

**АНАЛИЗА МОГУЋНОСТИ ПРИМЕНЕ ГАБИОНСКИХ ЗИДОВА ЗА
САНАЦИЈУ КЛИЗИШТА - СТУДИЈА СЛУЧАЈА КЛИЗИШТЕ НА ПУТУ
СТОЛИЦЕ - КРУПАЊ НА km 0+578,6 - 0+605,90
ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF APPLICATION OF GABION WALLS FOR
LANDSLIDE REHABILITATION - CASE STUDY OF A LANDSLIDE ON THE
ROAD STOLICA - KRUPANJ AT km 0+578.6 - 0+605.90**

Јована Цветковић¹, Никола Живановић², Вукашин Рончевић², Ненад Шурјанац¹,
Стеван Торлука³

¹ Институт за шумарство, Београд

² Универзитет у Београду, Шумарски факултет

³ Институт ИМС А.Д., Београд

Извод

У овом раду, анализа стабилности, пре и после примене техничких решења, је вршена на клизишту које се налази на релацији Столице – Крупањ, у западном делу Републике Србије. Клизиште је захватило и део саобраћајнице тако да је кретање саобраћаја било отежано. Анализирано је више решења потпорног зида од габионских корпи и нивелационог решења падине која је захваћена клизиштем. Одабир оптималног решења заснован је на испуњености два критеријума: стабилност конструкције и стабилност целокупне падине. Стабилност пре примене техничких мера и генерална стабилност падине са примењеним мерама испитивана је методом Janbu-a, а локална стабилност методом Bishop-a. Провера стабилности зида извршена је у погледу претурања и хоризонталног померања. Ове анализе извршене су применом софтвера GEO5 (Geotechnical software). Аналитичким путем извршена је и анализа носивости земљишта испод потпорних зидова методом Brinch Hansen-a. Два решења испунила су задате критеријуме, решења I са фактором сигурности $F_s = 1,81$ и решење II $F_s = 1,75$. Анализа носивости земљишта показала је да темељено тло може безбедно да прими оптерећење од конструкције у случају оба решења. За оптимално решење санације клизишта одабрано је решење II.

Кључне речи: GEO5, Габионски потпорни зид, Bishop, Janbu, Brinch Hansen.

Abstract

In this paper, the stability analysis before and after the application of technical solutions was performed on a landslide located on the Stolica-Krupanj route, in the western part of the Republic of Serbia. The landslide also affected part of the road, so the movement of traffic was difficult. Several solutions of the gabion retaining wall and the leveling of the slope affected by the landslide were analyzed. The selection of the optimal solution is based on the fulfillment of two criteria: the stability of the structure and the stability of the entire slope. The stability before the application of technical measures and the general stability of the slope with the applied measures were examined using the Yanbu method, and the local stability using the Bishop method. The stability of the wall was checked in terms of overturning and horizontal movement. These analyzes were performed using GEO5 software (Geotechnical software). Analytical analysis of the load-bearing capacity of the soil under the retaining walls was carried out using the Brinch Hansen method. Two solutions met the set criteria, solution I with a safety

¹ e-mail: jovana.cvetkovic@forest.org.rs

factor $F_s = 1.81$ and solution II $F_s = 1.75$. The analysis of the bearing capacity of the soil showed that the foundation soil can safely receive the load from the structure in the case of both solutions. Solution II was selected for the optimal solution for landslide rehabilitation.

Keywords: GEO5, Gabion retaining wall, Bishop, Janbu, Brinch Hansen.

УВОД

Настанк клизишта условљен је геоморфологијом терена, литолошким саставом, хидрогеолошким и хидролошким условима, присуством вегетације као и антропогеном активношћу. Такође, климатске промене могу утицати на појаву клизишта (Seneviratne et al., 2012). Gariano и Guzzetti (2016) наводе да је у 80% анализираних публикација утврђена узрочна веза између појаве клизишта и климатских промена. Ипак, Anderson, Holcombe (2013) и Froude, Petley (2018) истичу да антропогене активности у виду урбанизације, сече шума, минирања итд. много више утичу на појаву клизишта него климатске промене.

Изградњом и реконструкцијом саобраћајница ремети се стабилност падина и косине поред пута. Врло често падине и косине остају незаштићене од утицаја ерозије. Овакав утицај антропогеног фактора често може да буде узрок гравитационог покретања земљишта, нарочито појаве површинске ерозије као и формирање клизишта (Marković et al., 2019).

Постоје различите мере, интервентне, превентивне, привремене и дефинитивне, које се могу предузети да би се спречило, привремено или трајно зауставило клизиште (Todorović, 1991, Gajić, 2017, Spasić et al., 2018, Cvetković et al., 2022). Један од примера дефинитивног заустављања покренуте земљане масе јесте примена потпорних конструкција у виду габиона (Ayub et al., 2021). Потпорни габионски зидови представљају економично и еколошки прихватљиво решење (Chikute, Sonar 2021). Габиони, захваљујући својој флексибилности, имају велику примену (Campelo et al., 2018). Могу се користити као попречни објекти за уређење бујичних токова, за облагање корита бујичних река, одбрану од поплава, за санацију јаруга, стабилизацију падина и косина, контролу ерозије, мелиорација земљишта итд. (Klingeman et al., 1984, Evette et al., 2009, Utmani et al., 2019, Zuhaira et al., 2023, Liu et al., 2023). Често се користе у санацији и стабилизацији пројектованих косина путева (Nares, Nirula, 2005, Bhandari, 2006). Употреба габионских конструкција у виду потпорних зидова за заштиту саобраћајница има неколико предности: еластичност корпи која се прилагођава терену; потпорна конструкција представља и својеврсну дренажу (Marwa, Kimaro 2005). На трајност ових конструкција утиче начин уградње, квалитет жице као и квалитет камена које се користи за испуну габионских корпи. С обзиром на услове средине у којима се примењује, камен мора задовољити одређене критеријуме (Winkler, 1973, Rončević et al., 2018). Такође постоје и дефинисани услови које жица за габионске конструкције мора да испуни (Mitrović, 2014).

За анализу стабилности падина и косина примењују се многобројне методе како што су: Fellenius-ова метода, Шведска модификована метода, Bishop-ова метода, метода Janbu-a, метода Nonveiller-a и др., као и многобројни модели и софтверски пакети који поред ових метода пружају могућност анализе стабилности потпорних конструкција: Slide, HYCAN, Phase 2, FLAC, Plaxis (Kanungo et al., 2013, Wang et al., 2023, Rubay, Al

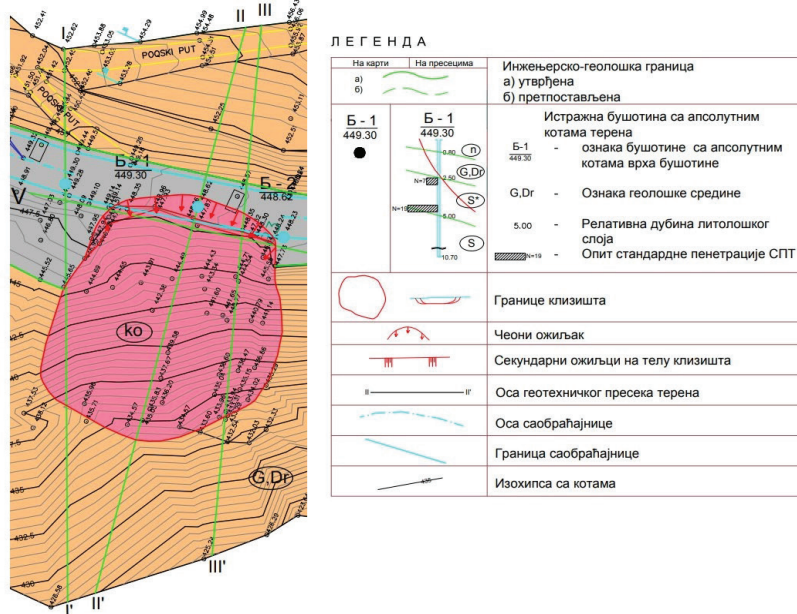
Nakeem, 2023, Sreelakshmi et al., 2023, Seghir et al., 2023). Један од програма за испитивање стабилности потпорних конструкција, падина и косина је и GEO5 (Fine spol. s r.o, Češka).

У овом раду је представљен је предлог решења за санацију клизишта на регионалном путу Столице – Крупањ кроз анализу више решења габионског потпорног зида са нивелацијом терена. Као предлог решења за санацију клизишта и за заштиту саобраћајнице дате су две варијанте. Циљ овог рада је да се прикаже могућност примене потпорних зидова од габиона у санацији клизишта.

МАТЕРИЈАЛ И МЕТОД

Материјал

Истраживано подручје налази се у Западној Србији на долинским странама реке Брштице. Нестабилна падина односно клизиште угрозило је регионални пут Р-211 Столице - Крупањ на km 0+578,6 - 0+605,90. Деформације проузроковане покретањем су обухватиле конструкцију пута и косину испод пута (слика 1).



Слика 1. Означено клизиште на инжењерско-геолошкој карти са легендом (Извор: Елаборат, 2011)

Figure 1. Marked landslide on the engineering-geological map with legend (Source: Elaborat. 2011)

Литолошки слојеви, геометрија падине, геотехнички профил, резултати физичко-механичких параметара који су коришћени за анализу и прорачуне, преузети су из „Елабората о геотехничким условима санације клизишта“ - у даљем тексту Елаборат (2011).

Просечна дужина клизишта је око 30,0 m, а измерена просечна ширина око 20,0 m. Дубина до клизне равни у његовом централном делу износи између 4,0 и 4,5 m. А висинска разлика од чеоног ожилжа до ножице је 15,0 m.

Истражним бушењем, три бушотине (слика 1), утврђено је да покренути материјал чине: насип трупа пута, делувијално прашинасто глиновити до дробински површински покривач, физичко-хемијски измењена повлатна зона глиненних шкриљаца у подлози. Вредности физичко-механичких параметара литолошких слојева терена које су добијене истражним бушењем приказане су у табели 1.

Табела 1. Геотехнички подаци литолошких слојева усвојени за прорачун
Table 1. Geotechnical data of lithological layers adopted for calculation

	γ [kN/m ³]	φ_{usl} [°]	φ_r [°]	φ [°]	c [kPa]	c_r [kPa]	Mv [kPa]
Насип и коловозна конструкција (n)	21,0			32	0,0		$25 \cdot 10^3$
Колувијум (ko)	19,0	28	15	22	5,0	3,0	$5 \cdot 10^3$
Глина са дробином¹ (G, Dr)	18,5		18	22 – 28	5,0 – 20,0	7,0	$1-3 \cdot 10^4$
Глинени шкриљци (S*)	21,0		15 – 22	25	22,0	3,0 - 4,0	8
Глинени шкриљци (S)	23,0			32	30,0		$4 \cdot 10^4$

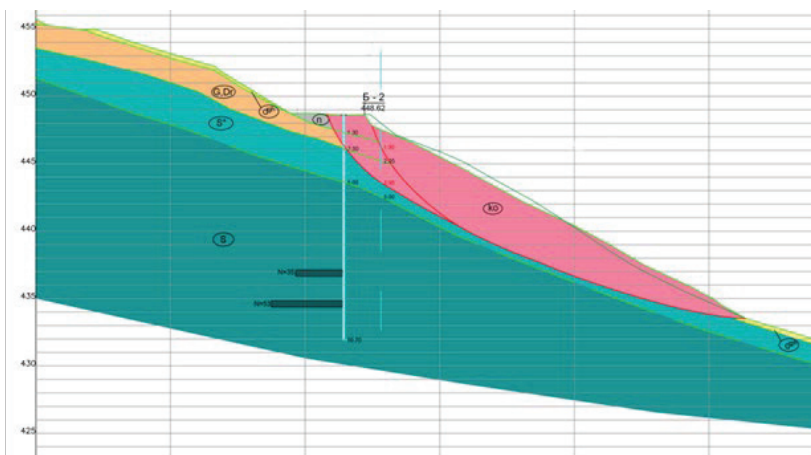
Легенда: 1 – глина са дробином до дробина кречњака у прашинасто глиновитој основи; γ – запреминска

тежина; φ – угао унутрашњег трења; c – кохезија; Mv – модул стишљивости; φ_{usl} – вредност мобилисаног угла

трења одређена повратном анализом; φ_r – резидуална вредност параметра отпорности на смицање одређена у

лабораторијским условима; c_r – резидуална вредност кохезије добијене у лабораторијским условима.

Између три постављена профила (слика 1), изабран је профил II-II' за потребе анализе стабилности падине, према критеријуму позиције у односу на осу клизања, највеће дужине у правцу клизања и најстрмијег нагиба (слика 2).



Слика 2. Карактеристични геотехнички пресек терена II-II' (Извор: Елаборат, 2011)
 Легенда: n – насип и коловозна конструкција; ko – колувијум, G, Dr – глина са дробином, S* – глинени шкриљци, S – глинени шкриљци; dgh – глина хумузирана
 Figure 2. Characteristic geotechnical section of terrain II-II' (Source: Elaborat, 2011)

Усвојени геометријски параметри профила коришћени у анализи стабилности су:

- Дужина - 30,0 m;
- Ширина - 20,0 m;
- Дубина до клизне равни у централном делу клизишта - 4,0 – 4,5 m;
- Висинска разлика (од врха чеоног ожиљка до ножичног дела) - 15,0 m;
- Нагиб косине - 28°.

На одабраном профилу издвојене су следеће геотехничке средине: насип и коловозна конструкција, колувијум, глина са дробином и глинени шкриљци.

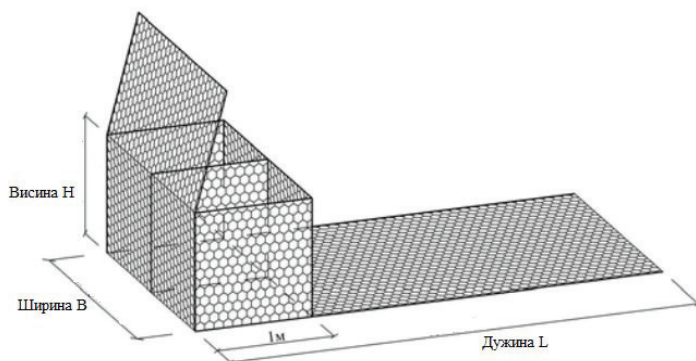
Насип и коловозна конструкција (n) – до 0,10 m је асфалтни застор а испод је дробина кречњака у прашинасто песковитој основи сиво беле боје, дебљина овог слоја варира између 0,2 и 1,0 m. Колувијум је средина захваћена клизиштем. У горњем делу просечна дебљина колувијума је око 3,5 m а у доњем 1,5 m и мање. Дебљина глине са дробином (G, Dr) је у распону од 1,1 до 2,2 m. Глинени шкриљци (S*) су физичко-хемијски измењени до честице глине, прашине, песка, дробине глинаца и пешчара. Њихова дубина варира између 0,5 и 3,0 m. Глинени шкриљци (S) су графит плаве боје, масног опипа, средње пластичности, полутврдог конзистентног стања; садржи ретке интеркалације пешчара сиво беле боје. Њихова дебљина је преко 3 m.

По завршеном бушењу, подземна вода у терену није утврђена (2011). У погледу водопрпусности, у контактним зонама литолошких средина различите водопрпусности, утврђена су већа провлажавања, знатна прслинска издељеност, гњечивост и дробљивост материјала.

Метод

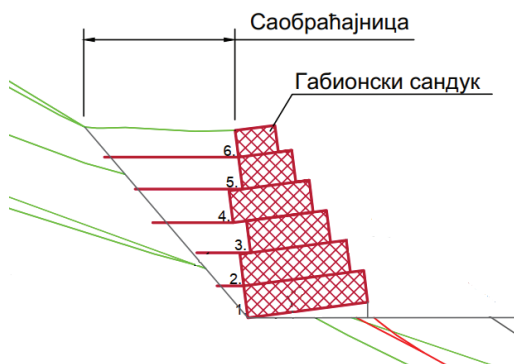
Метод рада састоји се из анализе стабилности падине и увођења техничких мера у циљу санације клизишта и заштитите саобраћајнице.

За санацију клизишта анализирано је више потенцијалних решења од којих је у раду Svetković et al. (2022) приказана могућност санације клизишта потпорном конструкцијом од бетона и од тла и геомреже, док је за потребе овог рада анализирано више решења потпорног зида од габионских корпи и нивелационог решења падине која је захваћена клизиштем (терасирање). Коришћене су различите димензије габионских корпи као и њихов рапоред и положај у конструкцији. Тип габионских сандука који је коришћен у анализи је са продуженим жичаним делом у виду анкера (слика 3). За сва анализирана решења конструкција је пројектована непосредно испод пута (слика 4).



Слика 3. Скица габионског сандука са анкером (Извор: <https://docplayer.ru>)

Figure 3. Sketch of a gabion box with an anchor (Source: <https://docplayer.ru>)



Слика 4. Положај габионског зида у односу на саобраћајницу (Извор: Оригинал)

Figure 4. The position of the gabion wall in relation to the road (Source: Original)

Коначна решења изабрана су на основу испуњености два критеријума: критеријум стабилности конструкције (формуле 3, 4) и критеријум стабилности целокупне падине (формуле 1, 2).

Све анализе стабилности падине, димензионисања зидова од габиона, локалне стабилности косина са потпорним зидовима, провера стабилности падине са потпорним конструкцијама и пројектованим косинама (генерална стабилност падине) спроведене су у софтверском пакету Geotechnical Software GEO5 (Fine spol. s r.o, Češka).

У раду су примењене методе граничне равнотеже: метода Janbu-a и метода Bishop-a.

Стабилност падине пре примене решења анализирана је методом Janbu-a (Janbu, 1973) због постојања неправилне равни клизања дефинисане приликом геотехничких истраживања (формула 1). Генерална стабилност падине (са примењеним решењима) такође је испитивана методом Janbu-a.

$$E_{i+1} = \frac{[(w_l - Fy_i) \cdot \cos\alpha_i - (K_h \cdot W_i - Fx_i) \cdot \sin\alpha_i - U_i + E_i \cdot \sin(\alpha_i - \delta_i)] \cdot \frac{\tan\varphi_i}{FS} + \sin(\alpha_i - \delta_{i+1}) \cdot \frac{\tan\varphi_i}{FS} + \cos(\alpha_i - \delta_{i+1})}{\frac{c_i}{FS} \cdot \frac{b_i}{\cos\alpha_i} - (W_i - Fy_i) \cdot \sin\alpha_i - (K_h \cdot W_i - Fx_i) \cdot \cos\alpha_i + E_i \cdot \cos(\alpha_i - \delta_i)} \quad (1)$$

Где је (слика 5):

W_i - тежина блока, укључује и вертикалну компоненту сила земљотреса (K_v);

$K_h \cdot W_i$ - хоризонтална сила инерције која представља утицај земљотреса, K_h је фактор хоризонталног убрзања током земљотреса;

Ni - нормална сила на површини клизања;

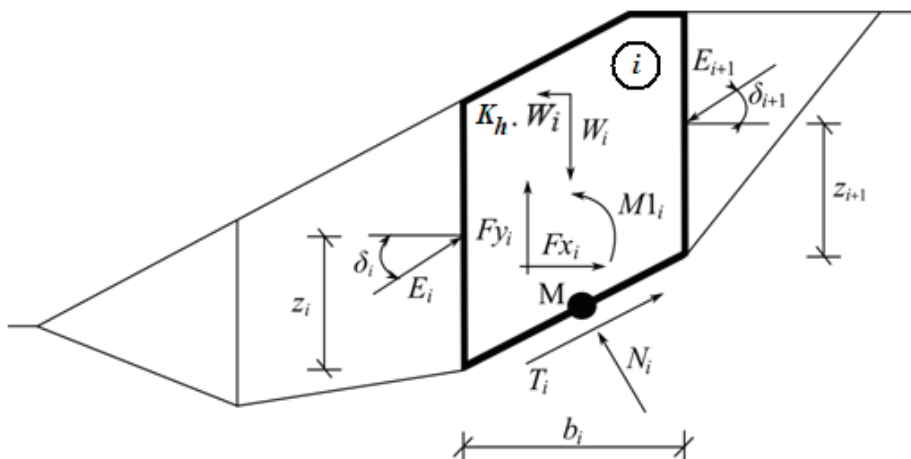
T_i - смичућа сила на површини клизања;

Е_i, Е_{i+1} - силе које врше суседни блокови, они су нагнути у односу на хоризонталу под углом δ_i односно δ_{i+1} и леже на висини z_i одн. z_{i+1} изнад површине клизања;

F_{xi} , F_{yi} - друге хоризонталне и вертикален силе које делују на блок;

Момент M_{li} од сила F_{xi} , F_{yi} које ротирају око тачке M која је центар овог сегмента површине клизања;

U_i - резултанта порног притиска на сваком сегменту површине клизања.



Слика 5. Статичка шема - Јанбу метода (Извор: GEO5 2022 – User Guide)

Figure 5. Static scheme - Yanbu method (Source: GEO5 2022 – User Guide)

Фактор сигурности за капиталне објекте износи $F_s = 1,3-1,5$, а за остале објекте $F_s = 1,1-1,3$ (Todorović, 1991), с обзиром да се ради о регионалном путу, усвојена вредност фактора сигурности износи $F_s = 1,5$ када се сматра да је падина стабилна.

Локална (парцијална) стабилност пројектованих косина испитана је методом Bishop-а (Bishop, 1955). Метода A.W. Bishop-а примењује се код испитивања стабилности косина и падина када је површина клизања у облику кружног лука. Фактор сигурности методом Bishop-а (GEO5 – User's Guide, 2014) се добија кроз итерацију следеће формуле:

$$F_s = \frac{1}{\sum_i w_i \cdot \sin \alpha_i} \cdot \sum_i \frac{c_i \cdot b_i + (W_i - u_i \cdot b_i) \cdot \tan \varphi_i}{\cos \alpha_i + \frac{\tan \varphi_i \cdot \sin \alpha_i}{F_s}} \quad (2)$$

Где је:

w_i - порни притисак унутар блока

c_i, φ_i - ефективне вредности кохезије и угла унутрашњег трења

W_i - тежина блока

α_i - нагиб површине клизања блока

b_i - хоризонтална ширина блока

Димензионисање зидова је извршено анализом нормалних и смичућих (тангенцијалних) сила на контакту конструкције и темељног тла. Провера стабилности је урађена на основу метода прорачуна стабилности потпорне конструкције на хоризонтално померање (4) и на претурање (3).

Провера стабилности зида на претурање се добија на основу следеће формуле (GEO5 2022 – User Guide):

$$\frac{M_{res}}{M_{ovr}} > SF_o \quad (3)$$

Где је:

M_{ovr} – момент претурања (ротационо покретање);

M_{res} – момент отпора (реактивне силе);

SF_o – фактор сигурности на претурање.

Провера стабилности на клизање се испитује на основу (GEO5 2022 – User Guide):

$$\frac{[(N \tan \varphi + c(d - 2e) \div \mu + F_{res})]}{H} = SF_s \quad (4)$$

Где је:

N – нормална сила у темељној стопи;

φ – угао унутрашњег трења;

c – кохезија тла;

d – ширина темељне стопе;

e – ексцентричност резултатне;

H – смичућа сила у темељној стопи;

F_{res} – сила отпора (као последица геоармирања и преклапања мреже);

SF_s – фактор сигурности на клизање;

μ – коефицијент редукције на контакту темеља и темељног тла.

Хоризонталне компоненте сила су укључене у силу смицања и момент претурања, док су вертикалне компоненте сила укључене у нормалну силу и момент отпора. Силе и моменти отпора такође обухватају хоризонталне силе од геоарматуре и делова мрежа које се преклапају. Притисак узгона је обухваћен кроз анализу момента претурања.

Аналитичким путем, извршена је анализа граничне (q_f) носивости земљишта испод конструкција по методи Бринч – Хансена (Brinch Hansen) (Hansen, 1970).

$$q_f = cN_c s_c d_c i_c + \gamma_1 D_f N_q s_q d_q i_q + 0,5\gamma_2 B N_\gamma s_\gamma d_\gamma i_\gamma \quad [\text{kN/m}^2] \quad (5)$$

Где су:

Коефицијенти N_q , N_c , N_γ - фактори носивости;

Коефицијенти d_q , d_c , d_γ - фактори дубине фундирања;

Коефицијенти s_q , s_c , s_γ - фактори облика темеља;

Коефицијенти i_q , i_c , i_γ - фактори закошености;

γ_1 и γ_2 су запреминске тежине изнад и испод коте фундирања;

D_f је ефективна дубина фундирања, а B ширина темеља, c – кохезија.

Дозвољена носивост темељног тла (q_a) извршена је применом глобалног и парцијалног фактора сигурности.

РЕЗУЛТАТИ

Стабилност покренуте падине анализирана је на одабраном карактеристичном геотехничком пресеку терена II-II' применом резидуалних вредности параметра отпорности на смицање $\varphi_r = 15^\circ$ и $c_r = 3$ kPa. Добијена вредност критичног фактора сигурности износи $F_s = 0,86$. Анализирана падина није стабилна јер није испуњен услов фактора сигурности $F_s > 1,3$.

Решења која су испунила критеријуме стабилности зида и целокупне падине су два потпорна зид од габиона - решење I и II.

У табели 2 приказане су усвојене меродавне вредности физичких својстава коришћених материјала, за потребе прорачуна.

Табела 2. Меродавне вредности физичких својстава ломљеног камена за испуну жичане корпе

Table 2. Official values of the physical properties of crushed stone for filling the wire basket

Материјал	Физичка особина	Усвојена вредност
Ломљени камен за испуну	Запреминска тежина	$\gamma = 21 \text{ kN/m}^3$
	Угао унутрашњег трења	$\varphi = 42^\circ$
	Кохезија	$c = 0,0 \text{ kPa}$
Жичана корпа (габион)	Затезна чврстоћа мреже	$R_t = 53 \text{ kN/m}$
	Размак вертикалних преграда	$v = 0,30 \text{ m}$
	Чврстоћа споја	$R_s = 60 \text{ kN/m}$

Усвојено максимално оптерећење од саобраћаја на регионалном путу, за прорачун стабилности габионског зида и косине, износи 120 kN/m^2 .

Решење I – Потпорни зид од габиона

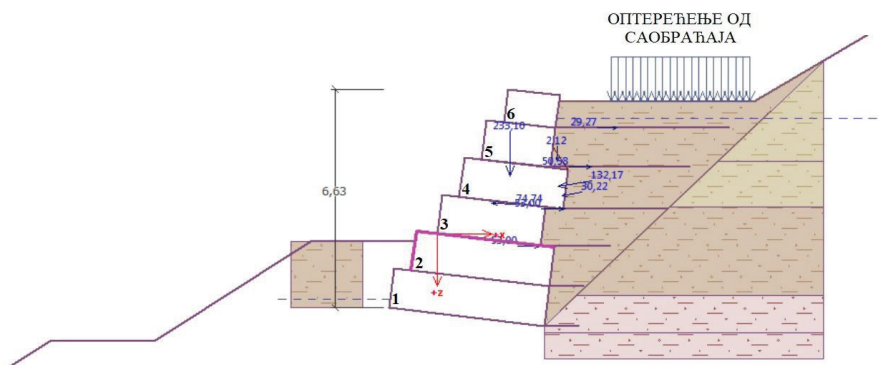
Стабилност габионског потпорног зида - решење I, је испитана за случај када је конструкција на темељном контакту постављена под углом од $\alpha = 7^\circ$ у односу на хоризонталу. Висина зида је 6,6 m (од коте круне 449 до коте дна темеља 442,4), ширина најшире габионске корпе која је уједно и део темеља објекта износи 4,5 m.

На слици 6 приказан је попречни пресек зида са распоредом габионских корпи. Ово решење се састоји од 6 редова корпи различитих димензија. У табели 3 представљени су усвојени геометријски параметри са којима је извршен прорачун испитивања стабилности потпорне конструкције од габиона.

Табела 3. Димензије габионских корпи код решења I
Table 3. Dimensions of gabion baskets in solution I

Ред габионске корпе	Ширина корпе b [m]	Висина корпе h [m]	Поравнање ¹ a [m]	Дужина анкера L [m]
6.	1,5	1,0	0,50	5,0
5.	2,0	1,2	0,50	4,0
4.	3,0	1,2	0,50	3,0
3.	3,0	1,2	0,60	2,0
2.	4,0	1,2	0,50	1,0
1.	4,5	1,2	/	1,0

1 – дужина која представља колико је одређени габионски сандук померен ка унутра у односу на спољну вертикалу претходног



Слика 6. Изглед габионског зида - решење I - на попречном пресеку (Извор: Оригинал)
Figure 6. Appearance of the gabion wall - solution I - on the cross section (Source: Original)

Резултати провере стабилноста габионског зида - решење I на превртање и хоризонтално померање приказани су у табели 4:

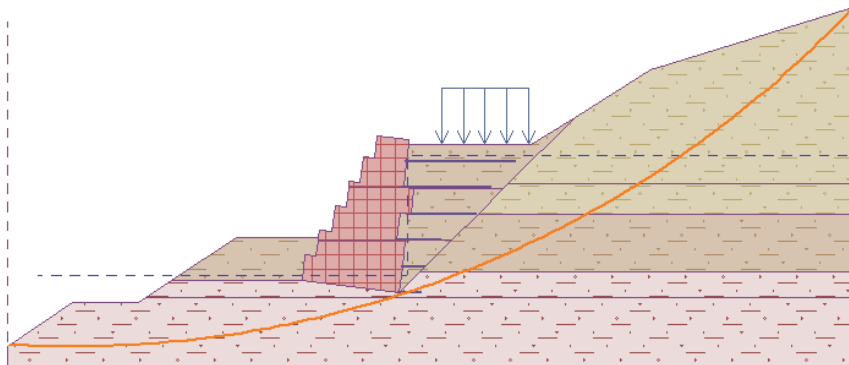
Табела 4. Провера стабилности потпорног зида у софтверу GEO5
 Table 4. Checking the stability of the retaining wall in the GEO5 software

Провера стабилности габионског зида на претурање	Момент отпора	$M_{res} = 1930,10 \text{ kN/m}$
	Момент претурање	$M_{ovr} = 947,37 \text{ kN/m}$
	Фактор сигурности	$F_s = 2,04$
Провера стабилности габионског зида на хоризонтално померање	Хоризонтална сила отпора	$H_{res} = 611,13 \text{ kN/m}$
	Хоризонтална сила деловања	$H_{res} = 611,13 \text{ kN/m}$
	Фактор сигурности	$F_s = 1,57$

Добијене вредности фактора сигурности на претурање и хоризонтално померање испуњавају услов стабилности, $F_s = 2,04 > 1,50$ и $F_s = 1,57 > 1,50$. Испуњењем наведених услова стабилности потпорни зид је стабилан у погледу претурања и хоризонталног померања на темељном контакту.

Део конструкције који трпи највеће затезање је изнад корпе број 2.

Локална стабилност новоформираног дела косине са габионским зидом (решење I) анализирана је за већи број клизних равни применом методе Bishop-a. У табели 5 приказане су вредности сила за клизну раван са најмањом вредношћу фактор сигурности $F_s = 2,08$ (слика 7). С обзиром да је $F_s = 2,08 > 1,50$ испуњен је услов стабилности те је косина стабилна.



Слика 7. Критична клизна равна (Извор: Оригинал)

Figure 7. Critical sliding plane (Source: Original)

Табела 5. Локална стабилност – решење I

Table 5. Local stability - solution I

Збир активних сила	$F_a = 1\,233,73 \text{ kN/m}$
Збир пасивних сила	$F_p = 2\,565,09 \text{ kN/m}$
Момент померања	$M_a = 60\,686,95 \text{ kNm/m}$
Момент отпора	$M_p = 126\,176,64 \text{ kNm/m}$
Фактор сигурности	$F_s = 2,08$

Дозвољена носивост темељног тла за габионску конструкцију (решење I) анализира је за димензије темеља ширине $B=4,5$ m, дужине $L=20$ m и дубину фундарања $D_f = 2,5$ m. Контакт темеља са темељним тлом налази се у слоју глинених шкриљаца. Резидуалне вредности параметара отпорности на смицање усвојене за прорачун носивости тла приказане су у табели 1, при чему су запреминске тежине тла испод и изнад коте фундарања усвојене за услове потопљеног тла $\gamma_1 = \gamma_2 = 13$ kN/m³.

Дозвољена носивост темељног тла износи $q_a = 696$ kN/m². Максимални напон конструкције који се преко темеља пренести на темељно тло износи $\sigma_{\max} = 224$ kN/m². С обзиром да је $\sigma_{\max} < q_a$ испуњен је услов носивости земљишта, односно темељно тло може безбедно да прими оптерећење од конструкције.

Решење II – Потпорни зид од габиона

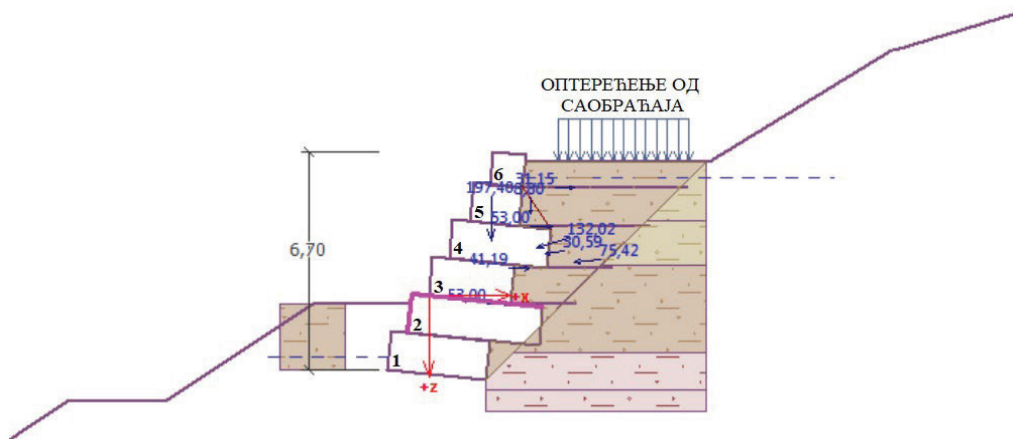
Анализа стабилности габионског зида решење II извршена је за положај конструкције под нагибом $\alpha = 6^\circ$ у односу на хоризонталу на контакту темеља и темељног тла. Висина зида је 6,7 m (од коте круне 449,0 до коте дна темеља 442,3), ширина најшире габионске корпе која је уједно и део темеља објекта износи 4,0 m.

На слици 8 је приказан, на попречном пресеку габионског зида, распоред корпи, који се састоји из 6 редова. Димензије габионских корпи као и остале вредности неопходне за прорачун стабилности зида приказане су у табели 6.

Табела 6. Параметри са карактеристикама сваке габионске корпе
Table 6. Parameters with characteristics of each gabion basket

Ред габионске корпе	Ширина b [m]	Висина h [m]	Поравнање ¹ a [m]	Дужина анкера L [m]
6.	1,0	1,0	0,50	5,0
5.	1,5	1,2	0,50	4,0
4.	3,0	1,2	0,50	1,0
3.	2,5	1,2	0,50	2,0
2.	4,0	1,2	0,50	/
1.	3,0	1,2	/	/

1 – дужина која представља колико је одређени габионски сандук померен ка унутра у односу на спољну вертикалу претходног



Слика 8. Изглед габионског зида на попречном пресеку (Извор: Оригинал)
Figure 8. Cross-section view of gabion wall (Source: Original)

Резултати провере стабилности габионског зида (решење II) на претурање и хоризонтално померање приказани су у табели 7.

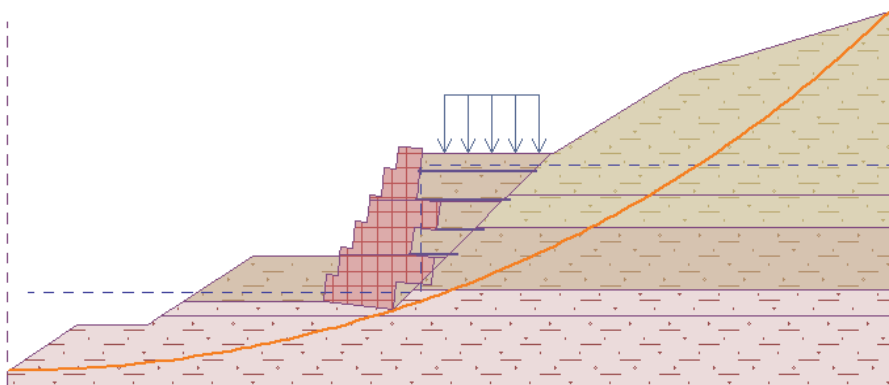
Табела 7. Провера стабилности зида у софтверу GEO5
Table 7. Wall stability check in GEO5 software

Провера стабилности габионског зида на претурање	Момент отпора	$M_{res} = 2523,85 \text{ kN/m}$
	Момент превртања	$M_{ovt} = 976,12 \text{ kN/m}$
	Фактор сигурности	$F_s = 2,59$
Провера стабилности габионског зида на хоризонтално померање	Хоризонтална сила отпора	$H_{res} = 632,86 \text{ kN/m}$
	Хоризонтална сила деловања	$H_{act} = 380,67 \text{ kN/m}$
	Фактор сигурности	$F_s = 1,66$

На основу вредности фактора сигурности на претурање зида $F_s = 2,59 > 1,50$ и фактора сигурности на хоризонтално померање $F_s = 1,66 > 1,50$ може се закључити да је потпорни зид стабилан у погледу клизања и претурања на темељном контакту.

Део габионског зида који има највеће затезање је изнад четврте корпе.

Локална стабилност новоформираног дела косине са габионским зидом (решење II) анализирана је за већи број клизних равни. У табели 8 приказане су вредности сила за клизну раван (слика 9) са најмањом вредношћу фактор сигурности $F_s = 1,99$. С обзиром да је $F_s = 1,99 > 1,50$ испуњен је услов стабилности те је косина стабилна.



Слика 9. Простирање клизне равни (Извор: Оригинал)
Figure 9. Extension of the sliding plane (Source: Original)

Табела 8. Локална стабилност – решење II
Table 8. Local stability - solution II

Збир активних сила	$F_a = 1127,80 \text{ kN/m}$
Збир пасивних сила	$F_p = 2239,52 \text{ kN/m}$
Момент померања	$M_a = 60280,68 \text{ kNm/m}$
Момент отпора	$M_p = 119702,43 \text{ kNm/m}$
Фактор сигурности	$F_s = 1,99$

Дозвољена носивост темељног тла за габионску конструкцију (решење II) анализира је за димензије темеља ширине $B=3,0 \text{ m}$, дужине $L=20 \text{ m}$ и дубину фундација $D_f = 2,4 \text{ m}$. Контакт темеља са темељеним тлом налази се у слоју глинених шкриљаца. Резидуалне вредности параметара отпорности на смицање усвојени за прорачун носивости тла приказане су у табели 1, при чему су запреминске тежине тла испод и изнад коте фундација усвојене за услове потопљеног тла $\gamma_1 = \gamma_2 = 13 \text{ kN/m}^3$.

Дозвољена носивост темељног тла износи $q_a = 671 \text{ kN/m}^2$. Максимални напон конструкције који се преко темеља пренести на темељно тло износи $\sigma_{\max} = 187 \text{ kN/m}^2$. С обзиром да је $\sigma_{\max} < q_a$ испуњен је услов носивости земљишта, односно темељно тло може безбедно да прими оптерећење од конструкције.

Терасирање тела клизишта

Након изградње потпорног зида, неопходно је извршити терасирање тела клизишта испод потпорне конструкције са циљем постизања целокупне стабилности падине. Предложена мера је део Решења I и Решења II.

Усвојене вредности параметара земљишта за анализу и прорачун стабилности пројектованих тераса су:

- Запреминска тежина – $\gamma = 19,0 \text{ kN/m}^3$,
- Угао унутрашњег трења – $\phi = 22^\circ$,
- Кохезија – $c = 12,0 \text{ kPa}$.

Предложена ширина сваког планума је 3 m , а нагиб планума у односу на хоризонталу је 3° (нагиб низ падину). Висине планума се разликују и идући у смеру од потпорних

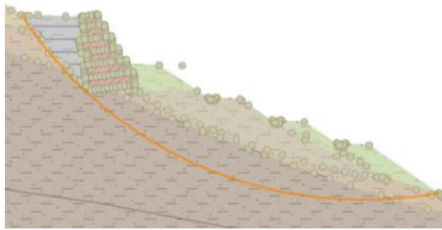
конструкција према дну косине, висине износе 3,0 m, 2,0 m, 2,0 m, 4,4 m (слике 8, 9, 10 и 11).

Генерална стабилност падине

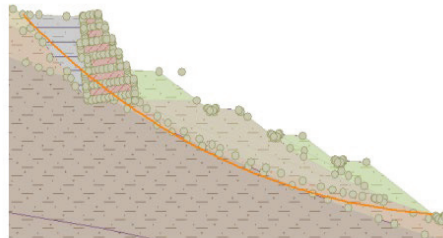
Крајњи резултати фактора сигурности добијени анализом стабилности косине у софтверу методом Janbu-а након примењених мера:

- Потпорни зид од габиона - Решење I – $F_s = 1,81$
- Потпорни зид од габиона - Решење II – $F_s = 1,75$

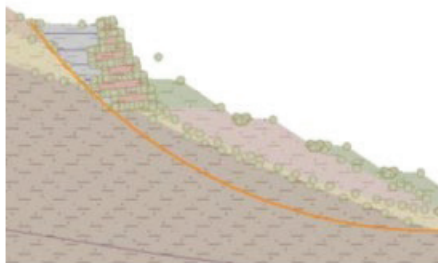
На сликама 10 и 12 приказане су критичне клизне равни а на сликама 11 и 13 клизна раван пролази кроз конструкцију.



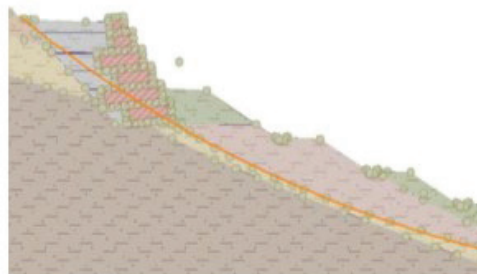
Слика 10. Потпорни зид од габиона, Решење I, анализирана клизна раван 1 ($F_s=1,81$) (Извор: Оригинал)
Figure 10. Gabion retaining wall, Solution I, analyzed sliding plane 1 ($F_s=1.81$) (Source: Original)



Слика 11. Потпорни зид од габиона, Решење I, анализирана клизна раван 2 ($F_s=8,70$) (Извор: Оригинал)
Figure 11. Gabion retaining wall, Solution I, analyzed sliding plane 2 ($F_s=8.70$) (Source: Original)



Слика 12. Потпорни зид од габиона, Решење II, анализирана клизна раван 1 ($F_s=1,75$) (Извор: Оригинал)
Figure 12. Gabion retaining wall, Solution II, analyzed sliding plane 1 ($F_s=1.75$) (Source: Original)



Слика 13. Потпорни зид од габиона, Решење II, анализирана клизна раван 2 ($F_s=11,78$) (Извор: Оригинал)
Figure 13. Gabion retaining wall, Solution II, analyzed sliding plane 2 ($F_s=11.78$) (Source: Original)

ДИСКУСИЈА

Постојање клизишта на регионалном путу Столице – Крупањ, потврђено је анализом стабилности падине $F_s = 0,86$. С обзиром на значај регионалног пута, неопходно је санарати клизиште. До оптималног решења долази се анализом више решења (Cvetković et al., 2022), а у овом случају различитим облицима габионске конструкције. Габионске конструкције одабране су са циљем смањења антропогеног утицаја на животну средину. Овакве конструкције спадају у еколошки прихватљива (eco-friendly) решења (Chikute, Sonar, 2021). У поређењу са бетонским конструкцијама приликом производње, уградње и експлоатације габионских конструкција не користи се цемент (или је његова употреба минимална), смањује се бука, могуће је озелењавање саме конструкције а постоји могућност рециклирања употребљених материјала (Chikute, Sonar, 2021). Chikute i Sonar (2019) наводе да је приликом изградње оваквих потпорних зидова битно обратити пажњу на заштиту жице од корозије као и на доступност камена за испуну. У нашој земљи доступни су кречњак и доломит који испуњавају критеријуме квалитета материјала за испуну габионских корпи (Rončević et al., 2018). Мерадавне вредности физичких својстава ломљеног камена за испуну које су усвојене за приказана решења представљају минималне препоручене вредности за избор камена (Mitrović, 2014).

Два решења, Решење I и Решење II, су испунила постављене критеријуме у погледу стабилности потпорних конструкција на претурање и хоризонтално померање. Фактори сигурности на претурање за Решење I и Решење II већи су од усвојеног граничног фактора стабилности за 36% и 73%, редом. У погледу стабилности на хоризонтално померање, оба су решења испунила услов стабилности. Фактор сигурности Решења I већи је од услова стабилности за 5% док је код Решење II фактор сигурности већи за 11%. Фактор сигурности за локалну стабилност у зони објеката код оба решења је већи од услова стабилности за 39% и за 33%. Постављањем анкерованих габионских потпорних зидова постиже се повећање стабилности на рачун повећања силе трења између анкера и тла (Mitrović, 2014). Додатно повећање стабилности потпорне конструкције од габиона може се постигнути постављањем бетона (МБ 15) на темељном контакту у дебљини од 0,2 метара (Ayub et al. 2021).

Како би се обезбедила трајна стабилизација покренуте масе земљишта као саставни део оба решења примењено је и терасирање. У случају Решења I, фактор сигурности за генералну стабилност падине је повећан за 111% а у односу на услов стабилности за 21%. Применом решења II фактор сигурности је увећан за 104% а у поређењу са условом стабилности повећање износи 17%. Приликом анализе стабилности у случају проласка клизне равни кроз конструкцију постигнути су доста већи фактори сигурности у односу на услов стабилности. Код Решења I, фактор сигурности је за 480% већи од услова стабилности, а код Решења II повећан је за 685%. Значајно веће вредности фактора сигурности, у овом случају јављају се због проласка клизне равни кроз саму конструкцију и армирани део тла у залеђу зида, које су дефинисане високим вредностима параметара отпорности.

Услед повећаног затезања које се јавља изнад друге корпе код Решења I (слика 6) и четврте корпе код Решења II (слика 8), потребно је да спојеви између ових корпи буду додатно ојачани, заварени и/или везани, како би се повећала отпорност конструкција.

Решења II у коме су потпорном зиду од габиона смањене димензије темеља као и димензије осталих габионских корпи, при чему је конструкција испунила услове за

локалну и генералну стабилност, показано је да је врло важно обратити пажњу на начин конструисања зида. Ово утиче на смањење количине утрошеног материјала а самим тим и на цену изградње објекта. Одговарајући дизајн габионских потпорних зидова је кључ за осигурање стабилности конструкције (Ayyub et al., 2021). Имајући у виду претходно наведено Решење II се може изабрати као оптимално решење.

ЗАКЉУЧЦИ

За потребе овог рада испитана је стабилност покренутог дела падине, стабилност уведених потпорних конструкција за стабилизацију падине као и генерални фактор сигурности косине са примењеним мерама стабилизације.

Увођењем техничких мера за санацију клизишта испуњена су оба критеријума: критеријум стабилности конструкција и критеријум стабилности покренутог дела падине и саобраћајнице.

Применом Решења 1, фактор сигурности за генералну стабилност износи $F_s = 1,81$, а применом Решења 2 износи $F_s = 1,75$. Такође, код Решења I и Решења II, анализом носивости земљишта потврђено је да темељено тло може безбедно да прими оптерећење од конструкције.

На основу анализе фактора сигурности, за оптимално решење изабрано је Решење 2. Резултати ових анализа пружају информације о томе да је приликом изградње потпорних конструкција од габиона битно обратити пажњу на распоред и величину габионских корпи како би се дошло до оптималног решења за санацију клизишта.

ЛИТЕРАТУРА

- Anderson M. G. and Holcombe E. (2013): Community-Based Landslide Risk Reduction: Managing Disasters in Small Steps, World Bank Publications;
- Ayyub, A., Alshameri, B., Jamil, S. M., & Nawaz, N. (2021). Analysis of Gabion Retaining Wall Using Analytical and Numerical modelling with Plaxis 2D. University of Wah Journal of Science and Technology (UWJST), 5, 12-19;
- Bhandari R.K. (2006): The Indian Landslides Scenario, Strategic Issues and Action Point- First India Disaster Management Congress, New Dehli;
- Bishop, A.W. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes (1955): Geotechnique, 5 (1), pp. 7-17. doi: 10.1680/geot.1955.5.1.7;
- Campelo N. S., Santoro Filho M. J. G., Valadares O. C. P., Paes M. D. C., Aragão A. F. (2018): Georeferenced monitoring of displacements of gabion walls, Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering 2018 171:1, 64-77;
- Chikute, G. & Sonar, I. (2019): Failures of Gabion Walls. International Journal of Photoenergy, 8. 1384. doi: 10.35940/ijitee.J9731.0981119;
- Chikute, G.C., Sonar, I.P. (2021). Gabion Wall: Eco-friendly and Cost-Efficient Retaining Wall. In: Biswas, S., Metya, S., Kumar, S., Samui, P. (eds) Advances in Sustainable Construction Materials. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 124. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-33-4590-4_22;
- Cvetković J., Živanović N., Rončević V., Gajić G., Kabiljo M. (2022): Primena potpornih konstrukcija u sanaciji klizišta na regionalnom putu Stolice – Krupanj, Sustainable Forestry: Collection br. 85-86, str. 183-196, doi: 10.5937/SustFor2285183C;
- Cvetković J., Vulević T., Gajić G., Živanović N., Rončević V. (2022): Application of Simple Additive Weighting Method for Selection of Appropriate Measures in the Rehabilitation of the Landslide, Abstract book - SOIL Erosion and Torrential Flood: Prevention: Curriculum Development at the Universities of Western Balkan Countries Conference (SETOF) November 3rd 2022, Goč, 2022, 34-34;

- (2011): Elaborat o geotehničkim uslovima sanacije klizišta na putu P-211, deonica: Stolice - Krupanj na km: 0+578.6 - 0+605.90, Institut za puteve a.d., Zavod za geotehniku, Kumodraška 257, Beograd;
- Evette A, Labonne S, Rey F, Liebault F, Jancke O, Girel J. (2009): History of bioengineering techniques for erosion control in rivers in Western Europe, *Environ Manage*, 43(6):972-84. doi: 10.1007/s00267-009-9275-y, Epub 2009 Feb 24, PMID: 19238480;
- Freeman G. E., & Fischenich J. C. (2000): Gabions for streambank erosion control, Engineer Research and Development Center, US;
- Froude M.J., Petley D.N. (2018): Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18 (8) , pp. 2161-2181;
- Gajić G. (2017): Sanacija klizišta, materijal za pripremu ispita, Šumarski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd;
- Gariano S.L., Guzzetti F. (2016): Landslides in a changing climate, *Earth-Science Reviews*, Volume 162, Pages 227-252, ISSN 0012-8252, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.08.011>;
- GEO5 2022 – User Guide – Geotechnical software suite and Fine Ltd, “Geo5 User’s Guide”. www.finesoftware.eu;
- Hansen, J. B. (1970): Revised and extended formula for bearing capacity Bulletin no. 28, Danish Geotechnical Institute Copenhagen, pp. 5-11;
- Janbu N. (1973) Slope stability computations. John Wiley Sons, Hoboken;
- Kanungo D. & Pain A., & Sharma S. (2013): Stability Assessment of a Potential Debris Slide in Garhwal Himalayas, India. *Indian Landslides*. 6. 9-20;
- Klingeman P. C., Kehe S. M., Owusu Y.A. (1984): Streambank erosion protection and channel scour manipulation using rockfill dikes and gabions. Technical Report WRRI-98, Water Resources Research Institute, Oregon State University, Corvallis, 1–169;
- Liu J., Tan J., Zhang S, Zhong C, Lv L, Tara A. (2023): Suitability Assessment of Small Dams’ Location as Nature-Based Solutions to Reduce Flood Risk in Mataniko Catchment, Honiara, Solomon Islands, *Sustainability* 2023, 15(4), 3313; <https://doi.org/10.3390/su15043313>;
- Marković, M., Živanović, N., & Gajić, G. (2019). Stability analysis of slopes along roads in bio-reinforced soil conditions. *Glasnik Sumarskog fakulteta*, (119), 91-104;
- Marwa, Ernest & Kimaro, Didas. (2005): Geomorphological mapping for route selection and road construction at lower Kihansi in Tanzania. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 64, 333-339. 10.1007/s10064-005-0012-3;
- Mitrović, P. (2014): Rehabilitation of landslides and insufficient load-bearing soil, AGM book, ISBN: 978-86-86363-43-5;
- Rončević V., Živanović N., Gajić G. (2018): Analysis of physico-mechanical characteristics of stone in Serbia for the needs of erosion control works, *Erozija*, 2018, 44, 32-39, ISSN: 0350-9648;
- Rončević V., Živanović N., Gajić G. (2018): Analysis of Physico-Mechanical Characteristics of Building Stone for the Needs of Antierosion Works in Serbia, Abstract book - 1st Young researchers' conference - Erosion and torrent control (ETC 2018), international conference, November 28 - 30, 2018, Belgrade, 2018, 27-27;
- Rubay S., and Al Hakeem N. (2023): Stability Analysis of Partially Saturated Soil Slope by Random Limit Equilibrium Method, *Disaster Advances*; Vol. 16(8); 67-76; doi: <https://doi.org/10.25303/1608da067076>;
- Seghir T., Fourar F.Z., Zeroual, A. Fourar A., & Massouh F. (2023): Comparative study of the seismic performance of earth dams-case of Ouarkiss dam. *Modeling Earth Systems and Environment*, <https://doi.org/10.1007/s40808-023-01833-z>;

- Seneviratne S.I., Nicholls N., Easterling D., Goodess C.M., Kanae S., Kossin J., Luo Y., Marengo J., McInnes K., Rahimi M., Reichstein M., Sorteberg A., Vera C., Zhang X. (2012): Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment, in: Field C.B., Barros V., Stocker T.F., Qin D., Dokken D.J., Ebi K.L., Mastrandrea M.D., Mach K.J., Plattner G.-K., Allen S.K., Tignor M., Midgley P.M. (Eds.) *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*, A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, pp. 109-230;
- Shakya N. M., Nirula D. R. (2005): *Integration of Bioengineering Techniques in Slope Stabilization Works: a Cost Effective Approach for Developing Countries* - International Seminar on Sustainable Slope risk Management for Roads, Kathmandu Nepal;
- Spasić, M., Živanović, N., & Gajić, G. (2018). Influence of lime stabilization on shear strength parameters of silty clay soil. *Glasnik Sumarskog fakulteta*, (117), 143-156;
- Sreelakshmi G., Lini Dev K., Nithesh N., Harshan H.S. (2023): Stability Analysis of Non-homogeneous Slopes and Assessment of Failure Characteristics Using HYRCAN, *Lecture Notes in Civil Engineering*, Volume 274, Pages 455 - 465, doi: 10.1007/978-981-19-4055-2_36;
- Utmani N., & Ahmad S., & Rabbi Ur I., & Abbas M., (2019): Gabion wall used in road construction and flood protection embankment, *Journal of Civil Engineering and Environmental Sciences*, 001-004, 10.17352/2455-488X.000031;
- Wang W, Bai M, Liu Q, Fekadu HF (2023): Multiple reinforcement measures of flysch landslide. *PLoS ONE* 18(8): e0290099. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0290099>;
- Zuhaira, A. A., Mohamad, S. A., & Al-Hamd, R. K. S. (2023): Scale effects of non-aerated flow properties over gabion stepped spillways, *AIP Conference Proceedings*, 2631(1): pp.020028-1-020028-13. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0131164>.