

OPTIMIZACIJA JEKLENE GLADKE STENSKE OBLOGE VISOKOTLAČNEGA CEVOVODA

OPTIMIZATION OF STEEL LINER FOR HIGH-PRESSURE PENSTOCK

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

stojan.kravanja@um.si

Univerza v Mariboru

Fakulteta za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo

Znanstveni članek

UDK 519.853:621.643.2-034.14

Povzetek | Članek obravnava optimizacijo jeklene gladke stenske obloge visokotlačnega cevovoda, vgrajenega v izvrtan predor v hribino. Cevovod je obravnavan kot jeklena obloga brez sodelovanja hribine in okoliškega betona. Dimenzioniran je kot samonosilna jeklena cilindrična lupina brez ojačitvenih reber. Optimizacija je izvedena z nelinearnim programiranjem, NLP. Za optimizacijo je bil modeliran optimizacijski model PIPEOPT. Masna namenska funkcija jeklenega cevovoda je podvržena sistemu (ne)linearnih (ne)enačb iz statične analize in dimenzioniranja cevovoda v skladu s priporočili C.E.C.T. Na koncu članka je predstavljen primer optimizacije visokotlačnega cevovoda črpalne hidroelektrarne Kozjak z nelinearnim programiranjem, NLP.

Ključne besede: optimizacija, nelinearno programiranje, NLP, visokotlačni cevovod, gladka jeklena obloga

Summary | The paper presents the optimization of a steel liner for the high-pressure penstock, built in a bored tunnel. The penstock is designed without collaboration of the surrounding concrete and rock. The penstock is designed to be self-resistant liner without stiffener rings. The optimization was performed by the non-linear programming (NLP) approach. For this purpose, the NLP optimization model PIPEOPT was developed. The model comprises the mass objective function, which is subjected to design and dimensioning constraints. The dimensioning constraints were defined according to C.E.C.T. Recommendations. Practical example of the NLP penstock optimization for the Pump Hydropower Plant Kozjak, Slovenia, is presented at the end of the paper.

Key words: optimization, non-linear programming, NLP, high-pressure penstock, steel liner

1 • UVOD

Članek opisuje optimizacijo gladke stenske obloge jeklenega visokotlačnega cevovoda, vgrajenega v izvrtani predor v hribino. Tovrstni visokotlačni cevovodi dovajajo vodo pod visokim tlakom v črpalne hidroelektrarne za proizvodnjo električne energije. V članku je prikazan način, ko visokotlačni cevovod obravnavamo kot cevno jekleno oblogo brez sodelovanja hribine in okoliškega betona. Jek-

leni cevovod je v tem primeru dimenzioniran kot samonosilna jeklena cilindrična lupina brez ojačitvenih reber.

Ker so enačbe nosilnosti, napetosti in deformacij pri izračunu jeklene stenske obloge nelinearne, smo pri optimizaciji nosilne konstrukcije uporabili nelinearno programiranje, NLP. Optimirali smo maso jeklene stene cevovoda, kar za idejni projekt več kot zadošča, saj je

strošek jeklene obloge več kot 5-krat višji od skupnega stroška vrtanja v hribino, injektiranja in vgradnje okoliškega betona. Za optimizacijo smo modelirali (programirali) optimizacijski model PIPEOPT jeklene cevne obloge, s katerim smo minimirali namensko funkcijo – maso cevne obloge, podvrženo pogojem nosilnosti, napetosti in deformacij, poznanih iz statike cevovoda. Optimizacijski model je zapisan v splošni obliki, zato ga lahko uporabimo za optimizacijo kateregakoli cevovoda tega tipa. Treba je podati vhodne podatke, kot so premer cevi, notranji in zunanji tlak na

cev, materialne karakteristike jekla (napetost tečenja) in dolžina cevnega odseka. Potem ko je z iteracijskim postopkom nelinearnega programiranja avtomatsko izračunana najmanjša možna masa cevododa, je izračunana tudi debelina stene cevi. Konkretno smo razvili model uporabili tudi pri optimizaciji visokotlačnega cevododa črpalne hidroelektrarne Kozjak.

Jeklene cevodode obravnava Evrokod 3 ((EN, 2001), (EN, 2007)), in sicer v dveh privzetih standardih: SIST EN 1993-4-3:2007; Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij-4-3.del: Cevovodi in SIST EN 1993-1-6:2007; Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij-1-6.del: Trdnost in stabilnost lupinastih konstrukcij.

Prvi standard podaja samo določena splošna izhodišča za dimenzioniranje cevododov, vendar konkretno ne obravnava cevododov, vbetoniranih v predore. Vgrajene cevodode v predorih, kakršni se gradijo za hidroelektrarne, obravnavajo priporočila C.E.C.T. (C.E.C.T., 1979). Ta priporočila obravnavajo tudi problem obbetoniranih cevododov v kamenini, kjer pri odpornosti cevododa proti zunanjemu tlaku sodelujeta tudi okoliški beton in kamenina. To teorijo so v šestdesetih letih prejšnjega stoletja razvili Amstutz (Amstutz, 1950), Kollbrunner in Milosavljević (Kollbrunner, 1956) na osnovi dognanj Timoshenka (Timoshenko, 1940). Veliko uspešnih aplikacij, tj. vgrajenih cevododov v predorih, je bilo dimenzioniranih in projektiranih po priporočilih C.E.C.T.

V Sloveniji je imelo več desetletij vodilno vlogo pri projektiranju tovrstnih cevododov podjetje Metalna Maribor. Tudi pionir razvoja teorije odpornosti cevododa proti zunanjemu tlaku inž. S. Milosavljević je bil projektant konstrukcij v Metalni. Metalna je zgradila nekaj najbolj



Slika 1 • Gradnja tlačnega cevododa Chiew Larn, Tajska

znanih cevododov na svetu. Leta 1979 je Metalna dokončala izgradnjo 1400 m dolgega visokotlačnega cevododa za hidroelektrarno Bajino Bašto v Srbiji. Cevodod ima v zgornjem delu premer 6,30 m, v spodnjem delu pa 4,20 m. Največji vodni tlak na spodnjem delu znaša 950 m vodnega stolpca, tj. 95 barov. Konstruktor inž. Janez Rztresen je dimenzioniral jekleno steno cevododa debelin od 43 mm do 49 mm v razcepu. Objekt je še danes velika svetovna referenca. Leta 1985 so konstruktorji Metalne sprojehtirali in izdelali tlačni cevodod Chiew Larn, Tajska, premera 11,20 m in debeline 20 mm, ki je še danes uvrščen med največje cevodode na svetu (Kravanja, 1988). Za to elektrarno je bil

izdelan tudi takrat drugi največji razdelilnik na svetu dolžine 80,7 m, z vstopnim premerom 11,20 m, izstopnim premerom 6,00 m, obremenjenim z vodnim tlakom 120 m, tj. 12 barov. Debeline jeklene stene znašajo od 20 do 36 mm. Vodilni konstruktor cevododa je bil inž. Janez Rztresen, razdelilnika pa prof. dr. Janez Kramar.

Verjetno so Japonci najboljši metalurgi na svetu, izumili so kar nekaj jekel visoke trdnosti z drobnozrnato strukturo in dobro varivostjo, iz katerih smo izdelovali jeklene konstrukcije večjih dimenzij in obremenitev. Pri izgradnji stene visokotlačnega cevododa prej omenjene hidroelektrarne Bajine Bašte je bilo uporabljeno japonsko jeklo HT780 z natezno trdnostjo 780 N/mm² (Horikawa, 2009), pri izdelavi manj obremenjenega, vendar dimenzijsko izjemnega cevododa, Chiew Larn na Tajskem, pa japonsko jeklo SHT50A z natezno trdnostjo 500 N/mm².

Japonci so pri gradnji cevododa hidroelektrarne Kannagawa (Tokio Electric Power Co.), ki je začela delovati leta 2005, uporabili termomehansko obdelano jeklo visoke trdnosti HT950 (Horikawa, 2009) z natezno trdnostjo 950 N/mm². Elektrarna ima moč 2800 MW. Jekleni cevodod premera 4,60 m in višinske razlike 653 m je obremenjen z največjim vodnim tlakom 1079 m (107,9 barov), ki vključuje hidrodinamični tlak vodnega udara. 2330 ton jekla HT950 je bilo uporabljene za steno cevi v debelinah do 94 mm. Omeniti velja, da je jeklo visoke trdnosti HT950 v letih 1988–1989 bilo najprej uporabljeno pri gradnji visečega mostu Akashi Kaikyo, mostu z največjim razponom na svetu: 1991 m (Miki, 1998).

2 • MODELIRANJE OPTIMIZACIJSKEGA MODELA PIPEOPT

2.1 NLP – modelna formulacija

Pri optimiranju konstrukcije jeklene stene visokotlačnega cevododa smo uporabili nelinearno programiranje, NLP. Problem nelinearnega programiranja (NLP) zapišemo v naslednji obliki:

$$\min z = f(\mathbf{x})$$

p.p.:

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \quad (\text{NLP})$$

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}) = \mathbf{0}$$

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

$$\mathbf{Ax} \leq \mathbf{a}$$

$$\mathbf{x} \in \mathbf{X} = \{\mathbf{x} \mid \mathbf{x} \in \mathbf{R}^n, \mathbf{x}^{\text{LO}} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}^{\text{UP}}\}$$

V zgornji formulaciji pomeni \mathbf{x} vektor zveznih spremenljivk, definiranih znotraj svojih spodnjih mej \mathbf{x}^{LO} in zgornjih mej \mathbf{x}^{UP} . Nelinearna namenska funkcija je določena z izrazom $f(\mathbf{x})$. Izraz $\mathbf{h}(\mathbf{x}) = \mathbf{0}$ predstavlja sistem neli-

nearnih pogojnih enačb, izraz $\mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0}$ pa sistem nelinearnih pogojnih neenačb. Matrična neenačba $\mathbf{Ax} \leq \mathbf{a}$ določa sistem linearnih enačb in neenačb. Vse funkcije $f(\mathbf{x})$, $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ in $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ so nelinearne, zvezne in zvezno odvedljive. Učinkovitejše metode rešujejo NLP-problem z neposredno zadostitvijo Karush-Kuhn-Tuckerjevega pogoja.

V začetku petdesetih let prejšnjega stoletja sta Kuhn in Tucker (Kuhn, 1951) predlagala matematična izraza za potrebni in zadostni pogoj optimalnosti rešitve problema nelinearnega programiranja (Non-linear Programming, NLP). Pozneje se je ugotovilo, da je bil Kuhn-Tuckerjev teorem dokazan že dvakrat pred njunim prispevkom: prvič leta 1939 v magistrskem delu Karusha (Karush,

1939) na Univerzi v Chicagu, katerega izsledki niso bili nikoli objavljeni; in drugič v raziskavi Johna, katere izsledki so bili za objavo v reviji Duke Mathematical Journal prvotno zavrjeni, pozneje pa objavljeni v zbirki študij in razprav (John, 1948).

Najpomembnejše metode nelinearnega programiranja so:

- metoda reduciranega gradienta (Reduced Gradient Method, RG) (Wolfe, 1967),
- posplošena metoda reduciranega gradienta (Generalized Reduced Gradient Method, GRG) (Abadie, 1969),
- razširjeni Lagrangian (Augmented Lagrangian, AL) ((Powell, 1978), (Hestenes, 1969) ter
- zaporedno kvadratno programiranje (Successive Quadratic Programming, SQP) (Powell, 1978).

Za prvi prispevek na področju optimiranja konstrukcij z NLP večina strokovnjakov omenja članek Schmita (Schmit, 1960). Številni avtorji omenjajo metode optimalnih kriterijev (Optimality Criteria Methods, OC), kjer so Karush-Kuhn-Tuckerjevi pogoji optimalnosti nelinearnega programiranja kombinirani z Lagrangejevimi množitelji. S Karush-Kuhn-Tuckerjevimi pogoji se zagotovijo zahteve za optimalno rešitev, z Lagrangejevimi množitelji pa se vključijo omejitve optimizacijskega problema. Komercialni računalniški programi so NPSOL za SQP, MINOS za RG, programi GRG2, LSGRG, CONOPT za GRG in LANCELOT za AL itd.

2.2 NLP – optimizacijski model PIPEOPT

Za optimizacijo gladke jeklene cevne obloge brez reber smo v skladu z gornjo NLP-formulacijo modelirali optimizacijski model PIPEOPT (PIPE OPTimization). Model smo zapisali v višjem algebrskem modelnem jeziku GAMS (General Algebraic Modelling System) (Brooke, 1988). Model sestavljajo vhodni podatki (skalarji), spremenljivke in namenska funkcija, ki je podvržena sistemu linearnih in nelinearnih enačb in neenačb.

Skalarji, vhodni podatki, so premer cevi D , notranji tlak p_{in} , zunanji tlak p_{ex} na cev, napetost tečenja jekla f_y , dolžina cevne odseka L_{sect} , faktor varnosti na notranji tlak C_{ip} , faktor varnosti na zunanji tlak C_{op} , korozijski dodatek cor itd. Medtem ko smo za zvezne spremenljivke \mathbf{x} definirali debelino stene cevododa t , obodno normalno napetost σ_N in kritično napetost v steni p_{cr}^i , smo v množico pogojnih neenačb in enačb $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ in $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ zapisali sistem linearnih in nelinearnih (ne)enačb iz statične analize in dimenzioniranja konstruk-

cije cevododa v skladu s priporočili C.E.C.T. (C.E.C.T., 1979).

V glavnem ločimo dva merodajna obtežna primera izračuna jeklene konstrukcije cevododa, obbetoniranega v predoru:

- izračun jeklene obloge na notranji tlak, kjer poleg hidrostatičnega tlaka mirujoče vode upoštevamo še hidrodinamični vpliv prehodnih pojavov (vodni udar), brez upoštevanja zunanjega tlaka na cev,
- izračun jeklene obloge na zunanji tlak podzemne vode (višina terena nad cevjo) pri praznem cevododu.

2.2.1 Namenska funkcija mase jeklenega cevododa

Namenska funkcija f definira maso jeklene stene visokotlačnega cevododa obravnavanega dolžinskega odseka:

$$masa = \pi \cdot t \cdot (2R+t) \cdot \rho \cdot L_{sect} \quad (1)$$

t debelina stene cevododa
 R notranji radij cevi ($D/2$)
 ρ volumska masa jekla
 L_{sect} dolžina odseka cevododa

2.2.2 Pogoje enačbe modela dimenzioniranja na notranji tlak

Jeklena cev se ob znatnem notranjem tlaku p_{in} radialno raztegne in nasloni na okoliški beton v predoru. Pri tem beton prejme določeni del obtežbe. Dejansko imamo opravka s sovprežno konstrukcijo, sestavljeno iz treh različnih materialov: jekla, betona in kamenine. Ugotovljeno je, da okoliški beton in kamenina prenašata najmanj 15 do 20 % skupne obtežbe notranjega tlaka, če imamo opravka s trdo in kompaktno kamenino. Ne Evrokod in ne priporočila C.E.C.T. ne predvidevajo prevzema tega dela obtežbe notranjega tlaka na kamenino. K tej problematiki lahko pristopimo tako, da v računski analizi nosilnosti jeklenega cevododa upoštevamo dvoosno napetostno stanje, s čimer zmanjšamo primerjalne napetosti.

Inženirji pri dimenzioniranju na notranji tlak v predorih vgrajenih cevni lupini večinoma ne upoštevajo dvoosnega napetostnega stanja, ki zmanjša napetost v lupini za 11 %. Notranji tlak ima namreč tendenco jekleno cevno lupino radialno raztegovati, pri čemer bi se prosta cev v vzdolžni smeri skrajšala. To skrajšanje okoliški beton in kamenina preprečita, zato se poleg obodnih nateznih napetosti v steni lupine σ_θ pojavijo še vzdolžne natezne napetosti σ_x zaradi preprečene deformacije (kon-

trakcije). Dvoosnega napetostnega stanja ne smemo računati na mestih, kjer ni hribine (na začetku in koncu cevododa), in na mestih razpokane kamenine.

Obodna napetost σ_θ v steni cevi se izračuna po formuli:

$$\sigma_\theta = p_{in} \cdot \frac{R}{e} \quad (2)$$

p_{in} vrednost notranjega tlaka
 R notranji radij cevi
 e debelina stene cevi, zmanjšana za korozijski dodatek cor

Vzdolžna napetost σ_x :

$$\sigma_x = \nu \cdot \sigma_\theta = 0,3 \cdot \sigma_\theta \quad (3)$$

$\nu = 0,3$ Poissonov koeficient

Von Misesova primerjalna napetost v steni cevi pri dvoosnem napetostnem stanju:

$$\begin{aligned} \sigma_{eq} &= \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_\theta^2 - \sigma_x \cdot \sigma_\theta} = \\ &= \sqrt{(0,3 \cdot \sigma_\theta)^2 + \sigma_\theta^2 - (0,3 \cdot \sigma_\theta) \cdot \sigma_\theta} = \\ &= 0,89 \sigma_\theta \end{aligned} \quad (4)$$

Ta napetost, povečana s faktorjem varnosti za notranji tlak C_{ip} , mora biti manjša od napetosti tečenja f_y izbranega materiala jekla:

$$C_{ip} \cdot \sigma_{eq} \leq f_y \quad (5)$$

$$C_{ip} \cdot 0,89 \cdot \sigma_\theta \leq f_y \quad (6)$$

$$C_{ip} \cdot 0,89 \cdot p_{in} \cdot \frac{R}{e} \leq f_y \quad (7)$$

$C_{ip} = 1,50$ faktor varnosti za notranji tlak

Iz česar izračunamo najmanjšo teoretično debelino cevi e :

$$e \geq \frac{0,89 \cdot C_{ip} \cdot p_{in} \cdot R}{f_y} \quad (8)$$

in najmanjšo potrebno debelino cevi t_{min} z upoštevanjem korozijskega dodatka cor :

$$t = e + cor \quad (9)$$

$$t_{min} \geq \frac{0,89 \cdot C_{ip} \cdot p_{in} \cdot R}{f_y} + cor \quad (10)$$

2.2.3 Pogoje enačbe modela dimenzioniranja na zunanji tlak

Jeklena cev je v predoru v vseh radialnih smereh podprta z okoliškim betonom in kamenino, ki tako bistveno povečata stabilnost cevne lupine na zunanji tlak. To sodelovanje okoliškega betona in kamenine moramo upoštevati pri dimenzioniranju cevne lupine (obloge) na zunanji tlak in je zajeto v poglavju 8.4 priporočil C.E.C.T.. Na ta način dobimo precej tanjšo steno cevi. Predstavljamo enačbe odpornosti gladke jeklene cevne obloge brez ojačitev, tj. brez ojačitvenih reber.

Največjo možno obodno napetost v steni cevi σ_N izračunamo z neenačbo A poglavja 8.4.1. priporočil C.E.C.T. tako, da izenačimo levi del neenačbe z desnim delom:

$$12 \cdot \left(\frac{R+e}{e} \right)^2 \cdot \left(\sigma_N + E^* \cdot \frac{j}{R} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_N}{E^*} \right)^{3/2} \leq f_y - \sigma_N \quad (11)$$

$$E^* = E/(1-\nu^2) \quad (12)$$

$$j/R = 1,0 \text{ ‰} = 0,001 \quad (13)$$

R notranji radij cevi ($D/2$)
 t debelina stene cevovoda
 cor korozijski dodatek (2 mm)
 e za korozijski dodatek zmanjšana debelina stene cevi, teoretična debelina ($e = t - cor$)

E modul elastičnosti jekla (21000 kN/cm²)

$\nu = 0,3$ Poissonov koeficient

j/R prazna vrzel med cevjo in okoliškim betonom (razpokana kamenina)

f_y napetost tečenja jekla

Izpolnjen mora biti tudi pogoj:

$$\sigma_N \leq \varphi \cdot f_y \quad (14)$$

$\varphi = 0,7$ koeficient najvišje elastične napetosti, zgornja meja Hookove premice

Kritični zunanji tlak sedaj izračunamo z enačbo B-poglavja 8.4.1. priporočil C.E.C.T.:

$$p_{cr}^{-i} = \sigma_N \cdot \frac{e}{R+e} \cdot \left(1 + 0,35 \cdot \frac{R+e}{e} \cdot \frac{f_y - \sigma_N}{E^*} \right)^{-1} \quad (15)$$

Kritični zunanji tlak, ki ga lahko prenese jeklena cevna obloga p_{cr}^i , mora biti večji od projektne vrednosti zunanjega tlaka:

$$p_{cr}^{-i} \geq C_{ep} \cdot p_{ex} \quad (16)$$

$C_{ep} = 1,80$ faktor varnosti za zunanji tlak
 p_{ex} zunanji tlak (vodni tlak v višini terena nad odsekom cevi)

3 • OPTIMIZACIJA VISOKOTLAČNEGA JEKLENEGA CEVOVODA ČHE KOZJAK

V nadaljevanju predstavljamo primer optimizacije jeklene gladke obloge visokotlačnega cevovoda črpalne hidroelektrarne Kozjak pri Mariboru. Bodoča elektrarna ima že izgrajeno akumulacijsko jezero s 3 milijoni m³ vode, načrtovanih pa je bilo več variant jeklenih visokotlačnih cevovodov s tlakom več kot 1000 m vodnega stolpca (100 barov) različnih dolžin, do 2400 m in več. Dve Francoski reverzibilni turbini bi zagotavljali elektriko 2 x 220 MW moči. Strokovnjaki IBE Ljubljana so leta 2011 izdelali idejni projekt elektrarne in izvedli osnovno dimenzioniranje poševnega cevovoda (Močnik, 2011). Za Varianto 1 (prva med več variantami) so npr. načrtovali porabo 12751,98 tone jekla kvalitete S 460. Varianto vertikalnega visokotlačnega cevovoda so načrtovali leta 2012 (Močnik, 2012).

Na Fakulteti za gradbeništvo UM smo v letih 2011–2012 izvedli optimizacijo visokotlačnega cevovoda vseh predvidenih poševnih variant (Kravanja, 2011). Nazadnje smo opravili še optimiranje vertikalne variante cevovoda (Kravanja, 2012). Poleg optimizacije cevovoda smo izdelali navodila za projektante. Za reševanje optimizacijskega problema smo uporabili nelinearno programiranje (NLP) in razvili optimizacijski model PIPEOPT. Optimirali smo maso jeklene stene cevovoda, podvrženo pogojem obtežb, napetosti in deformacij. Ko

je bila v iteracijskem računskem postopku izračunana najmanjša možna masa cevovoda, so bile izračunane tudi vse dimenzije. V članku predstavljamo optimizacijo dveh variant:

- poševni cevovod Varianta 1, tj. cevovod z najdaljšo dolžino, in
- vertikalni cevovod, tj. cevovod z najvišjim zunanjim tlakom.

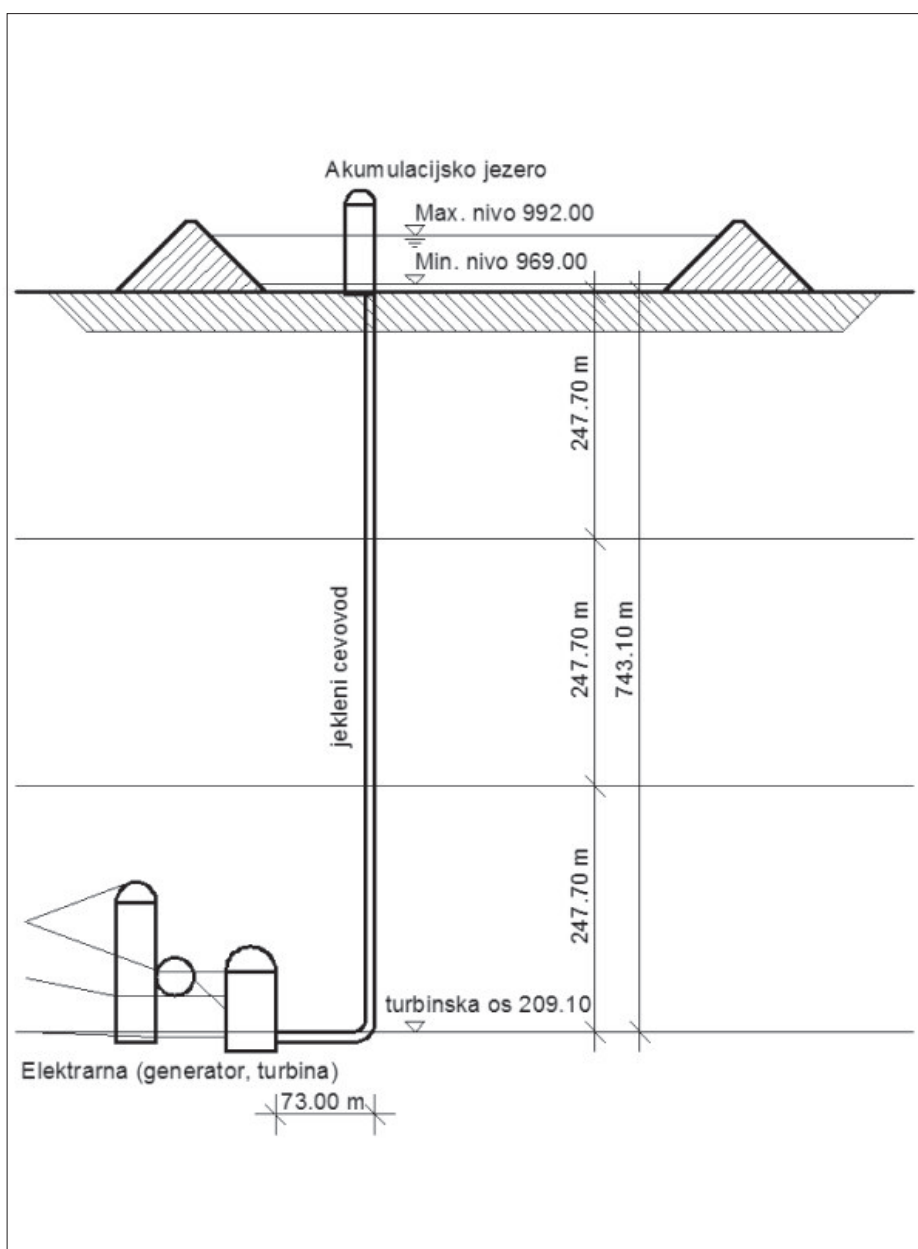
3.1 Optimizacija poševnega visokotlačnega cevovoda Varianta 1

Varianta 1 (z asinhronim generatorjem) ima predvideno dolžino visokotlačnega cevovoda 2471,03 m. Ker naj bi se 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. V izračunu smo upoštevali jeklo visoke trdnosti, drobnozrnate strukture in dobre varivosti, poboljšano jeklo kvalitete S 690Q. Vhodni podatki vsebujejo premera cevi D od 3,90 m do 4,30 m, odsekovne dolžine cevi L_{sekt} od 144,10 m do 619,78 m, korozijski dodatek cor 2 mm, napetost tečenja jekla $f_y = 650$ N/mm², faktor varnosti za notranji vodni tlak $C_{ip} = 1,5$, faktor varnosti za zunanji vodni tlak $C_{ep} = 1,8$, največji notranji vodni tlak $p_{in} = 102,83$ barov (upoštevan je vodni udar 1028,30 m vodnega stolpca) in največji zunanji tlak $p_{ex} = 46,38$ bara.

Izračun optimizacije smo naredili s podprogramom GAMS/CONOPT2 (Drudd, 1994), ki računa po metodi reduciranih gradientov. Za 6 različnih cevni odsekov Variante 1 smo definirali 6 različnih računskih modelov in naredili 6 izračunov (preglednica 1). Za vsak odsek smo v okolju GAMS v optimizacijski model PIPEOPT vstavili vse potrebne vhodne podatke, skalarje, in definirali začetne vrednosti spremenljivk ter njihove spodnje in zgornje meje (bližje ko definiramo začetne vrednosti spremenljivk k njihovim optimalnim vrednostim, hitreje bo program konvergiralo). Zatem smo pognali program CONOPT2, ki je naredil izračun – nelinearno programiranje posameznega cevne odseka. Model PIPEOPT ni obsežen in obsega le 200 vrstic, 14 skalarjev (vhodni podatki), 6 pogojnih (ne)enačb, namensko funkcijo, 16 (ne)enačb mej spremenljivk in 2 ukazna stavka. Računski čas optimizacije je zato kratek. Na primer: za izračun odseka dolžine 363,66 m, kjer je bila izračunana največja debelina stene cevovoda, je program CONOPT2 potreboval 5 glavnih iteracij in manj kot 1 sekundo računskega časa. Delovni čas, ki vključuje vnos podatkov in interpretacijo rezultatov, je znašal 10 minut. Skupni delovni čas izračuna celotnega cevovoda Variante 1 je tako znašal samo 1 uro. Optimalni rezultat predstavlja najmanjšo izračunano možno maso jeklenega visokotlačnega cevovoda 9967,40 tone. Dobljene so tudi bile potrebne debeline jeklene stene t : od 20 mm do 63 mm (preglednica 1).

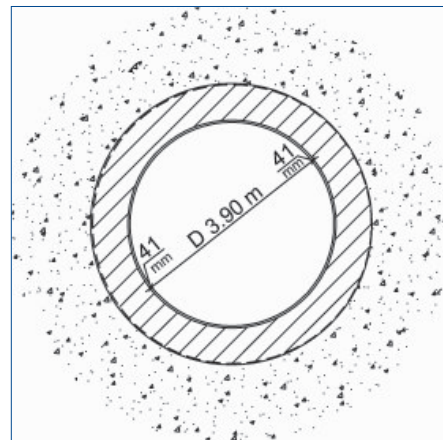
x (m)	p_{in} (m)	p_{ex} (m)	D (m)	t (mm)	L_{sect} (m)	ΣG (kg)
0,00	1028,30	150,00	3,90	41	144,10	574 214
108,15	926,19	200,00	3,90	37	356,87	1 282 025
465,00	885,62	348,53	3,90	50	465,02	2 264 948
930,00	832,76	463,88	4,10	63	363,66	2 352 133
1205,00	589,65	369,28	4,10	55	385,66	2 173 490
1480,00	293,91	42,06	4,30	20	619,78	1 320 598
Total:					2335,09	9 967 408

Preglednica 1 • Optimirana masa visokotlačnega cevovoda Kozjak, Varianta 1



Slika 3 • Vertikalna varianta visokotlačnega cevovoda ČHE Kozjak

Namesto najprej načrtovanih 12751,98 tone jekla S 460 smo z uporabo optimizacijske tehnike nelinearnega programiranja in jekla visoke trdnosti S 690Q izračunali maso 9967,41 tone, kar je 22 % prihranka mase cevovoda.



Slika 2 • Prerez skozi spodnji cevni odsek cevovoda ČHE Kozjak, Varianta 1

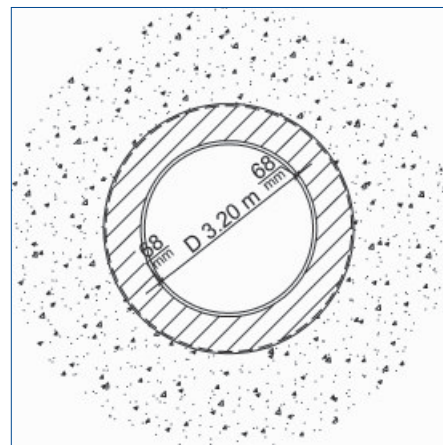
3.2 Optimizacija vertikalnega cevovoda

Vertikalni visokotlačni cevovod je projektiran kot varianta cevovoda v dolžini 784,06 m iz jekla S690Q (slika 3). Vhodni podatki za optimizacijski model PIPEOPT vsebujejo premere cevi D od 3,20 m do 4,00 m, odsekovne dolžine cevi L_{sect} od 9,00 m do 81,00 m, korozijski dodatek cor 2 mm, napetost tečenja jekla $f_y = 650$ N/mm², faktor varnosti za notranji vodni tlak $C_{ip} = 1,5$, faktor varnosti za zunanji vodni tlak $C_{ep} = 1,8$, največji notranji vodni tlak $p_{in} = 94,92$ barov (upoštevane je vodni udar 949,20 m višine vodnega stolpca) in največji zunanji tlak $p_{ex} = 78,29$ bara (782,90 m višine vodnega stolpca).

Optimiranih je bilo 15 različnih cevni odsekov različnih premerov in dolžin (preglednica 2). Optimalni rezultat predstavlja izračunano najmanjšo možno maso visokotlačnega cevovoda 3165,34 tone. Izračunana je bila jeklena stena cevovoda v debelinah od 18 do 65 mm. Za izračun vertikalnega cevovoda smo potrebovali okoli 3 ure delovnega časa.

x (m)	p _{in} (m)	p _{ex} (m)	D (m)	t (mm)	L _{sect} (m)	ΣG (kg)
81,00	883,00	733,90	3,20	65	54,00	282 624
135,00	817,60	679,90		62	54,00	269 332
189,00	752,10	625,90		55	54,00	238 411
243,00	686,70	571,90		54	36,66	158 863
Spodnji del:						1 393 140
279,66	642,20	535,20	3,40	57	54,00	262 414
333,66	576,70	481,20		53	54,00	243 716
387,66	511,30	427,20		48	54,00	220 405
441,66	445,80	373,20		45	54,00	206 450
495,66	380,40	319,20		41	31,70	110 292
Srednji del:						1 043 277
527,36	341,90	287,50	3,60	41	54,00	198 800
581,36	276,50	233,50		36	54,00	174 316
635,36	211,00	179,50		31	54,00	149 899
689,36	145,60	125,50		27	54,00	130 414
743,36	78,10	69,50	4,00	21	31,70	59 446
775,06	39,80	37,80		18	9,00	16 052
Zgornji del:						728 927
Visokotlačni cevovod skupaj:						3 165 344

Preglednica 2 • Optimirana masa vertikalnega visokotlačnega cevovoda ČHE Kozjak



Slika 4 • Prerez skozi spodnji cevni odsek vertikalne variante cevovoda ČHE Kozjak

4 • ZAKLJUČEK

Članek opisuje optimizacijo gladke stene jeklenega visokotlačnega cevovoda, vgrajenega v izvrtani predor v hribino. Cevovod obravnavamo kot cevno jekleno oblogo brez sodelovanja hribine in okoliškega betona ter je dimenzioniran kot samonosilna jeklena cilindrična lupina brez ojačitvenih reber. Optimizacijo opravljamo z nelinearnim programiranjem, NLP. Za optimizacijo smo modelirali optimizacijski model PIPEOPT. Model sestavljajo vhodni podatki (skalarji), spremenljivke

in namenska funkcija, ki je podvržena sistemu (ne)linearnih (ne)enačb iz statične analize in dimenzioniranja cevovoda v skladu s priporočili C.E.C.T. Namenska funkcija definira maso jeklene stene cevovoda. Ko z modelom PIPEOPT v iteracijskem računskem postopku izračunamo najmanjšo možno maso cevovoda, so izračunane tudi vse spremenljivke – dimenzije in napetosti.

V zaključku smo predstavili primer optimizacije gladke jeklene obloge visokotlačnega

cevovoda črpalne hidroelektrarne Kozjak. Optimizacijo smo opravili z nelinearnim programiranjem, NLP. Za steno cevovoda smo predvideli poboljšano jeklo visoke trdnosti S 690Q. Prikazali smo optimizacijo mase dveh variant cevovodov: poševnega cevovoda Varianta 1, ki ima najdaljšo dolžino, in vertikalnega cevovoda, ki je obremenjen z najvišjim zunanjim tlakom. Na praktičnem primeru visokotlačnega cevovoda ČHE Kozjak smo dokazali, da je z uporabo modernih optimizacijskih metod in jekel visoke trdnosti mogoče izdelati lažje in cenejše konstrukcije jeklenih cevovodov.

5 • LITERATURA

- Abadie, J., Carpenter, J., Generalization of the Wolfe reduced gradient method to the case of nonlinear constraints. In: Fletcher, R. (ur.) Optimization, New York: Academic Press, str. 37–47, 1969.
- Amstutz, E., Das Einbeulen von Schacht- und Stollenpanzerungen, Schweizerische Bauzeitung, 68, 9, str. 102, 1950.
- 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.
- Drudd, A. S., CONOPT, A Large-Scale GRG Code. ORSA Journal on Computing, 6 (2), pp. 207–216, 1994.
- EN 1993-1-6:2007, Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 1-6: Strength and Stability of Shell Structures, 2007.
- EN 1993-4-3:2001, Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 4-3: Pipelines, 2001.
- Hestenes, M. R., Multiplier and gradient methods. J. Optim. Theory Appl. 4, str. 303–320, 1969.
- Horikawa, K., Watanabe, N., Application of Extra-High Tensile Strength Steel for Hydropower Plants in Japan, Conference on High Strength Steels for Hydropower Plants, Takasaki, 3-1 do 3-8.
- John, F., Extremum problems with inequalities as subsidiary conditions. Studies and Essays presented to Richard Courant on his 60th birthday, New York: Interscience, str. 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 Au enddruck beanspruchten kreiszylindrischen Rohren, Verlag Leemann Zürich, 1956.
- Kravanja, S., Faith, Š., Rztresen, J., Zelenko, B., Bedenik, B., Visokotlačni cevovod, jeklena obloga in razdelilnik za hidroelektrarno Chiew Larn na Tajskem. Gradbeni vestnik, ISSN 0017-2774, 1988, let. 37, št. 4/5/6, str. 86–90.
- 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 za 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 za 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.
- Kuhn, H.W., Tucker, A. W., Nonlinear programming. In: Neyman, J. (ur.) Proceedings of the Second Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, Berkeley: University of California Press, str. 481–492, 1951.
- Miki, C., Development of high strength and high performance steels and their use in bridge structures, International Seminar on Long Span Bridge Aerodynamics Perspective ISBAP`98, Kobe, Japonska, 1998.
- 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 fast algorithm for nonlinearly constrained optimization calculations. In: Proceedings 1977 Dundee Conference on Numerical Analysis, Lecture Notes in Mathematics. Berlin: Springer-Verlag, 1978.
- Powell, M. J. D., A method for nonlinear constraints in minimization problems. In: Fletcher, R. (ur.) Optimization, New York: Academic Press, str. 238–298, 1969.
- Schmit, L. A., Structural Design by Systematic Synthesis, Proceedings of 2nd Conference on Electronic Computation, ASCE, New York, str. 105–122, 1960.
- Timoshenko, S., Theory of plates and shells, McGraw-Hill, New York, London, 1940.
- Wolfe, P., Methods of nonlinear programming. In: Abadie J. (ur.) Nonlinear Programming, Amsterdam: North-Holland Publishing Company, str. 97–131, 1967.