Stojan Kravanja

Oktober 2024

Naslov <i>Title</i>	Priročnik za delo s programom za optimiranje sovprežnega stropnega sistema s plastično odpornostjo nosilca z jeklenimi IPE profili <i>Manual for Working With the Program for Optimizing the Composite Floor System With the Plastic Resistance of the Beam With Steel Profiles IPE</i>		
Podnaslov <i>Subtitle</i>	COMBOPT-PIPE, verzija 1,0 <i>COMBOPT-PIPE, version 1,0</i>		
Avtorja <i>Authors</i>	Tomaž Žula (Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo)	Stojan Kravanja (Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo)	
Recenzija <i>Review</i>	Uroš Klanšek (Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo)	Goran Turkalj (Univerza v Reki, Tehniška fakulteta)	
Lektoriranje <i>Language editing</i>	Zvezdana Sabolj Golob (Univerza v Mariboru, Knjižnica tehniških fakultet)		
Tehnični urednik <i>Technical editor</i>	Jan Perša (Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba)		
Oblikovanje ovitka <i>Cover designer</i>	Jan Perša (Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba)		
Grafične priloge <i>Graphic material</i>	Viri so lastni, razen če ni navedeno drugače. Žula, Kravanja (avtorja), 2024		
Grafika na ovitku <i>Cover graphics</i>	Brown and gray wooden surface, foto: Greg Rosenke, unsplash.com, 2020		
Založnik <i>Published by</i>	Univerza v Mariboru Univerzitetna založba Slomškov trg 15, 2000 Maribor, Slovenija https://press.um.si , zalozba@um.si		
Izdajatelj <i>Issued by</i>	Univerza v Mariboru Fakulteta za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo Smetanova ulica 17, 2000 Maribor https://fgpa.um.si , fgpa@um.si		
Izdaja <i>Edition</i>	Prva izdaja	Izdano <i>Published at</i>	Maribor, oktober 2024
Vrsta publikacije <i>Publication type</i>	E-knjiga	Dostopno na <i>Available at</i>	https://press.um.si/index.php/ump/catalog/book/887

CIP - Kataložni zapis o publikaciji
Univerzitetna knjižnica Maribor

624.07-033.37:519.853 (0.034.2)

ŽULA, Tomaž

Priročnik za delo s programom za optimiranje sovprežnega stropnega sistema s plastično odpornostjo nosilca z jeklenimi IPE profili [Elektronski vir] : COMBOPT-PIPE, verzija 1,0 / avtorja Tomaž Žula, Stojan Kravanja. - 1. izd. - E-knjiga. - Maribor : Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba, 2024

Način dostopa (URL):

<https://press.um.si/index.php/ump/catalog/book/887>

ISBN 978-961-286-916-8 (PDF)

doi: [10.18690/um.fgpa.3.2024](https://doi.org/10.18690/um.fgpa.3.2024)

COBISS.SI-ID 212025603



© Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba
/ University of Maribor, University Press

Besedilo / *Text* © Žula, Kravanja (avtroja), 2024

To delo je objavljeno pod licenco Creative Commons Priznanje avtorstva 4.0 Mednarodna. / *This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License.*

Uporabnikom je dovoljeno tako nekomercialno kot tudi komercialno reproduciranje, distribuiranje, dajanje v najem, javna priobčitev in predelava avtorskega dela, pod pogojem, da navedejo avtorja izvirnega dela.

Vsa gradiva tretjih oseb v tej knjigi so objavljena pod licenco Creative Commons, razen če to ni navedeno drugače. Če želite ponovno uporabiti gradiva tretjih oseb, ki ni zajeto v licenci Creative Commons, boste morali pridobiti dovoljenje neposredno od imetnika avtorskih pravic.

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ISBN 978-961-286-916-8 (pdf)

DOI <https://doi.org/10.18690/um.fgpa.3.2024>

Cena
Price Brezplačni izvod

Odgovorna oseba založnika
For publisher Prof. dr. Zdravko Kačič,
rektor Univerze v Mariboru

Citiranje
Attribution Žula, T., Kravanja, S. (2024). *Priročnik za delo s programom za optimiranje sovprežnega stropnega sistema s plastično odpornostjo nosilca z jeklenimi IPE profili: COMBOPT-PIPE, verzija 1,0*. Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba. doi: [10.18690/um.fgpa.3.2024](https://doi.org/10.18690/um.fgpa.3.2024)

Kazalo

1	Uvod	1
2	Sovprežni stropni sistem z jeklenimi standardnimi IPE profili	3
3	Program COMBOPT-PIPE	5
3.1	Struktura programa	5
3.2	Mešano celoštevilsko nelinearno programiranje, MINLP	5
3.3	Vhodni podatki – konstante	6
3.4	Parametri	6
3.5	Spremenljivke	7
3.6	Pogojne (ne)enačbe	8
3.6.1	Pogojne (ne)enačbe mejnega stanja nosilnosti v optimizacijskem modelu COMBOPT-PIPE	9
3.6.2	Pogojne (ne)enačbe mejnega stanja uporabnosti v optimizacijskem modelu COMBOPT-PIPE	10
3.7	Logične pogojne (ne)enačbe	11
3.8	Namenska funkcija	11
4	Optimizacija	13
5	Računski primer	15
5.1	Vhodni podatki	15
5.2	MINLP optimiranje	15
5.3	Rezultati optimiranja sovprežnega stropnega sistema	16
	Literatura	17

Vsebina dokumenta in program za optimiranje sovprežnega stropnega sistema s plastično odpornostjo nosilca COMBOPT-PIPE, verzija 1.0, je last avtorjev in Univerze v Mariboru, Fakultete za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo.

© Vse pravice so pridržane. Brez dovoljenja avtorjev programa COMBOPT-PIPE, verzija 1.0, ni dovoljeno nobenega dela tega poročila prekopirati ali prenesti v katerikoli obliki. Uporaba programa COMBOPT-PIPE, verzija 1.0, je dovoljena samo v izobraževalne namene. Brez dovoljenja avtorjev ni dovoljena kakršnakoli komercialna uporaba programa COMBOPT-PIPE, verzija 1.0.

1 Uvod

Priročnik predstavlja delo s programom COMBOPT-PIPE (*COMposite Beam OPTimization Plastic IPE profiles*), ki izvaja diskretno stroškovno optimiranje prostoležečih stropnih sistemov s plastično odpornostjo nosilcev. V nadaljevanju bo predstavljeno: sovprežni stropni sistem s plastično odpornostjo nosilca, program COMBOPT-PIPE, verzija 1,0 in njegova uporaba z vidika optimiranja z mešanim celoštevilskim nelinearnim programiranjem, MINLP. Sovprežni stropni sistemi, ki so sestavljeni iz armiranega betona in jeklenih I nosilcev, veljajo za stroškovno učinkovite konstrukcijske elemente v gradbeništvu. Zaradi tega so postali priljubljena izbira med arhitekti in inženirji. Optimizacija teh konstrukcij je posledično postala pomembno področje raziskav.

Uporabnost programa COMBOPT-PIPE, verzija 1,0, je bila predstavljena v člankih:

- Žula T., Kravanja S., Klanšek U., MINLP optimization of a composite I beam floor system, *Steel and composite structures*, 22(5), 1163-1192, 2016,
- Kravanja S., Žula T., Klanšek U., Multi-parametric MINLP optimization study of a composite I beam floor system, *Engineering structures*, 130, 316-335, 2017,
- Žula T., Kravanja S., MINLP-optimiranje sovprežnega stropnega sistema z I-nosilci, *Gradbeni vestnik*, 66, 194-203, 2017.

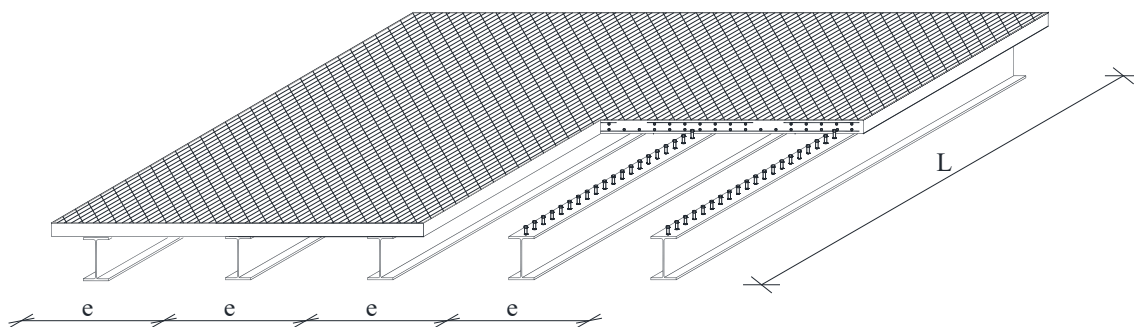
2 Sovprežni stropni sistem z jeklenimi standardnimi IPE profili

Sovprežni stropni sistem se statično obravnava kot prostoležeči nosilni sovprežni sistem, kot je prikazano na sliki 1. Konstrukcija je sestavljena iz več sovprežnih nosilcev, ki so medsebojno razmaknjeni. Posamezen sovprežni nosilec je sestavljen iz sodelujočega dela armiranobetonske plošče in enega jeklenega I profila.

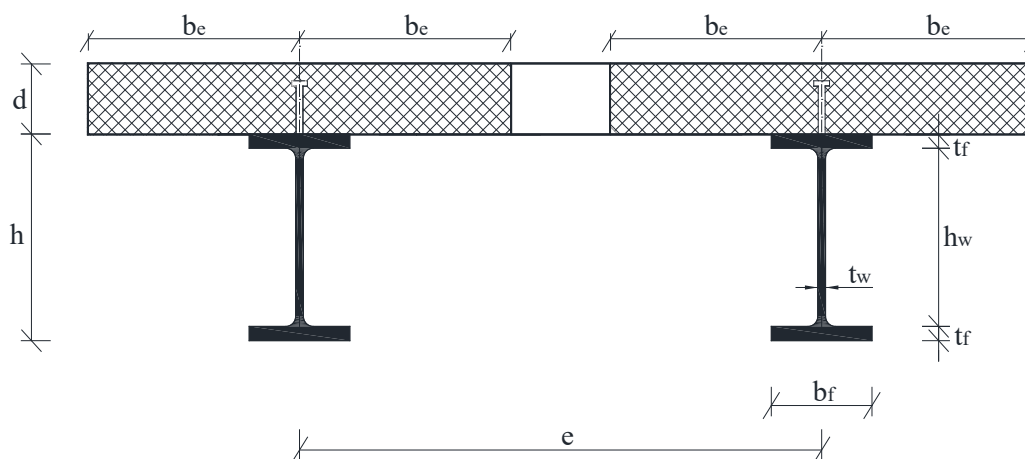
Armiranobetonska plošča in jekleni nosilec sta povezana z valjčnimi mozniki, ki so privarjeni na zgornji del pasnice I nosilca in zaliti v beton plošče, kot je prikazano na sliki 2. Na ta način so izpolnjeni vsi pogoji za doseg polne sovprežnosti. Med postopkom betoniranja so nosilci podprti z začasnimi podporniki, kar omogoča, da se po strjevanju betona lastna teža in spremenljiva obtežba popolnoma preneseta na sovprežni prerez.

Dimenzioniranje je izvedeno skladno z evropskimi standardi Evrokod [(Evrokod 1, 2002), (Evrokod 2, 2004a), (Evrokod 3, 2005) in (Evrokod 4, 2004b)], pri čemer so upoštevani vsi pogoji mejnih stanj nosilnosti (MSN) in uporabnosti (MSU). Sovprežni I nosilci so dimenzionirani v skladu z Evrokodom 4 [Evrokod 4, 2004b], ob dodatnem upoštevanju zahtev za jekleni del prereza v skladu z Evrokodom 3 [Evrokod 3, 2005] in zahtev za armiranobetonsko ploščo po Evrokodu 2 [Evrokod 2, 2004a]. Obtežbe na sovprežnih nosilcih so kombinirane v skladu z Evrokodom 1 [Evrokod 1, 2002].

Pri mejnih stanjih nosilnosti (MSN) so izpolnjeni vsi pogoji za plastično upogibno nosilnost sovprežnega prereza, strižno nosilnost, preprečevanje lokalnega izbočenja stojine zaradi strižnih sil, strižno odpornost moznikov (strig in



Slika 1: Sovprežni stropni sistem z IPE profili



Slika 2: Prečni prerez sovprenega stropnega sistema z IPE

bočni pritisk na beton) ter plastično upogibno nosilnost armiranobetonske plošče. Armiranobetonska plošča je zasnovana kot kontinuirna plošča, ki prenaša obremenitve v eni smeri. Pri dimenzioniranju sovprenega stropnega sistema smo upoštevali možnost, da nevtralna os poteka skozi beton, zgornjo pasnico IPE prereza ali stojino IPE prereza.

Pri mejnih stanjih uporabnosti (MSU) so vertikalni upogibi sovprenih nosilcev izračunani po elastični metodi, pri čemer so upoštevani vplivi lezenja in krčenja betona zaradi stalne obtežbe. Največji upogibi, ki nastanejo zaradi stalnih in spremenljivih obtežb, niso presegli predpisanih mejnih vrednosti za vertikalne upogibe. Poleg tega smo preverili tudi končne vertikalne upogibe ter nastanek razpok v armiranobetonski plošči in jih omejili na dopustne vrednosti.

Zaradi hitrega napredka v računalništvu in računalniški strojni opremljenosti je bilo razvitih ter uporabljenih več učinkovitih metod in algoritmov za optimizacijo sovprenih konstrukcij. Kravanja in Šilih [Kravanja, 2003] ter Klanšek in Kravanja [(Klanšek, 2006a), (Klanšek, 2006b)] so pri preučevanju konkurenčnosti različnih sovprenih stropnih sistemov uporabili metodo nelinearnega programiranja (NLP). Adeli in Kim [Adeli, 2001] sta denimo za optimizacijo sovprenih plošč uporabila algoritem nevronske dinamike. Različni algoritmi so bili uporabljeni za iskanje optimalne oblike sovprenih konstrukcij: Kaveh in Ahangaran [Kaveh, 2012] sta uporabila algoritem socialnega harmonijskega iskanja, Senouci in Al-Ansari [Senouci, 2009] genetski algoritem, Poitras in sodelavci [Poitras, 2011] pa metodo rojev delcev (particle swarm optimization).

3 Program COMBOPT-PIPE

3.1 Struktura programa

Optimizacijski program za sovprežni stropni sistem je bil razvit v višjem algebrskem modelnem jeziku GAMS (General Algebraic Modeling System) [Brooke, 1988]. Program vključuje stroškovno namensko funkcijo, pogoje enačbe in neenačbe, kot tudi celoštevilске in mešane celoštevilске pogoje enačbe in neenačbe. Poleg tega vsebuje vhodne podatke (konstante) in spremenljivke, kar je prikazano na sliki 3.

3.2 Mešano celoštevilsko nelinearno programiranje, MINLP

Zaradi nelinearne, nekonveksne in diskretno-zvezne narave optimizacijskega problema sovprežnega stropnega sistema smo za njegovo reševanje uporabili mešano celoštevilsko nelinearno programiranje (MINLP). Optimizacijski problem MINLP lahko formalno izrazimo v naslednji obliki:

$$\begin{aligned} \min \quad & z = \mathbf{c}^T \mathbf{y} + f(\mathbf{x}) \\ \text{p.p.} \quad & \mathbf{h}(\mathbf{x}) = 0 \\ & \mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq 0 \quad (\text{MINLP}) \\ & \mathbf{B}\mathbf{y} + \mathbf{C}\mathbf{x} \leq \mathbf{b} \\ & \mathbf{x} \in X = \{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n: \mathbf{x}_{LO} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}_{UP}\} \\ & \mathbf{y} \in Y = \{0,1\}^m \end{aligned}$$

v danem optimizacijskem problemu je vektor $\mathbf{x}$ sestavljen iz zveznih spremenljivk, ki so definirane na območju X , medtem ko je vektor $\mathbf{y}$ sestavljen iz diskretnih binarnih spremenljivk, ki lahko zavzamejo vrednosti 0 ali 1. Vsakemu alternativnemu konstrukcijskemu elementu superstrukture je dodeljena binarna spremenljivka y . Element je izbran, ko pripadajoča binarna spremenljivka zavzame vrednost 1 ($y=1$), in izločen iz superstrukture, ko je binarna spremenljivka enaka 0 ($y=0$). Funkcija $f(\mathbf{x})$ predstavlja namensko funkcijo, $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ je množica pogojev enačb, medtem ko $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ označuje množico pogojev neenačb. Vse

funkcije $f(\mathbf{x})$, $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ in $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ so nelinearne, zvezne in zvezno odvedljive. Sistem vključuje tudi linearne enačbe in neenačbe oblike $\mathbf{B}\mathbf{y} + \mathbf{C}\mathbf{x} \leq \mathbf{b}$, ki povezujejo zvezne in diskretne spremenljivke. Namenska stroškovna funkcija z vsebuje stalne proizvodne stroške, podane z linearnim izrazom $\mathbf{c}^T\mathbf{y}$, ter dimenzijsko odvisne stroške, opisane z nelinearno funkcijo $f(\mathbf{x})$.

3.3 Vhodni podatki – konstante

Prijava vhodnih podatkov – konstant optimizacijskega programa je izvršena s stavkom **SCALARS**. Prijava konstant v programu COMBOPT-PIPE je prikazana na sliki 4. Zaradi velikega števila konstant jih prikazujemo le nekaj.

Q	koristna obtežba [kN/m ²]
L	razpon nosilca [m]
Ea	modul elastičnosti jekla [Gpa]
F_{ya}	meja plastičnosti armature [kN/cm ²]
h_{moz}	višina moznika [kN/m ²]
f_u	natezna trdnost moznika [kN/cm ²]
a	zaščitni sloj betona [cm]
γ_a	delni varnostni faktor za armaturo [/]
γ_c	delni varnostni faktor za beton [/]
ρ_c	prostorninska teža betona [kN/m ³]
C_c	cena m ³ betona [€]
C_a	cena kg armature [€]
C_{akz}	cena antikorozijske zaščite [€/m ²]
C_{plina}	cena m ³ zemeljskega plina [€/m ³]
C_{elek}	cena električne energije [€/kWh]
U_{PD}	urna postavka delavca [€/h]

3.4 Parametri

Prijava parametrov v programu COMBOPT-PIPE je izvedena s stavkom **PARAMETERS** in s tem je definiran vektor diskretnih številčnih vrednosti alternativ, npr. standardnih materialov, standardnih IPE profilov in zaokroženih dimenzij. Na sliki 5 prikazujemo diskretno vrednost alternativ standardnih materialov za

PROGRAM COMBOPT-PIPE za optimiranje sovprežnega stropnega sistema	
Stroškovna namenska funkcija: $\min z = \mathbf{c}^T\mathbf{y} + f(\mathbf{x})$	
pri pogojih: $\mathbf{h}(\mathbf{x}) = \mathbf{0}$ $\mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0}$ $\mathbf{B}\mathbf{y} + \mathbf{C}\mathbf{x} \leq \mathbf{b}$	
Izračun notranjih statičnih količin	
Pogojne (ne)enačbe mejnega stanja nosilnosti: – plastična upogibna odpornost sovprežnega sistema – odpornost na strig – strižna odpornost moznikov – odpornost armiranobetonske plošče na upogibni moment	
Izračun deformacij	
Pogojne (ne)enačbe mejnega stanja uporabnosti: – kontrola navpičnih upogibkov sovprežnega sistema – kontrola navpičnih upogibkov armiranobetonske plošče – kontrola razpok armiranobetonske plošče	
Logične pogojne (ne)enačbe diskretnih materialov:	
– izračun standardnega materiala (trdnost betona in jekla)	
Logične pogojne (ne)enačbe standardnih dimenzij:	
– izračun standardnih prerezov	
Logične pogojne (ne)enačbe zaokroženih dimenzij:	
– izračun debeline armiranobetonske plošče	
Vhodni podatki (konstante):	
– razpon, obtežba, faktorji varnosti, elastični modul, cene materialov, električne energije, itd.	
Zvezne spremenljivke: $\mathbf{x} \in X$	
– neodvisne: višina profila, meja plastičnosti jekla, tlačna trdnost betona, razdalja med nosilci, itd. – odvisne: geometrijske karakteristike prereza, lastna teža, nosilnost, upogibki, itd.	
Binarne spremenljivke: $\mathbf{y} \in Y$	
– za izbor standardnega materiala, standardnih IPE prerezov, armaturnih mrež in debeline armiranobetonske plošče	

Slika 3: Struktura programa COMBOPT-PIPE

jeklo (meja plastičnosti za jekleni IPE nosilec), za beton (karakteristična tlačna trdnost armiranobetonske plošče) in standardne dimenzije za IPE profil (višina profila, širina

pasnice, debelina stojine, debelina pasnice, površina prečnega prereza in vztrajnostni moment profila).

SCALARS

Q	koristna obtežba v kN-m ² /4.0/
L	razpon nosilca v m /20/
GAMAA	varnostni faktor za jeklo /1.0/
GAMAC	varnostni faktor za beton /1.5/
ALFA	faktor za beton /0.85/
EA	modul elast jekla v kN-cm ² /21000/
HMOZ	visina moznika v cm /10/
DMOZ	premer stebila moznika v cm /1.9/
FU	natezna trdnost materiala moznika v kN-cm ² /45.0/
GAMAV	varnostni faktor mozniki /1.25/
CC	cena m3 betona C25 /85/
CS	cena kg jekla pločevina 8mm S235 /1.25/
CM	cena moznika /0.5/
CAKZ	cena m ² AKZ /0.85/
CKP	cena m ² končnega pokrovnega premaza /0.65/
CO	cena m ² opaza /1.0/
CA	cena kg armature /0.7/
CPZ	pozarna zascita /9/
B	enotska sirina betonske plosce V cm /100/
RN	razmak med nosilci v cm /100/
A	zascitni sloj betona v cm /2/
ES	modul elastičnosti armature v kN-cm ² /20000/
FCTEFF	natezna trdnost betona v casu pojava prvih razpok v kN-cm ² /0.3/
FYA	meja plasticnosti armature v kN-cm ² /40/
FYKA	karakteristicna meja plasticnosti armature v kN-cm ² /40/
GAMAS	parcialni varnostni faktor za armaturo /1.15/
RO	specificka teza armiranega betona v kN-cm ³ /0.000025/
ROA	volumska masa armature v Kg-cm ³ /0.00785/
FIMAX	maksimalni premer palice armaturne mreze v cm /0.8/
NUMVERTV	stevilo vertikalnih delitev nosilca /3/
MOCZ	moc motorja zage [kW] /2.2/
MOCB	moc motorja brusilnika [kW] /1.1/
MOCV	moc varilnega aparata 230[A] 25[V] [kW] /5.75/
MOCVAM	moc varilnega aparata za moznike 1409[A] 20[V][kW] /28.18/
MOCVIB	moc vibratorja za beton [kW] /3.1/
IZKZ	izkoristek motorja zage /0.85/
IZKB	izkoristek motorja brusilnika /0.85/
IZKV	izkoristek varilnega aparata /0.90/
IZKVAM	izkoristek varilnega aparata za moznike /0.90/
IZKVIB	izkoristek vibratorja za beton /0.85/
UPD	urna postavka delavca [EUR-h] /20.0/
CPLINA	cena zemeljskega plina [EUR-m3] /0.5/
CKISIKA	cena kisika [EUR-m3] /1.6/
CELEN	cena elektricne energije [EUR-kWh]/0.1/
CELEK	cena varilnih elektrod [EUR-kg]/1.7/
DR	stopnja kolicine pretaljene varilne zice [kg-h]/3.7/
EMY	delez mase elektrode, ki ga vgradimo v zvar /0.6/;

Slika 4: Prijava konstant – skalarjev v programu COMBOPT-PIPE

PARAMETERS

```
*standardni material jeklo
STMS (MS)
*standardni material beton
STMC (MC)
*standardne dimenzije za IPE profil
STNC (NC);
*standardni material jeklo
STMS ('1')=23.5;
STMS ('2')=27.5;
STMS ('3')=35.5;
*standardni material beton
STMC ('4')=2;
STMC ('5')=2.5;
STMC ('6')=3;
STMC ('7')=3.5;
STMC ('8')=4;
STMC ('9')=4.5;
STMC ('10')=5;
*standardne dimenzije za IPE80 profil
*IPE 80
STAA ('36')=7.6;
STH ('36')=8.0;
STTW ('36')=0.38;
STTF ('36')=0.52;
STBF ('36')=4.6;
STIA ('36')=80.1;
*IPE 100
STAA ('37')=10.3;
STH ('37')=10.0;
STTW ('37')=0.41;
STTF ('37')=0.57;
STBF ('37')=5.5;
STIA ('37')=171.0;
*IPE 120
STAA ('38')=13.2;
STH ('38')=12.0;
STTW ('38')=0.44;
STTF ('38')=0.63;
STBF ('38')=6.4;
STIA ('38')=318.0;
*IPE 140
STAA ('39')=16.4;
STH ('39')=14.0;
STTW ('39')=0.47;
STTF ('39')=0.69;
STBF ('39')=7.3;
STIA ('39')=541.0;
```

Slika 5: Prijava parametrov v programu COMBOPT-PIPE

3.5 Spremenljivke

Prijava spremenljivk v programu COMBOPT-PIPE izvedemo s tremi stavki: **POSITIVE VARIABLES**, kjer so definirane pozitivne spremenljivke (npr. višina profila, debelina armiranobetonske plošče, razdalja med jeklenimi nosilci itd.), ki lahko zavzamejo vrednosti v intervalu $[0, +\infty]$; **VARIABLES**, kjer so definirane spremenljivke (npr. lastni izdelavni stroški), ki lahko zavzamejo vrednost v intervalu $[-\infty, +\infty]$ in **BINARY VARIABLE**, ki so dodeljene alternativnim strukturnim elementom (npr. standardni material za jeklo in beton, standardni IPE profil), ki lahko zavzamejo vrednost 0 ali 1, glej sliko 6.

e	razdalja med nosilci [cm]
d	debelina betonske plošče [cm]
b_e	sodelujoča širina betona [cm]
h	višina IPE profila [cm]
t_w	debelina stojine [cm]
b_f	širina pasnice [cm]
t_f	debelina pasnice [cm]
A_a	prečni prerez IPE profila [cm ²]
I_a	vztrajnostni moment IPE profila [cm ⁴]
C_{OST}	lastni izdelavni stroški konstrukcije [€/m ²]

$Y(BIN)$ diskretna spremenljivka

POSITIVE VARIABLES	
E	razdalja med nosilci v cm
D	debelina betonske plosce v cm
BE	sodelujoca sirina betona v cm
H	visina stojine profila v cm
TW	debelina stojine v cm
BF	sirina pasnice v cm
T	debelina pasnice v cm
AW	debelina kotnega zvara v cm
AA	prečni prerez profila v cm ²
IA	vztrajnostni moment IPE profila v cm ⁴ ;
VARIABLES	
COST	lastni izdelavni stroški konstrukcije v EUR-m ² ;
BINARY VARIABLE	
Y (BIN)	DISKRETNNA SPREMENLJIVKA;

Slika 6: Prijava spremenljivk v programu COMBOPT-PIPE

Za vsako definirano spremenljivko je določena spodnja mejna vrednosti (.LO), začetna vrednost (.L) in zgornja mejna vrednosti (.UP), glej sliko 7. Če so meje dobro nastavljene v okolici optimalnih vrednosti (ki bodo šele izračunane), bo konvergenca potekala hitro in brez zapletov.

*M E J E	spremenljivk
*razdalja med nosilci v cm	
E.LO=50;	
E.L=180;	
E.UP=650;	
*debelina betonske plosce v cm	
D.LO=10;	
D.L=19;	
D.UP=30;	
*visina IPE profila v cm	
H.LO=8;	
H.L=30;	
H.UP=60;	
*standardna kvaliteta jekla v kN/cm ²	

```
FY.LO=23.5;
FY.L=23.5;
FY.UP=35.5;

*standardna kvaliteta betona v kN/cm2
FCK.LO=2.0;
FCK.L=4.0;
FCK.UP=5.0;

*standardni prerez površine armaturne mreže v cm2
AS.LO=1;
AS.L=10;
AS.UP=30;
```

Slika 7: Primer postavitve mej spremenljivk v programu COMBOPT-PIPE

3.6 Pogojne (ne)enačbe

Pogojne (ne)enačbe v programu COMBOPT-PIPE so prijavljene s stavkom **EQUATIONS** v modelnem jeziku GAMS, glej sliko 8.

```
EQUATIONS
RXP      izracun lege plasticne nevtralne osi v betonu;
RMPN     izracun plasticne odpornosti sovpreznega
          prereza na
          upogibni moment
VPL      kontrola strizne odpornosti sovpreznega
          prereza
MOZl      kontrola strizne odpornosti moznikov
OBJ      namenska funkcija lastni izdelavni stroški

RXP$(NOT MILP) ..
XP+0.99999*LINVAR$(LINEAR)
=E=AA*FY*GAMAC/ (2*BE*ALFA*FCK*GAMAA) ;

RMPN$(NOT MILP) ..
MPN+0.99999*LINVAR$(LINEAR)
=E=FY*AA/GAMAA*(TF+(H-2*TF)/2+D(FY*GAMAC*AA)/
(4*ALFA*FCK*GAMAA*BE)) ;

VPL$(NOT MILP) ..
(1.35*G+1.5*Q*E/100)*L/2
+0.99999*LINVAR$(LINEAR)=L=
KAPAV*FY*(H-2*TF)*TW/(SQRT(3)*GAMAA) ;

MOZl$(NOT MILP) ..
AA*FY*2/(GAMAA*NMOZ)+0.99999*LINVAR$(LINEAR)
=L=0.8*FU*3.141592654*D*MOZ*DMOZ/(4*GAMAV) ;

OBJ ..
REVENUE$(NOT MILP) + REVENUEC$MILP
=E= zapis namenske funkcije, glej enacbo 30
```

Slika 8: Primer prijave (ne)enačbe v programu COMBOPT-PIPE

Pogojne enačbe in neenačbe za dimenzioniranje sovprežne konstrukcije so določene v skladu s standardom Evrokod 4. Te so razdeljene v dve

glavni skupini: pogojne enačbe in neenačbe mejnega stanja nosilnosti in pogojne enačbe in neenačbe mejnega stanja uporabnosti. V nadaljevanju so predstavljene le ključne pogojne enačbe in neenačbe, ki so pomembne za analizo in dimenzioniranje konstrukcije.

3.6.1 Pogojne (ne)enačbe mejnega stanja nosilnosti v optimizacijskem modelu COMBOPT-PIPE

Z enačbama (1)-(2) računamo odpornost sovprežnega prereza na upogibni moment, kjer $M_{Ed,cb}$ prikazuje projektni upogibni moment, $M_{Pl,Rd,cb}$ pa predstavlja projektno plastično upogibno odpornost sovprežnega prereza:

$$M_{Ed,cb} \leq M_{Pl,Rd,cb} \quad (1)$$

kjer je:

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

Enačbe (3)-(5) podrobneje obravnavajo plastično odpornost sovprežnega prereza na upogibni moment, ko leži nevtralna os v betonski plošči, slika 9a. Enačbe (6)-(8) predstavljajo plastično odpornost sovprežnega prereza na upogibni moment, ko leži nevtralna os v zgornji pasnici jeklenega IPE prereza, slika 9b. Enačbe (9)-(11) pa označujejo plastično odpornost sovprežnega prereza na upogibni moment, ko leži nevtralna os v stojini jeklenega IPE profila, slika 9c. Ostali členi v enačbah in neenačbah so: g je stalna obtežba, q je spremenljiva obtežba, $q_{ed,cb}$ je projektna zvezna obtežba, γ_q je delni faktor za spremenljivo obtežbo, γ_g je delni faktor za stalno obtežbo, A_a je prečni prerez jeklenega profila, b je višina jeklenega IPE prereza, f_{ck} je karakteristična tlačna trdnost betona, f_y je napetost tečenja, γ_c je delni varnostni faktor za beton, γ_a je delni varnostni faktor za jeklo, d je debelina armiranobetonske plošče, b_e sodelujoča

širina armiranobetonske pasnice na vsaki strani stojine, x_p je oddaljenost nevtralne osi od zgornjega roba sovprežnega prereza: za nevtralno os v armiranobetonski plošči enačba (5), za nevtralno os v zgornji pasnici IPE profila enačba (8) in za nevtralno os v stojini IPE profila (11).

- kadar plastična nevtralna os leži v armiranobetonski plošči, (glej sliko 9a):

$$(A_a \cdot f_y \cdot \gamma_c) / (0.85 \cdot f_{ck} \cdot \gamma_a) \leq 2 \cdot b_e \cdot d \quad (3)$$

$$M_{Pl,Rd,cb} = [b / 2 + d - (A_a \cdot f_y \cdot \gamma_c) / (4 \cdot b_e \cdot 0.85 \cdot f_{ck} \cdot \gamma_a)] \cdot A_a \cdot f_y / \gamma_a \quad (4)$$

$$x_p = (A_a \cdot f_y \cdot \gamma_c) / (2 \cdot 0.85 \cdot f_{ck} \cdot \gamma_a \cdot b_e \cdot \gamma_a) \quad (5)$$

- kadar plastična nevtralna os leži v zgornji pasnici IPE profila, (glej sliko 9b):

$$2 \cdot b_e \cdot d < (A_a \cdot f_y \cdot \gamma_c) / (0.85 \cdot f_{ck} \cdot \gamma_a) \leq 2 \cdot b_e \cdot d + 2 \cdot (f_y \cdot \gamma_c) / (0.85 \cdot f_{ck} \cdot \gamma_a) \cdot b_f \cdot t_f \quad (6)$$

$$M_{Pl,Rd,cb} = [A_a \cdot (b / 2 + d / 2) - b_f \cdot x_p \cdot (x_p - d)] \cdot f_y / \gamma_a \quad (7)$$

$$x_p = d + t_f + A_a / (2 \cdot t_w) - (0.85 \cdot f_{ck} \cdot \gamma_a \cdot b_e \cdot d) / (t_w \cdot f_y \cdot \gamma_c) - t_f \cdot b_f / t_w \quad (8)$$

- kadar plastična nevtralna os leži v stojini IPE profila, (glej sliko 9c):

$$(f_y \cdot \gamma_c) / (0.85 \cdot f_{ck} \cdot \gamma_a) \cdot (A_a - 2 \cdot t_f \cdot t_w) > 2 \cdot b_e \cdot d \quad (9)$$

$$M_{Pl,Rd,cb} = [A_a \cdot (b / 2 + d / 2) - t_f \cdot b_f \cdot (d + t_f) - t_w \cdot (x_p - t_f - d) \cdot (x_p - t_f)] \cdot f_y / \gamma_a \quad (10)$$

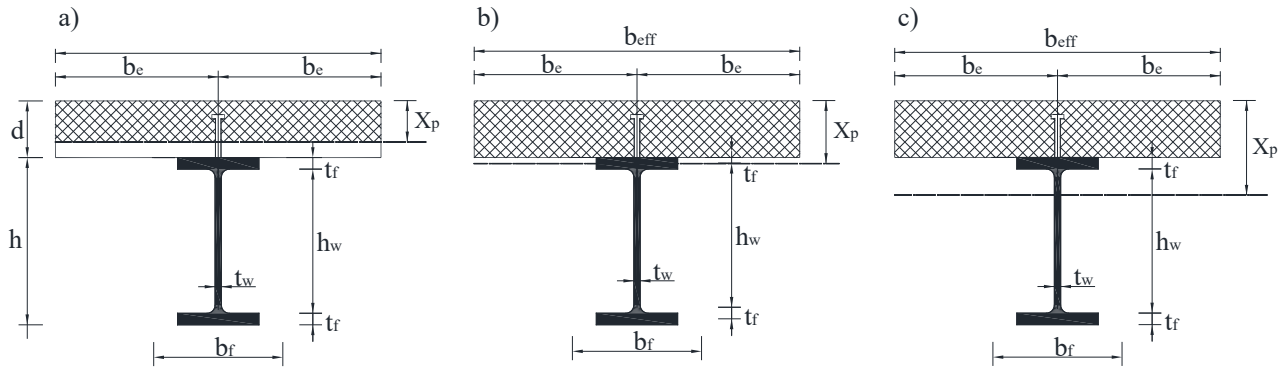
$$x_p = d + t_f + A_a / (2 \cdot b_f) - (0.85 \cdot f_{ck} \cdot \gamma_a \cdot b_e \cdot d) / (b_f \cdot f_y \cdot \gamma_c) \quad (11)$$

Enačbe (12)-(13) opisujejo odpornost sovprežnega prereza na strig. $V_{Ed,cb}$ označuje projektno strižno silo, $V_{b,Rd,cb}$ je projektna strižna nosilnost z upoštevanjem lokalnega izbočenja stojine IPE profila.

$$V_{Ed,cb} \leq V_{b,Rd,cb} \quad (12)$$

kjer je:

$$V_{b,Rd,cb} = \frac{\chi_w \cdot f_y \cdot (b - 2 \cdot t_f) \cdot t_w}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1}} \quad (13)$$



Slika 9: Lege plastičnih nevtralnih osi

Odpornost moznikov na strig računamo s pomočjo enačb od (14) do (16), kjer je V_l vzdolžna strižna sila, d_{sc} je premer valjčnega moznika, n_{sc} je število moznikov, a je koeficient odvisen od vitkosti moznika, P_{rd} je projektna strižna nosilnost moznika, E_{cm} je sekantni modul elastičnosti betona, f_u natezna trdnost jekla, π je Arhimedova konstanta in γ_v je delni faktor za projektno strižno odpornost moznika.

$$V_l = 1/2 \cdot n_{sc} \cdot P_{rd}, \quad (14)$$

kjer sta:

$$V_l = \min \left\{ \frac{A_a \cdot f_y}{\gamma_a}; \frac{b_{eff} \cdot d \cdot 0,85 \cdot f_{ck}}{\gamma_c} \right\} \quad (15)$$

$$P_{rd} = \min \left\{ \frac{0,29 \cdot a \cdot d_{sc}^2 \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot E_{cm}}{\gamma_v}; \frac{0,8 \cdot f_u \cdot \pi \cdot d_{sc}^2}{4 \cdot \gamma_v} \right\} \quad (16)$$

Pogoje enačbe in neenačbe od (17) do (24) obravnavajo upogibno plastično nosilnost armiranobetonske plošče, kjer $M_{Ed,cs}$ in $M_{ult,cs}$ predstavljata projektni upogibni moment in plastično upogibno odpornost prereza armiranobetonske plošče, $A_{s,max}$ je največji potreben prerez armature, $A_{s,min}$ je najmanjši potreben prerez armature, b_{cu} je enotska širina armiranobetonske plošče (1 m), ρ_c je prostorninska teža betona, c je debelina zaščitnega sloja betona, f_{yk} je meja plastičnosti armature, x_{pc} je oddaljenost nevtralne osi od zgornjega roba armiranobetonske plošče in γ_s je delni varnostni faktor za armaturno jeklo.

$$M_{Ed,cs} \leq M_{ult,cs} \quad (17)$$

kjer so:

$$M_{Ed,cs,el} = q_{Ed,cs} \cdot \ell^2 / 16 \quad (18)$$

$$q_{Ed,cs} = (\gamma_g \cdot \rho_c \cdot b_{cu} \cdot d + \gamma_q \cdot q \cdot b_{cu}) \quad (19)$$

$$M_{ult,cs} = \frac{0,48 \cdot 0,85 \cdot f_{yk} \cdot b_{cu} \cdot x_{pc}^2}{\gamma_c} + \frac{A_s \cdot b_{cu} \cdot (d - c - x_{pc}) \cdot f_{yk}}{\gamma_s} \quad (20)$$

$$A_{s,min} \cdot \sigma_s = k_c \cdot k_1 \cdot f_{ct,eff} \cdot A_d \quad (21)$$

$$A_{s,min} \geq 0,26 \cdot f_{ctm} / f_{yk} \cdot b_{cu} \cdot (d - c) \quad (22)$$

$$A_{s,min} \geq 0,0013 \cdot b_{cu} \cdot (d - c) \quad (23)$$

$$A_{s,max} \leq 0,04 \cdot b_{cu} \cdot d \quad (24)$$

3.6.2 Pogoje (ne)enačbe mejnega stanja uporabnosti v optimizacijskem modelu COMBOPT-PIPE

Enačbe (25) do (35) definirajo pogoje mejnega stanja uporabnosti, kjer je δ_2 deformacija sovprežnega nosilca zaradi projektne spremenljive obtežbe q_{Ed} , δ_{max} je deformacija sovprežnega nosilca zaradi celotne obtežbe, δ_{sb} je deformacija sovprežnega nosilca zaradi krčenja betona in δ_{cr} je deformacija sovprežnega nosilca zaradi lezenja betona. E_a je elastični modul konstrukcijskega jekla, M_{sb} je upogibni moment zaradi krčenja betona, I_i je idealiziran vztrajnostni moment sovprežnega prereza, I_{sb} je idealiziran vztrajnostni moment sovprežnega prereza zaradi lezenja betona in I_{cr} je idealiziran vztrajnostni moment zaradi krčenja betona.

$$\delta_2 \leq L/300 \quad (25)$$

$$\delta_2 = \frac{5 \cdot qEd \cdot e \cdot L^4}{384 \cdot E_a \cdot I_i} \quad (26)$$

$$\delta_{max} \leq L/250 \quad (27)$$

$$\delta_{max} = \delta_2 + \delta_{cr} + \delta_{sb} \quad (28)$$

$$\delta_{cr} = \frac{5 \cdot g \cdot L^4}{384 \cdot E_a \cdot I_{cr}} \quad (29)$$

$$\delta_{sb} = \frac{M_{sb} \cdot L^2}{8 \cdot E_a \cdot I_{sb}} \quad (30)$$

Pogojne enačbe in neenačbe od (31) do (35) določajo vertikalno deformacijo armiranobetonske plošče, kjer je δ deformacija armiranobetonske plošče zaradi celotne obtežbe, δ_I je deformacija armiranobetonske plošče zaradi celotne obtežbe pri upoštevanju nerazpokanega prereza in δ_{II} je deformacija armiranobetonske plošče zaradi celotne obtežbe pri upoštevanju razpokanega prereza. σ_{sr} je napetost v natezni armaturi razpokanega prereza pri obtežnih pogojih nastanka prvih razpok, ζ je koeficient porazdelitve, σ_s je napetost v natezni armaturi pri razpokanem prerezu, E_{cm} je sekantni modul elastičnosti betona, $E_{c,eff}$ je učinkoviti modul elastičnosti betona, I_c je vztrajnostni moment razpokane betonske plošče širine 1 meter in I_u je vztrajnostni moment nerazpokane betonske plošče širine 1 meter.

$$\delta \leq L/250 \quad (31)$$

$$\delta = \zeta \cdot \delta_{II} + (1 - \zeta) \cdot \delta_I \quad (32)$$

$$\zeta = 1 - 0,5 \cdot (\sigma_{sr}/\sigma_s)^2 \quad (33)$$

$$\delta_I = k \cdot \left(\frac{\rho_c \cdot b_{cu} \cdot d \cdot e^4}{E_{c,eff} \cdot I_u} + \frac{q \cdot b_{cu} \cdot e^4}{E_{cm} \cdot I_u} \right) \quad (34)$$

$$\delta_{II} = k \cdot \left(\frac{\rho_c \cdot b_{cu} \cdot d \cdot e^4}{E_{c,eff} \cdot I_c} + \frac{q \cdot b_{cu} \cdot e^4}{E_{cm} \cdot I_c} \right) \quad (35)$$

3.7 Logične pogojne (ne)enačbe

Logične pogojne (ne)enačbe so prijavljene s stavkom **EQUATIONS**, glej sliko 10. Z logičnimi pogojnimi enačbami računamo

diskretne vrednosti, npr. material (tlačna trdnost betona, meja plastičnosti jekla), standardne jeklene profile (velikost IPE prereza) in zaokrožene dimenzije (debelina betonske plošče).

EQUATIONS

```
*standardna kvaliteta jekla - fy
E1$( (RACUN EQ 2) OR (RACUN EQ 3))..
FY=E=SUM(MS, STMS(MS)*Y(MS));

E2$( (RACUN EQ 2) OR (RACUN EQ 3))..
SUM(MS, Y(MS))=E=1;

*standardna kvaliteta betona - fck
*BETON - FCK
E3$( (RACUN EQ 2) OR (RACUN EQ 3))..
FCK=E=SUM(MC, STMC(MC)*Y(MC));

E4$( (RACUN EQ 2) OR (RACUN EQ 3))..
SUM(MC, Y(MC))=E=1;
*standardne dimenzije nosilca (visina IPE profila)
ESTH$(RACUN EQ 3)..
H=E=SUM(NP, STH(NP)*Y(NP));

ESTD$(RACUN EQ 3)..
SUM(NF, Y(NF))=E=1;

*standardne dimenzije armaturne mreže
E5$(RACUN EQ 3)..
AS=E=SUM(NC, STNC(NC)*Y(NC));

E6$(RACUN EQ 3)..
SUM(NC, Y(NC))=E=1;

*zaokrožene dimenzije betonske plošče
EZD$(RACUN EQ 3)..
D=E=SUM(RD, ZD(RD)*Y(RD));

EZD1$(RACUN EQ 3)..
SUM(RD, Y(RD))=E=1;
```

Slika 10: Prijava logičnih pogojnih (ne)enačbe v programu COMBOPT-PIPE

3.8 Namenska funkcija

Namenska funkcija lastnih izdelavnih stroškov je definirana s spremenljivko **COST**, ki jo zapišemo pod stavkom **VARIABLES**. Enačba namenske funkcije je v modelu prijavljena z označbo **OBJ** pod stavkom **EQUATIONS**, glej sliko 8.

COMBOPT-PIPE je optimizacijski model, ki vsebuje namensko funkcijo lastnih izdelavnih stroškov in definira obsežni sistem stroškovnih postavk, zapisanih v obliki nelinearnih funkcij, ki so jih razvili Klanšek in Kravanja (Klanšek, 2006a), (Klanšek, 2006b) ter (Žula, 2017), Žula

idr. (Žula, 2016). V enačbi (36) je zapisana namenska funkcija, ki obsega stroške materiala, energije in dela, potrebnih za izdelavo obravnavanega sovprežnega stropnega sistema:

$$\begin{aligned} \min: Cost = & \{C_{M,s,c,r} + C_{M,sc} + C_{M,e} + C_{M,ac,jp,tc} + C_{M,f} \\ & + C_{M,c,ng} \\ & + C_{M,c,oxy} + C_{P,gm} + C_{P,c,gm} + C_{P,w} + C_{P,sw} + C_{P,v} \\ & + C_{L,c,oxy-ng} + C_{L,g} + C_{L,p,d,t} + C_{L,SMAW} + C_{L,sw} + C_{L,ssp} \\ & + C_{L,f} + C_{L,r} + C_{L,c} + C_{L,v} + C_{L,\alpha}\} / (e \cdot L) \end{aligned} \quad (36)$$

Spremenljivka $Cost$ (€/m²) predstavlja lastne izdelavne stroške na enoto uporabne površine sovprežnega stropnega sistema (€/m²); $C_M, \dots$, $C_P, \dots$ in $C_L, \dots$ definirajo posamezne stroškovne postavke materiala, dela in električne energije, izračunane v €; e (m) je medsebojna razdalja dveh sosednjih I nosilcev in L (m) je razpon sovprežnega stropnega sistema. Stroški materiala so: beton $C_{M,c}$, konstrukcijsko jeklo $C_{M,s}$, valjčni mozniki $C_{M,sc}$, rebrasta mrežna armatura $C_{M,r}$, antikorozijska zaščita, protipožarna zaščita in končni premaz $C_{M,ac,jp,tc}$, elektrode $C_{M,e}$,

prefabricirane opažne plošče $C_{M,f}$, kisik $C_{M,c,oxy}$ in naravni plin $C_{M,c,ng}$. Stroški električne energije vključujejo: proces obločnega varjenja profilov $C_{P,w}$, proces brušenja robov pločevin $C_{P,gm}$, proces obločnega varjenja valjčnih moznikov $C_{P,sw}$ in proces vibriranja betona $C_{P,v}$. Stroški dela zajemajo: brušenje robov profilov $C_{L,g}$, plinsko rezanje jeklenih profilov s tehnologijo kisik-naravni plin $C_{L,c,oxy-ng}$, ročno obločno varjenje $C_{L,SMAW}$, priprava, sestavljanje in pritrdjevanje elementov za varjenje $C_{L,p,d,t}$, polavtomatsko obločno varjenje valjčnih moznikov $C_{L,sw}$, peskanje pločvine in nanos antikorozijskega, protipožarnega ter končnega premaza $C_{L,ssp}$, rezanje, postavitve in vezanje mrežne armature $C_{L,r}$, montažo, niveliranje, demontažo in čiščenje opažnega sistema $C_{L,f}$, konsolidacija betona $C_{L,v}$, betoniranje plošče $C_{L,c}$ in nego betona $C_{L,\alpha}$.

Omenjena namenska funkcija je podvržena sistemu pogojnih enačb in neenačb, s katerimi preverjamo mejno stanje nosilnosti in uporabnosti sovprežnih konstrukcij, glej poglavje 3.6.

4 Optimizacija

Modificirani algoritem zunanje aproksimacije s sprostitvijo enačb, Modified OA/ER, avtorjev Kravanja in Grossmanna (1994), smo uporabili za optimiranje. Modificirani OA/ER algoritem iterativno rešuje zaporedje optimizacijskih podproblemov nelinearnega programiranja (NLP) in glavnih problemov mešanega celoštevilskega linearnega programiranja (MILP). Vsak NLP podproblem je usmerjen v optimizacijo zveznih parametrov sovprežnega stropnega sistema ob upoštevanju standardnih materialov, standardnih dimenzij in zaokroženih dimenzij. Rešitev NLP podproblema določa trenutno zgornjo mejo namenske stroškovne funkcije, ki ga minimiramo. Rešitev MILP glavnega problema predstavlja spodnjo mejo namenske funkcije. MILP vključuje globalno linearno aproksimacijo superstrukturnih alternativ in določa nove standardne dimenzije, nove standardne materiale ter nove zaokrožene dimenzije, pri čemer zagotavlja, da spodnja meja ne preseže najboljših znane zgornje meje. Iterativni postopek reševanja NLP in MILP

problemov se v primeru konveksnih problemov zaključi, ko napovedana spodnja meja preseže najboljšo zgornjo mejo. Pri nekonveksnih problemih se postopek konča, ko ni več izboljšav v rešitvah NLP podproblemov.

GAMS posreduje naslednje izhodne podatke:

- sporočila uporabniku,
- statusno poročilo,
- celotni izpis rezultatov,
- rezultate optimiranja.

Primer izpisa statusnega poročila in rezultatov optimiranja sta prikazana na slikah 11 in 12.

	LOWER	LEVEL	UPPER
---- VAR E	100.0000	299.7999	500.0000
---- VAR D	6.0000	9.0000	30.0000
---- VAR BE	50.0000	143.5957	250.0000
---- VAR H	8.0000	55.0000	65.0000
---- VAR AA	30.0000	134.0000	450.0000
---- VAR XP	1.0000	3.8699	30.0000
---- VAR FY	23.5000	23.5000	35.5000
---- VAR FCK	2.0000	5.0000	5.0000
---- VAR AS	1.0000	2.5700	30.0000

Slika 12: Primer izpisa vrednosti spremenljivk

5 Računski primer

V računskem primeru prikazujemo sočasno optimizacijo stroškov standardnih dimenzij, standardnih materialov in zaokroženih dimenzij prostoležečega sovprežnega stropnega sistema. Pri tem analiziramo stropni sistem ob upoštevanju plastične nosilnosti sovprežnega nosilca.

Za optimizacijo smo uporabili navedeni MINLP optimizacijski model COMBOPT-PIPE. Model vključuje podrobno stroškovno funkcijo, ki zajema stroške energije, materiala in dela, povezane z izdelavo konstrukcije. Superstruktura sovprežnega sistema je zasnovana iz jeklenih IPE profilov, pri čemer se nevtralna os nahaja v armiranobetonski plošči. Optimalni rezultati bodo določili optimalno konstrukcijsko jeklo, optimalni trdnostni razred betona, standardni prerez armaturne mreže, debelino armiranobetonske plošče, optimalni profil jeklenega IPE nosilca in razdaljo med IPE nosilci vse z namenom minimizacije stroškov izdelave sovprežnega sistema.

5.1 Vhodni podatki

Obravnavani stropni sistem ima razpon 15 m in je obtežen z enakomerno zvezno spremenljivo obtežbo 5 kN/m^2 ter z lastno težo, slika 13. Sovprežni sistem sestavlja armiranobetonska plošča, ki je preko moznikov povezana z jeklenimi IPE profili. Premer čepov je 19 mm.

5.2 MINLP optimiranje

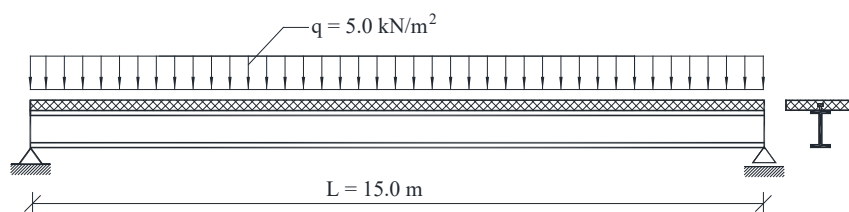
Optimizacija je bila izvedena z uporabo programskega paketa MIPSYN (Kravanja S., 2003; Kravanja Z., 2010), ki je bil razvit kot nadgradnja sistema PROSYN (Kravanja Z., 1994). Reševanje problema MINLP za stropni sistem je potekalo v dveh fazah (Žula, 2017), pri čemer je bil uporabljen modificiran algoritem OA/ER za zunanjo aproksimacijo z relaksacijo enačb. NLP podproblemi so bili rešeni z uporabo programske opreme GAMS/CONOPT2 (Drud, 1994), ki temelji na posplošeni metodi reduciranih gradientov, medtem ko so bili MILP

glavni problemi rešeni s pomočjo programa GAMS/Cplex 7.0 (Cplex, 2016), ki uporablja metodo vejania in omejevanja.

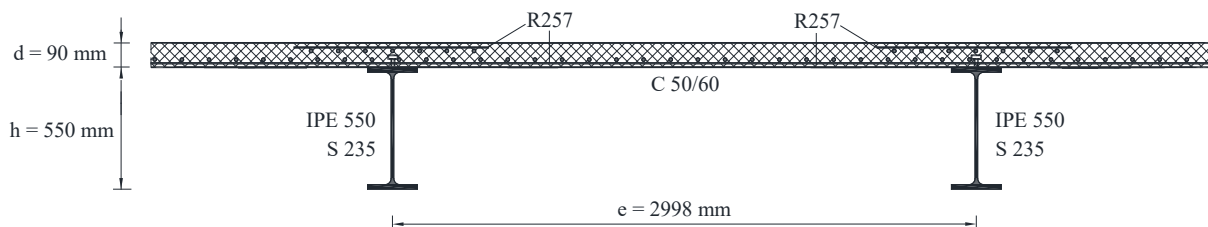
5.3 Rezultati optimiranja sovprežnega stropnega sistema

Optimalna rešitev analiziranega sovprežnega stropnega sistema je bila dosežena v drugi glavni iteraciji reševanja MINLP problema. Izračunani optimalni lastni stroški izdelave znašajo 98,18

€/m². Poleg tega so bili določeni še naslednji optimalni parametri: trdnostni razred betona C50/60, debelina armiranobetonske plošče 9 cm, armaturna mreža R257, trdnostni razred konstrukcijskega jekla S235, jekleni profil IPE 550 ter medsebojna razdalja med nosilci 2998 mm. Slika 14 prikazuje izračunane optimalne rezultate..



Slika 13: Obravnavani sovprežni stropni sistem



Slika 14: Optimalni prerez sovprežnega stropnega sistema

Literatura

- Adeli, H., Kim, H., Cost optimization of welded of composite floors using neural dynamics model, *Commun Numer. Methods Eng.*, 17(11), 771–787, 2001.
- Brooke A., Kendrick D. and Meeraus A., *GAMS - A User's Guide*, Scientific Press, Redwood City, CA, 1988.
- CPLEX User Notes, ILOG inc, 2016.
- Drudd, A.S., CONOPT – A Large-Scale GRG Code, *ORSA J. Comput.*, 6(2), 207-216, 1994.
- Evrokod 1, Vplivi na konstrukcije, European Committee for Standardization, Brussels, 2002.
- Evrokod 2, Projektiranje betonskih konstrukcij, European Committee for Standardization, Brussels, 2004a.
- Evrokod 3, Projektiranje jeklenih konstrukcij, European Committee for Standardization, Brussels, 2005.
- Evrokod 4, Projektiranje sovprežnih konstrukcij iz jekla in betona – 1-1. del: Splošna pravila in pravila za stavbe, European Committee for Standardization, Brussels, 2004b.
- Kaveh A., Ahangaran M., Discrete Cost Optimization of Composite Floor System Using Social Harmony Search Model, *Applied Soft Computing*, No. 1, 12, 372–381, 2012.
- Klanšek, U., Kravanja, S., Cost estimation, optimization and competitiveness of different composite floor systems—Part 1: Self-manufacturing cost estimation of composite and steel structures, *J Construct Steel Res.*, 62(5), 434-448, 2006a.
- Klanšek, U., Kravanja, S., Cost estimation, optimization and competitiveness of different composite floor systems—Part 2: Optimization based competitiveness between the composite I beams, channel-section and hollow-section trusses, *J Construct Steel Res.*, 62(5), 449-462, 2006b.
- Kravanja, S., Šilih, S., Optimization based comparison between composite I beams and composite trusses, *J Construct Steel Res.*, 59(5), 609–625, 2003.
- Kravanja, S., Žula, T., Klanšek, U., Multi-parametric MINLP optimization study of a composite I beam floor system, *Engineering structures*, 130, 316-335, 2017.
- Kravanja, Z., Grossmann, I.E., New Developments and Capabilities in PROSYN - An Automated Topology and Parameter Process Synthesizer, *Computers & Chemical Engineering*, 18(11-12), 1097-1114, 1994.
- Kravanja, Z., Challenges in sustainable integrated process synthesis and the capabilities of an MINLP process synthesizer MipSyn, *Comput. chem. eng.*, 34(11), 1831-1848, 2010.
- Poitras, G., Lefrançois, G., Cormier, G., Optimization of steel floor systems using particle swarm optimization, *J Construct Steel Res.*, 67(8), 1225-1231, 2011.
- Senouci A.B., Al-Ansari M.S., Cost optimization of composite beams using genetic algorithms, *Advances in Engineering Software*, 40, 1112-1118, 2009.
- Žula, T., Kravanja, S., Klanšek, U., MINLP optimization of a composite I beam floor system, *Steel and composite structures*, 22(5), 1163-1192, 2016.
- Žula, T., Kravanja, S., MINLP optimiranje sovprežnega stropnega sistema z I-nosilci, *Gradbeni vestnik*, 66, 194-203, 2017.

PRIROČNIK ZA DELO S PROGRAMOM ZA OPTIMIRANJE SOVPREŽNEGA STROPNEGA SISTEMA S PLASTIČNO ODPORNOSTJO NOSILCA Z JEKLENIMI IPE PROFILI: COMBOPT-PIPE, VERZIJA 1,0

TOMAŽ ŽULA, STOJAN KRAVANJA

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

tomaz.zula@um.si, stojan.kravanja@um.si

Priročnik predstavlja delo s programom za optimiranje sovprežnega stropnega sistema, ki se lahko uporablja pri gradnji večetažnih stavb. Konstrukcija je sestavljena iz armiranobetonske plošče in jeklenih IPE nosilcev. Optimiranje je izvedeno z mešanim celoštevilskim nelinearnim programiranjem (MINLP). Razvit je bil optimizacijski model COMBOPT-PIPE s podrobno namensko funkcijo lastnih izdelavnih stroškov. Poleg namenske funkcije optimizacijski model vsebuje vhodne podatke, spremenljivke, pogojne (ne)enačbe, poznane iz analize in dimenzioniranja sovprežnih konstrukcij, celoštevilске in mešane celoštevilске pogojne (ne)enačbe. Pogoji dimenzioniranja so definirani v skladu z Evrokod 4. Na koncu priročnika je predstavljen računski primer optimizacije sovprežnega stropnega sistema.

DOI

[https://doi.org/
10.18690/um.feri.3.2024](https://doi.org/10.18690/um.feri.3.2024)

ISBN

978-961-286-916-8

Ključne besede:

program,
optimizacijski model,
optimizacija,
mešano celoštevilsko
nelinearno
programiranje,
sovprežni stropni sistem

DOI
[https://doi.org/
10.18690/um.fgpa.3.2024](https://doi.org/10.18690/um.fgpa.3.2024)

ISBN
978-961-286-916-8

Keywords
program,
optimization model,
optimization,
mixed-integer non-linear
programming,
composite floor system

MANUAL FOR WORKING WITH THE PROGRAM FOR OPTIMIZING THE COMPOSITE FLOOR SYSTEM WITH THE PLASTIC RESISTANCE OF THE BEAM WITH STEEL PROFILES IPE: COMBOPT-PIPE, VERSION 1,0

TOMAŽ ŽULA, STOJAN KRAVANJA

University of Maribor, Faculty of Civil Engineering, Transportation Engineering and
Architecture, Maribor, Slovenia
tomaz.zula@um.si, stojan.kravanja@um.si

The manual presents the work with the program for optimization of the composite floor system, which can be used in the structure of multi-storey buildings. The structure consists of a reinforced concrete slab and IPE steel profiles. Mixed integer nonlinear programming (MINLP) is used for optimization. A COMBOPT-PIPE optimization model was developed with a detailed objective function of the self-manufacturing costs. In addition to the objective function, the optimization model also includes input data, variables, (in)equality constraints known from the dimensioning of composite structures and logical constraints. Dimensioning constraints are defined according to Eurocod



Univerza v Mariboru

Fakulteta za gradbeništvo,
prometno inženirstvo in arhitekturo

