

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

UDK-UDC 05 : 625; tiskana izdaja ISSN 0017-2774;

spletna izdaja ISSN 2536-4332.

Ljubljana, julij 2021, letnik 70, str. 137-160

Izdajatelj:

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

Izdajateljski svet:

ZDGITS: **prof. dr. Matjaž Mikoš, predsednik**
izr. **prof. dr. Andrej Kryzanowski**
Dušan Jukić
IZS MSG: **Jernej Mazij**
mag. Jernej Nučič
mag. Mojca Ravnikar Turk
UL FGG: **doc. dr. Matija Gams**
UM FGPA: **doc. dr. Milan Kuhta**
ZAG: **doc. dr. Aleš Žnidarič**

Glavni in odgovorni urednik:

izr. **prof. dr. Sebastjan Bratina**

Lektor:

Jan Grabnar

Lektorica angleških povzetkov:

Romana Hudin

Tajnica:

Eva Okorn

Oblikovalska zasnova:

Mateja Goršič

Tehnično urejanje, prelom in tisk:

Kočeovski tisk

Naklada:

450 tiskanih izvodov
3000 naročnikov elektronske verzije

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

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

Letno izide 12 števil. Letna naročnina za individualne naročnike znaša 23,16 EUR; za študente in upokojece 9,27 EUR; za družbe, ustanove in samostojne podjetnike 171,36 EUR za en izvod revije; za naročnike iz tujine 80,00 EUR. V ceni je vštete DDV.

Poslovni račun ZDGITS pri NLB Ljubljana:
SI56 0201 7001 5398 955

Navodila avtorjem za pripravo člankov in drugih prispevkov

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

Uredništvo

Vsebina • Contents

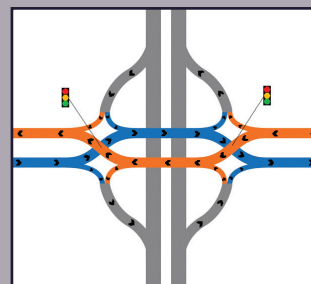
Članki • Papers

stran **138**

Luka Trček, mag. inž. grad.
dr. Rok Marsetič, univ. dipl. inž. grad.

OPTIMALNI MODEL KOORDINACIJE SVETLOBNIH SIGNALNIH NAPRAV V RAZCEPNEM DIAMANTNEM KRIŽIŠČU NA PROMETNI MREŽI

OPTIMAL TRAFFIC SIGNAL COORDINATION
MODEL FOR ROAD NETWORK WITH A DIVERGING
DIAMOND INTERCHANGE

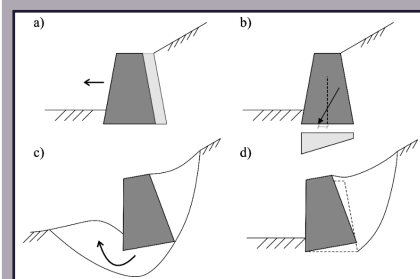


stran **147**

doc. dr. Primož Jelušič, univ. dipl. gosp. inž.
Rok Varga, mag. inž. grad.
prof. dr. Bojan Žlender, univ. dipl. inž. grad.

NAČRTOVANJE TEŽNOSTNEGA PODPORNEGA ZIDU NA PODLAGI VERJETNOSTI PORUŠITVE

GRAVITY RETAINING WALL DESIGN BASED
ON FAILURE PROBABILITY



Fotoreportaža z gradbišča

stran **159**

Luka Koper, d.d.

PODALJŠANJE PRVEGA POMOLA V LUKI KOPER



Novi diplomanti

Eva Okorn

Koledar prireditev

Eva Okorn

Slika na naslovnici: Prenovljena notranjost poslopja Cukrarne, foto: arhiv MOL

OPTIMALNI MODEL KOORDINACIJE SVETLOBNIH SIGNALNIH NAPRAV V RAZCEPNEM DIAMANTNEM KRIŽIŠČU NA PROMETNI MREŽI

OPTIMAL TRAFFIC SIGNAL COORDINATION MODEL FOR ROAD NETWORK WITH A DIVERGING DIAMOND INTERCHANGE

Luka Trček, mag. inž. grad.

luka.trcek@fgg.uni-lj.si

dr. Rok Marsetič, univ. dipl. inž. grad.

rok.marsetic@fgg.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo
in geodezijo,

Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana

Znanstveni članek

UDK 656.11:625.711.1(497.4)

Povzetek | V članku proučujemo sistem križišč v omrežju z razcepnim diamantnim križiščem, kjer so križišča opremljena s prometno odvisnimi svetlobno signalnimi napravami. Vzpostavitev optimalnega modela koordinacije na cestni mreži z razcepnim diamantnim križiščem zahteva drugačen pristop kot pri klasičnih križiščih. Zasnova tovrstnega diamantnega križišča namreč ne omogoča klasične izvedbe krmilnih programov, kjer bi se promet v isti fazi vodil sočasno v obeh glavnih smereh, kar otežuje koordinacijo prometnega toka v glavnih prometnih smereh. Zanima nas, kako z različnimi modeli koordinacije med svetlobnimi signalnimi napravami povečamo kapaciteto omrežja in zmanjšamo zamude vozil. Predpostavili smo dve različni izvorno ciljni matriki in štiri koordinacijske modele. Za vsak model in izvorno ciljno matriko smo določili optimalno dolžino cikla in dolžine zelenih faz ter določili nekatere indikatorje prometnega toka v omrežju (povprečna zamuda vozil, stopnja nasičenosti, stopnja zaustavljanja). Pokazali smo, da lahko z različnimi modeli koordinacije dosežemo različne nivoje uslug prometnega toka. Izkaže se namreč, da se kapacitete omrežja z različnimi modeli koordinacije precej razlikujejo in da višja kapaciteta omrežja ne pomeni nujno manjših povprečnih zamud vozil v omrežju. Rezultati so pokazali, da je vzpostavitev koordinacije z vidika zmanjšanja zamud vozil smiselna, ko prometne obremenitve dosežejo vsaj približno 80 % kapacitete nekoordiniranega omrežja. Določili smo model koordinacije, ki je za spreminjanje izvorno ciljnih matrik in odstopanje le-teh od predvidenih najmanj občutljiv.

Ključne besede: razcepno diamantno križišče, koordinacija, povprečna zamuda vozil, kapaciteta omrežja

Summary | This article presents an unconventional approach to traffic signal coordination on a road network with a diverging diamond interchange with traffic actuated signals. While this novel design can significantly improve the efficiency of an interchange, it introduces difficulties in coordinating with other traffic signals due to non-classical traffic signal operation, as the two main directions cannot be managed in the same phase. We compare different traffic signals coordination models in terms of increasing network capacity and reducing vehicle delays. Two different origin-destination matrices and four di-

fferent coordination models were studied. We determined the optimal cycle length and the optimal split for each coordination model and each origin-destination matrix and calculated three performance parameters, namely average delay, degree of saturation and stop rate. The results show different performances of the four coordination models, resulting in significant differences in network capacities. Interestingly, higher network capacity does not necessarily lead to lower average delay in the network. Additionally, we have shown, that traffic signal coordination on a road network with diverge diamond interchange with the aim of reducing vehicle delays is beneficial when traffic volumes reach 80 % of the capacity of uncoordinated road network. Finally, we determined a coordination model that is least sensitive to changes in origin-destination matrix to account for normal variations in traffic volumes.

Key words: diverging diamond interchange, coordination, average delay, network capacity

1 • UVOD

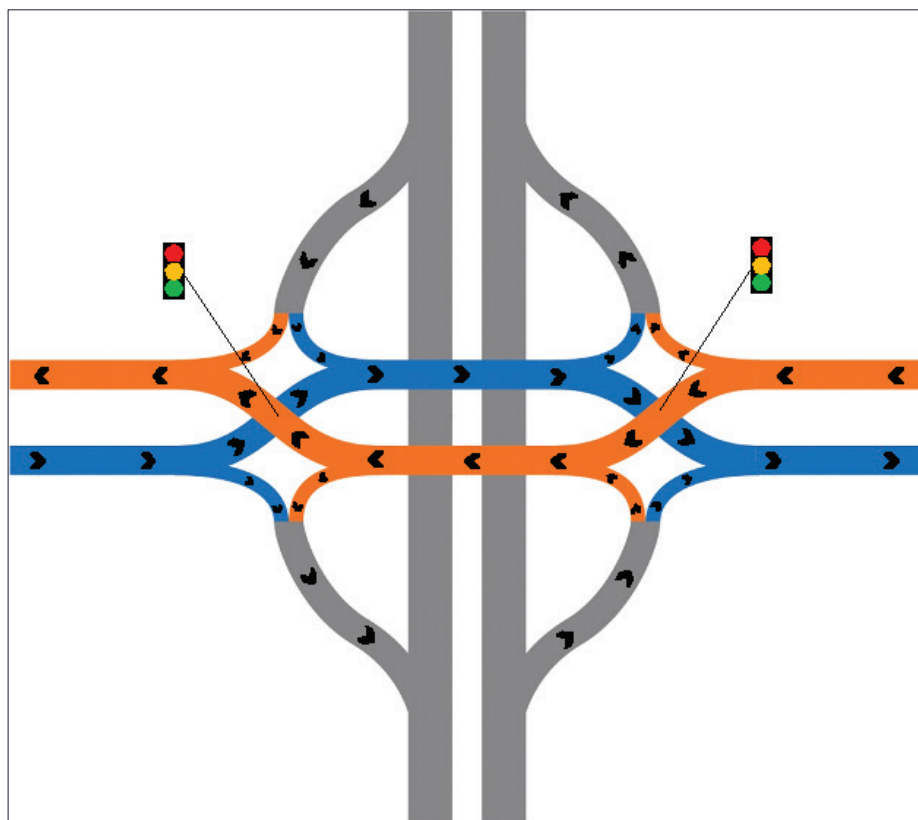
Po svetu se ponekod vedno bolj uveljavljajo inovativna nekonvencionalna križišča, ki v primerjavi z obstoječimi omogočajo bolj učinkovito vodenje prometa na prometno obremenjenih odsekih. Med njimi so tudi tako imenovana razcepna diamantna križišča (angl.: diverging diamond interchange – DDI ali tudi double crossover diamonds – DCD), ki so na področju prometnega inženirstva pogosto predmet raziskav ((Day, 2016a), (Alzoubaidi, 2021), (Cheng, 2018), (Warchol, 2017), (Pang, 2016), (Almoshaogeh, 2020)). Shema takega križišča je prikazana na sliki 1. Taka križišča so se po svetu začela širše uveljavljati šele v zadnjem desetletju, čeprav so v Franciji obstajala že od 70. let prejšnjega stoletja. Glavna prednost tovrstnih križišč je v tem, da vozila, ki zavijajo levo, ne prečkajo nasprotno glavne smeri in zato ne potrebujejo svoje faze v krmilnem programu svetlobnih signalnih naprav. Zaradi specifičnega vodenja prometnega toka skozi križišče se kapaciteta za leve zavijalce lahko poveča tudi dvakrat v primerjavi z vodenjem prometnega toka v klasičnem diamantnem križišču, kjer je za leve zavijalce običajno treba nameniti svojo fazo. Razcepna diamantna križišča so zato pogosto boljša alternativa klasičnim diamantnim križiščem, kar na podlagi kapacitetnih analiz s pomočjo mikrosimulacij prometnega toka dokazuje tudi avtor v raziskavi (Chlewicki, 2011).

Največje prednosti razcepnega diamantnega križišča pred klasičnim diamantnim križiščem so povezane z njegovo geometrijo, ki omogoča izvedbo dvofaznih krmilnih programov semaforjev s krajšim ciklom, kar pomembno prispeva k zmanjšanju zamud vozil. Poleg tega imajo manj konfliktnih točk v primerjavi

s klasičnim diamantnim križiščem in krožnim križiščem, zato so lahko bolj prometno varna. Za slabost razcepnega diamantnega križišča se lahko pokaže neizkušenost voznikov pri vožnji skozi križišča takega tipa (MDoT, 2010). V raziskavi (Hunter, 2019) ugotavljajo, da so klasična diamantna križišča primerna na tistih lokacijah, kjer pričakujemo, da bo prometno povpraševanje precej nižje od kapacitete in delež vozil na glavni smeri, ki zavijajo levo (npr. na avtocestni priključek), pod 30 %, sicer

se z vidika kapacitete za bolj primerno izkaže razcepno diamantno križišče.

Kot omenjajo avtorji raziskave (Day, 2016a) vodenje prometa skozi razcepno diamantno križišče najpogosteje poteka s pomočjo dvofaznega krmilnega programa, ki ima enako dolg cikel kot sosednja križišča. Ob tem pa obstajajo različne analize in raziskave, ki potrjujejo, da tako vodenje ni nujno najbolj optimalno (Day, 2016a). Skozi razcepno diamantno križišče lahko prometni tok vodimo z dvema krmilnima programoma na vsakem križišču ali pa z enim krmilnim programom, ki je obema križiščema v sklopu razcepnega diamantnega



Slika 1 • Shematični prikaz razcepnega diamantnega križišča.

križišča skupen. V primeru dvojnega krmilnika je za učinkovito prometno rešitev pozornost treba usmeriti predvsem dimenzioniranju optimalne dolžine cikla in dolžini zelenih faz na posameznih križiščih, določiti primerne časovnega razmaka med obema križiščema ter dimenzioniranju optimalne razdalje med obema križiščema, da zagotovimo zadostno zajezitveno dolžino za vozila (Cheng, 2018).

Izziv pri načrtovanju krmilnih programov za svetlobne signalne naprave v omrežju, kjer se nahaja razcepno diamantno križišče, je vzpostavitev medsebojne optimalne koordinacije. Geometrija križišč v sklopu tovrstnih križišč namreč ne omogoča, da bi se glavni prometni tok območju križišča odvijal v obe smeri hkrati. Namen koordinacije je zagotoviti dovolj veliko kapaciteto omrežja in minimizirati povprečno zamudo vozil v omrežju, tako da so vrednosti stopnje nasičenosti med kritičnimi pasovi križišč v mreži čim bolj podobne (in nikjer ne presegajo vrednosti 1, če je mogoče). Na področju koordinacije križišč v sklopu razcepnih diamantnih križišč s sosednjimi križišči zasledimo le malo raziskav in študij. Med njimi velja omeniti študijo (Yang, 2014), v okviru

katere so predlagali optimizacijski model, ki z optimalno dolžino cikla, dolžino zelenih faz in zamiki maksimizira kapaciteto razcepnega diamantnega križišča pod različnimi geometrijskimi pogoji (s sosednjimi križišči ali brez sosednjih križišč). Pri tem model koordinacije temelji na shemi časovno odvisnih krmilnih programih in dvojnem krmilniku na razcepnem diamantnem križišču. Iskanje maksimalne kapacitete razcepnega diamantnega križišča je smiselno, ko le-to predstavlja ozko grlo v omrežju, sicer z vidika zamud vozil tako osnovan model ne bo nujno optimalen. V okviru študij (Day, 2016b) in (Kim, 2016) sta bila analizirana različna cestna odsek z več križišči (v prvi študiji pet, v drugi pa štiri, kjer sta križišči v sklopu razcepnega diamantnega križišča vodeni z enim krmilnikom). Pri tem so avtorji prve študiji za križišči v sklopu razcepnega diamantnega križišča uporabili polovično dolžino cikla v primerjavi s sosednjimi križišči, v drugi študiji pa enako dolžino cikla kot pri sosednjih križiščih. Alternativnih možnosti pri tem niso raziskali. Krmiljenje svetlobnih signalnih naprav na križiščih v sklopu razcepnega diamantnega križišča je običajno dvofazno, krmiljenje svetlobnih sig-

nalnih naprav na ostalih običajnih štirikrakah križiščih pa lahko zaradi vodenja levih zavijalcev poteka v več fazah, kar pomeni, da je cikel pri teh križiščih lahko relativno dolg (lahko tudi več kot 120 sekund). V primeru dolgih ciklov v križiščih vzdolž vpadnice lahko v razcepnem diamantnem križišču uporabimo polovično dolžino cikla. Kot alternativa se lahko na tovrstnih križiščih vzpostavi tudi trifazno krmiljenje, kot ga predlaga Hainen (Hainen, 2015).

V splošnem ugotavljamo, da raziskave na tem področju potrjujejo, da so razcepna diamantna križišča lahko zelo dobra rešitev tako z vidika kapacitete kot z vidika prometne varnosti. Ob tem pa se raziskovalci soočajo z izzivom, kako izvesti optimalno koordinacijo krmilnih programov na cestni mreži, kjer se nahajajo taka diamantna križišča.

V članku obravnavamo del cestnega omrežja, v katerem je razcepno diamantno križišče. Raziskali smo, kako na prometne parametre vplivajo časovni zamiki med križišči, dolžine ciklov križišč in dolžine zelenih faz. Za različna scenarija prometnih obremenitev smo predlagali koordinacijski model za optimizacijo krmilnih programov.

križiščih v sklopu razcepnega diamantnega križišča:

- model A: krmilni program z izmeničnim vodenjem prometnega toka v glavni smeri (slika 3) s ciklom enake dolžine kot na vpadnici;
- model B: krmilni program z izmeničnim vodenjem prometnega toka v glavni smeri (slika 3) s polovičnim ciklom glede na cikel na vpadnici;
- model C: krmilni program s konceptom polnjenja in praznjenja (slika 4) s ciklom enake dolžine kot na vpadnici;
- model D: krmilni program s konceptom polnjenja in praznjenja (slika 4) s polovičnim ciklom glede na cikel na vpadnici.

2 • METODOLOGIJA

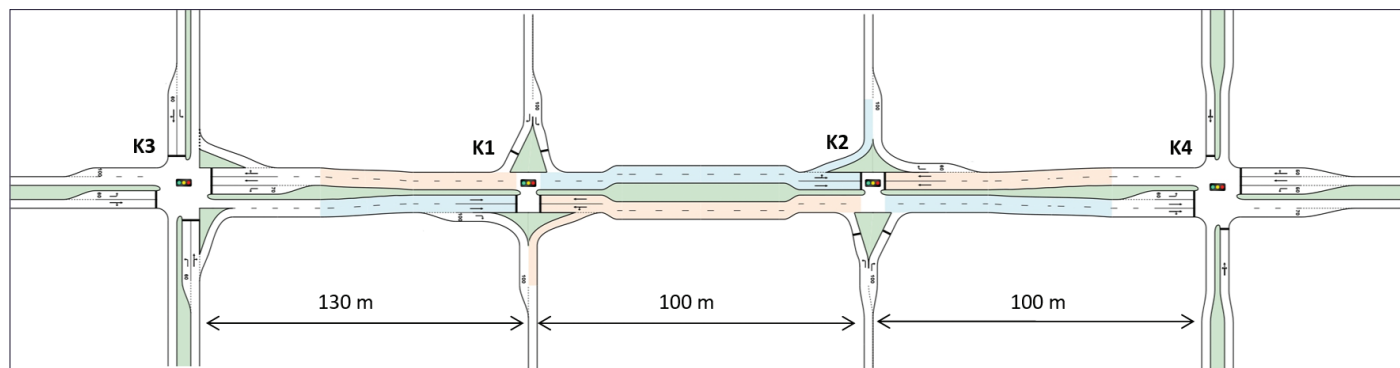
V raziskavi ugotavljamo, kako s posameznimi modeli koordinacije svetlobnih signalnih naprav v sklopu razcepnega diamantnega križišča vplivamo na prometne parametre na cestni mreži. Za različni izvorno ciljni matriki (scenarija prometnih obremenitev) smo za posamezne koordinacijske modele določili optimalne sheme prometno odvisnih krmilnih programov zaporednih semaforiziranih križišč. Za vsak koordinacijski model smo določili kapaciteto omrežja in občutljivost za odstopanje od predvidenih scenarijev prometnih

obremenitev. Analizo smo izvedli s pomočjo analitičnega programa Sidra Intersection 9.1.

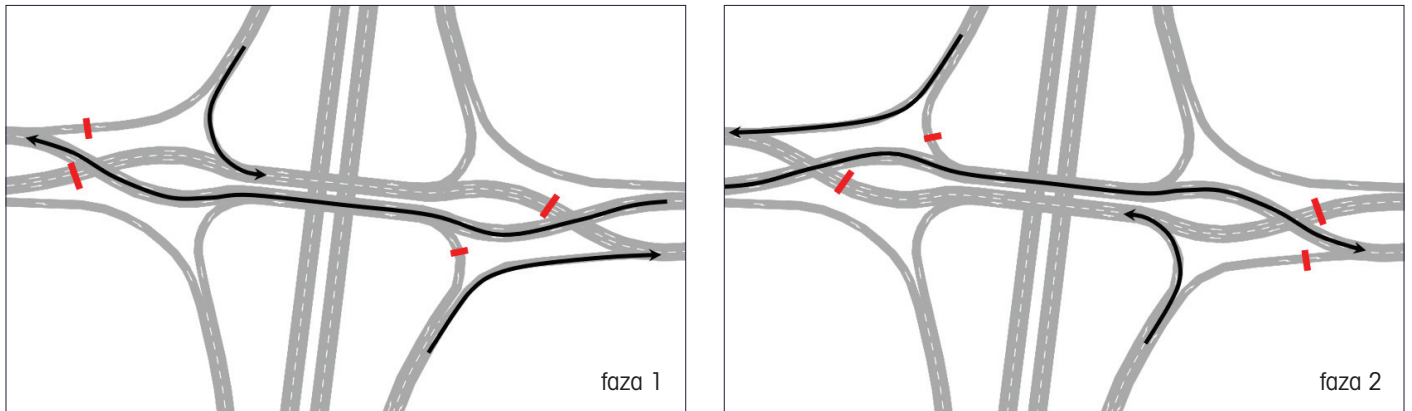
2.1 Modeli koordinacije

Shema obravnavane cestne mreže prikazana na sliki 2. V članku obravnavamo sistem štirih semaforiziranih križišč, od katerih sta dve v sklopu razcepnega diamantnega križišča (križišči K1 in K2 na sliki 2), preostali dve pa sta klasični štirikraki križišči.

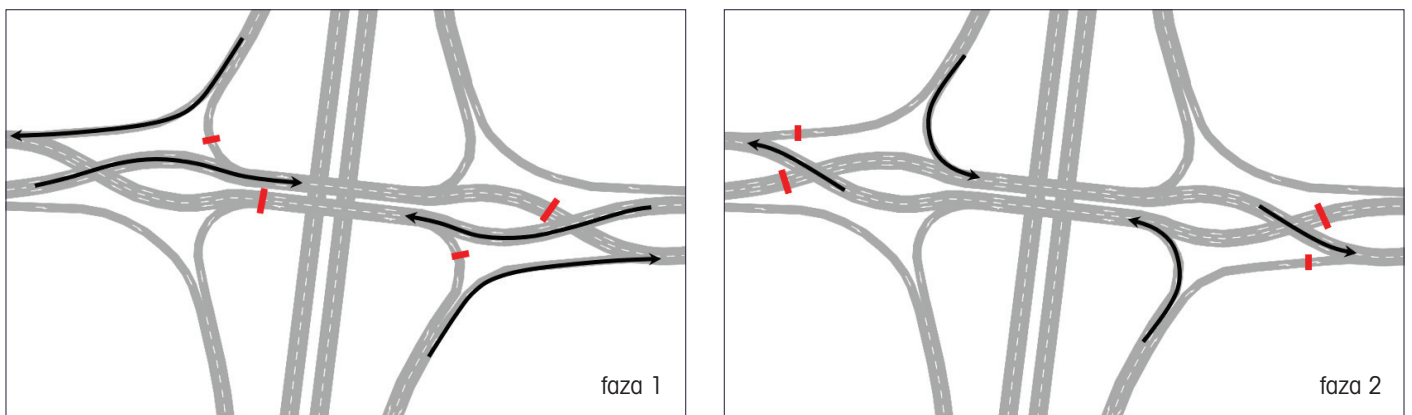
Raziskali smo štiri različne zasnove koordinacije prometno odvisnih krmilnih programov na



Slika 2 • Shematski prikaz obravnavane cestne mreže z barvnim prikazom smeri vožnje.



Slika 3 • Primer vodenja prometa skozi križišči v sklopu razcepnega diamantnega križišča, kjer se prometni tok v glavni smeri vodi izmenično – v vsaki fazi v eno smer (modela A in B).



Slika 4 • Primer vodenja prometa skozi križišči v sklopu razcepnega diamantnega križišča, kjer se prometni tok v glavni smeri vodi sočasno v obeh smereh – v prvi fazi se izkoristi zajezična dolžina za kolono vozil med obema križanjema znotraj sklopa, v drugi fazi pa se kolona vozil med obema križanjema izprazni (modela C in D).

Poleg koordiniranih modelov smo analizirali še model E: med seboj nekoordinirano delovanje svetlobno signalnih naprav na cestnem omrežju, ki so le prometno odvisna.

Križišči K3 in K4 sta v vseh petih variantah krmiljeni po enakem vzorcu, pri čemer se pri križišču K3 predvideva dvofazno krmiljenje s podaljšano fazo za leve zavijalce v glavni smeri, na K4 pa dvofazno krmiljenje.

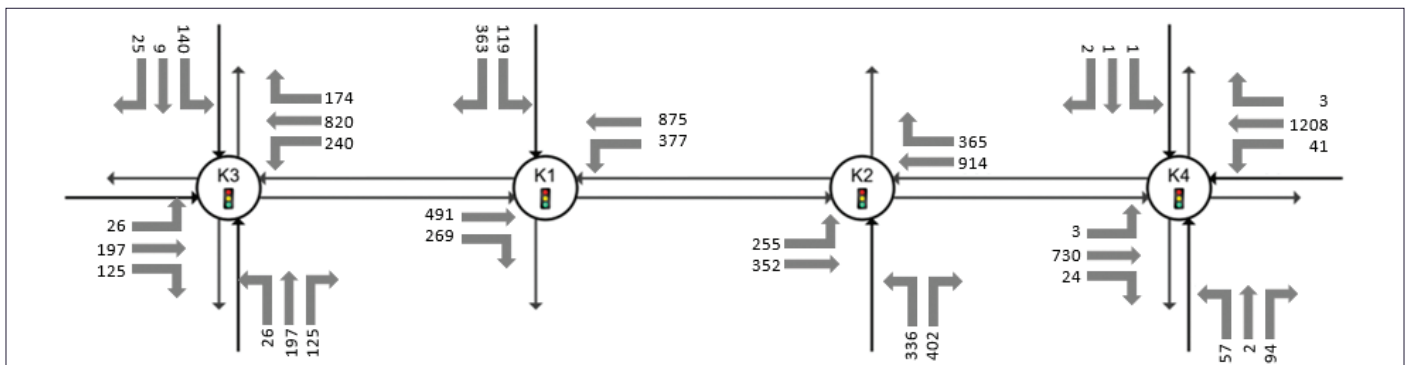
Na sliki 3 je grafičen prikaz način vodenja prometnega toka, ki je predviden po modelih

koordinacij A in B. Glavni prometni tok se preko razcepnega diamantnega križišča vodi izmenično – v prvi fazi v eno smer, v drugi fazi pa v drugo smer. Na sliki 4 je prikazan način vodenja prometnega toka skozi sklop križišča, ki je predviden po modelih C in D. V prvi fazi se glavni prometni tok preko obeh križišč v tem primeru vodi sočasno z obeh strani diamantnega križišča. Pri tem se izkoristi zajezična dolžina med obema križanjema (K1 in K2) znotraj sklopa križišča – faza polnjenja. V

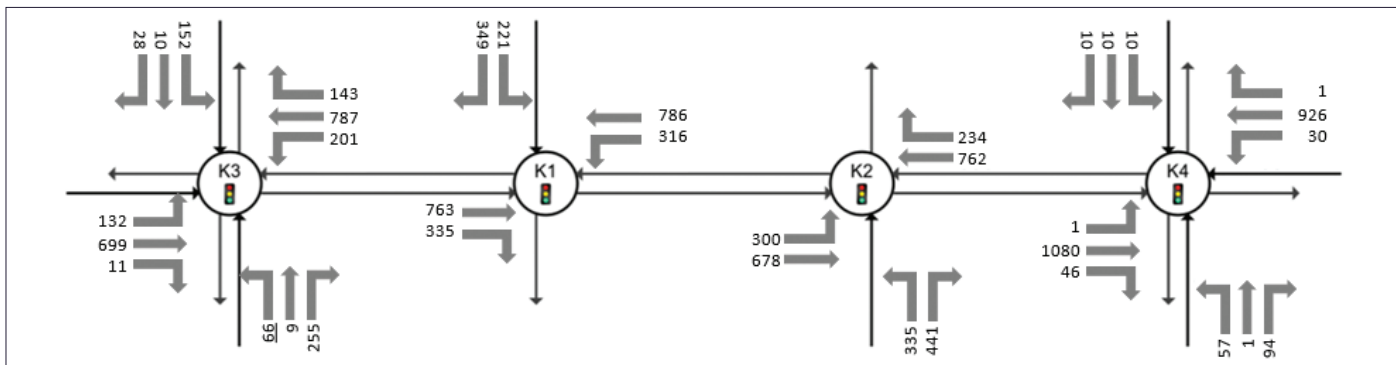
drugi fazi se glavni prometni tok sočasno vodi preko obeh križanj v smeri iz sklopa razcepnega diamantnega križišča – faza praznjenja. Pri vseh modelih koordinacije se obe križišči K1 in K2 vodita preko skupnega krmilnika, zato med njima ni časovnega zamika.

2.2 Prometno povpraševanje

Predvideli smo dva scenarija izvorno ciljnih matrik. V scenariju 1 (slika 5) je prometno povpraševanje izrazitejše v eni od glavnih



Slika 5 • Prometno povpraševanje, predvideno po scenariju 1 (vozil/h).



Slika 6 • Prometno povpraševanje, predvideno po scenariju 2 (vozil/h).

smeri (približno 60 % vozil v eno smer, 40 % v drugo smer), levih zavijalcev na razcepnem diamantnem križišču je med 30 % in 40 %. Na stranskih uvoznih krakih križišč K1 in K2 je prometnega povpraševanja za približno 40 % manj kot v glavni smeri. V scenariju 2 (slika 6) je prometno povpraševanje v obeh glavnih smereh približno enako, ostala razmerja v prometnem povpraševanju pa so podobna kot pri scenariju 1.

2.3 Optimizacija krmilnih programov

Za vsak model koordinacije in scenarij prometnega povpraševanja smo določili optimalne dolžine ciklov krmilnih programov v omrežju, dolžine zelenih faz in primerne časovne zamike med krmilnimi programi posameznih križišč. S spreminjanjem prometnega povpraševanja po določenem scenariju smo analizirali, kako občutljivi so posamezni modeli koordinacije za odstopanje od predvidenih prometnih obremenitev.

Optimalno shemo krmilnih programov svetlobno signalnih naprav v cestni mreži smo za posamezne modele koordinacije določili z minimizacijo namenske funkcije, ki definira povprečno zamudo vozil v omrežju.

Pri tem smo dolžino cikla omejili od 40 sekund do 150 sekund. Parametri krmilnih programov (dolžine zelenih faz, dolžine ciklov) so pri tem izračunani po metodi enakomerne stopnje nasičenosti. Uporaba te metode je primerna tudi za modeliranje koordiniranih prometno odvisnih križišč, za katere je sicer značilno, da se dolžina cikla in zelenih časov s prometnim povpraševanjem spreminja. Izračunane vrednosti zelenih faz in dolžin ciklov je treba v tem primeru razumeti kot povprečne vrednosti v obdobju, ki ga zajema analiza (npr. obdobje prometne konice).

Prometne parametre smo določili po metodologiji HCM 6 za semaforizirana križišča, ki

zajema naslednje korake: določitev geometrije križišč in njihove konfiguracije po smereh (pasovi); določitev pretokov po smereh in po prometnih pasovih in določitev kapacitete, stopnje nasičenosti in ostalih količin: zamude vozil, nivo usluge, dolžine kolon ...

Kapaciteta prometnih pasov za posamezne smeri je po HCM-metodologiji definirana z enačbo:

$$c = N s \frac{g}{C}, \quad (1)$$

- kjer so: c kapaciteta (vozil/h);
 N število prometnih pasov;
 s pretok prilagojenega nasičenega prometnega toka (vozil/h);
 g efektivni zeleni čas (s);
 C dolžina cikla (s).

Stopnja nasičenosti X je definirana z razmerjem med prometnim povpraševanjem in kapaciteto:

$$X = \frac{v}{c}, \quad (2)$$

- kjer so: X stopnja nasičenosti;
 v prometno povpraševanje (vozil/h);
 c kapaciteta (vozil/h).

Zamude vozil, ki nastanejo zaradi križišč in z njim povezanih motenj v prometnem toku, po metodologiji HCM določimo z naslednjo enačbo:

$$d = d_1 + d_2 + d_3, \quad (3)$$

- kjer so: d zamuda vozil (s/vozilo);
 d_1 enotna zamuda (s/vozilo);
 d_2 slučajne zamude (s/vozilo);
 d_3 zamuda zaradi začetne kolone vozil (s/vozilo).

Enotna zamuda vozil v križišču na prednostni smeri je ocenjena z naslednjo enačbo:

$$d_1 = PF \frac{0,5 C (1 - g/C)^2}{1 - [\min(1, X) g/C]}, \quad (4)$$

kjer sta:

$$PF = \frac{1 - P}{1 - g/C} \frac{1 - y}{1 - \min[1, X] P} [1 + y \frac{1 - P C/g}{1 - g/C}] \quad (5)$$

$$y = \min(1, X) \frac{g}{C}, \quad (6)$$

- kjer so: PF faktor prilagoditve zaradi koordinacije;
 y pretok vozil (vozil/h);
 P delež vozil, ki do križišča prispejo med zelenim časom;
 g efektivni zeleni čas (s) in
 C dolžina cikla (s).

Slučajno zamudo izračunamo z naslednjo enačbo:

$$d_2 = 900 T \left[(X_A - 1) + \sqrt{(X_A - 1)^2 + \frac{8 k I X_A}{c_A T}} \right], \quad (7)$$

kjer je $X_A = v/c_A$,

kjer sta: X_A povprečno razmerje med prometnim povpraševanjem in kapaciteto;

c_A povprečna kapaciteta (vozil/h).

Če v začetku analiziranega obdobja ni kolone vozil na nobenem prometnem pasu v križišču, je zamuda zaradi začetne kolone vozil enaka nič. Do zamude zaradi začetne kolone vozil pride, če prometno povpraševanje presega vrednost kapacitete iz obdobja pred analiziranim časovnim odsekom. Ta ne vključuje tistih zamud, ki nastanejo zaradi slučajnosti prometnega toka in nihanja prometnih obremenitev v času analiziranega obdobja.

3 • REZULTATI

V tem delu prikazujemo rezultate optimizacije krmilnih programov po obeh scenarijih prometnih obremenitev. V drugem delu smo za posamezne modele koordinacije prikazali, kako se v primeru odstopanja od predvidenih scenarijev spreminjajo povprečne zamude vozil v mreži.

žena, če za vsak prometni pas v omrežju velja, da je stopnja nasičenosti manjša od 1 ($X \leq 1$). Prometni pas z najvišjo stopnjo nasičenosti imenujemo kritični prometni pas. Kapaciteto omrežja v splošnem ni mogoče enolično določiti, saj je ta odvisna tudi od izvorno ciljne matrike potovanj. V raziskavi

opisuje prometno povpraševanje v scenariju 2. Odstopanje prometnega povpraševanja od določenega scenarija lahko opišemo na naslednji način:

$$[D] = f \cdot [D_{scenarij}], \quad (8)$$

kjer so: $[D]$ dejanska izvorno ciljna matrika,
 $(D_{scenarij})$ izvorno ciljna matrika scenarija,
 f faktor odstopanja.

Za vsako vrednost faktorja f na območju od $f=0,5$ do $f=1,5$ s korakom $\Delta f=0,01$ smo določili povprečno zamudo vozil v omrežju in povprečno zamudo vozil na kritičnem prometnem pasu. Občutljivost koordinacijskega modela za nihanje prometnega povpraševanja po scenariju 1 ali 2 smo ocenili na podlagi porazdelitve vrednosti povprečnih zamud. S tako analizo je mogoče oceniti tudi kapaciteto omrežja za vsak model koordinacije. Vrednosti faktorja f pri doseženi kapaciteti posameznih modelov koordinacije povzema mo v preglednici 2.

V primeru scenarija 1 ima največjo kapaciteto model A ($f_c=1,11$), najmanjšo pa model E, ki ne predvideva koordinacije ($f_c=1,02$). V

	model A	model B	model C	model D	model E
dolžina cikla, scenarij 1 (s)	50	70	40	80	/
dolžina cikla, scenarij 2 (s)	60	70	60	80	/
povprečna zamuda vozil, scenarij 1 (s)	10,8	13,7	12,2	15,5	19,7
povprečna zamuda vozil, scenarij 2 (s)	13,4	13,1	14,8	12,9	14,4
stopnja zaustavljanja, scenarij 1	0,64	0,70	0,75	0,74	0,82
stopnja zaustavljanja, scenarij 2	0,66	0,70	0,71	0,68	0,79
stopnja nasičenosti, scenarij 1	0,822	0,930	0,927	0,918	0,994
stopnja nasičenosti, scenarij 2	0,859	0,856	0,859	0,789	0,884

Preglednica 1 • Optimalne vrednosti parametrov posameznih modelov koordinacije za predvidena scenarija.

V preglednici 1 so za vsak model koordinacije in scenarij prikazane optimalne dolžine ciklov ter pripadajoče vrednosti nekaterih indikatorjev. Vsi modeli koordinacije so sposobni prevzeti predvidene prometne obremenitve, saj kapaciteta omrežja ni presežena v nobenem primeru. V primeru prometnega povpraševanja po scenariju 1 lahko najmanjše zamude pričakujemo pri modelu A, največje pa pri modelu E. Po scenariju 2 so vrednosti povprečnih zamud med modeli zelo podobne – najmanjšo zamudo pričakujemo pri modelu D, največjo pa pri modelu C. Večje razlike v zamudah lahko pričakujemo na najbolj nasičenem prometnem pasu v omrežju. V primeru scenarija 1 so zamude na kritičnem pasu najmanjše pri modelu C, največje pa pri modelu E, ki ne predvideva koordinacije. V primeru scenarija 2 so kritične zamude med modeli A, C in E enake, največje kritične zamude pa lahko pričakujemo pri modelu koordinacije D.

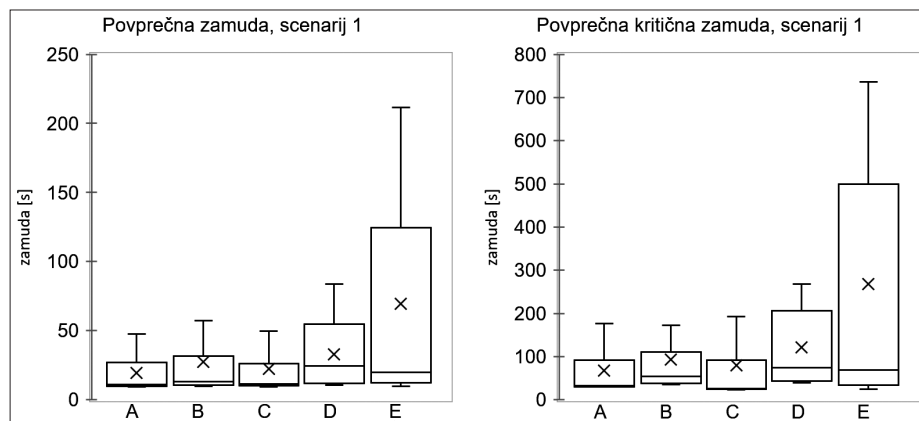
Na osnovi rezultatov kapacitetne analize v preglednici 1 modele koordinacije med seboj težko primerjamo, saj so rezultati med nekaterimi modeli zelo podobni. V drugem delu smo zato za posamezne modele koordinacije ocenili kapaciteto omrežja in občutljivost modelov za spreminjanje izvorno ciljnih matrik. Kapaciteta omrežja ni prese-

model	A	B	C	D	E
f_{c1} , scenarij 1	1,11	1,05	1,07	1,03	1,02
f_{c2} , scenarij 2	1,15	1,16	1,14	1,12	1,03
Razmerje $\frac{f_{c1}}{f_{c2}}$	0,97	0,91	0,94	0,92	0,99

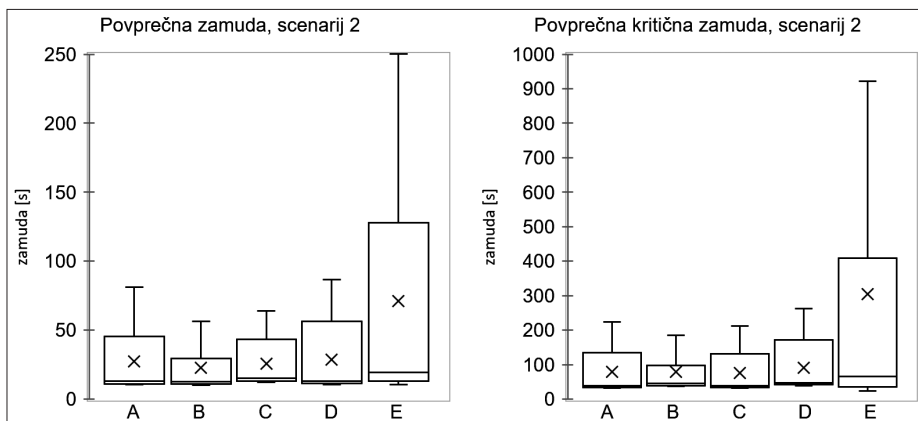
Preglednica 2 • Vrednosti faktorjev f_c ob doseženi kapaciteti omrežja pri posameznih modelih koordinacije.

smo obravnavali dve osnovni izvorno ciljni matriki, in sicer matriko, ki opisuje prometno povpraševanje v scenariju 1, in matriko, ki

primeru scenarija 2 ima največjo kapaciteto model B ($f_c=1,16$), najmanjšo pa model E ($f_c=1,03$). Višja vrednost kapacitete pa



Slika 7a in 7b • Porazdelitev povprečne zamude vseh vozil v omrežju in povprečne zamude vozil na kritičnem prometnem pasu ob različnih koordinacijskih modelih v primeru nihanja prometnega povpraševanja po scenariju 1 ($0,5 \leq f \leq 1,5, \Delta f = 0,01$).



Slika 8a in 8b • Porazdelitev povprečne zamude vseh vozil v omrežju in povprečne zamude vozil na kritičnem prometnem pasu ob različnih koordinacijskih modelih v primeru nihanja prometnega povpraševanja po scenariju 1 ($0,5 \leq f \leq 1,5, \Delta f = 0,01$).

v praksi ne pomeni nujno najbolj ugodne rešitve, saj so modeli koordinacije lahko različno občutljivi za spremembo scenarijev in za odstopanje od predvidenih scenarijev (izvirno ciljnih matrik). Če izvzamemo nekoordinirani model E, je za spremembo scenarijev najbolj občutljiv model B, najmanj pa model A.

vozil v omrežju v primeru spreminjanja izvorno ciljne matrike po scenariju 1 je prikazana na slikah 7a in 7b, v primeru spreminjanja izvorno ciljne matrike po scenariju 2 pa na slikah 8a in 8b.

Najširšo porazdelitev povprečnih zamud zavzame omrežje z nekoordiniranimi prometno

tljiva modela A in C, za spreminjanje povpraševanja po scenariju 2 pa je najmanj občutljiv model B. Vrednosti zamud vozil v omrežju so za nekatere vrednosti faktorjev f prikazane v preglednicah 3 in 4.

Za odstopanja na območju $f \in [0,5; 1,5]$, kjer $\Delta f = 0,01$ so prikazane povprečne vrednosti povprečne zamude $\bar{d}_{avg(0,5-1,5)}$ in standardni odklon povprečnih zamud $\sigma(d_{avg})$. Vrednosti $d_{f=0,75}$ in $d_{f=1,25}$ sta spodnja in zgornja meja zamud pri 25-% odstopanju od predvidenih scenarijev, vrednosti $d_{f=0,9}$ in $d_{f=1,1}$ pa spodnja in zgornja meja zamud pri 10-% odstopanju od predvidenih scenarijev. Občutljivost posameznih modelov koordinacije za zamude in stopnjo nasičenosti na kritičnem prometnem pasu je v primeru 10-% odstopanja od predvidenih scenarijev grafično prikazana na sliki 9. Modela A in C se v obeh scenarijih izkažeta za najbolj stabilna, B in D, ki predvidevata polovično dolžino ciklov na razcepnem diamantnem križišču, pa sta stabilna le v primeru scenarija 2. Pri modelu koordinacije A je odstopanje povprečnih zamud na kritičnem pasu med obema scenarijema najmanjše.

koordinacijski model	Povprečna zamuda vseh vozil v omrežju					Povprečna zamuda vozil na kritičnem prometnem pasu				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
$\bar{d}_{avg(0,5-1,5)}$ [s]	19,2	27,2	22,3	32,8	69,6	68,0	92,8	80,0	121,7	267,8
$\sigma(d_{avg})$ [s]	13,1	26,9	18,3	22,4	65,1	54,7	82,1	95,5	86,2	248,9
$d_{f=0,75}$ [s]	9,7	10,8	10,1	12,0	13,0	30,2	38,6	24,1	43,8	38,3
$d_{f=1,25}$ [s]	26,1	31,6	25,5	54,5	122,3	91,8	102,1	86,2	198,5	490,6
$d_{f=0,9}$ [s]	10,2	11,8	10,7	12,8	16,7	31,3	42,3	24,9	49,6	59,1
$d_{f=1,1}$ [s]	12,4	15,6	14,2	43,2	84,4	35,2	78,5	27,8	148,6	397,3

Preglednica 3 • Povprečna zamuda vozil v primeru nihanja prometnega povpraševanja po scenariju 1.

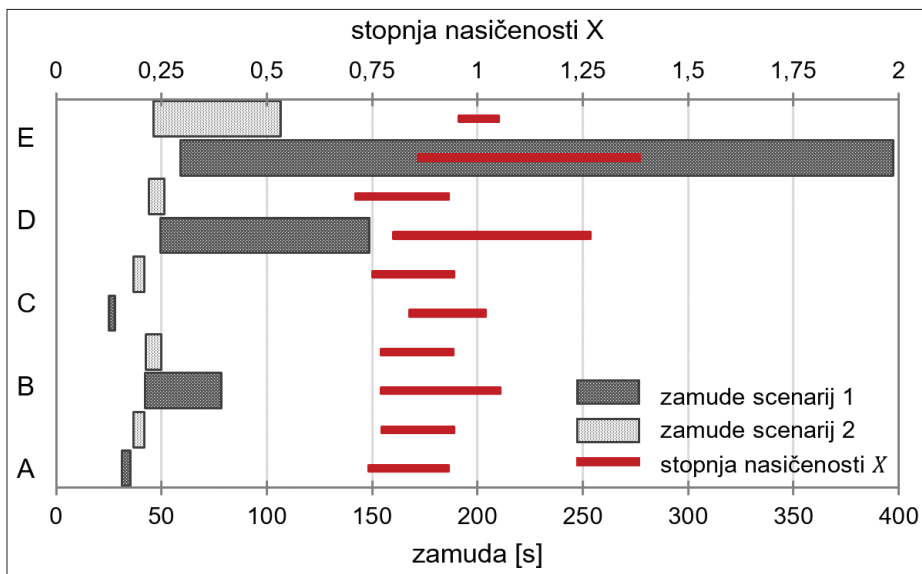
Rezultate analize občutljivosti posameznih modelov koordinacije za spreminjanje izvorno ciljne matrike po enačbi (8) povzemamo v nadaljevanju. Porazdelitev povprečnih zamud

odvisnimi krmilnimi programi (model omrežja E na slikah 7a, 7b, 8a in 8b). Na intervalu $0,5 \leq f \leq 1,5$ sta na spreminjanje prometnega povpraševanja po scenariju 1 najmanj obču-

Model E, ki med križišči ne predvideva koordinacije, je najmanj stabilen v obeh scenarijih, saj je kapaciteta omrežja v tem primeru skoraj dosežena že pri predvidenih scenarijih.

koordinacijski model	Povprečna zamuda vseh vozil v omrežju					Povprečna zamuda vozil na kritičnem prometnem pasu				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
$\bar{d}_{avg(0,5-1,5)}$ [s]	27,3	22,6	25,8	28,5	70,9	80,1	79,6	76,5	91,8	304,3
$\sigma(d_{avg})$ [s]	22,3	17,7	17,5	23,0	76,8	63,0	63,7	60,1	68,0	397,9
$d_{f=0,75}$ [s]	11,3	10,9	13,0	11,5	13,4	33,7	39,9	33,7	41,8	35,9
$d_{f=1,25}$ [s]	42,8	29,4	41,1	55,6	121,7	132,6	95,3	128,2	161,4	406,7
$d_{f=0,9}$ [s]	12,0	11,5	13,7	11,8	16,4	36,6	42,5	36,6	44,2	46,2
$d_{f=1,1}$ [s]	15,7	14,6	17,5	15,9	27,5	41,7	50,0	41,7	51,3	106,7

Preglednica 4 • Povprečna zamuda vozil v primeru nihanja prometnega povpraševanja po scenariju 2.



Slika 9 • Grafični prikaz območja povprečne zamude in stopnje nasičenosti na kritičnem prometnem pasu v primeru do 10% odstopanja od predvidenih scenarijev.

4 • SKLEP

Razcepno diamantno križišče ima dovolj veliko kapaciteto, da v omrežju ne predstavlja ozkega grla, zato med posameznimi modeli koordinacije v primeru predvidenega prometnega povpraševanja ni velikih razlik, čeprav so prometne obremenitve blizu kapacitete omrežja. Ugotavljamo, da je vzpostavitev koordinacije v primeru visokih prometnih obremenitev (prometne obremenitve presega približno 80 % kapacitete nekoordiniranega omrežja) smiselna. V primeru nižjih prometnih obremenitev je model z nekoordiniranimi prometno odvisnimi semaforji v obeh scenarijih primerljiv z ostalimi modeli, kjer je med prometno odvisnimi krmilnimi programi vzpostavljena koordinacija. Izbira optimalnega modela koordinacije je odvisna od predvidene izvorno ciljne matrike. Pri stabilnem modelu koordinacije pričakujemo, da manjša odstopanja od predvidenih scenarijev prometnih obremenitev ne povzročijo večjih odstopanj v povprečnih zamudah vozil v

omrežju. Model koordinacije, ki je najmanj občutljiv za spremembo izvorno ciljne matrike, je model A (model na razcepnem diamantnem križišču predvideva enako dolg cikel kot sosednja križišča, vodenje prometnega toka pa poteka izmenično v glavnih smereh), najbolj občutljiv za spremembo izvorno ciljne matrike pa je model C (model predvideva na križiščih v sklopu razcepnega diamantnega križišča enako dolg cikel kot sosednja križišča, vodenje prometnega toka v glavni smeri pa poteka s polnjenjem in praznjenjem zajeziščne dolžine med obema križiščema v sklopu razcepnega diamantnega križišča). Pri tem je treba poudariti, da v omrežju, ki je koordinirano po modelu C, pričakujemo najmanjše zamude na kritičnem prometnem pasu v obeh scenarijih. Najmanj občutljiva za odstopanja od predvidenih scenarijev sta modela koordinacije A in C. Stabilnosti omrežja z določenim modelom koordinacije ne moremo opisati le s kapaciteto, saj je

občutljivost koordinacijskih modelov za spreminjanje prometnega povpraševanja različna. Za nekatere modele se namreč izkaže, da so kljub manjši kapaciteti sposobni prevzeti enake prometne obremenitve z manjšimi povprečnimi zamudami. Čeprav ima model B v scenariju 2 najvišjo kapaciteto, je razpon kritičnih zamud pri 10% odstopanju pri tej višji kot pri modelih A in C, povprečna zamuda vozil po predvidenem scenariju pa je višja kot pri modelu D.

Na izbiro optimalnega koordinacijskega modela poleg izvorno ciljnih matrik vpliva tudi geometrijska zasnova omrežja in razcepnega diamantnega križišča. Pri slednjem je to predvsem dolžina zajeziščne razdalje med obema križanjema. V nadaljnjem raziskovalnem delu bi bilo smiselno preučiti, kako geometrijska zasnova razcepnega diamantnega križišča pod različnimi izvorno ciljnim matrikami vpliva na izbiro optimalnega koordinacijskega modela in kako pri tem rezultati mikrosimulacijskih modelov prometnega toka odstopajo od analitičnih izračunov.

5 • LITERATURA

Almoshaogeh M., Abou-Senna H., Radwan E., Haider H., Sustainable design of diverging diamond interchange: Development of warrants for improving operational performance, Sustainability, MDPI, 12, 14, 1–15, 2020.

Alzoubaidi M., Molan A. M., Ksaibati K., Comparing the efficiency of the super diverging diamond interchange to other innovative interchanges, Simulation Modelling Practice and Theory, Elsevier, 106, 1, 1–13, 2021.

- Cheng Y., Chang G. L., Rahwanji S., Concurrent optimization of signal progression and crossover spacing for diverging diamond interchanges, *Journal of Transportation Engineering Part A: Systems*, ASCE, 144, 3, 2–10, 2018.
- Chlewicki G., Should the diverging diamond interchange always be considered a diamond interchange form?, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, SAGE, 2223, 88–95, 2011.
- Day C. M., Bullock D. M., Cycle-length strategies for a diverging diamond interchange in a coordinated arterial, *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, 142, 12, 1–11, 2016a.
- Day C. M., Lavrenz S., Stevens A., Miller E. E., Bullock D., Extending Link Pivot Offset Optimization to Arterials with Single Controller Diverging Diamond Interchange, *Lyles School of Civil Engineering Faculty Publications*, Purdue University Libraries, 25, 1–22, 2016b.
- Hainen A. M., Stevens A. L., Day C. M., Li H., Mackey J., Luker M., Taylor M., Sturdevant J. R., Bullock D. M., Performance measures for optimizing diverging interchanges and outcome assessment with drone video, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, SAGE, 2487, 31–43, 2015.
- Hunter M., Guin A., Anderson J., Park S. J., Operating Performance of Diverging Diamond Interchanges, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, SAGE, 2673, 11, 801–812, 2019.
- Kim S. K., Warchol S., Schroeder B. J., Cunningham C., Innovative method for remotely fine-tuning offsets along a diverging diamond interchange corridor, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, SAGE, 2557, 33–43, 2016.
- MoDOT, Missouri's Experience with a Diverging Diamond Interchange - Lessons Learned, tehnično poročilo, Missouri Department of Transportation, Organizational Results, Missouri Department of Transportation, št. poročila OR 10 – 021, 2010.
- Pang B., Liu H., Xu H., Calculating Approach Capacity of Diverging Diamond Interchanges with Consideration of Internal Queue Effects, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, SAGE, 2553, 63–71, 2016.
- Warchol S., Chase T., Cunningham C., Use of microsimulation to evaluate signal-phasing schemes at diverging diamond interchanges, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, SAGE, 2620, 10–19, 2017.
- Yang X., Chang G. L., Rahwanji S., Development of a signal optimization model for diverging diamond interchange, *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, 140, 5, 1–9, 2014.

NAČRTOVANJE TEŽNOSTNEGA PODPORNEGA ZIDU NA PODLAGI VERJETNOSTI PORUŠITVE

GRAVITY RETAINING WALL DESIGN BASED ON FAILURE PROBABILITY

doc. dr. Primož Jelusič, 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

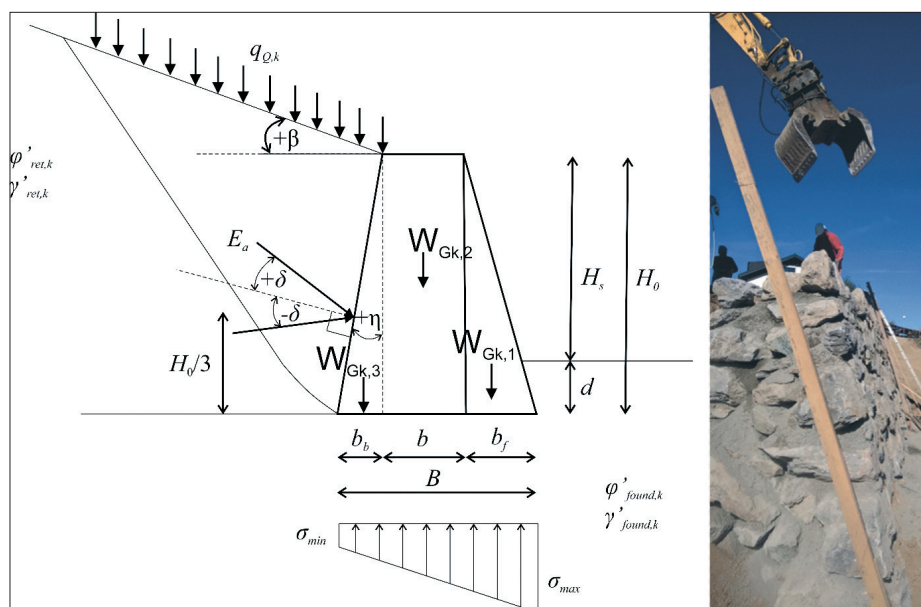
Summary | The article presents an optimal design for a gravity retaining wall based on a Real Coded Genetic Algorithm (RCGA). The gravity retaining wall optimization model (OPT-TPZ) includes a construction cost objective function of the wall, which is limited by geotechnical and design constraints. Two 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 podpirne konstrukcije, ki lahko prevzamejo natezne napetosti. V drugo skupino pa spadajo zidane podpirne konstrukcije, v katerih nastanek natezних 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.

del Gandomi (Gandomi, 2015). Optimizacija stroškov in teže armiranobetonskega zidu je bila izvedena s strani številnih raziskovalcev ((Camp, 2012), (Khajehzadeh, 2010), (Sarbass, 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



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 metahevrstičnih 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 izve-

delni količniki varnosti ne upoštevajo celoten vpliv negotovih parametrov ((Fenton, 2017), (Kulhaway, 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 podpirne 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:

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

pri pogojih:

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

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

$$x_i^{l_o}\leq x_i\leq x_i^{u_p};i=1,2,\dots,n_c$$

$$y_j\in \mathbf{Y}_{d_j};[\mathbf{Y}_{d_j}]_{p_j}j=1,2,\dots,n_d$$

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 omejujeata namensko funkcijo q . Podane so tudi meje (robni pogoji) za vsako zvezno in diskretno spremenljivko (x^{l_o} , x^{u_p}). Treba je opozoriti, da vsaka diskretna

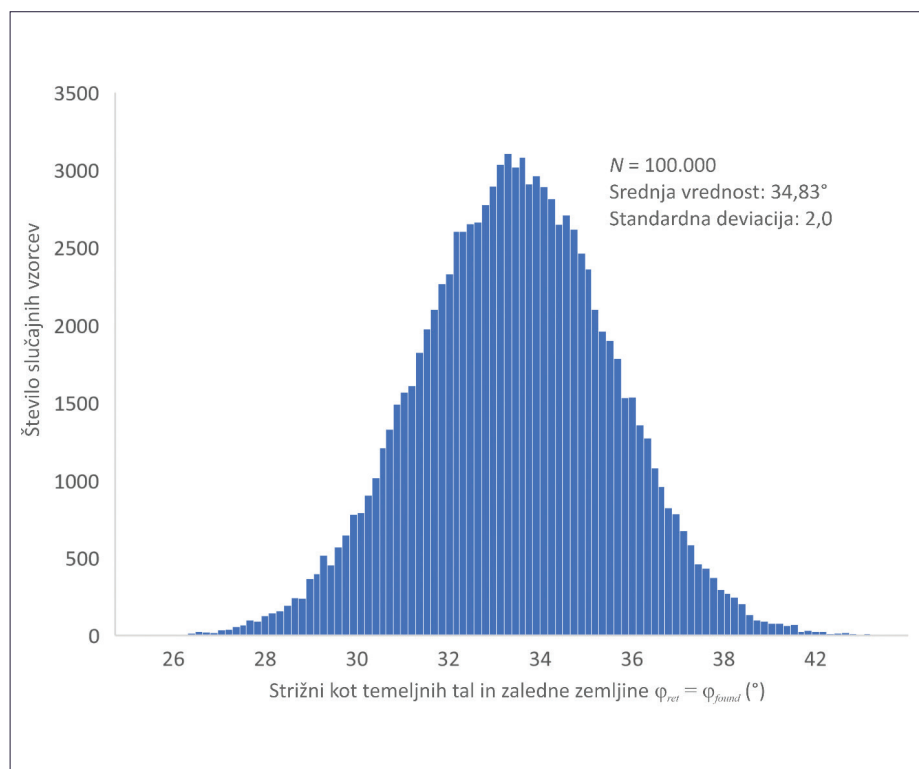
spremenljivka y_j pripada vnaprej določenemu naboru p_j diskretnih vrednosti \mathbf{Y}_{d_j} . V modelu OPT-TPZ spremenljivke vsebujejo dimenzije, obremenitve, lastnosti materiala, napetosti, stroške, maso itd. Binarne spremenljivke se uporabljajo, kadar se dimenzije in materiali izberejo iz določenega 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 RCGA 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 PODPORSKI ZID

Za izvedbo optimizacije s pomočjo RCGA je bil problem zasnovane 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):

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

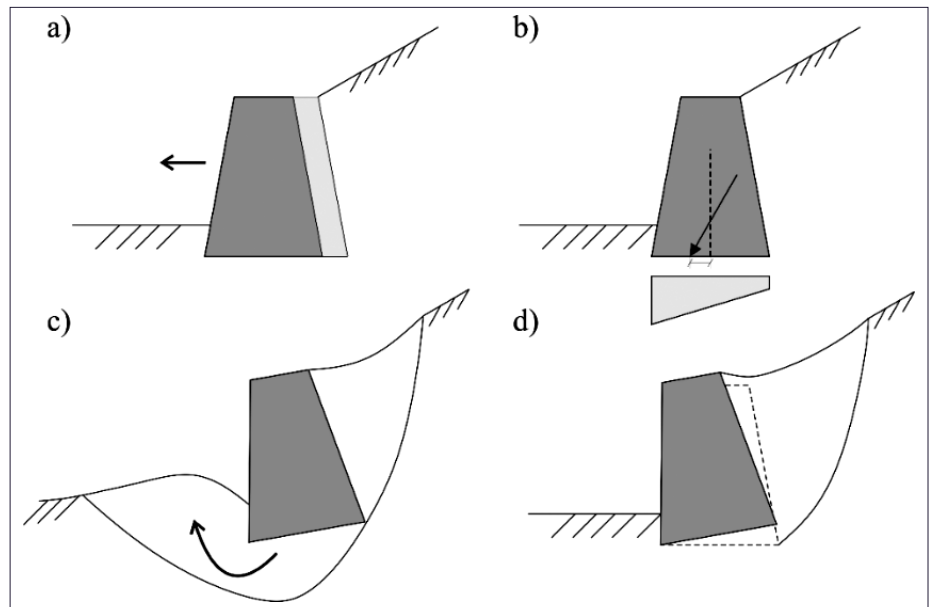
kjer $STROŠKI$ označujejo materialne stroške na tekoči meter težnostnega podpornega zidu. Stroškovna funkcija tako vključuje stroške gradnje, kamor spadajo stroški izkopa, stroški izdelave kamnite zložbe, stroški zasipa s sprotim utrjevanjem zemljine in izdelavo drenažnega sistema. Zato optimalna rešitev predstavlja minimalne stroške težnostnega podpornega zidu, ki lahko prevzame obtežbe zaledne zemljine. Oznaka C_{stone} (€/m³) predstavlja stroške dobave in vgradnje lomljenca iz karbonatnih kamnin, vezanega s polnilnim betonom v kamnito zložbo podpornega zidu, medtem ko C_{exc} (€/m³), C_{fill} (€/m³) 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

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/m³) 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



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

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.
- Četrty pogoj: prevrnitev zidu, slika 3d.
- Peti pogoj: čezmerni posedki.

prostorninska teža zidu γ_{wall} (kN/m³), zvezna spremenljiva obtežba q_{Qk} (kN/m²), 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 temeljnih 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			
$\min: COST = C_{stone} \cdot A_{wall} + C_{exc} \cdot V_{exc} + C_{fill} \cdot V_{fill} + C_{drain} = C_{stone} \cdot (H_0 \cdot b_f/2 + H_0 \cdot b + H_0 \cdot b_b/2) + C_{exc} \cdot ((b_f + b + b_b) + (b + b_b + n_{exc} \cdot H_0)) \cdot H_0/2 + C_{fill} \cdot (((b_f + b + b_b) + (b + b_b + n_{exc} \cdot H_0)) \cdot H_0/2 - (H_0 \cdot b_f/2 + H_0 \cdot b + H_0 \cdot b_b/2)) + C_{drain} \quad (1)$			
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)	$E_{a,h2} = (p_{h,bottom} - p_{h,top}) \cdot H_0/2$	(2.3)
$H_0 = H_s + d$	(2.4)	$K_{ayh} = K_n \cdot \cos \beta \cdot \cos(\beta - \eta)$	(2.5)
$P_p = \tan^2(45^\circ + \varphi_{found,d}/2) \cdot \gamma_{found,k} \cdot d^2/2$	(2.6)	$p_{h,top} = SF_Q \cdot K_{aqh} \cdot q_{Q,k} - K_{ach} \cdot c'_{ret,d}$	(2.7)
$p_{h,bottom} = SF_Q \cdot K_{aqh} \cdot q_{Q,k} + SF_G \cdot K_{ayh} \cdot H_0 \cdot \gamma_{ret,k} - K_{ach} \cdot c'_{ret,d}$	(2.8)	$K_{ach} = (K_n - 1) \cdot \cot \varphi'_{ret,d} = \left(\frac{1}{\cos \beta \cdot \cos(\beta - \eta)} \cdot K_{ayh} - 1 \right) \cdot \cot \varphi'_{ret,d}$	(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)	$K_{aqh} = K_n \cdot \cos^2 \beta = K_{ayh} \cdot \frac{\cos \beta}{\cos(\beta - \eta)}$	(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)	$H_{Rd} = (V_{d,fav} \cdot \tan \delta_{found,d} + P_p)/SF_{Rh}$	(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)	$E_{a,v1} = E_{a,h1} \cdot \tan(\delta_{ret,d} + \eta)$	(2.27)
$E_{a,v2} = E_{a,h2} \cdot \tan(\delta_{ret,d} + \eta)$	(2.28)		
$e_B \leq e_{max}$	(3)	$e_B = \frac{B}{2} - \frac{(M_{Ed,stab} - M_{Ed,dst})}{V_d}$	(3.1)
$B = b_f + b + b_b$	(3.2)	$V_d = W_{Gk} + E_{a,v1} + E_{a,v2}$	(3.3)
$M_{Ed,stab} = SF_{G,fav} \cdot (M_{Gk,1} + M_{Gk,2} + M_{Gk,3}) + M_{E_{a,v1}} + M_{E_{a,v2}}$	(3.4)	$M_{Gk,1} = W_{Gk,1} \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot b_f \right)$	(3.5)
$M_{Gk,2} = W_{Gk,2} \cdot (b_f + b/2)$	(3.6)	$M_{Gk,3} = W_{Gk,3} \cdot (b_f + b + b_b/3)$	(3.7)
$M_{E_{a,v1}} = E_{a,v1} \cdot (b_f + b + b_b/2)$	(3.8)	$M_{E_{a,v2}} = E_{a,v2} \cdot (b_f + b + 2 \cdot b_b/3)$	(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)	$R_d = A' \cdot \left(\frac{c'_{found,d} \cdot N_c \cdot s_c \cdot i_c + q' \cdot N_q \cdot s_q \cdot i_q + 0,5 \cdot \gamma_{found,k} \cdot B' \cdot N_\gamma \cdot s_\gamma \cdot i_\gamma}{SF_{Rv}} \right)$	(4.1)
$B' = B - 2 \cdot e_B$	(4.2)	$A' = 1 \cdot B'$	(4.3)
$q' = \gamma_{found,k} \cdot d$	(4.4)	$N_q = e^{\pi \cdot \tan \varphi'_{found,d}} \cdot \tan^2(45^\circ + \varphi'_{found,d}/2)$	(4.5)
$N_c = (N_q - 1) \cdot \cot \varphi'_{found,d}$	(4.6)	$N_\gamma = 2 \cdot (N_q - 1) \cdot \tan \varphi'_{found,d}$	(4.7)
$s_q = s_\gamma = s_c = 1$	(4.8)	$m_B = 2$	(4.9)
$i_q = (1 - H_{Ed}/(V_d + A' \cdot c'_{found,d} \cdot \cot \varphi'_{found,d}))^{m_B}$	(4.10)	$i_c = i_{q,B} - (1 - i_{q,B})/(N_c \cdot \tan \varphi'_{found,d})$	(4.11)
$i_\gamma = (1 - H_{Ed}/(V_d + A' \cdot c'_{found,d} \cdot \cot \varphi'_{found,d}))^{m_B+1}$	(4.12)	$M_{Ed,dst} \leq M_{Ed,stab}$	(5.0)
$s \leq s_{tim}$	(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 p_j diskretnih vrednosti 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 opti-

mizacijskem 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.

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

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

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

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

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

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°.

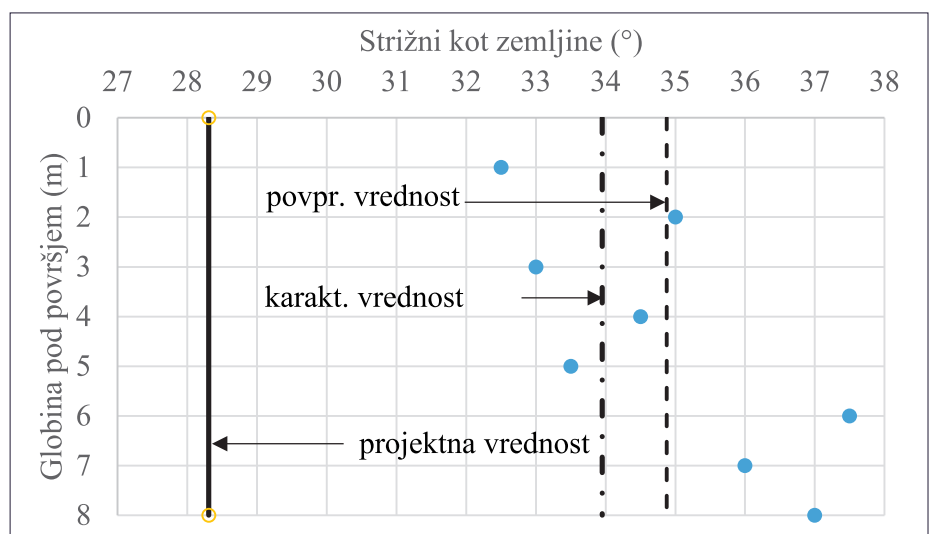
Schneiderjeva metoda (Orr, 1999) je bila uporabljena za izračun karakteristične vrednosti strižnega kota.

$$\varphi'_{k,ret} = \varphi'_{av,ret} - 0,5 \cdot \sigma = 34,8^\circ - 0,5 \cdot 1,85^\circ = 34,0^\circ \quad (9)$$

Podatki za projektiranje so vsebovali strižni kot zaledne zemljine $\varphi_{ret,k} = 34^\circ$, njeno prostorninsko težo $\gamma_{ret,k} = 18 \text{ kN/m}^3$, kohezijo $c_{ret,k} = 0 \text{ kPa}$ in interakcijski koeficient $k_{ret} = 2/3$. Strižni kot temeljnih tal znaša $\varphi_{found,k} = 34^\circ$, kohezija je $c_{found,k} = 0 \text{ kPa}$,

prostorninska teža je $\gamma_{found,k} = 18 \text{ kN/m}^3$ in interakcijski koeficient $k_{found} = 2/3$. Svetla vi-

šina težnostnega podpornega zidu znaša $H_s = 4 \text{ m}$, naklon zaledja pa $\beta = 14^\circ$. Na zaledje deluje spremenljiva obtežba $q_{Qk} = 5 \text{ kPa}$. 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_φ	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.

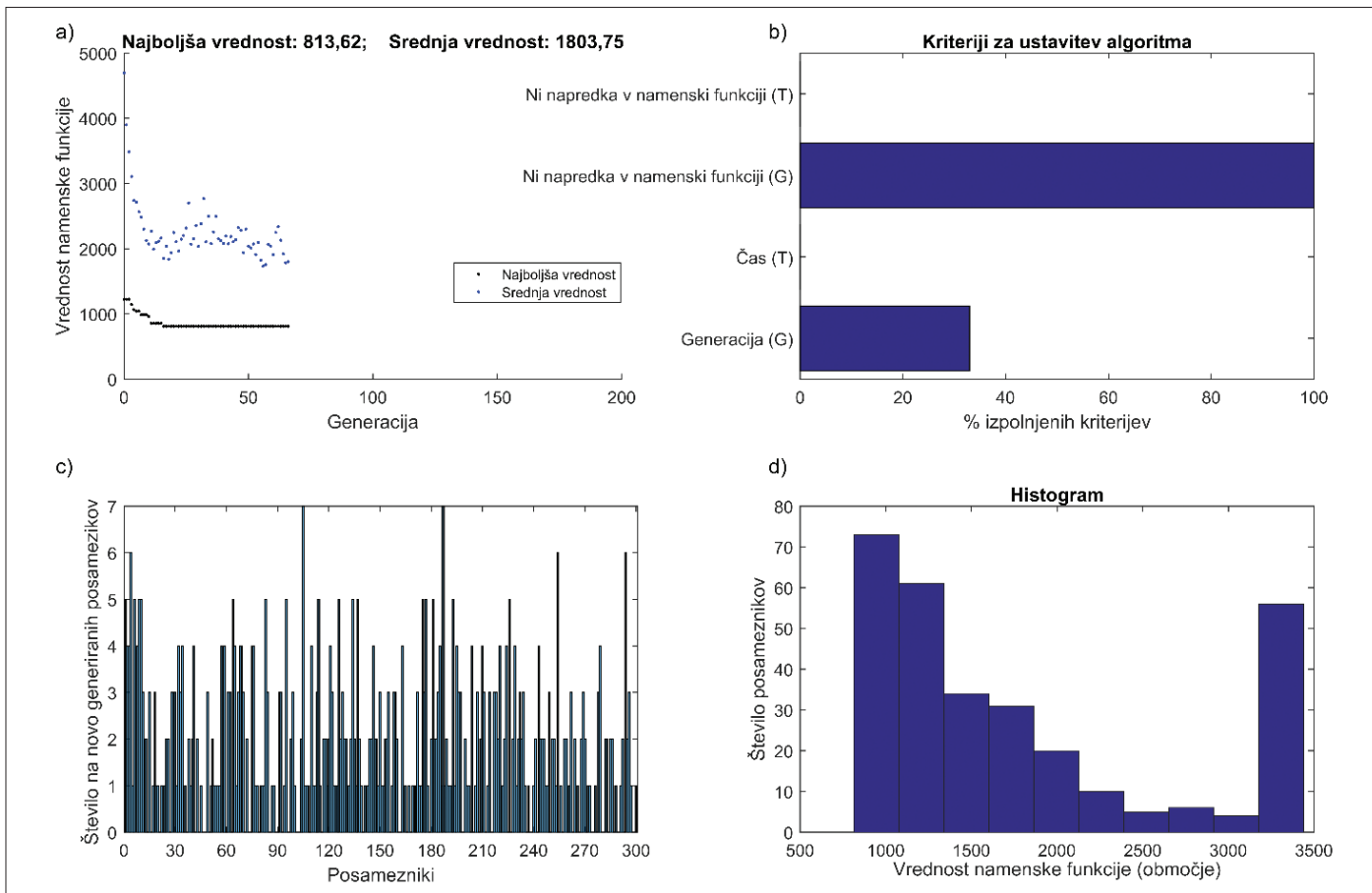
pristope, vsak z drugačnimi vrednostmi delnih količnikov varnosti v skladu z Evrokodom 7 (SIST, 2005).

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:	$M_{Ed,dst} \leq M_{Ed,stab}$ (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} (m ³ /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 se potem uporabljale za ustvarjanje naključnih vzorcev s pomočjo simulacije Monte Carlo markovskih verig (MCMV). Za generacijo vrednosti slučajnih spremenljivk φ_{rev} , φ_{found} , Y_{rev} , Y_{found} in q_i 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 zavzamejo naključne vrednosti in se lahko zapišeta kot:

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

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
$\varphi_{ret} = \varphi_{found} (^{\circ})$	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
$\varphi_{ret} = \varphi_{found} (^{\circ})$	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	
	Minimalna vrednost	0,5	
$k_{ret} = k_{found}$	Najverjetnejša vrednost	2/3	Trikotna razporeditev
	Maksimalna vrednost	1	

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

Na podlagi determinističnega modela in dela negotovosti smo izračunali tri različne verjetnosti porušitve za tri različne optimalne zasnove. Verjetnosti porušitve za tri optimalne

	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

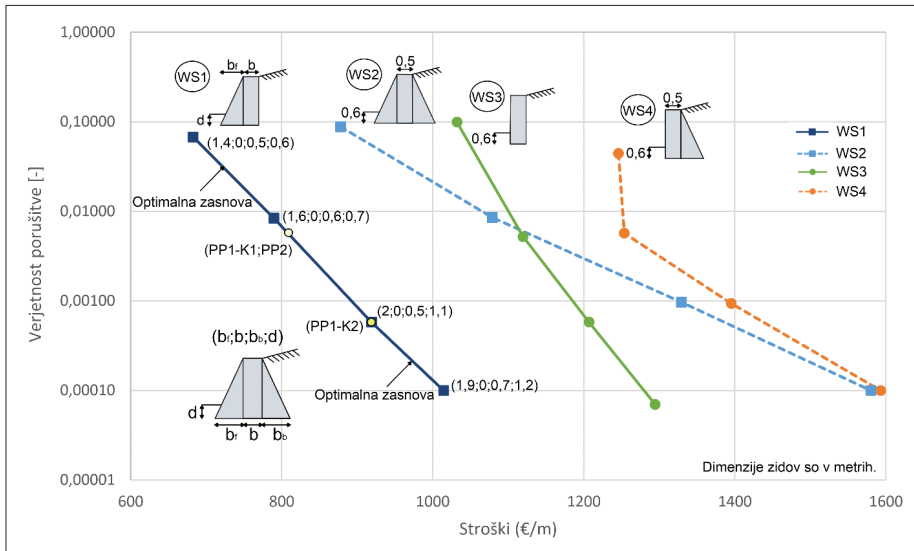
Preglednica 6 • Dimenzije in stroški za različne tipe zidov ob različnih verjetnostih porušitve.

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.

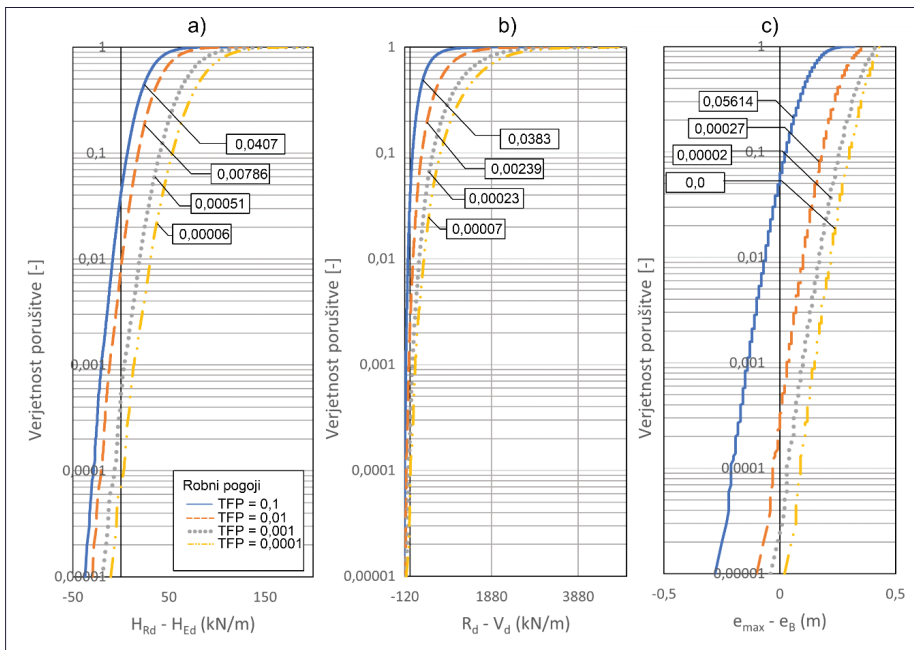
$$F = \begin{cases} M_1 \leq 0 \\ M_2 \leq 0 \\ M_3 \leq 0 \\ M_4 \leq 0 \\ M_5 \leq 0 \end{cases} = \begin{cases} H_{Rd} - H_{Ed} \leq 0 \\ e_{max} - e_B \leq 0 \\ R_d - V_d \leq 0 \\ M_{Ed,stab} - M_{Ed,dst} \leq 0 \\ s_{lim} - s \leq 0 \end{cases} \quad (11)$$

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 porušitve 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 porušitvam. 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-



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 prereзов 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 poru-

šitev 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 trajala 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.

- Khajezadeh 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.

PODALJŠANJE PRVEGA POMOLA V LUKI KOPER

Lokacija: **Prvi pomol Luke Koper**

Investitor: **Luka Koper d.d., Vojkovo nabrežje 38, 6501 Koper**

Projektanti: **JV Gravitass d.o.o., Elea IC d.o.o., IRGO Consulting d.o.o., Geoportal d.o.o. in OPI Inter d.o.o.**

Izvajalec: **Kolektor Koling d.o.o. s partnerjema Grafist d.o.o. in Adriaing d.o.o.**

Projekt podaljšanja prvega pomola zajema izgradnjo operativne obale dolžine 98,5 metra in širine 34,4 metra ter izgradnjo zalednih skladiščnih površin na južni strani pomola v velikosti 24.830 m². Celotna konstrukcija sloni na 770 jeklenih pilotih, povprečne dolžine 65 metrov, na katerih so nameščene betonske plošče. Dela so potekala v skladu z omejitvami okoljevarstvenega soglasja, kar pomeni, da so se izvajala le med delavniki, med 7. in 18. uro, vendar največ dve uri dnevno. Operativni del obale je bil zaključen junija 2021, zaledne površine pa bodo zaključene predvidoma do oktobra 2022.



Slika 1 • Podaljšanje prvega pomola v Luki Koper, januar 2021.

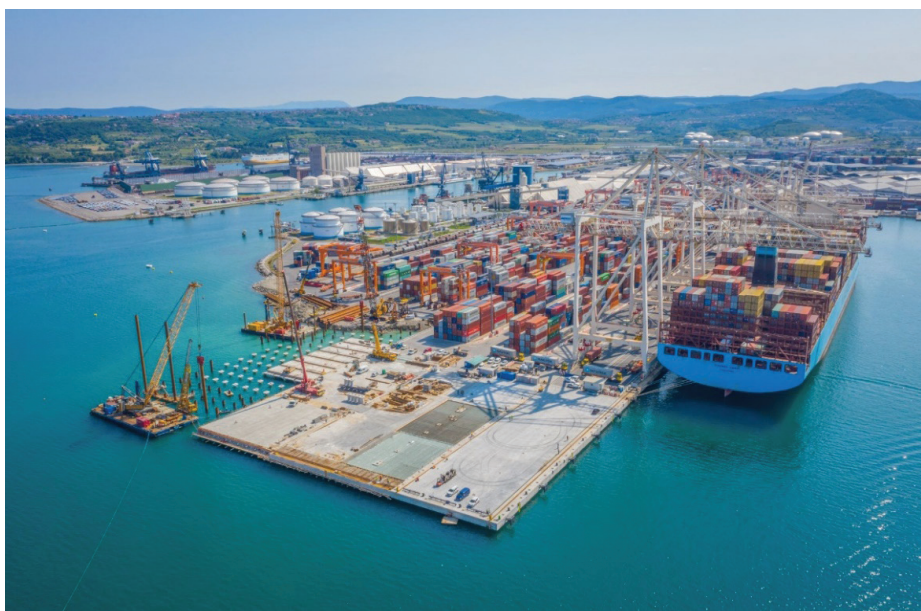


Slika 2 • Podaljšanje prvega pomola v Luki Koper, marec 2021.

Dolžina prvega pomola na južni strani, ki je namenjena pretovoru kontejnerjev, bo po izgradnji podaljška znašala 695 metrov. Po izvedenih delih bo imel kontejnerski terminal kapaciteto skoraj 1,3 milijona TEU letno, z optimizacijo procesov dela na terminalu pa se bo kapaciteta povečala na 1,5 milijona TEU. S tem bo zagotovljena dolgoročna konkurenčnost najpomembnejšega terminala v Luki Koper.



Slika 3 • Podaljšanje prvega pomola v Luki Koper, junij 2021.



Slika 4 • Podaljšanje prvega pomola v Luki Koper, junij 2021.

Luka Koper je za to naložbo, katere vrednost znaša 45,6 milijona evrov, pridobila tudi evropska sredstva v okviru projekta NAPA4CORE (iz programa Instrument za povezovanje Evrope).

Foto: arhiv Luke Koper d.d., fotograf Kristjan Stojakovič

NOVI DIPLOMANTI

UNIVERZA V LJUBLJANI, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO IN GEODEZIJO

II. STOPNJA – MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM GRADBENIŠTVO (smeri Gradbene konstrukcije, Geo- tehnika-hidrotehnika, Nizke gradnje)

Jerneja Čehovin, Uporaba generatorja valov za določanje lastnosti in dosega valov na nagnjeni obali, mentor izr. prof. dr. Dušan Žagar, somentor doc. dr. Gorazd Novak; <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=127864>

Luka Mehle, Primerjava metod za izračun hrupa železniškega prometa CNOSSOS-EU in RMR, mentor prof. dr. Zvonko Jagličič, somentorica asist. dr. Darja Šemrov; <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=127965>

Mojca Sevšek, Forenzične preiskave poplavnih dogodkov kot osnova za sanacijo njihovih posledic, mentor doc. dr. Primož Banovec, somentor asist. dr. Matej Kušar; <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=127963>

II. STOPNJA – MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM STAVBARSTVO

Kaja Moličnik Turk, Analiza vpliva obnašanja uporabnikov na kakovost notranjega okolja in rabe energije v stavbah, mentorica doc. dr. Mateja Dovjak, somentor izr. prof. dr. Uroš Stritih; <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=127860>

II. STOPNJA – MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM VODARSTVO IN OKOLJSKO INŽENIRSTVO

Špela Kne, Idejne rešitve odvodnje in čiščenja odpadnih voda naselij na levem bregu reke Save med Dvorsko vasjo in Posavcem, mentor doc. dr. Mario Krzyk; <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=128116>

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

II. STOPNJA – MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM GRADBENIŠTVA

Miha Blatnik, Projekt 15 nadstropne poslovne jeklene stavbe z dvoetažno armiranobetonsko garažo, mentor doc. dr. Tomaž Žula, somentorja prof. dr. Stojan Kravanja in doc. dr. Primož Jelušič; <https://dk.um.si/lzpisGradiva.php?id=79252>

Anja Ježovita, Analiza vhodnih podatkov potrebnih za uporabo računalniških programov za projektiranje cest, mentor izr. prof. dr. Marko Renčelj; <https://dk.um.si/lzpisGradiva.php?id=79288&lang=slv>

III. STOPNJA – DOKTORSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM GRADBENIŠTVA

Denis Imamović, Razvoj novih končnih elementov za numerično modeliranje prečno razpokanih vitkih nosilcev z linearno spreminjajočo se širino in/ali višino pravokotnega prereza, mentor izr. prof. dr. Matjaž Skrinar, somentor izr. prof. dr. Iztok Peruš; <https://dk.um.si/lzpisGradiva.php?id=78769>

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

KOLEDAR PRIREDITEV

10.-12.7.2021

4th International Conference on Civil Engineering and Architecture

Spletna konferenca
www.iccea.org/index.html

19.-21.7.2021

GSCAEE 2021 - Global Summit on Civil, Architectural and Environmental Engineering

Barcelona, Španija
www.thescientistft.com/civil-structural-environmental-engineering/

22.-24.9.2021

S.ARCH 2021 - 8th International Conference on Architecture and Built Environment with Architecture AWARDS

Spletna konferenca
Rim, Italija
www.s-arch.net/

24.-26.9.2021

ICSCE 2021 - 5th International Conference on Structural and Civil Engineering

Barcelona, Španija
www.icsce.org

27.-29.9.2021

International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering

Lyon, Francija
www.olcinternational.com/civil-engineering/index.php

30. 9. 2021

8. posvetovanje slovenskih geoteknikov in 21. Šukljetov dan

Spletna konferenca
<http://sloged.si/>

14.-16.10.2021

ICCEN 2021 - 9th International Conference on Civil Engineering

Singapur
www.iccen.org/index.html

2.-6.11.2021

5th World Landslide Forum

Kjoto, Japonska
<http://wlf5.iplhq.org/>

4.11.2021

Strokovni posvet Društva za ceste severovzhodne Slovenije "Slovensko gradbeništvo pred izzivi izgradnje velikih prometnih infrastrukturnih projektov"

Maribor, Slovenija
www.dcm-svs.si

1.-4.12.2021

11th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar

Valletta, Malta
www.iwagpr2021.eu/

23.-25.2.2022

DFI-PFSF Piling & Ground Improvement Conference 2022

Sydney, Avstralija
www.dfi.org/dfieventlp.asp?13385

27.-29.3.2022

ICOCE 2022 - 6th International Conference on Civil Engineering

Spletna konferenca
Singapur
www.icoce.org/

1.-6.5.2022

ICSMGE 2022 - 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering

Sydney, Avstralija
<https://www.icsmge2022.org/>

20.-24.6.2022

ICOSSAR 2021-2022, 13th International Conference on Structural Safety & Reliability

Šanghaj, Kitajska
www.icossar2021.org/

5.-7.9.2022

17th Danube - European Conference on Geotechnical Engineering

Bukarešta, Romunija
www.issmge.org/events/17th-danube-european-conference-on-geotechnical-engineering

27.-29.6.2022

IS-Cambridge 2022 - 10th International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground

Cambridge, Združeno kraljestvo Velike Britanije in Severne Irske
www.is-cambridge2020.eng.cam.ac.uk/

17.-21.9.2023

12th International Conference on Geosynthetics

Rim, Italija
www.12icg-roma.org

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