

Stojan
KRAVANJA

Tomaž
ŽULA



Priročnik za delo s programom PIPEOPT-SR za optimiranje visokotlačnih jeklenih cevovodov z ojačitvami



Univerza v Mariboru

Fakulteta za gradbeništvo,
prometno inženirstvo in arhitekturo

Priročnik za delo s programom PIPEOPT-SR za optimiranje visokotlačnih jeklenih cevovodov z ojačitvami

Avtorja

Stojan Kravanja

Tomaž Žula

December 2024

Naslov <i>Title</i>	Priročnik za delo s programom PIPEOPT-SR za optimiranje visokotlačnih jeklenih cevovodov z ojačitvami <i>Manual for Working With the Pipeopt-Sr Program for Optimizing High-Pressure Steel Pipelines With Reinforcements.</i>	
Avtorja <i>Authors</i>	Stojan Kravanja (Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo)	Tomaž Žula (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. Kravanja, Žula (avtorja), 2024	
Grafika na ovitku <i>Cover graphics</i>	Mariborski otok, foto: Rene Šešerko, 2023	

Založnik
Published by **Univerza v Mariboru**
Univerzitetna založba
Slomškov trg 15, 2000 Maribor, Slovenija
<https://press.um.si>, zalozba@um.si

Izdajatelj
Issued by **Univerza v Mariboru**
Fakulteta za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo
Smetanova ulica 17, 2000 Maribor
<https://fgpa.um.si>, fgpa@um.si

Izdaja
Edition Prva izdaja

Izdano
Published at Maribor, december 2024

Vrsta publikacije
Publication type E-knjiga

Dostopno na
Available at <https://press.um.si/index.php/ump/catalog/book/4fgpa24>

CIP - Kataložni zapis o publikaciji Univerzitetna knjižnica Maribor
627.844 (035) (0.034.2)
KRAVANJA, Stojan Priročnik za delo s programom PIPEOPT-SR za optimiranje visokotlačnih jeklenih cevovodov z ojačitvami [Elektronski vir] / avtorja Stojan Kravanja, Tomaž Žula. - 1. izd. - E-knjiga. - Maribor : Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba, 2024
Način dostopa (URL): https://press.um.si/index.php/ump/catalog/book/4fgpa24 ISBN 978-961-286-937-3 doi: 10.18690/um.fgpa.4.2024 COBISS.SI-ID 219531779



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

Besedilo / *Text* © Kravanja, Žula (avtorja), 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 gradivo 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 978-961-286-937-3 (pdf)

DOI <https://doi.org/10.18690/um.fgpa.4.2024>

Cena
Price Brezplačni izvod

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

Citiranje
Attribution Kravanja, S., Žula, T. (2024). *Priročnik za delo s programom PIPEOPT-SR za optimiranje visokotlačnih jeklenih cevovodov z ojačitvami*. Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba. doi: 10.18690/um.fgpa.4.2024

Kazalo

1	Uvod	1
2	Visokotlačni jekleni cevovodi s krožnimi ojačitvami	3
3	Program PIPEOPT-SR	5
3.1	Struktura programa.....	5
3.2	Nelinearno programiranje, NLP.....	5
3.3	Vhodni podatki – konstante	6
3.4	Spremenljivke	8
3.5	Namenska funkcija	9
3.6	Pogojne (ne)enačbe	9
4	Optimizacija	13
5	Računski primer	15
5.1	Optimizacija variante poševnega visokotlačnega cevovoda	16
5.2	Optimizacija variante vertikalnega visokotlačnega cevovoda	17
	Literatura	21

Vsebina dokumenta in program za optimiranje visokotlačnih jeklenih cevovodov z ojačitvami PIPEOPT-SR, 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 PIPEOPT-SR, verzija 1,0, nobenega dela tega poročila ni dovoljeno prekopirati ali prenesti v katerikoli obliki. Uporaba programa PIPEOPT-SR, verzija 1,0, je dovoljena samo v izobraževalne namene. Brez dovoljenja avtorjev ni dovoljena kakršnakoli komercialna uporaba programa PIPEOPT-SR, verzija 1,0.

1 Uvod

Pričujoči priročnik obravnava delo s programom (optimizacijskim modelom) PIPEOPT-SR, verzija 1,0, za optimiranje visokotlačnih jeklenih cevovodov z ojačitvami, kakršni se vgrajujejo v izvrtan tunel v hribino. Visokotlačni cevovodi, ki se uporabljajo za dovod vode pod visokim tlakom v hidroelektrarnah, so zasnovani z različnimi konstrukcijskimi pristopi. Medtem ko so bili v prejšnjih študijah [Kravanja, 2014 in 2015] cevovodi obravnavani kot gladke jeklene cevi brez ojačitev, ta priročnik [Kravanja, 2019] obravnava cevovode kot samonosilne jeklene cilindrične lupine, ki imajo navarjene krožne ojačitve. Pri tem zasnovanem modelu sodelovanje hribine in okoliškega betona pri nosilnosti jeklene cevi ni upoštevano. Ojačitve je smiselno navariti tam, kjer je cev izpostavljena večjim zunanjim vodnim pritiskom. Z vključitvijo ojačitev v računski model se posledično dosežejo tanjše stene cevi, kar zmanjšuje maso in stroške izdelave jeklene konstrukcije.

Uporabnost programa PIPEOPT-SR, verzija 1,0, je bila predstavljena v člankih:

- Kravanja, S., Optimization of steel penstock in a bored tunnel, High performance and optimum design of structures and materials, International Conference on High performance and optimum design of structures and materials, HPSM/OPTI 2014, WIT transactions on the built environment 137, WIT Press, Southampton, 337-345, 2014,
- Kravanja, S., Optimizacija jeklene gladke stenske obloge visokotlačnega cevovoda, Gradbeni vestnik 64, 280-286, 2015,
- Kravanja, S., Optimization of a steel penstock with stiffener rings, E-GFOS 9 (17), 64-73, 2018,
- Kravanja, S., Žula, T., Optimizacija jeklenega visokotlačnega cevovoda z ojačitvami, Gradbeni vestnik 68, 246-255, 2019.

2 Visokotlačni jekleni cevovodi s krožnimi ojačitvami

Jeklena konstrukcija obbetoniranega visokotlačnega jeklenega cevovoda z ojačitvami, nameščenega v hribini (glej sliko 1), je izpostavljena tako notranjemu kot tudi zunanjemu vodnemu tlaku. Zaradi teh obremenitev je potrebno s programskim orodjem PIPEOPT-SR izvesti:

- Izračun nosilnosti jeklenega cevovoda na notranji tlak, pri čemer se poleg hidrostatičnega tlaka mirujoče vode upoštevajo tudi hidrodinamični učinki prehodnih pojavov, kot je vodni udar zaradi padajoče vode iz akumulacijskega jezera v prazno cev. Pri tem izračunu se zunanji tlak na cev ne upošteva,
- Izračun nosilnosti jeklenega cevovoda na zunanji tlak podzemne vode, ki deluje na cev, pri čemer se upošteva višina terena nad cevjo, v primeru praznega cevovoda.

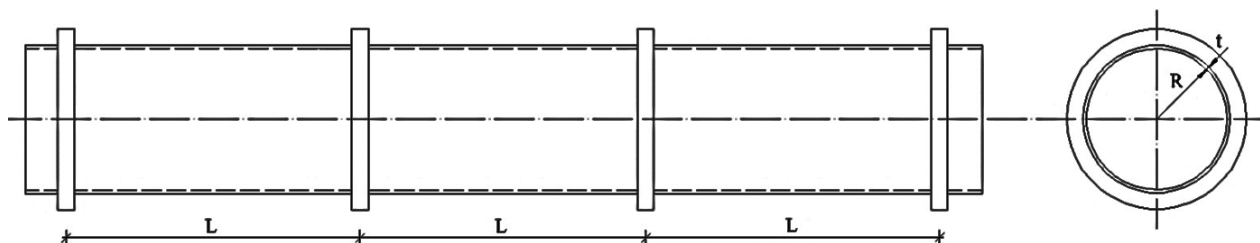
Osnovno teorijo stabilnosti cilindričnih lupin, obremenjenih z zunanjim tlakom, je podal [Timoshenko, 1940], teorijo cilindričnih lupin s krožnimi ojačitvami pa so pozneje še razvijali [Amstutz, 1950 in 1953] in [Kollbrunner in Milosavljević, 1956]. Slednja teorija je upoštevana tudi v priporočilih C.E.C.T. [C.E.C.T. Recommendations, 1979]. Omenjeni inž. Milosavljević je bil vodja biroja v nekdanji Metalni, kjer so sprojektirali in zgradili veliko visokotlačnih cevovodov svetovnih referenc. Ker standardi Evrokod [SIST EN 1993, 2007a in 2007b] podajajo samo določena splošna izhodišča za dimenzioniranje cevovodov in ne obravnavajo cevovodov, vbetoniranih v tunele, smo pri enačbah dimenzioniranja uporabili C.E.C.T. priporočila.

Leta 1979 je podjetje Metalna zaključila gradnjo 1400 metrov dolgega visokotlačnega cevovoda za hidroelektrarno Bajina Bašta v Srbiji, s premerom

od 4,20 m do 6,30 m in delovnim tlakom 95 barov. Pri konstrukciji so uporabili japonsko jeklo HT780, z natezno trdnostjo 780 N/mm^2 . Vodilni konstruktor tega cevovoda je bil inženir Janez Rztresen, vodja projektnega oddelka za cevovode. Leta 1985 so konstruktorji Metalne, prav tako pod vodstvom inženirja Janeza Rztresena, zasnovali in izdelali tlačni cevovod Chiew Larn na Tajskem, s premerom 11,20 m in tlakom 12 barov, ki še danes velja za enega največjih cevovodov na svetu [Kravanja, 1988]. Za isto elektrarno so izdelali tudi takrat drugi največji razdelilnik na svetu, dolg 80,7 m, z vstopnim premerom cevi 11,20 m in tremi izstopnimi premeri 6,00 m, ki so bili obremenjeni z vodnim tlakom 12 barov. Konstruktor razdelilnika je bil prof. dr. Janez Kramar [Kramar, 1985 in 1990]. Pri projektu v Chiew Larnu je bilo uporabljeno japonsko jeklo SHT50A, z natezno trdnostjo 500 N/mm^2 .

Številni inženirji in raziskovalci danes preučujejo optimizacijo cevovodov. Optimizacijo za majhne

hidroelektrarne in cevovode s celoštevilskim programiranjem je obravnaval [Tapia, 2018], medtem ko so optimizacijo tunelov za hidroelektrarne z uporabo genetskega algoritma izvedli [Fathi-Moghadam, 2013]. Optimizacijo cevovodov z ojačitvami so s preprostim genetskim algoritmom in metodo direktnega iskanja predstavili [Bai, 2013]. Optimizacijo cevovodne armature s pomočjo programa ABAQUS so prikazali [Wu, 2012], nadaljnjo optimizacijo cevovodov obravnava [Gu, 2011]. Optimizacijo cevovodov z genetskimi algoritmi sta preučevala tudi [Haghighipour, 2010], medtem ko sta optimizacijo prereza cevovodov in črpalnih hidroelektrarn z uporabo evolucijskih algoritmov izvedla [Anagnostopoulos, 2008]. Stabilnost cevovodov so z nevtronskimi mrežami in metodo simuliranega ohlajanja preučevali [Dong, 2008], medtem ko so optimizacijski model za jekleni obbetonirani cevovod z uporabo orodja ANSYS Optimization Toolbox razvili [Li, 2008].



Slika 1: Jeklen cevovod s krožnimi ojačitvami

3 Program PIPEOPT-SR

3.1 Struktura programa

Z namenom zniževanja izdelavnih stroškov jeklenih cevovodov smo na Fakulteti za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo Univerze v Mariboru razvili optimizacijski program, s katerim smo uspešno izvedli optimizacijo mase jeklene stene visokotlačnega cevovoda z navarjenimi krožnimi ojačitvami. Optimizacija je bila izvedena z uporabo nelinearnega programiranja (NLP). Razvili in modelirali smo optimizacijski model jeklenega cevovoda z ojačitvami, imenovan PIPEOPT-SR, različica 1.0. Za ta namen smo definirali namensko funkcijo mase cevovoda, ki je podvržena linearnim in nelinearnim omejitvam glede nosilnosti in napetosti v cevi. V model je treba vnesti vhodne podatke, kot so: obremenitve (notranji in zunanji vodni tlak), premer cevi, dolžina cevnega odseka in materialne lastnosti jekla (meja tečenja). V postopku optimizacije so izračunani optimalna masa jeklene konstrukcije

cevi, optimalna debelina stene, prerez krožnih ojačitev in distance med njimi.

Optimizacijski program PIPEOPT-SR (PIPE OPTimization – with Stiffener Rings) izvaja optimiranje mase visokotlačnih jeklenih cevovodov z ojačitvami. Program je zapisan v višjem algebrskem modelnem jeziku GAMS (General Algebraic Modeling System, GAMS), glej [Brooke idr., 1988]. Program PIPEOPT-SR obsega vhodne podatke (konstante), spremenljivke, pogojne (ne)enačbe in namensko funkcijo.

3.2 Nelinearno programiranje, NLP

Zaradi nelinearne narave enačb nosilnosti in napetosti jeklene konstrukcije visokotlačnega cevovoda, kot tudi nelinearne namenske funkcije mase cevovoda, smo za optimizacijo uporabili metodo nelinearnega programiranja (NLP). Problem nelinearnega programiranja je mogoče predstaviti v naslednji obliki:

$$\begin{aligned} \min z &= f(\mathbf{x}) \\ \text{p.p.:} \\ \mathbf{h}(\mathbf{x}) &= \mathbf{0} \\ \mathbf{g}(\mathbf{x}) &\leq \mathbf{0} \\ \mathbf{x} \in \mathbf{X} &= \{\mathbf{x} \mid \mathbf{x} \in \mathbf{R}^n, \mathbf{x}^{\text{LO}} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}^{\text{UP}}\} \end{aligned} \quad (\text{NLP})$$

V zgornji formulaciji pomeni \mathbf{x} vektor zveznih spremenljivk, definiranih znotraj svojih spodnjih in zgornjih mej \mathbf{x}^{LO} in \mathbf{x}^{UP} . Navadno nelinearna namenska funkcija je določena z izrazom $f(\mathbf{x})$. Leta je podvržena sistemu pogojnih (ne)enačb. Izraz $\mathbf{h}(\mathbf{x})=\mathbf{0}$ predstavlja sistem (ne)linearnih pogojnih enačb, izraz $\mathbf{g}(\mathbf{x})\leq\mathbf{0}$ pa sistem (ne)linearnih pogojnih neenačb. Funkcije $f(\mathbf{x})$, $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ in $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ morajo biti zvezne in zvezno odvedljive. Vsaj ena od omenjenih funkcij mora biti nelinearna.

V zgoraj predstavljeni formulaciji je \mathbf{x} vektor zveznih spremenljivk, ki so definirane znotraj svojih spodnjih in zgornjih mej, označenih kot \mathbf{x}^{LO} in \mathbf{x}^{UP} . Nelinearna namenska funkcija je podana z izrazom $f(\mathbf{x})$, ki je podvržena sistemu pogojnih enačb in neenačb. Sistem linearnih in nelinearnih pogojnih enačb je predstavljen z izrazom $\mathbf{h}(\mathbf{x})=\mathbf{0}$, medtem ko sistem linearnih in nelinearnih pogojnih neenačb podaja izraz $\mathbf{g}(\mathbf{x})\leq\mathbf{0}$. Funkcije $f(\mathbf{x})$, $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ in $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ morajo biti zvezne in zvezno odvedljive, pri čemer mora biti vsaj ena izmed teh funkcij nelinearna (v modelu cevovoda jih je večina nelinearnih).

Učinkovitejše metode rešujejo problem nelinearnega programiranja (NLP) z neposrednim izpolnjevanjem Karush-Kuhn-Tuckerjevih pogojev, kot je opisano v virih [Karush, 1939], [John, 1948] in [Kuhn, 1951]. Med najpomembnejše metode za reševanje problemov nelinearnega programiranja spadajo:

- zaporedno kvadratno programiranje (Successive Quadratic Programming, SQP), glej [Powell, 1978],

- razširjeni Lagrangian (Augmented Lagrangian, AL), glej [Powell, 1969] in [Hestenes, 1969],
- posplošena metoda reduciranega gradienta (Generalized Reduced Gradient Method, GRG), glej [Abadie, 1969],
- metoda reduciranega gradienta (Reduced Gradient Method, RG), glej [Wolfe, 1967].

Za računanje problemov nelinearnega programiranja lahko uporabimo naslednje komercialne računalniške programe, kot so NPSOL za SQP, MINOS za RG, programi GRG2, LSGRG, CONOPT za GRG in LANCELOT za AL, itd.

3.3 Vhodni podatki – konstante

V optimizacijskem modelu PIPEOPT-SR smo definirali sledeče konstante (vhodne podatke):

R	notranji polmer cevi [cm],
L_{sect}	dolžina odseka cevovoda [cm],
f_j	napetost tečenja jekla [kN/cm ²],
cor	korozijski dodatek na jekleno pločevino [cm],
p_{in}	notranji vodni tlak [kN/cm ²],
p_{ex}	zunanji vodni tlak [kN/cm ²],
C_{ip}	faktor varnosti za notranji vodni tlak [-],
C_{ep}	faktor varnosti za zunanji vodni tlak [-],
E	modul elastičnosti jekla [kN/cm ²],
ν	Poissonov koeficient [-],
φ	koeficient, ki definira najvišjo možno elastično napetost v jeklu (kjer še velja Hookov zakon) [-],
$j_R = j/R$	razmerje med prazno vrzeljo med cevjo in okoliškim betonom j ter notranjim polmerom cevi R [-],
$\varepsilon = \eta/R$	razmerje med največjim koeficientom ovalnosti cevi η (deviacija med idealno krožnico polmera cevi in radialno navzven deformirano ovalno cevjo) in notranjim polmerom cevi R [-],

$u_e = U/e$ razmerje med največjo notranjo deviacijo cevi U in teoretično debelino stene cevi e [-],
 π Ludolfovo število [-],
 ρ prostorninska masa jekla [kg/cm^3].

Faktor varnosti za notranji tlak. Trije različni parcialni faktorji za obtežbo kot jih predpisuje standard »SIST EN 1993-4-3:2007, Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij – 4 - 3. del: Cevovodi« so:

$\gamma_F = \gamma_{F1} = 1,39$ naravno (ruralno) okolje,
 $\gamma_F = \gamma_{F2} = 1,50$ polurbano okolje brez protipoplavne obrambe,
 $\gamma_F = \gamma_{F3} = 1,80$ polurbano okolje s protipoplavno obrambo.

Parcialni faktor varnosti za odpornost materiala je v SIST EN 1993-4-3:2007 zapisan kot $\gamma_M = 1,0$. Če se v splošnem odločimo za srednji parcialni faktor varnosti obtežbe $\gamma_F = 1,50$, potem skupni faktor varnosti za notranji tlak znaša: $C_{ip} = \gamma_F \cdot \gamma_M = 1,50$, ki ga enakega določajo tudi C.E.C.T. priporočila.

Faktor varnosti za zunanji tlak. Parcialna faktorja varnosti pri izračunu stabilnosti cevi na zunanji tlak sta definirana v standardu »SIST EN 1993-1-6:2007, Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij – 1 - 6. del: Trdnost in stabilnost lupinastih konstrukcij«: $\gamma_{M1} = 1,1$ in $\gamma_F = 1,50$. Po Evrokodu skupni faktor varnosti za zunanji tlak tako znaša: $C_{ep} = \gamma_F \cdot \gamma_{M1} = 1,65$ (C_{ep} v C.E.C.T. priporočilih znaša 1,60). Enačbe optimizacijskega modela so zapisane skladno s C.E.C.T. priporočili. Ker je varnostni faktor za odpornost materiala γ_M že vključen v skupne varnostne faktorje C_{ip} in C_{ep} , se v enačbah modela ne uporablja projektna napetost tečenja $f_{j,d}$, temveč zgolj napetost tečenja jekla f_j . Vse ostale napetosti in izrazi v modelu ohranjajo enake nazive kot v priporočilih C.E.C.T.

SCALARS	
R	NOTRANJI RADIJ CEVI cm /195/
LTOT	DOLŽINA ODSEKA CEVI cm /46502/
FY	MEJA PLASTICNOSTI JEKLA kN-cm2 /69/
COR	KOROZIJSKI DODATEK cm /0.2/
PIN	NOTRANJI TLAK V CEVI kN-cm2 /0.88562/
PEX	ZUNANJI TLAK NA CEV kN-cm2 /0.34853/
CIP	SKUPNI FAKTOR VARNOSTI ZA NOTRANJI TLAK /1.5/
CEP	SKUPNI FAKTOR VARNOSTI ZA ZUNANJI TLAK /1.80/
EME	MODUL ELASTICNOSTI JEKLA kN-cm2 /21000/
NI	POISSONOV KOEFICIENT /0.3/
FI	KOEFICIENT NAJVISJE ELASTICNE NAPETOSTI /0.7/
JR	PRAZNA VRZEL MED CEVJO IN BETONOM /0.001/
EPSILON	KOEFICIENT OVALNOSTI ETA-R /0.01/
UE	VBOCITEV CEVI U-E /0.2/
PI	PITAGORJEVO STEVILO /3.141592654/
RO	PROSTORNINSKA MASA JEKLA kg-cm3 /0.00785/;

Slika 2: Prijava konstant – skalarjev v programu PIPEOPT-SR

Nepopolnosti. Pri dimenzioniranju jeklene cevne lupine za zunanji tlak je potrebno upoštevati nepopolnosti, kot so odstopanja dejanske oblike cevi od idealne krožnice ter prazen prostor med jekleno cevjo in betonom. Visokotlačni cevovod mora biti izdelan in vgrajen v skladu z načrtovanimi nepopolnostmi, saj bi vsako prekoračenje teh odstopanj zmanjšalo nosilnost cevovoda. V skladu s C.E.C.T. priporočili je pri dimenzioniranju cevi na zunanji tlak potrebno upoštevati naslednje tri nepopolnosti:

$U = 0,2e$ koeficient lokalnega radialnega odstopanja od idealne krožnice cevi ($U \leq 0,2e$), kjer e predstavlja debelino stene cevi, zmanjšano za korozijski dodatek,
 $\eta = 0,01R$ koeficient ovalnosti cevi ($\eta \leq 0,01R$), kjer je R notranji radij cevi in
 $j/R = 1,0 \%$ prazna vrzel med jekleno cevjo in okoliškim betonom ($j = 0,001R$).

Vnos vhodnih podatkov – konstant optimizacijskega programa je izveden z ukazom SCALARS. Imena konstant-skalarjev so smiselno določena, saj so čim bolj usklajena z njihovimi izvirnimi oznakami iz teorije. Prikaz vnosa konstant v programu PIPEOPT-SR je predstavljen na sliki 1.

3.4 Spremenljivke

Spremenljivke optimizacijskega modela PIPEOPT-SR so vse dimenzije, napetosti zaradi notranjega in zunanjega vodnega tlaka ter masa jeklenega cevovoda:

t	debelina stene cevi [cm],
e	teoretična debelina stene cevi $e=t-cor$ [cm],
e_0	teoretična debelina stojine ojačitve [cm],
t_e	debelina stojine ojačitve - rebra [cm],
L	razmak med ojačitvami cevi [cm],
b_0	višina stojine ojačitve [cm],
a_0	svetli razmak med stojinama ojačitve [cm],
L_0	širina spodnje pasnice ojačitve – tj. sodelujoča širina stene cevi [cm],
A_0	površina prečnega prereza ojačitve (s sodelujočim delom stene cevi) [cm ²],
Y_0	razdalja med krajnim vrhom ojačitve in horizontalno težiščno osjo [cm],
R_0	polmer do horizontalne težiščne osi ojačitve [cm],
I_0	vztrajnostni moment prereza ojačitve [cm ⁴],
σ_N	normalna obodna napetost v steni cevi [kN/cm ²],
σ_{N0}	normalna obodna napetost v ojačitvi [kN/cm ²],
$\sigma_{N0,min}$	manjša normalna obodna napetost (ki ustreza manjšemu zunanjemu kritičnemu tlaku $p_{cr}^{L,min}$) [kN/cm ²],
$p_{cr}^{L,pipe}$	zunanji kritični tlak v ovalni cevi med dvema ojačitvama [kN/cm ²],
$p_{cr}^{L,ring}$	zunanji kritični tlak v ojačitvi [kN/cm ²],

$p_{cr}^{L,min}$	manjši zunanji kritični tlak [kN/cm ²],
a	stabilizacijski faktor [-],
β	faktor oslabitve gladke cevi zaradi splošne ovalnosti (izražen z $\eta=0,01R$) [-],
γ	faktor oslabitve gladke cevi zaradi navzven radialno deformirane ovalne cevi (izražen z $U>0,1e$) [-],
$mass$	masa jeklenega cevovoda total (stena cevi in ojačitve) [kg],
$mass_{stena}$	masa stene cevi [kg],
$mass_{reber}$	masa ojačitev - reber [kg].

POSITIVE VARIABLES

E	TEORETICNA DEBELINA STENE CEVI	cm
T	DEBELINA STENE CEVI	cm
E0	TEORETICNA DEBELINA STENE REBRA	cm
TE0	DEBELINA STENE REBRA	cm
LREB	RAZMAK MED OJACITVAMI	cm
H0	VIŠINA REBER	cm
A0	SVETLI RAZMAK MED REBRI	cm
L0	SODELUJOČA DOLŽINA CEVI V OJACITVI	cm
APR0	PRECNI PREREZ OJACITVE	cm2
Y0	RAZDALJA TEŽISCA OD VRHA OJACITVE	cm
R0	RADIJ DO TEŽISCA OJATVE	cm
I0	VZTRAJNOSTNI MOMENT OJACITVE	cm4
SIGN0	OBODNA NAPETOST V OJACITVI	kN-cm2
SIGN0MIN	OBODNA NAPETOST ZA MANJSO PCR	kN-cm2
PCRLCEV	KRITICNI ZUNANJI TLAK CEV	kN-cm2
PCRLREB	KRITICNI ZUNANJI TLAK REBRO	kN-cm2
PCRL	KRITICNI ZUNANJI TLAK OJACANE CEVI	SKUPAJ kN-cm2
ALFA	KOEFICIENT ODVIŠEN OD RAZMAKA MED OJACITVAMI	
BETA	KOEFICIENT OSLABITVE ZARADI OVALNOSTI CEVI	
GAMA	REDUKCIJSKI KOEFICIENT;	

VARIABLES

MASATOT	MASA CEVI Z REBRI	kg
MASACEVI	MASA STENE CEVI	kg
MASAREBER	MASA OJACITEV	kg;

Slika 3: Prijava spremenljivk v programu PIPEOPT-SR

Prijava spremenljivk v programu PIPEOPT-SR je izvedena z dvema stavkoma: POSITIVE VARIABLES, kjer so definirane pozitivne spremenljivke, ki lahko zavzamejo vrednosti v intervalu $[0,+\infty]$ in VARIABLES, kjer so definirane spremenljivke, ki lahko zavzamejo vrednost na celotnem intervalu $[-\infty,+\infty]$. Vse spremenljivke modela so pozitivne

spremenljivke, razen spremenljivka namenske funkcije *MASATOT* ter spremenljivki *MASACEVI* in *MASAREBER* cevovoda, glej sliko 2.

```

*M E J E SPREMENLJIVK

T.LO = 2;
T.L = 5;
T.UP =15;
T.FX=3.6;

TE0.LO = T.LO;
TE0.L = T.L/2;
TE0.UP = T.UP;
TE0.FX=2;

LREB.LO = 200;
LREB.L = 400;
LREB.UP =1000;
LREB.FX=300;

H0.LO = 5;
H0.L = 10;
H0.UP = 15;
H0.FX=11.4;

A0.LO = 1;
A0.L = 25;
A0.UP = 2*0.78*SQRT(R*T.UP);
A0.FX=9;

E.LO = T.LO - COR;
E.L = T.L - COR;
E.UP = T.UP - COR;

E0.LO = TE0.LO - COR;
E0.L = TE0.L - COR;
E0.UP = TE0.UP - COR;

```

Slika 4: Primer postavitve mej in začetnih vrednosti spremenljivk v programu PIPEOPT-SR

Za vsako definirano spremenljivko je določena spodnja mejna vrednost (.LO), začetna vrednost (.L) in zgornja mejna vrednost (.UP), glej sliko 3, kjer so prikazane meje in začetne vrednosti nekaterih spremenljivk. Od nastavitve mej in začetnih vrednosti spremenljivk v veliki meri zavisi konvergenca optimizacije. Če so te vrednosti dobro nastavljene, to je približno v bližini optimalnih vrednosti (ki bodo šele izračunane), bo izračun optimizacije potekal hitro in brez zapletov.

3.5 Namenska funkcija

Definirana je namenska funkcija, ki predstavlja skupno maso (*mas*) odseka ojačanega cevovoda dolžine L_{sect} , glej enačbo (1). Prvi izraz v enačbi predstavlja maso stene cevi, drugi in tretji izraz pa predstavljata maso ojačitev, glej geometrijo cevi in ojačitev na sliki 1 in 6.

$$\begin{aligned}
 mass = \pi \cdot t \cdot (2 \cdot R + t) \cdot \rho \cdot L_{sect} + 2\pi \cdot h_0 \cdot [2 \cdot (R + t) + h_0] \cdot e_0 \cdot \rho \cdot L_{sect} / L + \\
 \pi \cdot t \cdot [2 \cdot (R + t + h_0) + t] \cdot (a_0 + 2 \cdot e_0) \cdot \rho \cdot L_{sect} / L
 \end{aligned}
 \quad (1)$$

Namenska funkcija je v modelu prijavljena z nazivom OBJ, glej sliko 5.

```

*NAMENSKA FUNKCIJA

OBJ..
MASATOT =E=
*masa stene cevi
PI*T*(2*R+T)*LTOT*RO
+
*masa ojacitev
PI*H0*(2*(R+T)+H0)*2*TE0*RO *LTOT/LREB
+
PI*T*(2*(R+T+H0)+T)*(A0+2*TE0)*RO *LTOT/LREB;

```

Slika 5: Namenska funkcija v programu PIPEOPT-SR

Omenjena namenska funkcija je podvržena sistemu pogojnih enačb in neenačb, s katerimi je preverjena nosilnost jeklene stene cevi ter krožnih ojačitev na notranji in zunanji vodni tlak, glej poglavje 3.4.

3.6 Pogojne (ne)enačbe

Ko je cevovod izpostavljen notranjemu vodnemu tlaku, se jeklena cevna lupina radialno razširi in nasloni na okoliški beton ter kamenino. Če bi bila cev prosta, bi se v tem primeru vzdolžno skrčila. To krčenje preprečujeta okoliški beton in kamenina, zaradi česar poleg obodnih nateznih napetosti v steni lupine σ_θ nastanejo še vzdolžne natezne napetosti σ_s , ki so posledica preprečene deformacije (kontrakcije). Zaradi nastalega dvodimenzionalnega napetostnega stanja se

primerjalne napetosti v cevi σ_{eq} zmanjšajo za 11 %.

S pogojno enačbo (2) je določeno, da mora biti projektna napetost v cevi ($C_{ip} \cdot \sigma_{eq}$) manjša od napetosti tečenja jekla f_y . Enačbe od (3) do (5) pa definirajo zmanjšano napetost v cevi σ_{eq} , Poissonov koeficient za jeklo ν in obodno napetost v steni lupine σ_θ .

$$C_{ip} \cdot \sigma_{eq} \leq f_y, \quad (2)$$

kjer so:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_\theta^2 - \sigma_x \cdot \sigma_\theta} = \sqrt{(\nu \cdot \sigma_\theta)^2 + \sigma_\theta^2 - (\nu \cdot \sigma_\theta) \cdot \sigma_\theta} = 0,89\sigma_\theta \quad (3)$$

$$\nu = 0,3 \quad (4)$$

$$\sigma_\theta = p_{in} \cdot R / e \quad (5)$$

Jekleni cevovod mora izkazovati odpornost na obremenitev zunanjega vodnega tlaka p_{ex} . Enačba (6), ki se uporablja za preverjanje stabilnosti stene cevi med dvema krožnima ojačitvama, podaja izračun zunanjega kritičnega tlaka $p_{cr}^{L,pipe}$ za ovalno cev v skladu s priporočili C.E.C.T.

$$p_{cr}^{L,pipe} = \alpha \cdot \beta \cdot p_{cr}^{-i} \quad (6)$$

Enačba (7) predstavlja zunanji kritični tlak idealne (brez napak oblike) cevi brez ojačitev p_{cr}^{-i} .

$$p_{cr}^{-i} = \frac{E^*}{4} \left(\frac{e}{R+e} \right)^3, \quad (7)$$

kjer je:

$$E^* = E / (1 - \nu^2) \quad (8)$$

Enačba (9) definira faktor oslabitve gladke cevi zaradi ovalnosti β , ki je določen v skladu s

[Kollbrunner, 1956] za največji možni koeficient ovalnosti cevi $\eta = 0,01 \cdot R$.

$$\beta = \frac{\gamma_{KM}}{2} \pm \sqrt{\frac{\gamma_{KM}^2}{4} - \nu} \quad (9)$$

$$\beta \leq 1,0, \quad (10)$$

kjer so:

$$\gamma_{KM} = \nu + 6 \frac{\varepsilon}{\Phi_{KM}} + 1 \quad (11)$$

$$\nu = f_y \cdot \Phi_{KM} / p_0 \quad (12)$$

$$\Phi_{KM} = e / R \quad (13)$$

$$p_0 = \frac{E}{4(1 - \nu^2)} \cdot \Phi_{KM}^3 \quad (14)$$

$$\varepsilon = \eta / R = 0,01 \quad (15)$$

Z enačbo (16) je podan stabilizacijski faktor α . Ker so krožne ojačitve cevi v izvrtani hribini zalite z okoliškim betonom, so v bočni smeri vpete v beton, kar preprečuje njihovo bočno zvrnitev. Zato je v skladu z določilom 8.4.2.1.a C.E.C.T. priporočil mogoče izračunsko zmanjšati razdaljo med krožnimi ojačitvami L . Z enačbo (18) izračunamo ta zmanjšani razmak L_f .

$$\alpha = \frac{3,34}{\psi \sqrt{\Phi_{KM}}} + \frac{4}{9} \left(\frac{\pi^2}{\psi^2} - \frac{1}{2} \right), \quad (16)$$

kjer so:

$$\psi = L_f / R \quad (17)$$

$$L_f = 0,8 \cdot (L - a_0). \quad (18)$$

Visokotlačni cevovodi, nameščeni v izvrtane tunele v hribini, se zaradi zagotavljanja večje varnosti obravnavajo brez upoštevanja prispevka okoliškega betona in hribine. V skladu s C.E.C.T. priporočili se obravnavajo kot samostojna jeklena konstrukcija, zato z enačbama (19) in (20)

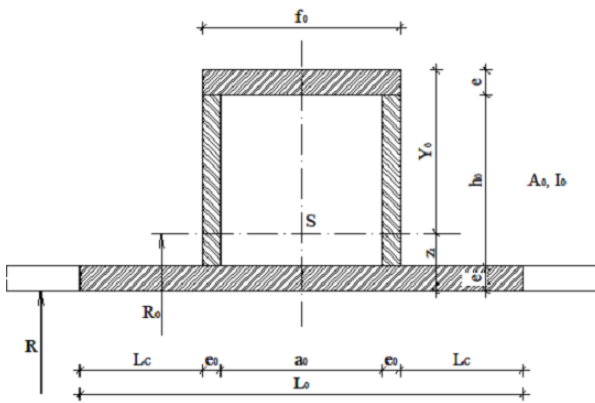
preverimo stabilnost krožnih ojačitev, oziroma z neenačbo C iz poglavja 8.4.2.2 priporočil C.E.C.T. Pri tem je σ_{N0} normalna obodna napetost v ojačitvi, $p_{cr}^{L,ring}$ pa zunanji kritični tlak v ojačitvi.

$$0,5 \cdot \frac{Y_0}{R} \cdot \left(\sigma_{N0} + E \cdot \frac{j}{R_0} \right) \cdot \left(1 + \frac{\sigma_{N0}}{E} \cdot \frac{L}{L_0} \cdot \frac{A_0 \cdot R_0^2}{I_0 + \frac{L-L_0}{12} \cdot e^3} \right)^{3/2} \leq$$

$$\leq (f_y - \sigma_{N0}) \cdot \left(1 - 0,2 \cdot \frac{R_0}{Y_0} \cdot \frac{f_y - \sigma_{N0}}{E} \right) \quad (19)$$

$$p_{cr}^{L,ring} = \sigma_{N0} \cdot \frac{A_0}{L_0 \cdot R_0} \cdot \left(1 + 0,175 \cdot \frac{R_0}{Y_0} \cdot \frac{f_y - \sigma_{N0}}{E} \right)^{-1} \quad (20)$$

Z enačbami (21)-(29) izračunamo karakteristike prečnega prereza krožne ojačitve. Krožna ojačitev je v bistvu votli pravokotni jekleni prerez (slika 6), pri čemer so zgornja horizontalna pasnica in dve vertikalni stojini navarjeni na jekleno steno cevi, ki s svojo sodelujočo širino L_0 računsko predstavlja spodnjo pasnico ojačitve.



Slika 6: Prečni prerez krožne ojačitve

$$e_0 = t_e - cor \quad (21)$$

$$L_c = 0,78 \sqrt{R \cdot e} \quad (22)$$

$$L_0 = 2(L_c + e_0) + a_0 \quad (23)$$

$$f_0 = a_0 + 2e_0 \quad (24)$$

$$A_0 = L_0 \cdot e + 2h_0 \cdot e_0 + f_0 \cdot e \quad (25)$$

$$z_t = \left[L_0 \cdot e \cdot \frac{e}{2} + 2h_0 \cdot e_0 \cdot \left(e + \frac{h_0}{2} \right) + f_0 \cdot e \cdot \left(\frac{3e}{2} + h_0 \right) \right] / A_0 \quad (26)$$

$$R_0 = R + z_t \quad (27)$$

$$Y_0 = 2e + h_0 - z_t \quad (28)$$

$$I_0 = \frac{L_0 \cdot e^3}{12} + L_0 \cdot e \cdot \left(\frac{e}{2} - z_t \right)^2 + 2 \cdot \frac{e_0 \cdot h_0^3}{12} + 2 \cdot h_0 \cdot e_0 \cdot \left(e + \frac{h_0}{2} - z_t \right)^2 + \frac{f_0 \cdot e^3}{12} + f_0 \cdot e \cdot \left(\frac{3e}{2} + h_0 - z_t \right)^2 \quad (29)$$

Z enačbo (30) zadostimo pogoju, kjer je normalna obodna napetost v ojačitvi σ_{N0} manjša od najvišje elastične napetosti v jeklu. Zato v cevovodu velja Hookov zakon.

$$\sigma_{N0} \leq \varphi \cdot f_y \quad (30)$$

Največji projektni zunanji vodni tlak na cev ($C_{ep} \cdot p_{ex}$) mora biti manjši od zunanjega kritičnega tlaka v cevi $p_{cr}^{L,pipe}$, kakor tudi od zunanjega kritičnega tlaka v ojačitvi $p_{cr}^{L,ring}$. Zunanji kritični tlak p_{cr}^L , pri katerem jeklena cev z ojačitevami še zagotavlja svojo stabilnost in odpornost, se izračuna po enačbi (31) kot manjša vrednost med zunanjima kritičnima tlakoma v cevi $p_{cr}^{L,pipe}$ in ojačitvi $p_{cr}^{L,ring}$. Nato preverimo neenačbo (32).

$$p_{cr}^L = \min \left\{ \begin{array}{l} p_{cr}^{L,pipe} \\ p_{cr}^{L,ring} \end{array} \right\} \quad (31)$$

$$C_{ep} \cdot p_{ex} \leq p_{cr}^L \quad (32)$$

Z enačbami (33) - (37) preverimo elastično obnašanje jeklenega materiala pri obtežbi zunanjega tlaka, pri čemer z enačbo (34) določimo normalno obodna napetost v steni cevi σ_N , z enačbo (35) pa definiramo manjšo normalno

obodno napetost $\sigma_{N0,min}$, ki ustreza najmanjšemu zunanjemu kritičnemu tlaku $p_{cr}^{L,min}$.

$$\sigma_N \leq \varphi \cdot \gamma \cdot f_y \quad (33)$$

kjer so:

$$\sigma_N = \frac{p_{cr}^L \cdot L \cdot R - \sigma_{N0,min} \cdot A_0}{(L - L_0) \cdot e} \quad (34)$$

$$\sigma_{N0,min} = \frac{p_{cr}^L \cdot L_0 \cdot R_0}{A_0} \quad (35)$$

$$\sigma_{N0,min} \leq \varphi \cdot f_y \quad (36)$$

$$\gamma = 1 - 3 \cdot p_{cr}^L \cdot \frac{R}{f_y \cdot e} \left(\frac{U}{e} - 0,1 \right) \quad (37)$$

Enačbe v modelu prijavimo z ukazom EQUATIONS, potem pa jih lahko zapišemo v modelu v modelnem jeziku GAMS. Na sliki 7 je prikazan primer pogojnih (ne)enačb prereznih karakteristik krožne ojačitve.

*prerezne karakteristike ojačitve

```

E6..
E0 =G= E/3;

E7..
E0 =L= E;

E7A..
TE0 =E= E0 + COR;

E8..
A0 =L= 2*0.78*SQRT(R*E);

E9..
L0 =E= 2*(0.78*SQRT(R*E)+E0)+A0;

E10..
APR0 =E= (2*(0.78*SQRT(R*E)+E0)+A0)*E + 2*H0*E0 +
(A0+2*E0)*E;

E11..
Y0 =E= 2*E + H0 -
(
*vstavljen zt

((2*(0.78*SQRT(R*E)+E0)+A0)*E*E/2+2*H0*E0*(E+H0/2)+
(A0+2*E0)*E*(1.5*E+H0))/
((2*(0.78*SQRT(R*E)+E0)+A0)*E + 2*H0*E0 +
(A0+2*E0)*E)
*vstavljen zt
);

E12..
R0 =E= R +
(
*vstavljen zt

((2*(0.78*SQRT(R*E)+E0)+A0)*E*E/2+2*H0*E0*(E+H0/2)+
(A0+2*E0)*E*(1.5*E+H0))/
((2*(0.78*SQRT(R*E)+E0)+A0)*E + 2*H0*E0 +
(A0+2*E0)*E)
*vstavljen zt
);

```

Slika 7: Enačbe karakteristik prereza ojačitve v programu PIPEOPT-SR

4 Optimizacija

Optimiranje visokotlačnih cevovodov z uporabo programa PIPEOPT-SR, varianta 1,0, se izvede v okolju GAMS (General Algebraic Modeling System) z optimizacijskimi programi nelinearnega programiranja, NLP.

Za optimiranje največkrat uporabljamo programa GAMS/MINOS (metoda reduciranega gradienta) in GAMS/CONOPT (posplošena metoda reduciranega gradienta). Slednji program daje boljše rezultate pri obsežnih in izrazito nelinearnih modelih.

S O L V E S U M M A R Y			
MODEL	CEVNAOBLOGA	OBJECTIVE	MASATOT
TYPE	NLP	DIRECTION	MINIMIZE
SOLVER	MINOS5	FROM LINE	808
**** SOLVER STATUS		1	Normal Completion
**** MODEL STATUS		2	Locally Optimal
**** OBJECTIVE VALUE		1755301.4754	
RESOURCE USAGE, LIMIT	0.079	1000.000	
ITERATION COUNT, LIMIT	4	2000000000	
EVALUATION ERRORS	0	0	
GAMS/MINOS 24.9.1 r63795 Released Aug 30, 2017			
WEI x86 64bit/MS Windo			
M I N O S 5.6 (Jul 2016)			
GAMS/MINOS 5.6, Large Scale Nonlinear Solver			
B. A. Murtagh, University of New South Wales			
P. E. Gill, University of California at San Diego,			
W. Murray, M. A. Saunders, and M. H. Wright,			
Systems Optimization Laboratory, Stanford University			

GAMS po izvršenem izračunu posreduje naslednje izhodne podatke:

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

Na sliki 8 je prikazan primer izpisa statusnega poročila, ko smo uporabili program MINOS, na sliki 9 pa je prikazan del izpisa rezultatov optimiranja – izpis vrednosti spremenljivk.

Slika 8: Primer izpisa statusnega poročila

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
--- VAR E	3.400	3.400	3.400	-4.665E-9
--- VAR T	3.600	3.600	3.600	EPS
--- VAR E0	1.800	1.800	1.800	-2.708E-9
--- VAR TE0	2.000	2.000	2.000	EPS
--- VAR LREB	325.000	325.000	325.000	8.197E-11
--- VAR H0	11.400	11.400	11.400	-2.213E-9
--- VAR A0	8.000	8.000	8.000	-1.477E-9
--- VAR L0	51.768	51.768	51.768	EPS
--- VAR APR0	256.492	256.492	256.492	EPS
--- VAR Y0	1.700	13.040	18.200	.
--- VAR R0	196.700	200.160	213.200	.
--- VAR I0	846.805	8468.054	84680.539	.
--- VAR SIGN0	.	23.673	48.300	.
--- VAR SIGN0MIN	.	23.628	48.300	.
--- VAR PCRLCEV	.	0.582	1.725	.
--- VAR PCRLREB	.	0.583	1.725	.
--- VAR PCRL	.	0.582	1.725	.
--- VAR ALFA	2.182	21.821	218.208	.
--- VAR BETA	.	0.918	1.000	.
--- VAR GAMA	.	0.855	1.000	.
--- VAR MASATOT	1.7553E+6	1.7553E+6	1.7553E+6	1.000
--- VAR MASACEVI	1.6250E+6	1.6250E+6	1.6250E+6	EPS
--- VAR MASAREBER	1.3032E+5	1.3032E+5	1.3032E+5	EPS

Slika 9: Primer izpisa vrednosti spremenljivk

5 Računski primer

V tem poglavju je predstavljen praktični primer uporabe programa PIPEOPT-SR za optimizacijo visokotlačnega cevovoda, načrtovanega za črpalno hidroelektrarno Kozjak pri Mariboru. Predvidena elektrarna, kamor bo po jeklenem cevovodu pod visokim tlakom pritekala voda iz že zgrajenega akumulacijskega jezera kapacitete 3 milijone m³ vode, vključuje dve Francisovi reverzibilni turbini s skupno močjo 2x220 MW. Strokovnjaki podjetja IBE Ljubljana so leta 2011 pripravili idejni projekt elektrarne in izvedli osnovno dimenzioniranje poševnega cevovoda [Močnik, 2011]. V procesu načrtovanja je bilo obravnavanih več različic jeklenega visokotlačnega cevovoda, ki je izpostavljen vodnemu tlaku nad 100 barov in dosega dolžine do 2400 metrov. Za Varianto 1 so na primer predvideli porabo 12.751,98 ton jekla kakovosti S 460. Varianta vertikalnega visokotlačnega cevovoda je bila načrtovana leta 2012 [Močnik, 2012].

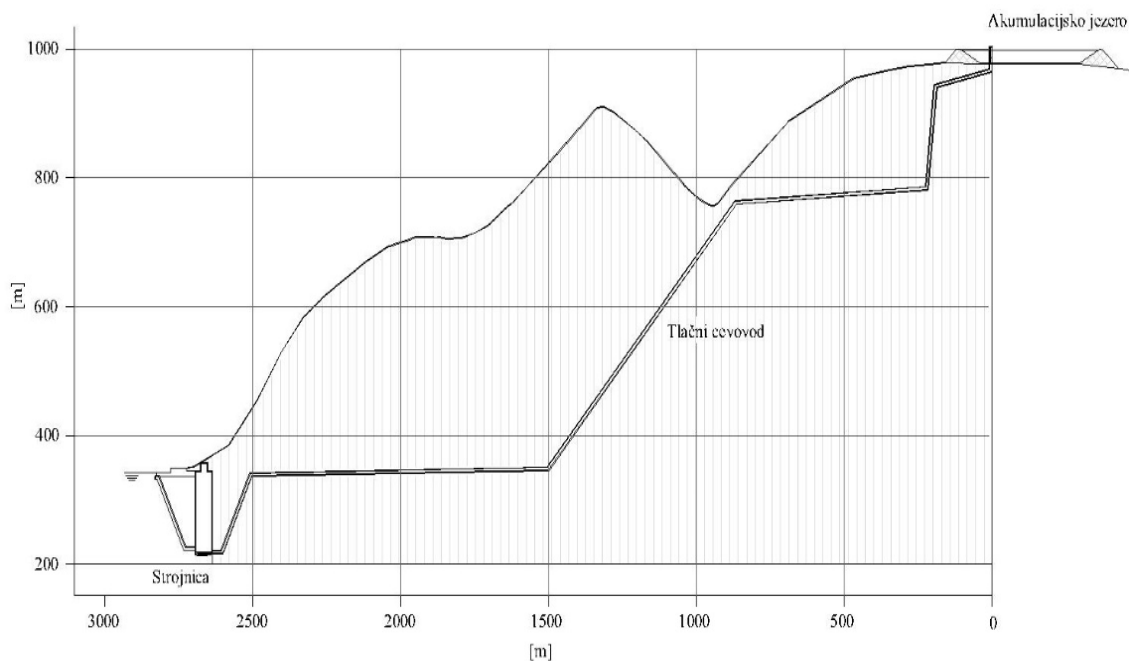
Na Fakulteti za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo (FGPA UM) smo v obdobju 2011–2012 izvedli optimizacijo vseh načrtovanih različic poševnega visokotlačnega cevovoda [Kravanja, 2011]. Kasneje smo optimirali tudi vertikalne različice cevovoda [Kravanja, 2012]. Poleg tega smo pripravili še smernice za projektante. Pri reševanju optimizacijskega problema smo uporabili metodo nelinearnega programiranja (NLP). Optimirali smo različice gladke jeklene cevi brez ojačitev [Kravanja, 2015] ter različice cevovodov s krožnimi ojačitvami [Kravanja, 2019]. Cilj optimizacije je bil določiti optimalno maso cevovodnih različic ter pridobiti vse potrebne dimenzije cevi in ojačitev. Tako kot v virih [Kravanja, 2015 in 2019] tudi v tem priročniku obravnavamo optimizacijo dveh različic:

- poševni cevovod - Varianta 1: cevovod z največjo dolžino (optimalna masa gladke cevi brez ojačitev znaša 9967,41 ton jekla S 690 [Kravanja, 2015]) in

- vertikalni cevovod: cevovod z najvišjim zunanjim tlakom (optimalna masa gladke cevi brez ojačitev znaša 3165,34 ton jekla S 690 [Kravanja, 2015]).

5.1 Optimizacija variante poševnega visokotlačnega cevovoda

Poševni visokotlačni cevovod Varianta 1 (z asinhronim generatorjem) ima predvideno dolžino visokotlačnega cevovoda 2471,03 m, glej sliko 10. Ker se bosta na vrhu dva vertikalna odseka dolžin po 67,97 m izdelala iz stene cevi z najmanjšo možno debelino, smo optimirali samo preostalo dolžino cevovoda $L = 2335,09$ m.



Slika 10: Prerez skozi poševni visokotlačni cevovod Kozjak

Pri izračunu smo uporabili poboljšano jeklo kakovosti S 690Q, ki izkazuje visoko trdnost, drobnozrnatost in dobro varivost. Za to različico smo optimirali 6 dolžinskih odsekov cevi, katerih dolžine segajo od 144,10 m do 619,78 m. Notranji premeri cevi znašajo od $D=3,90$ m ($R=1,95$ m) do $D=4,30$ m ($R=2,15$ m). Največji notranji vodni tlak znaša 102,830 barov, medtem ko je največji zunanji vodni tlak 46,388 barov, kot je prikazano v preglednici 1.

V optimizacijski model PIPEOPT-SR smo vstavili vhodne podatke, ki zajemajo vrednosti naslednjih konstant: $C_{cp}=1,8$, $C_{ip}=1,5$, $cor=0,2$ cm, $f_y=69,0$ kN/cm² (S 690Q, $t < 50$ mm), $f_y=65,0$ kN/cm² (S 690Q, $t \geq 50$ mm), $E=21000$ kN/cm², $\varphi=0,7$, $\nu=0,3$, $j_R=j/R=0,001$, $u_e=U/e=0,2$, $\varepsilon=\eta/R=0,01$ in $\rho=0,00785$ kg/cm³.

Optimizacijski model PIPEOPT-SR smo uporabili za 6 različnih cevni odsekov Variante 1, pri čemer smo izvedli 6 ločenih izračunov, kot je prikazano v preglednici 1. Za vsak odsek smo v model, zasnovan v programskem jeziku GAMS, vnesli vse potrebne vhodne podatke ter določili začetne vrednosti spremenljivk in njihove

omejitve. Nato smo izvedli optimizacijo z uporabo algoritma reduciranih gradientov za reševanje nelinearnih optimizacijskih problemov, ki je implementiran v podprogramu GAMS/CONOPT2 [Drudd, 1994]. Model PIPEOPT-SR vključuje 809 vrstic, 16 skalarjev, 23 spremenljivk, 28 osnovnih pogojnih enačb ter 23 dodatnih neenačb mej spremenljivk, skupaj z dvema ukaznima stavkoma. Ker je model relativno majhen, je čas optimizacije za posamezen odsek trajal manj kot 1 sekundo.

Celoten proces, vključno z vnosom podatkov in analizo rezultatov, je trajal približno 10 minut na odsek. Tako je skupni čas izračuna za celoten cevovod z vsemi odseki znašal le 1 uro.

Optimalni rezultat predstavlja najnižjo izračunano možno maso, ki znaša 8112,019 ton za visokotlačni cevovod z ojačitvami. Prav tako so bile izračunane optimalne debeline jeklene stene, ki segajo od 15 mm do 45 mm, ter dimenzije krožnih ojačitev (reber), kot je prikazano v preglednici 1.

Preglednica 1: Optimalna masa poševnega visokotlačnega cevovoda Kozjak – Varianta 1

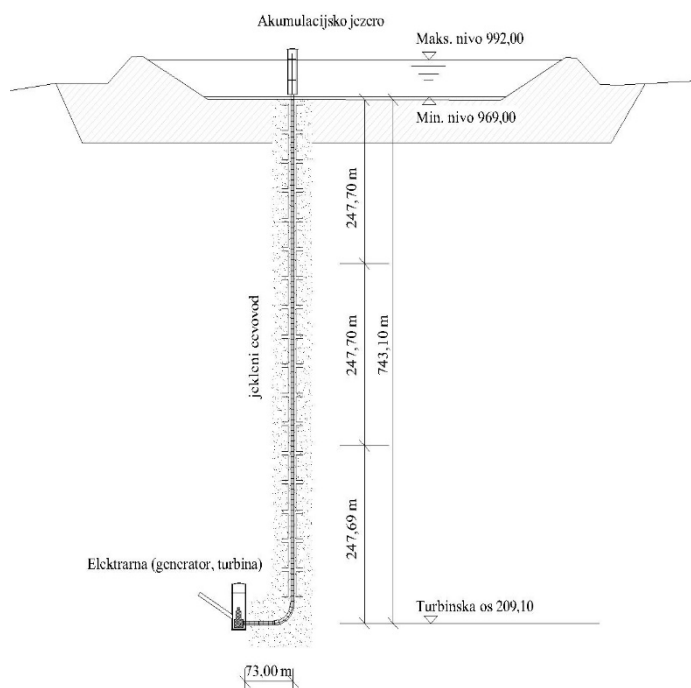
x (m)	P _{in} (m)	P _{ex} (m)	D (m)	t (mm)	ΔL (m)	ΣG (kg)
0,00	1028,30	150,00	3,9	41	144,10	cev: 574 214
108,15	926,19	200,00	3,9	37	356,87	cev: 1 282 025
465,00	885,62	348,53	3,9	36	465,02	cev: 1 624 983 rebra: 147 007 skupaj: 1 771 990
930,00	832,76	463,88	4,1	45	363,66	cev: 1 672 831 rebra: 160 086 skupaj: 1 832 917
1205,00	589,65	369,28	4,1	36	385,66	cev: 1 416 143 rebra: 161 487 skupaj: 1 577 630
1480,00	293,91	42,06	4,3	15	619,78	cev: 989 302 rebra: 83 941 skupaj: 1 073 243
Jekleni cevovod skupaj:					2335,09	8 112 019

Med izračunom smo ugotovili, da na prvih dveh cevni odsekih (x=0,00 m in x=108,15 m) ni bilo potrebno dodajati ojačitev, saj je bila zahtevana debelina cevi z ojačitvami enaka kot pri gladki cevi (brez ojačitev). To je posledica dejstva, da se na teh odsekih pojavlja kot merodejen notranji vodni tlak, medtem ko je zunanji tlak razmeroma majhen in ni imel odločilnega vpliva. Omeniti je treba, da smo s privaritvijo krožnih ojačitev zmanjšali maso jekla cevovoda za 18,6 %, saj bi masa optimirane gladke cevi brez ojačitev znašala 9967,41 ton jekla [Kravanja, 2015].

5.2 Optimizacija variante vertikalnega visokotlačnega cevovoda

Dolžina vertikalnega visokotlačnega cevovoda je 784,06 m, kot je prikazano na sliki 11. Optimizacijo te različice smo podrobneje

predstavili v virih [Kravanja, 2018 in 2019]. Tudi pri tej različici smo uporabili jeklo visoke trdnosti S 690Q. Optimizirali smo 16 dolžinskih odsekov cevi (5 v spodnjem delu, 5 v srednjem delu in 6 v zgornjem delu), katerih dolžine segajo od 9,00 m do 81,00 m. Notranji premeri cevi so se gibali med D=3,20 m (R=1,60 m) in D=4,00 m (R=2,00 m). Največji notranji vodni tlak je znašal 94,920 barov, največji zunanji pa 78,290 barov, kot je prikazano v preglednici 2.



Slika 11: Prerez skozi vertikalni visokotlačni cevovod Kozjak

Optimizacijski model PIPEOPT-SR zajema sledeče konstante: $C_{\varphi}=1,8$, $C_{\dot{\varphi}}=1,5$, $cor=0,2$ cm, $f_j=69,0$ kN/cm² (S 690Q, $t < 50$ mm), $f_j=65,0$ kN/cm² (S 690Q, $t \geq 50$ mm), $E=21000$ kN/cm², $\varphi=0,7$, $\nu=0,3$, $j_R=j/R=0,001$, $u_c=U/e=0,2$, $\varepsilon=\eta/R=0,01$ in $\rho=0,00785$ kg/cm³.

Vertikalni cevovod je razdeljen na spodnji, srednji in zgornji del. Spodnji in srednji del imata po 5 različnih cevni odsekov, zgornji del pa 6. Nadalje ima spodnji del cevovoda premer 3,2 m, srednji del 3,4 m, zgornji del (razen zg. odseka) 3,6 m, krajni zgornji odsek pa 4,0 m. Skupaj cevovod vsebuje 16 različnih cevni odsekov. Potrebne vhodne podatke smo v model PIPEOPT-SR vnesli 16-krat za vsakega od 16 različnih cevni odsekov. Nato smo s podprogramom GAMS/CONOPT2 izvedli 16

optimizacij z nelinearnim programiranjem (NLP). Skupni čas za izračun vseh 16 odsekov cevovoda je znašal približno 3 ure.

Spodnji del cevovoda izkazuje izračunano optimalno maso 1299,023 ton (glej preglednico 2), srednji del 821,627 ton (glej preglednico 3) in zgornji del cevi 471,896 ton (glej preglednico 4). Na ta način smo določili skupno optimalno maso jekla za vertikalni cevovod z ojačitvami, ki znaša 2592,546 ton. Prav tako smo izračunali optimalne debeline stene cevi, ki segajo od 8 mm do 61 mm, ter prereze ojačitev (reber), kot je prikazano v preglednicah 2-4. S privaritvijo krožnih ojačitev smo zmanjšali maso jekla visokotlačnega cevovoda za 18,1 %, saj bi optimirana masa gladke cevi brez ojačitev znašala 3165,34 ton [Kravanja, 2015].

Preglednica 2: Optimalna masa vertikalnega visokotlačnega cevovoda Kozjak – spodnji del

x (m)	prerez	p _{in} (m)	p _{ex} (m)	t (mm)	ΔL (m)	jeklo	ΣG (kg)
527,36	20	341,90	287,50	25	54,00	cev: 120 687 rebra: 22 210 skupaj: 142 897	
581,36	22	276,50	233,50	21	54,00	cev: 101 265 rebra: 14 925 skupaj: 116 190	
635,36	24	211,00	179,50	17	54,00	cev: 81 886 rebra: 15 282 skupaj: 97 168	
689,36	26	145,60	125,50	12	54,00	cev: 57 722 rebra: 16 349 skupaj: 74 071	
743,36	28	78,10	69,50	8	31,70	cev: 22 565 rebra: 10 020 skupaj: 32 585	
775,06	29	39,80	37,80	8	9,00	cev: 7 116 rebra: 1 869 skupaj: 8 985	
Zgornji del		D = 3,60 m				Σ	471 896

Preglednica 3: Optimalna masa vertikalnega visokotlačnega cevovoda Kozjak – srednji del

x (m)	prerez	p _{in} (m)	p _{ex} (m)	t (mm)	ΔL (m)	jeklo	ΣG (kg)
0,00	1	949,20	782,90	62	81,00	cev: 403 998 rebra: 23 944 skupaj: 427 942	
81,00	4	883,00	733,90	58	54,00	cev: 251 647 rebra: 15 501 skupaj: 267 148	
135,00	6	817,60	679,90	54	54,00	cev: 234 005 rebra: 15 168 skupaj: 249 173	
189,00	8	752,10	625,90	47	54,00	cev: 203 233 rebra: 15 105 skupaj: 218 338	
243,00	10	686,70	571,90	43	36,66	cev: 126 074 rebra: 10 348 skupaj: 136 422	
Spodnji del		D = 3,20 m				Σ	1 299 023

Preglednica 4: Optimalna masa vertikalnega visokotlačnega cevovoda Kozjak – zgornji del

x (m)	prerez	p _{in} (m)	p _{ex} (m)	t (mm)	ΔL (m)	jeklo ΣG (kg)	
279,66	11	642,20	535,20	43	54,00	cev: 197 160 rebra: 16 687 skupaj: 213 847	
333,66	13	576,70	481,20	39	54,00	cev: 178 612 rebra: 15 827 skupaj: 194 439	
387,66	15	511,30	427,20	35	54,00	cev: 160 106 rebra: 15 635 skupaj: 175 741	
441,66	17	445,80	373,20	31	54,00	cev: 141 643 rebra: 15 477 skupaj: 157 120	
495,66	19	380,40	319,20	27	31,70	cev: 72 336 rebra: 8 144 skupaj: 80 480	
Srednji del		D = 3,40 m				Σ	821 627

Literatura

- Abadie, J., Carpenter, J., Generalization of the Wolfe reduced gradient method to the case of nonlinear constraints, Optimization, New York: Academic Press, 37–47, 1969.
- Amstutz, E., Das Einbeulen von Schacht- und Stollenpanzerungen, Schweizerische Bauzeitung 68 (9), 102-105, 1950.
- Amstutz, E., Das Einbeulen von vorgespannten Schachtund Stollenpanzerungen, Schweizerische Bauzeitung 71 (16), 229-231, 1953.
- Anagnostopoulos, J.S., Papantonis, D.E., Simulation and size optimization of a pumped-storage power plant for the recovery of wind-farms rejected energy, Renewable energy 33 (7), 1685-1694, 2008.
- Bai, X.L., Jia, Q.P., Su, H.L., Optimal Design of the Stiffener Penstock Structure in a Hydropower Station, Civil engineering, architecture and sustainable infrastructure II, pts 1 and 2, Applied Mechanics and Materials 438-439, 561-564, 2013.
- Brooke, A., Kendrick, D., Meeraus, A., GAMS - A User's Guide, Scientific Press, Redwood City, CA, 1988.
- C.E.C.T., Recommendations for the design, manufacture and erection of steel penstocks of welded construction for hydro electric installations, European Committee for boilermaking and kindred steel structures, Prepared by the »Penstock« Section, 1979.
- Dong, W.S., Tang, K.D., Hou, X.M., Liu, X.M., Research on the stability problem of hydroelectric station penstock under external pressure, 2008 International symposium on intelligent information technology application, vol II, Proceedings, IEEE Computer Soc, Los Alamitos, CA, 508-+, 2008.
- Druid, A.S., CONOPT – A Large-Scale GRG Code, ORSA Journal on Computing 6 (2), 207-216, 1994.
- Fathi-Moghadam, M., Haghhighipour, S., Samani, H.M.V., Design-Variable Optimization of Hydropower Tunnels and Surge Tanks Using a Genetic Algorithm, Journal of water resources planning and management-ASCE 139 (2), 200-208, 2013.
- Gu, H., Yan, G.H., Analysis on Dynamic Response and its optimized design of Penstock and Expansion Joint Structure in Hydropower Station, Advanced building materials, pts 1-4, Advanced Materials Research 250-253 (1-4), 2892-2896, 2011.
- Haghhighipour, S., Fathi-Moghadam, M., Optimization of hydropower conveyance systems, Journal of food agriculture & environment 8 (2), 1093-1096, 2010.
- Hestenes, M.R., Multiplier and gradient methods, Journal of Optimization Theory and Applications 4, 303–320, 1969.
- John, F., Extremum problems with inequalities as subsidiary conditions, Studies and Essays presented to Richard Courant on his 60th birthday, New York: Interscience, 187–204, 1948.
- Karush, W., Minima of functions of several variables with inequalities as side conditions, Department of Mathematics, University of Chicago, Chicago, 1939.
- Kollbrunner, C.F., Milosavljević, S., Beitrag zur Berechnung von auf Ausendruck beanspruchten kreiszylindrischen Rohren, Verlag Leemann, Zürich, 1956.
- Kramar, J., Računalniško podprto snovanje razdelilnih delov tlačnih cevovodov: odpravljanje ozkih grl v konstrukcijskem procesu, Strokovni bilten 2 (2), 31-35, 1985.
- Kramar, J., Raztresen, J., Bradač, J., Očepek, M., The design and construction of the Chiew Lam penstock system, International water power & dam construction 42 (7), 32-35, 1990.
- Kravanja, S., Faith, Š., Raztresen, J., Zelenko, B., Bedenik, B., Visokotlačni cevovod, jeklena obloga in razdelilnik za hidroelektrarno Chiew Lam na Tajskem, Gradbeni vestnik 37 (4/5/6), 86-90, 1988.
- Kravanja, S., The optimization of penstock with the recommendations for the design of steel liner and the collaboration of the rock, The recommendations for the dimensioning and optimization of steel penstock, (Optimizacija cevovoda z izhodišči za načrtovanje jeklene obloge in sodelovanja hribine, Izhodišča za dimenzioniranje in optimizacijo jeklenega cevovoda), Kozjak PSP, Faculty of Civil Engineering, University of Maribor, 2011.
- Kravanja, S., The optimization of penstock with the recommendations for the design of steel liner and the collaboration of the rock, Variant the Vertical penstock, The recommendations for the dimensioning and optimization of steel penstock, (Optimizacija cevovoda z izhodišči za načrtovanje jeklene obloge in sodelovanja hribine, Varianta vertikalni cevovod – kaverna, Izhodišča za dimenzioniranje in optimizacijo jeklenega cevovoda), Kozjak PSP, Faculty of Civil Engineering, University of Maribor, 2012.
- Kravanja, S., Optimization of steel penstock in a bored tunnel, High performance and optimum design of structures and materials, International Conference on High performance and optimum design of structures and materials, HPSM/OPTI 2014, WIT transactions on the built environment 137, WIT Press, Southampton, 337-345, 2014.
- Kravanja, S., Optimizacija jeklene gladke stenske obloge visokotlačnega cevovoda, Gradbeni vestnik 64, 280-286, 2015.
- Kravanja, S., Optimization of a steel penstock with stiffener rings, E-GFOS 9 (17), 64-73, 2018.
- Kravanja, S., Žula, T., Optimizacija jeklenega visokotlačnega cevovoda z ojačitvami, Gradbeni vestnik 68, 246-255, 2019.
- Kuhn, H.W., Tucker, A.W., Nonlinear programming, Proceedings of the Second Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, Berkeley: University of California Press, 481–492, 1951.
- Li, H.W., Ning, H.M., Yang, Z.S., The Optimal Design Model of Steel-lined Reinforced Concrete Penstock Based on ANSYS, Proceedings of first international conference of modelling and simulation, vol VI: Modelling and simulation in architecture, civil engineering and materials, 31-35, 2008.
- Močnik, I., Kimovec, J., Penstock dimensioning, 3. civil construction design, Penstock, Kozjak PSP, IBE Ljubljana, 2011.
- Močnik, I., Technical Report, 3. civil construction design, 3/18 Penstock – cavern type, Kozjak PSP, IBE Ljubljana, 2012.
- Powell, M.J.D., A method for nonlinear constraints in minimization problems, Optimization, New York: Academic Press, 238–298, 1969.

- Powell, M.J.D., A fast algorithm for nonlinearly constrained optimization calculations, Proceedings 1977 Dundee Conference on Numerical Analysis, Lecture Notes in Mathematics, Berlin: Springer-Verlag, 1978.
- SIST EN 1993-1-6:2007, Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij -1-6.del: Trdnost in stabilnost lupinastih konstrukcij, 2007a.
- SIST EN 1993-4-3:2007, Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij -4-3.del: Cevovodi, 2007b.
- Tapia, A., Millan, P., Gomez-Estern, E., Integer programming to optimize Micro-Hydro Power Plants for generic river profiles, Renewable energy 126, 905-914, 2018.
- Timoshenko, S., Theory of plates and shells, 1st edition, McGraw-Hill Book Company, New York and London, 1940.
- Wolfe, P., Methods of nonlinear programming, Nonlinear Programming, Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 97-131, 1967.
- Wu, H.L., Du, X.F., Qin, S.H., Li, Y., Li, Q., Influence of Concrete Tension Softening Properties on the Steel-liner Reinforced Concrete Penstock, Applied mechanics and materials I, pts 1-3, Applied Mechanics and Materials 275-277, 1544-+, 2012.

PRIROČNIK ZA DELO S PROGRAMOM PIPEOPT-SR ZA OPTIMIRANJE VISOKOTLAČNIH JEKLENIH CEVOVODOV Z OJAČITVAMI

STOJAN KRAVANJA, TOMAŽ ŽULA

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

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

Pričujoči priročnik obravnava delo s programom – optimizacijskim modelom - za optimiranje visokotlačnih jeklenih cevovodov z ojačitvami, kakršni se vgrajujejo v izvrtan tunel v hribino. Cevovod je dimenzioniran kot samonosilna jeklena cilindrična lupina s krožnimi ojačitvami brez sodelovanja hribine in okoliškega betona. Cevovod je lahko obremenjen z notranjim ali zunanjim tlakom. Optimizacija cevovoda se izvede z nelinearnim programiranjem, NLP. V ta namen je bil modeliran optimizacijski program PIPEOPT-SR, verzija 1,0. Optimizacijski model vsebuje skalarje (vhodne podatke), spremenljivke in namensko funkcijo mase jeklene konstrukcije, ki je podvržena sistemu pogojnih (ne)enačb iz statične analize in dimenzioniranja cevovoda v skladu s C.E.C.T. priporočili. Na koncu priročnika je predstavljen primer optimizacije visokotlačnega cevovoda z ojačitvami črpalne hidroelektrarne Kozjak, locirane v bližini Maribora.

DOI

[https://doi.org/
10.18690/um.fgpa.4.2024](https://doi.org/10.18690/um.fgpa.4.2024)

ISBN

978-961-286-937-3

Ključne besede:

program,
optimizacijski model,
optimizacija,
nelinearno
programiranje,
visokotlačni jekleni
cevovod z ojačitvami



Univerzitetna založba
Univerze v Mariboru

DOI
[https://doi.org/
10.18690/um.fgpa.4.2024](https://doi.org/10.18690/um.fgpa.4.2024)

ISBN
978-961-286-937-3

Keywords

program,
optimization model,
optimization ,
non-linear programming,
high-pressure steel
penstocks with stiffener
rings

MANUAL FOR WORKING WITH THE PIPEOPT-SR PROGRAM FOR OPTIMIZING HIGH-PRESSURE STEEL PIPELINES WITH REINFORCEMENTS

STOJAN KRAVANJA, TOMAŽ ŽULA

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

This manual deals with the work with a program - an optimization model - for the optimization of high-pressure steel penstocks with stiffener rings, as they are installed in a tunnel bored into a rock. The penstock is dimensioned as a self-supporting steel cylindrical shell with circular stiffener rings without the assistance of the surrounding concrete and rock. The penstock can be loaded with internal or external pressure. Penstock optimization is performed using non-linear programming, NLP. For this purpose, the optimization program PIPEOPT-SR, version 1.0, was modeled. The optimization program contains scalars (input data), variables and a mass objective function of the steel structure, subjected to a system of (in)equality constraints from the static analysis and dimensioning of the pipeline according to the C.E.C.T. Recommendations. At the end of the manual, an example of optimization of the high-pressure penstock with stiffener rings of the Pump Hydropower Plant Kozjak near the city of Maribor is presented.





Univerza v Mariboru

Fakulteta za gradbeništvo,
prometno inženirstvo in arhitekturo

