NAČRTOVANJE TEŽNOSTNEGA PODPORNEGA ZIDU NA PODLAGI VERJETNOSTI PORUŠITVE
GRAVITY RETAINING WALL DESIGN BASED ON FAILURE PROBABILITY

doc. dr. Primož Jelušič, univ. dipl. gosp. inž.
primoz.jelusic@um.si
Rok Varga, mag. inž. grad.
rok.varga@um.si
prof. dr. Bojan Žlender, univ. dipl. inž. grad.
bojan.zlender@um.si
Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo,
prometno inženirstvo in arhitekturo,
Katedra za geotehniko,
Smetanova ulica 17, 2000 Maribor

Znanstveni članek
UDK 519.2:624.13(497.4)

Povzetek | V članku je predstavljena optimalna zasnova težnostnega podpornega zidu, pridobljena z uporabo genetskega algoritma, ki temelji na realnih številih. Model težnostnega podpornega zidu (OPT-TPZ) vsebuje stroškovno namensko funkcijo, ki je podvržena geotehničnim pogojem in konstrukcijskim omejitvam. Prikazana sta dva optimizacijska modela, in sicer deterministični optimizacijski model, ki temelji na delnih količnikih varnostih, ter stohastični optimizacijski model, pri katerem je stroškovna funkcija omejena z načrtovano verjetnostjo porušitve. Verjetnost porušitve je bila izračunana na podlagi negotovosti parametrov zemljine in simulacije Monte Carlo (MCS). V članku je podan primer optimalno zasnovanega težnostnega zidu za izbrane projektne podatke. Prav tako članek poudarja, da se lahko stroški gradnje težnostnega podpornega zidu zmanjšajo za polovico pri enaki verjetnosti porušitve v primeru, da se izvede optimizacija.

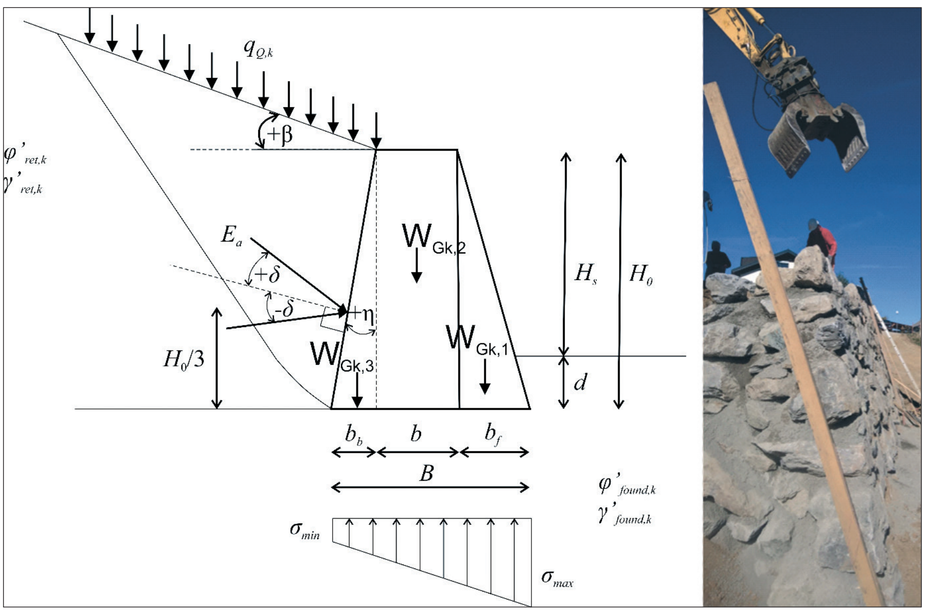
Ključne besede: težnostni podporni zid, optimizacija, genetski algoritem, verjetnosti porušitve, simulacija Monte Carlo

Summary | The article presents an optimal design for a gravity retaining wall based on a Real Coded Genetic Algorithm (RCGA). The gravity retaining wall optimization model (OPT-TPZ) includes a construction cost objective function of the wall, which is limited by geotechnical and design constraints. Two optimization models were set up, first a deterministic model based on partial safety factors of the Eurocodes and the other a stochastic model in which the deterministic model was extended by an optimization approach so that the cost objective function was constrained by a target probability of failure. The probability of failure was calculated based on the uncertainty of the soil parameters and the Monte Carlo Simulation (MCS). The article presents an example of determining the most cost-effective gravity retaining wall for given design parameters. It is emphasized that with the optimization approach we can obtain the design of the gravity retaining wall that is half as expensive and has the same probability of failure as a non-optimally designed wall.

Key words: gravity retaining wall, optimization, genetic algorithm, reliability-based design, Monte Carlo simulation

1 • UVOD

Težnostni podporni zidovi omogočajo preoblikovanje terena, ki je potrebno pri gradnji stavb, prometnic in drugih inženirskih objektov. Težnostni podporni zidovi se lahko razdelijo v dve skupini. V prvo skupino spadajo armiranobetonske podporne konstrukcije, ki lahko prevzamejo natezne napetosti. V drugo skupino pa spadajo zidane podporne konstrukcije, v katerih nastanek nateznih napetosti ni dovoljen, saj je njihova natezna trdnost zanemarljivo majhna. Osnovni gradniki zidanih podpornih konstrukcij so opeke ali kamniti bloki, ki jih lahko tudi medsebojno povežemo z betonom majhne tlačne trdnosti. Geometrijska zasnova težnostnega podpornega zidu je prikazana na sliki 1. Težnostni podporni zid mora biti projektiran skladno z Evrokodom 7 (SIST, 2005), kar pomeni, da nobeno mejno stanje ni preseženo.



Slika 1 • **Geometrija in parametri za težnostni podporni zid.**

Za optimizacijo podpornih zidov se uporabljajo različne metode in algoritmi. Kaveh (Kaveh, 2020) je podal optimalno zasnovo armiranobetonskih podpornih zidov, izvedeno z uporabo enajstih metahevrističnih algoritmov, ki spadajo med populacijske preiskovalne algoritme. Vsi uporabljeni algoritmi so hitro konvergirali in pridobili kvalitetne optimalne zasnove podpornih zidov ((Kaveh, 2013), (Kaveh, 2015), (Kaveh, 2020)). Analizo občutljivosti optimalne zasnove armiranobetonskega zidu za različne vrednosti obtežb, strižnih kotov temeljnih tal in nagiba zaledja je izvedel Gandomi (Gandomi, 2015). Optimizacija stroškov in teže armiranobetonskega zidu je bila izvedena s strani številnih raziskovalcev ((Camp, 2012), (Khajehzadeh, 2010), (Saribas, 1996))). Optimalno zasnovo zidanih in armiranobetonskih težnostnih podpornih zidov sta obravnavala tudi Sadoglu (Sadoglu, 2014) in Talatahari (Talatahari, 2012). Pri načrtovanju težnostnih podpornih zidov je smiselno izračunati tudi verjetnost porušitve, saj so podporni zidovi pod vplivom različnih negotovih podatkov o zemljini, obtežbah in računskih modelih. Zaradi teh negotovih podatkov je ključno, da se konstrukcija optimizira tudi na verjetnost porušitve, saj se v tem postopku podrobneje upošteva vpliv teh negotovosti ((Bathurst, 2017), (Fenton, 2016), (Li, 2017), (Low, 2015)). Tudi druge geotehnične objekte je treba projektirati na verjetnost porušitve, saj delni količniki varnosti ne upoštevajo celoten vpliv negotovih parametrov ((Fenton, 2017), (Kulhawy, 2017)). Namen načrtovanja na podlagi verjetnosti porušitve (ang. reliability based design – RBD) je, da se izbere zasnova geotehnične konstrukcije, ki ima nižjo verjetnost porušitve od načrtovane (Wang, 2016). S pomočjo metode RBD in simulacije Monte Carlo je Wang (Wang, 2011) analiziral temelj pravokotne oblike in prikazal vpliv dimenzij temelja na verjetnost porušitve. Načrtovanje težnostnega zidu na podlagi verjetnosti porušitve in simulacije Monte Carlo so obravnavali Gao in sod. (Gao, 2019). Basha in Babu (Basha, 2007) sta pridobila optimalno zasnovo armiranobetonskega težnostnega zidu, ki je bil podvržen številnim negotovostim parametrov. Ker težnostni podporni zid vsebuje več medsebojno povezanih mehanizmov porušitve, je priporočljivo izračunati verjetnost porušitve ((ISO, 2015), (Phoon, 2016)). Juang in Wang (Juang, 2013) sta predlagala RBD-metodo za zmanjšanje učinkov posledic zaradi negotovih parametrov v tleh. Za oceno upravičenosti investicije za zmanjšanje verjetnosti porušitve so Liu in sod. (Liu, 2021) podali indeks zanesljivosti, ki so ga izračunali na podlagi optimizacije stroškov.

Optimizacija stroškov kamnitega težnostnega podpornega zidu v skladu s standardom Evrokod 7 (SIST, 2005) pa v obstoječi literaturi do sedaj še ni bila obravnavana. Poleg tega so v tem članku podane diskretne vrednosti dimenzij težnostne podporne konstrukcije, kar je uporabno za inženirsko prakso. Da bi izboljšali ekonomsko učinkovitost težnostnih podpornih zidov, je v članku predstavljena optimizacija izdelavnih stroškov za tovrstno konstrukcijo. V optimizacijskem modelu so torej vključene zvezne in diskretne spremenljivke. Za reševanje tega problema je bil uporabljen genetski algoritem, ki uporablja realna števila za kodni zapis (RCGA) (Deep, 2009).

Z namenom, da bi pridobili optimalno zasnovo zidu, smo razvili optimizacijski model (OPT-TPZ), ki vsebuje namensko funkcijo izdelavnih stroškov in geotehnične ter konstrukcijske pogoje. Na ta način so izpolnjena vsa mejna stanja v skladu z Evrokodom 7 (SIST, 2005), ki temeljijo na delnih količnikih varnosti. Optimizacijski algoritem privede do optimalne rešitve, pri kateri pa so geotehnične omejitve v celoti izkoriščene, ter tako ni več nobenih rezerv v nosilnosti. Zato je smiselno izračunati verjetnost porušitve optimalno zasnovanega težnostnega zidu. V tem članku je bila uporabljena metoda RBD za iskanje scenarijev, v katerih pride do porušitve težnostnega podpornega zidu. Model, ki temelji na RBD-metodi je bil dodatno razširjen z optimizacijskim pristopom, kjer je funkcija izdelavnih stroškov omejena z načrtovano verjetnostjo porušitve. Pridobljene optimalne rešitve, ki so slonele na delnih količnikih varnosti v skladu s standardom Evrokod 7 (SIST, 2005), smo nato primerjali z optimalnimi rešitvami, ki so bile omejene z načrtovano verjetnostjo porušitve. Analiza, ki je temeljila na verjetnosti porušitve, je podala informacije o vplivu negotovih parametrov zemljine na porušitev težnostnih podpornih zidov.

2 • GENETSKI ALGORITEM, KODIRAN Z REALNIMI ŠTEVILI

Genetski algoritem, ki je kodiran z realnimi števili (RCGA), je mogoče uporabiti za optimizacijske probleme, tudi če niso konveksni in vsebujejo nekatere celoštevilčne spremenljivke z zveznimi in diskretnimi nelinearnimi omejitvami (Deep, 2009). Splošni problem optimizacije lahko zapišemo na naslednji način:

min $q = f(\mathbf{X},\mathbf{Y}), [\mathbf{X}]_{n_c}; [Y]_{n_d}$

pri pogojih:

$\mathbf{g}(\mathbf{X},\mathbf{Y}) \leq [0]; [\mathbf{g}]_k$

$\mathbf{h}(\mathbf{X},\mathbf{Y}) = [0]; [\mathbf{h}]_m$

$x_i^{Lo} \leq x_i \leq x_i^{Up}; i = 1,2,\ldots,n_c$

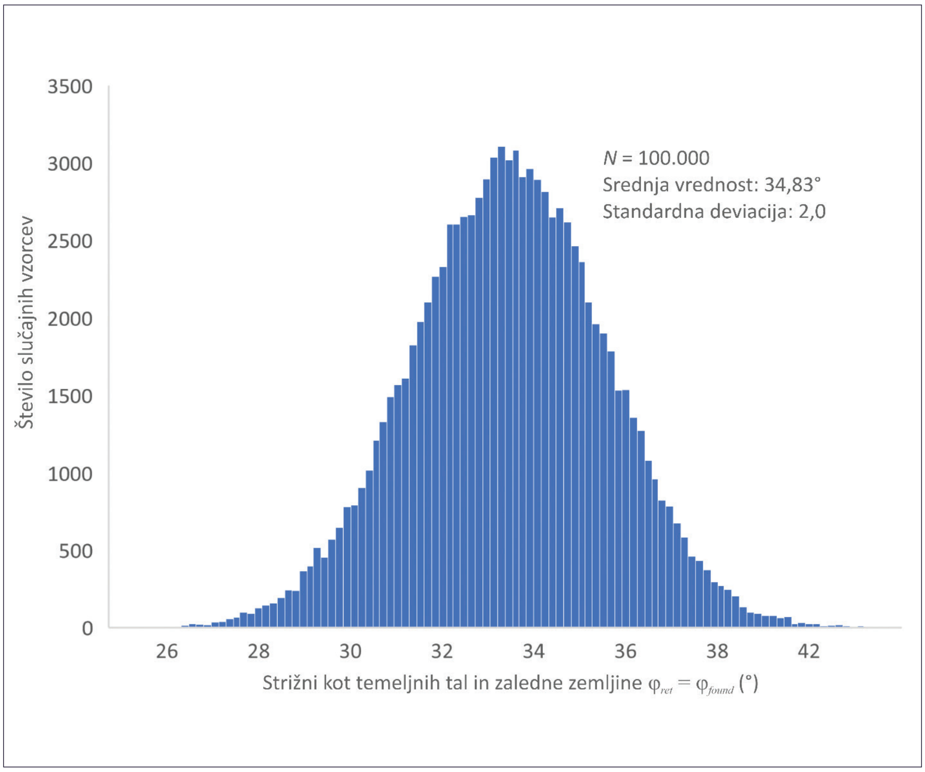
$y_j \in \mathbf{Y}_{dj}; [\mathbf{Y}_{dj}]_{pj}\ j = 1,2,\ldots,n_d$

kjer je $\mathbf{X}$ vektor n_c zveznih spremenljivk in $\mathbf{Y}$ predstavlja nabor n_d diskretnih večinoma binarnih 0-1 spremenljivk. Funkciji $\mathbf{g}$ in $\mathbf{h}$ sta nelinearni funkciji, ki omejujeta namensko funkcijo q. Podane so tudi meje (robni pogoji) za vsako zvezno in diskretno spremenljivko (x^{Lo}, x^{Up}). Treba je opozoriti, da vsaka diskretna spremenljivka y_j pripada vnaprej določenemu naboru p_j diskretnih vrednosti $\mathbf{Y}_{dj}$. V modelu OPT-TPZ spremenljivke vsebujejo dimenzije, obremenitve, lastnosti materiala, napetosti, stroške, maso itd. Binarne spremenljivke se uporabljajo, kadar se dimenzije in materiali izberejo iz določenega standardnega niza. Pogojne enačbe (enakosti, neenakosti, robni pogoji) se oblikujejo na podlagi geotehnične analize in projektnih pogojev. Ta članek opisuje namensko funkcijo minimalnih stroškov izgradnje težnostnega podpornega zidu.

Binarni genetski algoritem (GA) je zanesljiva optimizacijska metoda, ki se lahko izogne lokalnim minimumom. Vendar pa je računski napor zelo velik, zato problem nastane, če je prostor iskanja velik in kadar se zahteva velika natančnost rešitve. Ker pa vsa števila v optimizacijskem modelu težnostnega podpornega zidu predstavljajo pozitivna realna števila, je GA, ki je kodiran z realnimi števili, veliko bolj učinkovit od binarnega GA. RCGA najprej ustvari naključno populacijo rešitev. Nato posameznike v začetni populaciji razvrsti glede na uspešnost. Namenska funkcija predstavlja funkcijo uspešnosti in je osnova za izbiro posameznikov ter tako prispeva k iskanju optimalne vrednosti. Za generiranje nove populacije se RCGA poslužuje šestih korakov: (I) ovrednoti vsako posamezno rešitev v populaciji s pomočjo funkcije uspešnosti, (II) vse posameznike razvrsti glede na funkcijo uspešnosti, (III) izbere posameznike (starše) glede na funkcijo uspešnosti, (IV) izbere elitne posameznike, ki bodo prešli v naslednjo generacijo, (V) ustvari nove posameznike (otroke) iz staršev s pomočjo križanja in mutacije ter (VI) ustvari naslednjo generacijo z nadomestitvijo trenutne populacije z novimi posamezniki (otroki). Genetski algoritem se ustavi, kadar je eden izmed številnih pogojev izpolnjen. Glavni pogoji za ustavitev RGCA so število generacij, časovna omejitev, mejna vrednost funkcije uspešnosti, toleranca funkcije uspešnosti in toleranca pogojnih funkcij. V tem članku je bil uporabljen RCGA, ki so ga razvili Deep in sod. (Deep, 2009) za iskanje optimalne zasnove težnostnega podpornega zidu.

3 • SLUČAJNO VZORČENJE Z METODO MONTE CARLO

Metode Monte Carlo tvorijo družino računskih algoritmov, ki s pomočjo slučajnega vzorčenja pridejo do ustreznih numeričnih rezultatov. Metode Monte Carlo obravnavajo probleme, ki so povezani z verjetnostjo in verjetnostnimi metodami. V tem članku je bila uporabljena metoda Monte Carlo markovskih verig. Na sliki 2 je prikazan primer porazdelitve vzorcev slučajne spremenljivke, generirane s pomočjo simulacije Monte Carlo, ki vsebuje 100.000 vzorcev.



Slika 2 • **Histogram simulacije Monte Carlo strižnega kota zemljine, ki vsebuje 100.000 vzorcev.**

4 • OPTIMIZACIJSKI MODEL ZA TEŽNOSTNI PODPORNI ZID

Za izvedbo optimizacije s pomočjo RCGA je bil problem zasnove optimalnega težnostnega podpornega zidu preveden v standardno formulacijo optimizacijskega problema. Matrix Laboratory (MATLAB), programski jezik, je bil uporabljen kot vmesnik za matematično modeliranje in vnose/izhode podatkov (MathWorks, 2020). Predlagani optimizacijski model (OPT-TPZ) vključuje vhodne podatke (konstante), spremenljivke in stroškovno namensko funkcijo, ki je podvržena geotehničnim analizam, dimenzioniranju in logičnih omejitev težnostnega podpornega zidu. Stroškovna namenska funkcija je bila omejena z geotehničnimi omejitvami dimenzioniranja in diskretnimi spremenljivkami. Vhodni podatki predstavljajo določene projektne podatke, kot so mehanske lastnosti, fizikalne lastnosti in stroški gradnje.

V optimizacijskem modelu (OPT-TPZ) so bile uporabljene naslednje geometrijske spremenljivke (glej sliko 1): širina sprednjega dela zidu b_f (m), širina srednjega dela zidu b (m), širina zalednega dela zidu b_b (m), globina vpetja podpornega zidu d (m) in stroški izdelave podpornega zidu *STROŠKI* (EUR/m).

4.1 Stroškovna funkcija težnostnega podpornega zidu

Stroškovna funkcija vsebuje stroške materialov za izgradnjo težnostnega podpornega zidu (EUR/m), glej enačbo (1):

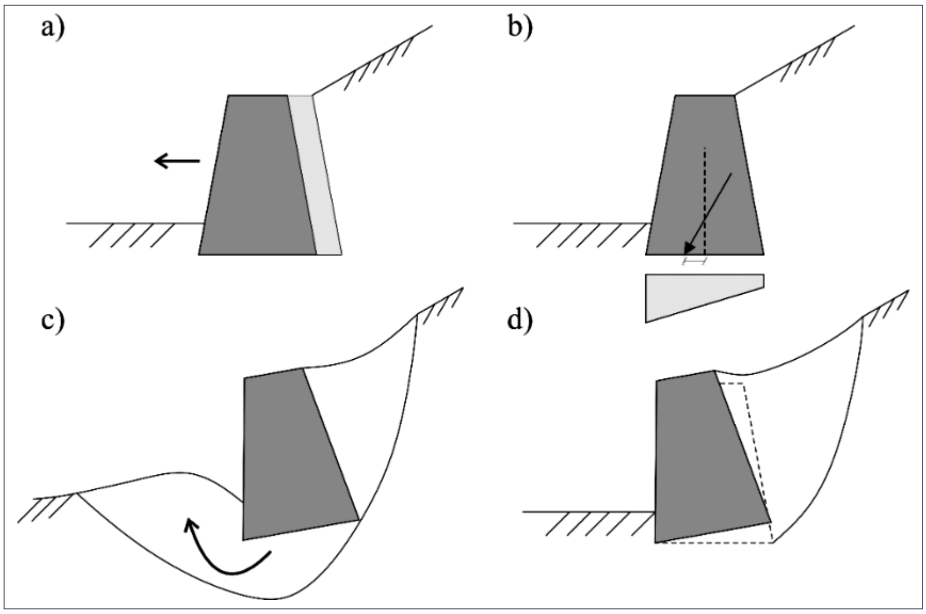
$$min{:}\,STROŠKI = C_{stone}\cdot A_{wall} + C_{exc}\cdot V_{exc} + C_{fill}\cdot V_{fill} + C_{drain} = C_{stone}\cdot\left(H_0\cdot b_f/2 + H_0\cdot b + H_0\cdot b_b/2\right) + C_{exc}\cdot\left(\left(b_f+b+b_b\right)+\left(b+b_b+n_{exc}\cdot H_0\right)\right)\cdot H_0/2 + C_{fill}\cdot\left(\left(\left(b_f+b+b_b\right)+\left(b+b_b+n_{exc}\cdot H_0\right)\right)\cdot H_0/2 - \left(H_0\cdot b_f/2 + H_0\cdot b + H_0\cdot b_b/2\right)\right) + C_{drain} \quad (1)$$

kjer STROŠKI označujejo materialne stroške na tekoči meter težnostnega podpornega zidu. Stroškovna funkcija tako vključuje stroške gradnje, kamor spadajo stroški izkopa, stroški izdelave kamnite zložbe, stroški zasipa s sprotnim utrjevanjem zemljine in izdelavo drenažnega sistema. Zato optimalna rešitev predstavlja minimalne stroške težnostnega podpornega zidu, ki lahko prevzame obtežbe zaledne zemljine. Oznaka C_{stone} (€/m^3) predstavlja stroške dobave in vgradnje lomljenca iz karbonatnih kamnin, vezanega s polnilnim betonom v kamnito zložbo podpornega zidu, medtem ko C_{exc} (€/m^3), C_{fill} (€/m^3) in C_{drain} (€/m) predstavljajo stroške na enoto za zemeljski izkop, stroške za zasip in stroške za izvedbo drenaže. Širine b_f, b, b_b in globina temeljenja d so v modelu OPT-TPZ predstavljene kot spremenljivke (glej sliko 1).

4.2 Geotehnični pogoji

Geotehnična analiza predstavlja osnovo optimizacijskega modela težnostnega podpornega zidu. Geotehnične omejitve zagotavljajo stabilnost podpornega zidu in hkrati omejujejo tudi stroškovno funkcijo. Geotehnična analiza težnostnega podpornega zidu je bila narejena v skladu s standardom Evrokod 7 (SIST, 2005). V skladu s standardom je bilo opredeljenih pet različnih pogojev (glej enačbe (2)–(6)), ki so bili vključeni v optimizacijski model (glej sliko 3).

- Prvi pogoj: preveritev na zdrs zidu, slika 3a.
- Drugi pogoj: položaj rezultante sil (ekscentričnost), slika 3b.
- Tretji pogoj: prekoračitev nosilnosti temeljnih tal, slika 3c.
- Četrti pogoj: prevrnitev zidu, slika 3d.
- Peti pogoj: čezmerni posedki.



Slika 3 • **Mehanizmi porušitve za težnostni podporni zid: a) zdrs zidu, b) položaj rezultante sil, c) nosilnost temeljnih tal in d) prevrnitev zidu.**

Predlagani optimizacijski model (OPT-TPZ) vsebuje vhodne podatke, ki jih sestavljajo naslednje konstante: strižni kot zaledne zemljine $\varphi'_{ret,k}$ (°), interakcijski koeficient zid zemljina k_{ret} (-), prostorninska teža zaledne zemljine $\gamma_{ret,k}$ (kN/m^3) in kohezija $c'_{ret,k}$ (kPa) zaledne zemljine. Prav tako vsebuje vhodne podatke za temeljna tla, in sicer strižni kot temeljnih tal $\varphi'_{found,k}$ (°), kohezijo temeljnih tal $c'_{found,k}$ (kPa), interakcijski koeficient temelj-zemljina k_{found} (tj. količnik redukcije strižne trdnosti stika med zidom in tlemi) ter ostale podatke, kot so prostorninska teža zidu γ_{wall} (kN/m^3), zvezna spremenljiva obtežba $q_{Q,k}$ (kN/m^2), nagib zaledja β, delni količnik varnosti za stalne vplive SF_G (-), delni količnik varnosti za ugodne stalne vplive $SF_{G,fav}$ (-), delni količnik varnosti za spremenljive vplive SF_Q (-), delni količnik varnosti za strižni kot zemljine SF_φ (-), delni količnik varnosti za kohezijo zemljine SF_c (-), delni količnik varnosti za nosilnost temeljih tal SF_{Rv} (-), delni količnik varnosti za zdrs SF_{Rh} (-) in zahtevana svetla višina težnostnega zidu H_s (m). V optimizacijski model je torej vključenih več pogojev.

– Prvi pogoj omejuje horizontalno silo, ki ne sme preseči rezultante sil odporov temelja zidu (glej enačbo (2)). Pogoj je definiran z enačbami 2.1–2.8.

– Ekscentričnost delovanja sile e_B (m) je omejena z največjo dovoljeno ekscentričnostjo e_{max}. Pogoj predstavlja enačba 3 in je v nadaljevanju definirana z enačbami 3.1–3.13.

Stroškovna funkcija težnostnega podpornega zidu			
$\min: COST = C_{stone} \cdot A_{wall} + C_{exc} \cdot V_{exc} + C_{fill} \cdot V_{fill} + C_{drain} = C_{stone} \cdot \left(H_0 \cdot b_f/2 + H_0 \cdot b + H_0 \cdot b_b/2\right) + C_{exc} \cdot \left(\left(b_f + b + b_b\right) + \left(b + b_b + n_{exc} \cdot H_0\right)\right) \cdot H_0/2 + C_{fill} \cdot \left(\left(\left(b_f + b + b_b\right) + \left(b + b_b + n_{exc} \cdot H_0\right)\right) \cdot H_0/2 - \left(H_0 \cdot b_f/2 + H_0 \cdot b + H_0 \cdot b_b/2\right)\right) + C_{drain}$	(1)		
Geotehnične omejitve in pripadajoče enačbe			
$H_{Ed} \leq H_{Rd}$	(2)	$H_{Ed} = E_{a,h1} + E_{a,h2}$	(2.1)
$E_{a,h1} = p_{h,top} \cdot H_0$	(2.2)	$E_{a,h2} = \left(p_{h,bottom} - p_{h,top}\right) \cdot H_0/2$	(2.3)
$H_0 = H_s + d$	(2.4)	$K_{a\gamma h} = K_n \cdot \cos\beta \cdot \cos(\beta - \eta)$	(2.5)
$P_p = \tan^2\left(45° + \varphi_{found,d}/2\right) \cdot \gamma_{found,k} \cdot d^2/2$	(2.6)	$p_{h,top} = SF_Q \cdot K_{aqh} \cdot q_{Q,k} - K_{ach} \cdot c'_{ret,d}$	(2.7)
$p_{h,bottom} = SF_Q \cdot K_{aqh} \cdot q_{Q,k} + SF_G \cdot K_{a\gamma h} \cdot H_0 \cdot \gamma_{ret,k} - K_{ach} \cdot c'_{ret,d}$	(2.8)	$K_{ach} = (K_n - 1) \cdot \cot\varphi'_{ret,d} = \left(\frac{1}{\cos\beta \cdot \cos(\beta-\eta)} \cdot K_{a\gamma h} - 1\right) \cdot \cot\varphi'_{ret,d}$	(2.9)
$K_n = \frac{1+\sin\varphi'_{ret,d} \times \sin(2m_w + \varphi'_{ret,d})}{1-\sin\varphi'_{ret,d} \times \sin(2m_t + \varphi'_{ret,d})} \cdot e^{2\cdot(m_t+\beta-m_w-\eta)\cdot\tan\varphi'_{ret,d}}$	(2.10)	$K_{aqh} = K_n \cdot \cos^2\beta = K_{a\gamma h} \cdot \frac{\cos\beta}{\cos(\beta-\eta)}$	(2.11)
$2m_t = \cos^{-1}\left(\frac{-\sin\beta}{\sin\varphi'_{ret,d}}\right) - \varphi'_{ret,d} - \beta$	(2.12)	$2m_w = \cos^{-1}\left(\frac{\sin\delta_{ret,d}}{\sin\varphi'_{ret,d}}\right) - \varphi'_{ret,d} - \delta_{ret,d}$	(2.13)
$\eta = \tan^{-1}(b_b/H_0)$	(2.14)	$\varphi'_{ret,d} = \tan^{-1}\left(\frac{\tan\varphi_{ret,k}}{SF_\varphi}\right)$	(2.15)
$c'_{ret,d} = \frac{c'_{ret,k}}{SF_c}$	(2.16)	$\delta_{ret,d} = \tan^{-1}\left(\frac{\tan(k_{ret} \cdot \varphi_{ret,k})}{SF_\varphi}\right)$	(2.17)
$\varphi'_{found,d} = \tan^{-1}\left(\frac{\tan\varphi_{found,k}}{SF_\varphi}\right)$	(2.18)	$c'_{found,d} = \frac{c'_{found,k}}{SF_c}$	(2.19)
$\delta_{found,d} = \tan^{-1}\left(\frac{\tan(k_{found} \cdot \varphi_{found,k})}{SF_\varphi}\right)$	(2.20)	$H_{Rd} = \left(V_{d,fav} \cdot \tan\delta_{found,d} + P_p\right)/SF_{Rh}$	(2.21)
$V_{d,fav} = SF_{G,fav} \cdot W_{Gk} + E_{a,v1} + E_{a,v2}$	(2.22)	$W_{Gk} = W_{Gk,1} + W_{Gk,2} + W_{Gk,3}$	(2.23)
$W_{Gk,1} = \gamma_{wall} \cdot b_f \cdot H_0/2$	(2.24)	$W_{Gk,2} = \gamma_{wall} \cdot b \cdot H_0$	(2.25)
$W_{Gk,3} = \gamma_{wall} \cdot b_b \cdot H_0/2$	(2.26)	$E_{a,v1} = E_{a,h1} \cdot \tan\left(\delta_{ret,d} + \eta\right)$	(2.27)
$E_{a,v2} = E_{a,h2} \cdot \tan\left(\delta_{ret,d} + \eta\right)$	(2.28)		
$e_B \leq e_{max}$	(3)	$e_B = \frac{B}{2} - \frac{(M_{Ed,stb} - M_{Ed,dst})}{V_d}$	(3.1)
$B = b_f + b + b_b$	(3.2)	$V_d = W_{Gk} + E_{a,v1} + E_{a,v2}$	(3.3)
$M_{Ed,stb} = SF_{G,fav} \cdot \left(M_{Gk,1} + M_{Gk,2} + M_{Gk,3}\right) + M_{E_{a,v1}} + M_{E_{a,v2}}$	(3.4)	$M_{Gk,1} = W_{Gk,1} \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot b_f\right)$	(3.5)
$M_{Gk,2} = W_{Gk,2} \cdot \left(b_f + b/2\right)$	(3.6)	$M_{Gk,3} = W_{Gk,3} \cdot \left(b_f + b + b_b/3\right)$	(3.7)
$M_{E_{a,v1}} = E_{a,v1} \cdot \left(b_f + b + b_b/2\right)$	(3.8)	$M_{E_{a,v2}} = E_{a,v2} \cdot \left(b_f + b + 2 \cdot b_b/3\right)$	(3.9)
$M_{Ed,dst} = M_{E_{a,h1}} + M_{E_{a,h2}}$	(3.10)	$M_{E_{a,h1}} = E_{a,h1} \cdot H_0/2$	(3.11)
$M_{E_{a,h2}} = E_{a,h2} \cdot H_0/3$	(3.12)	$e_{max} = B/6$	(3.13)
$V_d \leq R_d$	(4)	$R_d = A' \cdot \left(c'_{found,d} \cdot N_c \cdot s_c \cdot i_c + q' \cdot N_q \cdot s_q \cdot i_q + 0{,}5 \cdot \gamma_{found,k} \cdot B' \cdot N_\gamma \cdot s_\gamma \cdot i_\gamma\right)/SF_{Rv}$	(4.1)
$B' = B - 2 \cdot e_B$	(4.2)	$A' = 1 \cdot B'$	(4.3)
$q' = \gamma_{found,k} \cdot d$	(4.4)	$N_q = e^{\pi \cdot \tan\varphi'_{found,d}} \cdot \tan^2\left(45° + \varphi'_{found,d}/2\right)$	(4.5)
$N_c = \left(N_q - 1\right) \cdot \cot\varphi'_{found,d}$	(4.6)	$N_\gamma = 2 \cdot \left(N_q - 1\right) \cdot \tan\varphi'_{found,d}$	(4.7)
$s_q = s_\gamma = s_c = 1$	(4.8)	$m_B = 2$	(4.9)
$i_q = \left(1 - H_{Ed}/\left(V_d + A' \cdot c'_{found,d} \cdot \cot\varphi'_{found,d}\right)\right)^{m_B}$	(4.10)	$i_c = i_{q,B} - \left(1 - i_{q,B}\right)/\left(N_c \cdot \tan\varphi'_{found,d}\right)$	(4.11)
$i_\gamma = \left(1 - H_{Ed}/\left(V_d + A' \cdot c'_{found,d} \cdot \cot\varphi'_{found,d}\right)\right)^{m_B+1}$	(4.12)	$M_{Ed,dst} \leq M_{Ed,stb}$	(5.0)
$s \leq s_{lim}$	(6.0)	$s = 2.5 \cdot \sigma_{ave} \cdot B^{0.7}/N^{1.4}$	(6.1)
$\sigma_{ave} = (\sigma_{max} + \sigma_{min})/2$	(6.2)	$\sigma_{max} = \frac{V_d}{B \cdot L} \cdot \left(1 + \frac{6 \cdot e_B}{B}\right)$	(6.3)
$\sigma_{min} = \frac{V_d}{B \cdot L} \cdot \left(1 - \frac{6 \cdot e_B}{B}\right)$	(6.4)		

Omejitve dimenzij zidu				
	$b^{LO} \leq b \leq b^{UP}$	(7)	$d \geq d_c$;	(7.1)
	$d_c = max(0.1 \cdot H_0; d_{min})$	(7.2)		
Diskretne alternative dimenzij težnostnega zidu :				
Spremenljivka	Minimum	Inkrement (korak)	Maksimum	Število alternativ
b_f (m)	0,0	0,1	5,0	51
b (m)	0,5	0,1	5,0	46
b_b (m)	0,0	0,1	5,0	51
d (m)	0,6	0,1	5,0	45

Preglednica 1 • **Optimizacijski model težnostnega podpornega zidu (OPT-TPZ).**

– Tretji pogoj predstavlja nosilnost temeljnih tal, ki je definirana z enačbo 4, ki omejuje aplicirano vertikalno silo na temeljna tla V_d z rezultantno silo odporov R_d. Za preveritev tega pogoja so definirane enačbe 4.1–4.12, ki predpostavljajo, da je težnostni podporni zid linijska konstrukcija.

– Enačba 5 predstavlja pogoj prevrnitve, ki pa je relevanten le v primeru, da je težnostni podporni zid izveden na zelo dobro nosilnih tleh.

– Avtorja Burland in Burbidge (Burland, 1985) sta predlagala preprosto enačbo za izračun posedkov, s pomočjo standardnega penetracijskega preizkusa (SPT) in nekorigiranega števila potrebnih udarcev N za penetracijo standardnega konusa za 30 cm. Pogoj omejuje enačba 6, ki je definirana z enačbami 6.1–6.4.

– Dimenzije zidu so omejene s pogoji 7–7.2, medtem ko je nabor vrednosti spremenljivk predstavljen na koncu preglednice 1.

Stroškovna funkcija je prav tako podrejena diskretnim pogojem, ki definirajo dimenzije težnostnega podpornega zidu. Pomembno je poudariti, da vsaka diskretna spremenljivka $y_j = \{y_1, y_2, y_3\}$ pripada v naprej definiranemu naboru pj diskretnih vrednosti $\mathbf{Y}_{dj}$. Iskanim dimenzijam b_f, b, b_b in d se pripiše le ena diskretna optimalna vrednost.

4.3 Optimizacijski model omejen z načrtovano verjetnostjo porušitve

Deterministični optimizacijski model, predstavljen v preglednici 1, je v nadaljevanju nadgrajen s pogojno enačbo, ki omogoča optimizacijo težnostnega zidu na podlagi vnaprej določene verjetnosti porušitve. Treba je upoštevati, da so v tako definiranem optimizacijskem modelu nekateri vhodni podatki podani z naključnimi vrednostmi. Geotehnični pogoji, enačbe 2–6, so bili nadomeščeni s pogojem načrtovane verjetnosti porušitve, ki je definiran z enačbo 8.

$$AFP = \frac{\sum_1^n A(n)}{n} \leq TFP \tag{8}$$

$$\text{Če } \frac{H_{Ed}{}^n}{H_{Rd}{}^n} \geq 1\ ali\ \frac{e_B{}^n}{e_{max}{}^n} \geq 1\ ali$$

$$\frac{V_d{}^n}{R_d{}^n} \geq 1\ ali\ \frac{M_{Ed,dst}{}^n}{M_{Ed,stb}{}^n} \geq 1\ ali$$

$$\frac{s^n}{s_{lim}{}^n} \geq 1\,; potem\ A(n) = 1;$$

$$sicer\ A(n) = 0 \tag{8.1}$$

kjer n, TFP in AFP predstavljajo število naključno definiranih nizov vrednosti vhodnih podatkov (slučajni vzorec), načrtovano verjetnost porušitve in dejansko verjetnost porušitve.

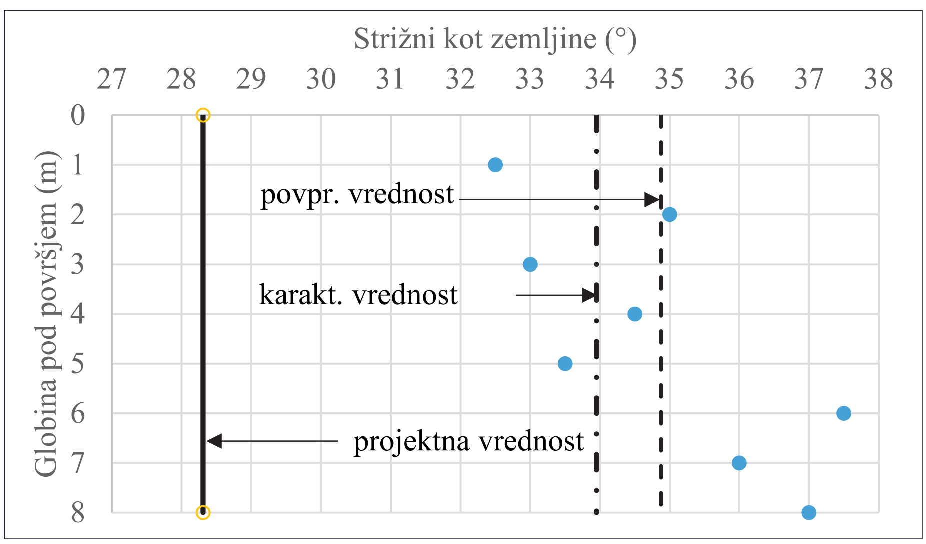
5 • APLIKACIJA MODELA OPT-TPZ – RAČUNSKI PRIMER

Za ponazoritev uporabnosti optimizacijskega modela, predstavljenega v tem članku, je podan primer za določitev dimenzij najcenejšega težnostnega podpornega zidu za podane vhodne podatke. Na sliki 4 so prikazane srednje in karakteristične vrednosti strižnega kota zemljine v tleh. Strižni koti so bili določeni na podlagi laboratorijskih strižnih testov, ki so znašali: 32,5°; 35°; 33°; 34,5°; 33,5°; 37,5°; 36° in 37°.

Schneiderjeva metoda (Orr, 1999) je bila uporabljena za izračun karakteristične vrednosti strižnega kota.

$$\varphi'_{k,ret} = \varphi'_{av,ret} - 0{,}5 \cdot \sigma = 34{,}8° - 0{,}5 \cdot 1{,}85° = 34{,}0° \tag{9}$$

Podatki za projektiranje so vsebovali strižni kot zaledne zemljine $\varphi_{ret,k}$ = 34°, njeno prostorninsko težo $\gamma_{ret,k}$ = 18 kN/m³, kohezijo $c_{ret,k}$ = 0 kPa in interakcijski koeficient k_{ret} = 2/3. Strižni kot temeljnih tal znaša $\varphi_{found,k}$ = 34°, kohezija je $c_{found,k}$ = 0 kPa, prostorninska teža je $\gamma_{found,k}$ = 18 kN/m³ in interakcijski koeficient k_{found} = 2/3. Svetla višina težnostnega podpornega zidu znaša H_s = 4 m, naklon zaledja pa β = 14°. Na zaledje deluje spremenljiva obtežba q_{Qk} = 5 kPa. Vsi podatki, vključeni v optimizacijski model OPT-TPZ, so predstavljeni v preglednici 2. PP1-K1, PP1-K2 in PP2 predstavljajo različne projektne



Slika 4 • **Povprečna, karakteristična in projektna vrednost strižnega kota.**

H_s	svetla višina težnostnega podpornega zidu			4,0 m
$q_{Q,k}$	spremenljiva obtežba			5,0 kPa
β	naklon zaledja			14°
$\varphi_{ret,k}$	strižni kot zaledne zemljine			34°
$c_{ret,k}$	kohezija zaledne zemljine			0 kPa
$\gamma_{ret,k}$	prostorninska teža zaledne zemljine			18 kN/m^3
k_{ret}	interakcijski koeficient zemljine in zidu			2/3
$\varphi_{found,k}$	strižni kot temeljnih tal			34°
$c_{found,k}$	kohezija temeljnih tal			0 kPa
$\gamma_{found,k}$	prostorninska teža temeljnih tal			18 kN/m^3
k_{found}	interakcijski koeficient temeljnih tal in zidu			2/3
γ_{wall}	prostorninska teža zidu			23,5 kN/m^3
s_{lim}	mejna vrednost posedka			50 mm
d_{min}	minimalna globina vpetja podpornega zidu			0,6 m
C_{stone}	cena lomljenca iz karbonatnih kamnin vezanim z betonom			85 €/m^3
C_{exc}	cena izkopa			10 €/m^3
C_{fill}	cena zasipa			18 €/m^3
C_{drain}	cena drenažnih cevi			10 €/m
Delni količniki varnosti za različne projektne pristope		PP1-K1	PP1-K2	PP2
SF_G	delni količniki varnosti za stalne vplive	1,35	1,0	1,35
$SF_{G,fav}$	delni količniki varnosti za ugodne stalne vplive	1,0	1,0	1,0
SF_Q	delni količniki varnosti za spremenljive vplive	1,5	1,3	1,5
$SF\varphi$	delni količniki varnosti za strižni kot	1,0	1,25	1,0
SF_c	delni količniki varnosti za kohezijo	1,0	1,25	1,0
SF_{Rv}	delni količniki varnosti za nosilnost	1,0	1,0	1,4
SF_{Rh}	delni količniki varnosti za zdrs	1,0	1,0	1,1

Preglednica 2 • **Vhodni podatki za OPT-TPZ model.**

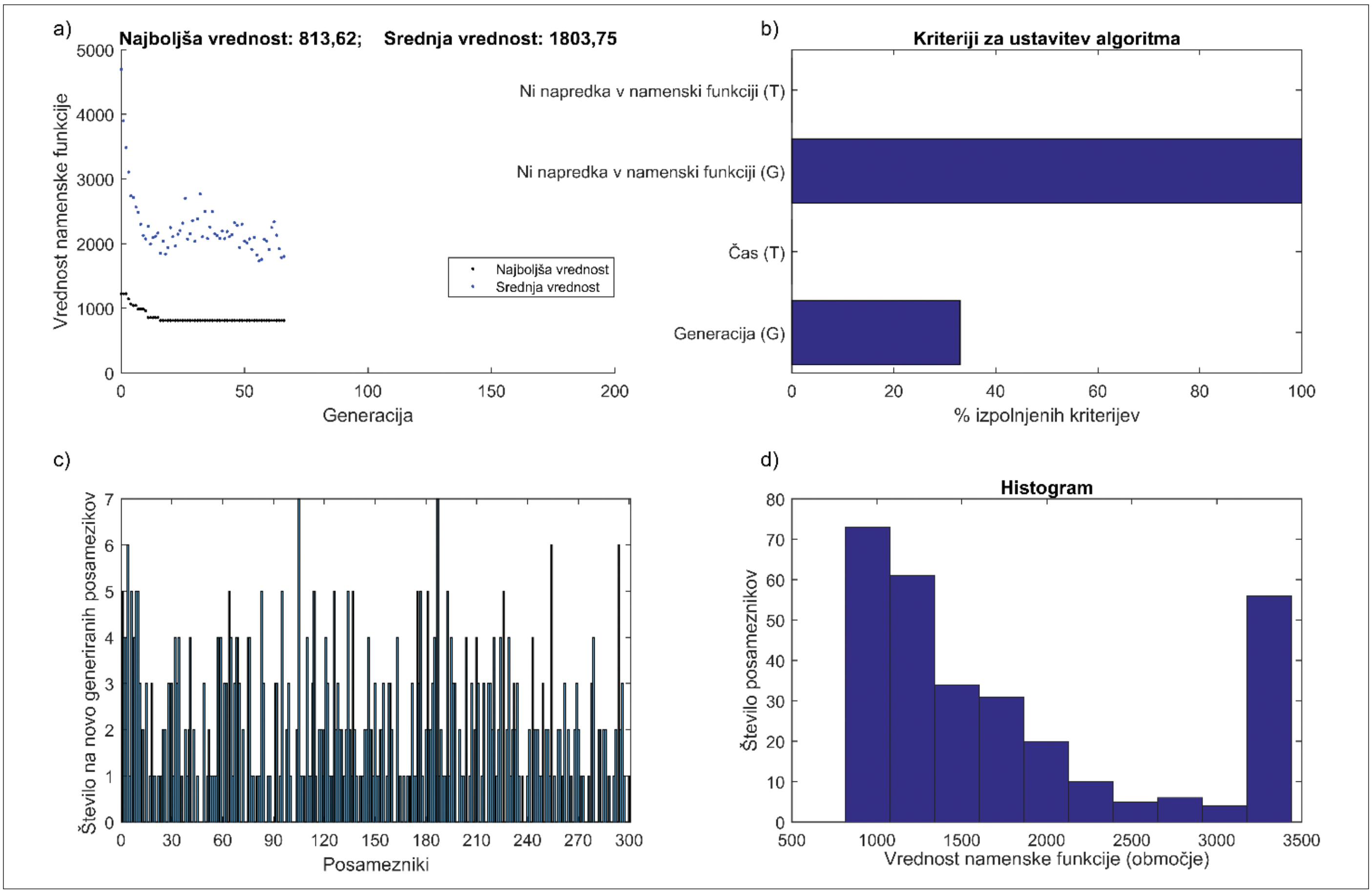
pristope, vsak z drugačnimi vrednostmi delnih količnikov varnosti v skladu z Evrokodom 7 (SIST, 2005).

Rezultati analize kažejo, da stroški optimalno zasnovanega težnostnega podpornega zidu pri danih projektnih podatkih znašajo 813 €/m za PP1-K1 in PP2 ter 918 €/m za PP1-K2. V preglednici 3 so prikazane stopnje izkoriščenosti za vsak geotehnični pogoj, na podlagi katerih lahko sklepamo, da je za projektni pristop PP1-K2 in PP2 merodajen zdrs zidu. Za projektni pristop PP1-K1 pa je merodajna ekscentričnost rezultante sile (rezultanta sile ni v jedru prereza). Treba je poudariti, da Evrokod 7 (SIST, 2005) ne zahteva, da je rezultanta sile v jedru prereza. Ker pa pri zidanih podpornih konstrukcijah nastanek nateznih napetosti ni dovoljen, je treba zagotoviti, da je rezultanta sile v jedru prereza. Najmanjša in povprečna vrednost namenske funkcije po vsaki iteraciji v optimizacijskem procesu sta prikazani na sliki 5a. Proces iteracije se je ustavil v trenutku, ko je bila povprečna relativna sprememba namenske funkcije napram trenutno najboljši vrednosti namenske funkcije manjša od predpisane (glej sliko 5b). Maksimalno predpisano število iteracij v tem modelu je bilo 200. Slika 5c prikazuje histogram, kjer je prikazana velikost populacije, ki je v tem modelu znašala 300. Ocena učinkovitosti vsake generacije je prikazana na sliki 5d. Čas, ki ga je računalnik potreboval za pridobitev optimalnega rezultata, je znašal 6,5 s. Računalnik, ki je bil uporabljen za izračun, ima CPU Intel Pentium i7 2,2 GHz. Optimalna rešitev je bila dobljena iz velikega števila kombinacij med vsemi različnimi diskretnimi spremenljivkami (št. diskretnih vrednosti(b_f) · št. diskretnih vrednosti(b) · št. diskretnih vrednosti(b_b) · št. diskretnih vrednosti(d) = 51 · 46 · 51 · 45 = 5.384.070 konstrukcijskih alternativ).

		PP1-K1	PP1-K2	PP2
	b_f (m)	2,0	2,0	2,0
	b (m)	0,5	0,5	0,5
	b_b (m)	0,0	0,0	0,0
	d (m)	0,6	1,1	0,6
P1:	$H_{Ed} \leq H_{Rd}$ (kN/m)	82,2 ≤ 93,5 (88%)	99,5 ≤ 101,8 (98%)	82,2 ≤ 85,0 (97%)
P2:	$e_b \leq e_{max}$ (m)	0,39 ≤ 0,42 (93%)	0,32 ≤ 0,42 (77%)	0,39 ≤ 0,42 (93%)
P3:	$V_d \leq R_d$ (kN/m)	253,2 ≤ 565,6 (45%)	213,0 ≤ 232,5 (92%)	253,2 ≤ 404,0 (63%)
P4:	$M_{Ed,dst} \leq M_{Ed,stb}$ (kNm/m)	133,5 ≤ 351,5 (38%)	179,7 ≤ 377,8 (48%)	133,5 ≤ 351,5 (38%)
P5:	$s \leq s_{lim}$ (mm)	19,1 ≤ 50 (38%)	16,1 ≤ 50 (32%)	19,1 ≤ 50 (38%)

V_{wall} (m3/m)	6,9	7,7	6,9
STROŠKI (€/m)	813,62	918,82	813,62

Preglednica 3 • **Optimalna zasnova težnostnega podpornega zidu – računski primer.**



Slika 5 • **Učinkovitost genetskega algoritma za PP2.**

6 • NAČRTOVANJE TEŽNOSTNEGA ZIDU NA PODLAGI VERJETNOSTI PORUŠITVE – RAČUNSKI PRIMER

Na podlagi negotovih projektnih podatkov smo izračunali verjetnost porušitve optimalno zasnovanega težnostnega podpornega zidu. Verjetnost porušitve smo izračunali v treh korakih. V prvem koraku je bil definiran deterministični model, ki vključuje mehanizme porušitve (zdrs zidu, nosilnost temeljnih tal, ekscentričnost). Deterministični model je enak geotehničnemu modelu, predstavljenemu v poglavju 4.2. Z definiranimi enačbami so se preverili vsi mehanizmi porušitve. V drugem koraku je treba določiti slučajne spremenljivke in pripadajoče statistične parametre (srednja vrednost min./max., standardna deviacija min./max., vrsta porazdelitve). Te vrednosti so prikazane v preglednici 4 in temeljijo na predhodnem poznavanju lastnosti tal in obremenitev, ki so potem uporabile za ustvarjanje naključnih vzorcev s pomočjo simulacije Monte Carlo markovskih verig (MCMV). Za generacijo vrednosti slučajnih spremenljivk φ_{ret}, φ_{found}, γ_{ret}, γ_{found} in q_q je bil uporabljen Excelov vtičnik, ki temelji na Bayesovem algoritmu vzorčenja (BEST - Bayesian equivalent sample toolkit). Naključne vrednosti slučajnih spremenljivk k_{ret} in k_{found} so bile modelirane s pomočjo kumulativne distribucijske funkcije (CDF), katere vrsta razporeditve je prikazana v preglednici 5. Spremenljivki k_{ret} in k_{found} sta torej slučajni spremenljivki, ki lahko zavzameta naključne vrednosti in se lahko zapišeta kot:

$$k_{ret} = k_{found} = \mathrm{CDF}^{-1}(\mathrm{U}_i) = \begin{cases} 0{,}5 + \sqrt{\frac{U_i}{12}} & U_i \leq \frac{1}{3} \\ 1 - \sqrt{\frac{1-U_i}{6}} & U_i > \frac{1}{3} \end{cases} \tag{10}$$

kjer U_i predstavlja naključno porazdeljena števila v določenem intervalu. V predstavljenem računskem primeru je bilo generiranih in analiziranih 100.000 vzorcev. Povprečna vrednost in standardna deviacija sta statistična podatka, ki sta bila pridobljena za izbrane slučajne spremenljivke po končani analizi generiranih vzorcev. Statistična analiza izbranih spremenljivk, ki lahko zavzamejo naključne vrednosti, je podana v preglednici 5. Model s tako definiranimi spremenljivkami imenujemo model negotovosti.

Spremenljivke (naključna vrednost)	Vrsta razporeditve	Min. srednja vrednost	Max. srednja vrednost	Min. standardna deviacija	Max. standardna deviacija
$\varphi_{ret} = \varphi_{found}$ (°)	Normalna	32,3	36,3	1,75	2
$\gamma_{ret} = \gamma_{found}$ (kN/m^3)	Normalna	17,5	18,5	0,7	1,3
q_q (kPa)	Normalna	4	6	1,8	2,2

Preglednica 4 • **Predhodne informacije o spremenljivkah, ki lahko zavzamejo naključne vrednosti.**

Spremenljivke (naključna vrednost)	Statistični parametri	Vrednosti	Vrsta razporeditve
$\varphi_{ret} = \varphi_{found}$ (°)	Srednja vrednost	34,83	BEST Excel vtičnik
	Standardna deviacija	2,0	
$\gamma_{ret} = \gamma_{found}$ (kN/m^3)	Srednja vrednost	18,0	BEST Excel vtičnik
	Standardna deviacija	1,0	
q_q (kPa)	Srednja vrednost	5,0	BEST Excel vtičnik
	Standardna deviacija	2,0	
$k_{ret} = k_{found}$	Minimalna vrednost	0,5	Trikotna razporeditev
	Najverjetnejša vrednost	2/3	
	Maksimalna vrednost	1	

Preglednica 5 • **Model negotovosti, težnostni podporni zid – računski primer.**

Na podlagi determinističnega modela in modela negotovosti smo izračunali tri različne verjetnosti porušitve za tri različne optimalne zasnove. Verjetnosti porušitve za tri optimalne zasnove so temeljile na treh različnih pristopih projektiranja (PP1-K1, PP1-K2 in PP2). Porušitev se zgodi, kadar eden izmed pogojev, predstavljen v enačbi 11, ni izpolnjen.

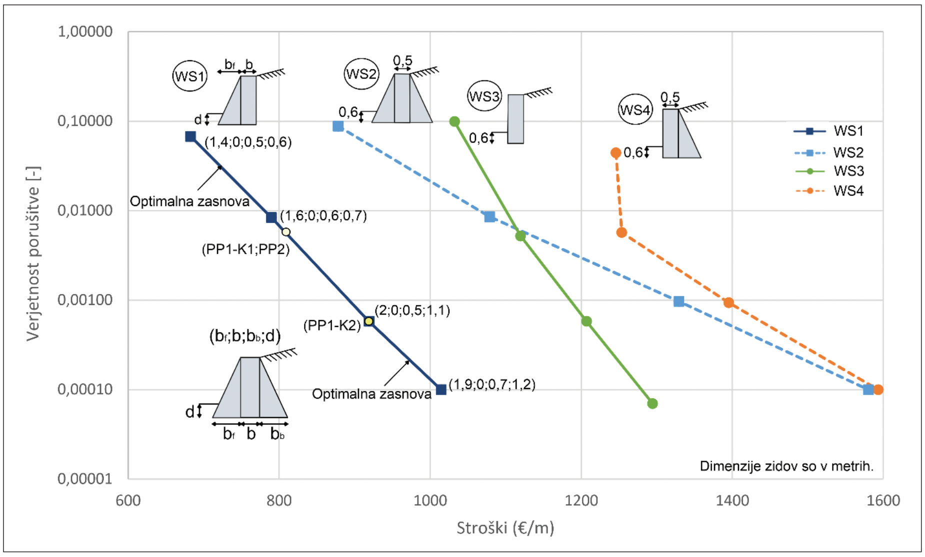
$$F = \begin{Bmatrix} M_1 \leq 0 \\ M_2 \leq 0 \\ M_3 \leq 0 \\ M_4 \leq 0 \\ M_5 \leq 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} H_{Rd} - H_{Ed} \leq 0 \\ e_{max} - e_B \leq 0 \\ R_d - V_d \leq 0 \\ M_{Ed,stb} - M_{Ed,dst} \leq 0 \\ s_{lim} - s \leq 0 \end{Bmatrix} \quad (11)$$

Končna verjetnost porušitve se nato izračuna tako, da se prešteje število vzorcev, pri katerih pride do porušitve, in nato deli s celotnim številom vzorcev, v predstavljenem računskem primeru znaša n = 100.000 (glej enačbo 8). Izračunane verjetnosti porušitev za PP1-K1, PP1-K2 in PP2 pa znašajo 0,006, 0,00058 in 0,006.

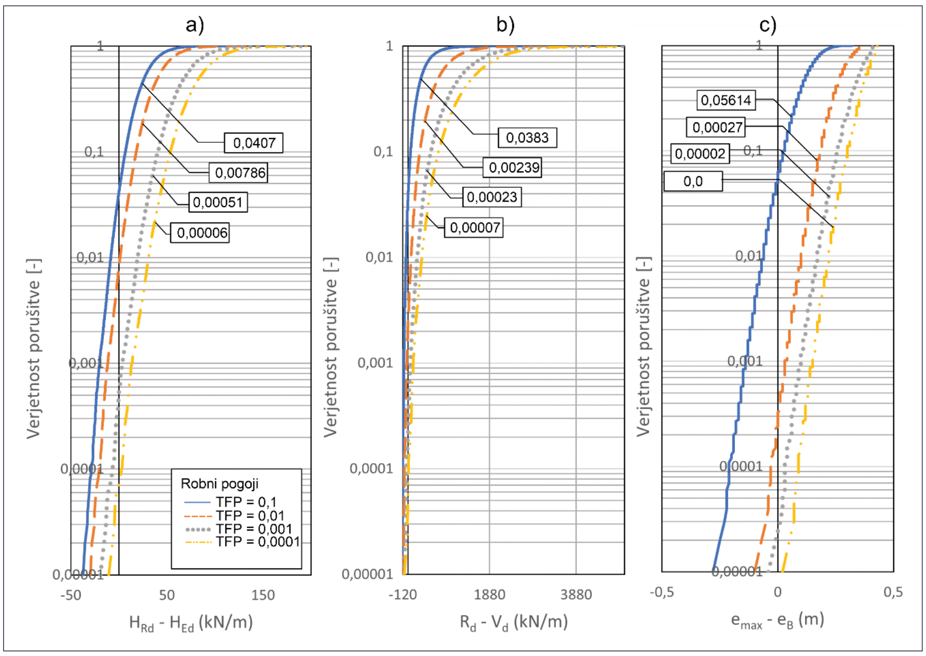
Z namenom, da bi dobili minimalne stroške gradnje težnostnega podpornega zidu glede na točno načrtovano verjetnost porušitve, pa je bil model negotovosti (100.000 naključnih vzorcev) vključen v optimizacijski proces. Genetski algoritem je bil uporabljen za izračun optimalne zasnove z ozirom na načrtovano verjetnost porušitve. Vsi delni količniki varnosti v determinističnem modelu zavzamejo vrednost 1,0. Izbrali smo štiri različne načrtovane verjetnosti porušitve *TFP* (0,1; 0,01; 0,001; in 0,0001), zato so podane tudi štiri različne optimalne zasnove težnostnega podpornega zidu. Optimalna zasnova težnostnega podpornega zidu pri načrtovani verjetnosti porušitve je prikazana na sliki 6 na skrajno levi strani, definirana kot WS1. Zaradi predpisanih diskretnih dimenzij težnostnega podpornega zidu so pridobljene verjetnosti porušitve manjše ali enake načrtovanim verjetnostnim porušitve. Za najmanjšo načrtovano verjetnost porušitve 0,0001 so optimalni stroški zidu 1014,38 €/m, katerega optimalne dimenzije so b_f = 1,9 m, b_b = 0 m, b = 0,7 m in d = 1,2 m. Optimizacija s slučajnimi spremenljivkami je trajala 5.140,6 s, pri čemer sta bila uporabljena enak algoritem in enaka zmogljivost procesorske enote kot pri optimizaciji brez slučajnih spremenljivk. Povečan čas analize za pridobitev optimalne rešitve sta povzročila velika kombinacija spremenljivk in veliko število naključnih vzorcev. Dodatno smo analizirali tudi različne neoptimalne prečne prereze podpornih zidov (WS2, WS3 in WS4), da bi pridobili odvisnost med verjetnostjo porušitve in stroški izgradnje zidu. V spodnji preglednici 6 so prikazani stroški v odvisnosti od preč-

	Optimalna zasnova (WS1)				Simetrična zasnova (WS2)			
b_f (m)	1,4	1,6	2,0	1,9	1,0	1,4	1,9	2,4
b (m)	0,5	0,5	0,5	0,7	0,5	0,5	0,5	0,5
b_b (m)	0	0	0	0	1,0	1,4	1,9	2,4
d (m)	0,6	0,7	1,1	1,2	0,6	0,6	0,6	0,6
AFP	0,0678	0,0084	0,00058	0,0001	0,08824	0,00857	0,00097	0,0001
(*TFP*)	(0,1)	(0,01)	(0,001)	(0,0001)				
STROŠKI (€/m)	682,52	789,73	918,8	1014,4	878,02	1078,58	1329,3	1580,0
	Pravokotna zasnova (WS3)				Zasnova s poševno zaledno stranico (WS4)			
b_f (m)	0	0	0	0	0	0	0	0
b (m)	2,0	2,2	2,4	2,6	0,5	0,5	0,5	0,5
b_b (m)	0	0	0	0	2,9	3,1	3,6	4,2
d (m)	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
AFP	0,0994	0,0052	0,00058	0,00007	0,04431	0,00572	0,00094	0,0001
STROŠKI (€/m)	1032,1	1119,5	1206,9	1294,3	1245,79	1253,61	1395,06	1593,1

Preglednica 6 • **Dimenzije in stroški za različne tipe zidov ob različnih verjetnostih porušitve.**



Slika 6 • **Odvisnost stroškov napram verjetnosti porušitve za različne tipe zidov.**



Slika 7 • **Izris CDF za a) zdrs, b) nosilnost temeljnih tal in c) ekscentričnost.**

nih prerezov in verjetnosti porušitve. *AFP* predstavlja dobljeno verjetnost porušitve in *TFP* načrtovano verjetnost porušitve.

Razlika v stroških med optimalno zasnovo (WS1) in najbolj neoptimalno zasnovo (WS4) pri enaki verjetnosti porušitve 0,0001 znaša 578 €/m. Zato je zelo pomembno, da pri zasnovi konstrukcije ne upoštevamo le načrtovane verjetnosti porušitve, ampak konstrukcijo tudi optimiziramo glede na stroške izdelave, saj lahko z različnimi zasnovami dosežemo enako verjetnost porušitve, pri tem pa niso vse zasnove optimalne. Pri vseh različnih verjetnostih porušitve je skupno to, da ima optimalna zasnova dimenzijo b_b = 0 m. Treba je poudariti, da predstavljen optimizacijski model ne omogoča izračuna optimalne zasnove zidu, ki je nagnjen k zaledju. Pravokotna zasnova (WS3) težnostnega podpornega zidu je bolj ekonomična kot simetrična zasnova (WS2) ali pa zasnova z nagibom zaledne stranice (WS4) pri manjših vrednostih verjetnosti porušitve. Tri optimalne zasnove zidu, ki so bile že določene na podlagi Evrokoda 7 (PP1-K1, PP1-K2 in PP2) in katerih verjetnosti porušitve so že bile izračunane (0,006, 0,00058, in 0,006), so na spodnji sliki (slika 6) označene s točkami (krogci). Razvidno je, da optimalne zasnove na podlagi Evrokoda 7 po verjetnosti porušitve sovpadajo s pridobljenimi rezultati optimizacije zidu glede na načrtovano verjetnost porušitve. Na sliki 6 so vse dimenzije težnostnih podpornih zidov (b_f; b; b_b; d) prikazane v metrih.

Za določitev verjetnosti porušitve $P(M \leq 0)$ za optimalno zasnovo, optimizirano glede na načrtovano verjetnost porušitve, je bila ustvarjena kumulativna distribucijska funkcija (CDF). CDF sedaj definira verjetnosti, da je vrednost M manjša od vrednosti praga M_0. Slika 7 prikazuje izris CDF za geotehnične pogoje (M), kot so nosilnost tal, zdrs in ekscentričnost za vsako načrtovano verjetnost porušitve. Vsaka krivulja predstavlja dobljene verjetnosti porušitve (*AFP*) za različne načrtovane verjetnosti porušitve *TFP* = (0,1; 0,01; 0,001; 0,0001).

7 • ZAKLJUČEK

Članek obravnava optimizacijo stroškov težnostnega podpornega zidu. Razvit je bil optimizacijski model OPT-TPZ. Ker je model načrtovan za splošno uporabo, lahko optimizacijo težnostnega podpornega zidu izvedemo za različne vrednosti parametrov tal, obremenitev, zahtevane svetle višine zidu in ostalih projektnih podatkov. Model vsebuje namensko funkcijo stroškov, ki pa je omejena z geotehničnimi in konstrukcijskimi pogoji. Optimizacija je bila narejena v skladu s standardom Evrokod 7, saj so bili zemeljski pritiski izračunani z enačbami, predpisanimi v Evrokodu, in ne na podlagi Coulombovih koeficientov. Prikazana sta dva različna optimizacijska modela. Prvi model, ki je bil v skladu z Evrokodom 7 in temelji na delnih količnikih varnosti, ter drugi model, ki pa temelji na verjetnosti porušitve. Za pridobitev optimalne zasnove sta bila uporabljena RCGA in program v MatLab. Računski primer težnostnega podpornega zidu, ki zadržuje 4 m zemljine, pri čemer je zaledna zemljina pod določenim nagibom, kaže, da ima optimalna zasnova poševno čelno stranico in navpično zaledno stranico (op. optimizacijski model ne obravnava zidov z zaledno stranico nagnjeno k zaledju). Za izbrane projektne podatke sta bila zdrs in ekscentričnost odločilna pogoja za porušitev glede na izbrani projektni pristop. Postopek optimizacije je trajal 6,5 s, optimalni zasnovi težnostnega zidu pa smo pripisali tudi verjetnost porušitve.

Optimizacija glede na načrtovano verjetnost porušitve pa je terjala veliko več časa (5.140,6 s) zaradi velikega števila naključnih vzorcev (100.000). Rezultati računskega primera so pokazali, da je v obravnavanem primeru za najmanjšo načrtovano verjetnost porušitve (0,0001) merodajna nosilnost temeljnih tal.

Prispevek tudi podarja, da se lahko stroški ob enaki verjetnosti porušitve zmanjšajo za polovico, če se izvede optimizacija težnostnega podpornega zidu glede na načrtovano verjetnost porušitve.

8 • Izjava o razpoložljivosti podatkov

Nekateri ali vsi podatki, modeli ali kode, ki podpirajo ugotovitve te študije, so na voljo pri avtorjih članka.

9 • Zahvala

Avtorji se zahvaljujejo za finančno podporo Javne agencije za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije, št. P2-0268.

10 • LITERATURA

Bathurst R. J., Javankhoshdel S., Allen T. M., LRFD calibration of simple soil-structure limit states considering method bias and design parameter variability, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 143(9), 1-14, 2017.

Burland J. B., Burbidge M. C., Settlement of Foundations on Sand and Gravel. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, London, 78, 1325–1381, 1985.

Camp C. V., Akin A., Design of retaining walls using big bang-big crunch optimization, Journal of Structural Engineering, 138(3), 438-448, 2012.

Deep K., Singh K. P., Kansal M. L., Mohan C., A real coded genetic algorithm for solving integer and mixed integer optimization problems, Applied Mathematics and Computation, 212(2), 505-518, 2009.

Fenton G. A., Griffiths D. V., Naghibi F., Future Directions in Reliability-Based Geotechnical Design, Geo-Risk 2017, American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 69–97, 2017.

Fenton G. A., Naghibi F., Griffiths D. V., On a unified theory for reliability-based geotechnical design, Computers and Geotechnics, 78, 110-122, 2016.

ISO, ISO 2394, General principles on reliability for structures, International Organization for Standardization, Switzerland, 2015.

Kaveh A., Behnam A. F., Charged System Search Algorithm for the Optimum Cost Design of Reinforced Concrete Cantilever Retaining Walls, Arabian Journal for Science and Engineering, 38, 563-570, 2013.

Kaveh A., Hamedani K. B., Bakhshpoori T., Optimal design of reinforced concrete cantilever retaining walls utilizing eleven meta-heuristic algorithms: A comparative study, Periodica Polytechnica Civil Engineering, 64(1), 156-168, 2020.

Kaveh A., Soleimani N., CBO and DPSO for optimum design of reinforced concrete cantilever retaining walls, Asian Journal of Civil Engineering, 16(6), 751-774, 2015.

Khajehzadeh M., Taha M. R., El-Shafie A., Eslami, M., Economic design of retaining wall using particle swarm optimization with passive congregation, Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 4(11), 5500-5507, 2010.

Kulhawy F. H., Foundation Engineering, Geotechnical Uncertainty, and Reliability-Based Design, Geotechnical Special Publication, 174-184, 2017.

Li D. Q., Yang Z. Y., Cao Z. J., Au S. K., Phoon K. K., System reliability analysis of slope stability using generalized Subset Simulation, Applied Mathematical Modelling, 46, 650-664, 2017.

Low B. K., Phoon K. K., Reliability-based design and its complementary role to Eurocode 7 design approach, Computers and Geotechnics, 65, 30-44, 2015.

MathWorks, MATLAB, Natick, Massachusetts, USA, 2020.

Orr T. L. L., Farrell E. R., Geotechnical Design to Eurocode 7, Springer, 1999.

Phoon K. K., Retief J. V., Reliability of Geotechnical Structures in ISO2394, CRC Press/Balkema, 2016.

Sadoglu E., Design optimization for symmetrical gravity retaining walls, Acta Geotechnica Slovenica, 11(2), 71-79, 2014.

Saribas A., Erbatur F., Optimization and sensitivity of retaining structures, Journal of Geotechnical Engineering-ASCE, 122(8), 649–656,1996.

SIST, SIST EN 1997–1–1:2005, Evrokod 7, Geotehnično projektiranje-Del 1-1, Splošna pravila, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2005.

Talatahari S., Sheikholeslami R., Shadfaran M., Pourbaba M., Optimum design of gravity retaining walls using charged system search algorithm, Mathematical Problems in Engineering, 2012, 1-10, 2012.

Wang Y., Reliability-based design of spread foundations by Monte Carlo simulations, Géotechnique, 61(8), 677-685, 2011.

Wang Y., Schweckendiek T., Gong W., Zhao T., Phoon K. K., Reliability of Geotechnical Structures in ISO2394, poglavje: Direct probability-based design methods, CRC Press/Balkema, 2016.