

# Утицај анизотропије на стабилност косине 2 у Грделичкој клисури

Ксенија Мицић



Дигитални репозиторијум Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду

**[ДР РГФ]**

Утицај анизотропије на стабилност косине 2 у Грделичкој клисури | Ксенија Мицић | | 2022 | |

<http://dr.rgf.bg.ac.rs/s/repo/item/0006565>

**УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ-  
РУДАРСКО-ГЕОЛОШКИ ФАКУЛТЕТ**

11120 Београд 35, Ђушина 7, п.п. 35-62  
Тел: (011) 3219-100, Факс: (011) 3235-539



**UNIVERSITY OF BELGRADE,  
FACULTY OF MINING AND GEOLOGY**

Republic of Serbia, Belgrade, Djusina 7  
Phone:(381 11) 3219-100, Fax:(381 11) 3235-539

**ЗАВРШНИ РАД**  
**МАСТЕР АКАДЕМСКЕ СТУДИЈЕ**

**Утицај анизотропије на стабилност косине 2 у  
Грделичкој клисури**

**Ментор:**

**Доц. др Зоран Берисављевић**

**Кандидат:**

**Ксенија Мицић Г601/21**

**Београд, септембар 2022.**

КОМИСИЈА:

1. Доц. др Зоран Берисављевић, ментор

---

Рударско-геолошки факултет, Београд

2. Доц. др Душан Берисављевић, члан

---

Рударско-геолошки факултет, Београд

3. Ван. проф. Милош Марјановић, члан

---

Рударско-геолошки факултет, Београд

Датум одбране: \_\_\_\_\_

## РЕЗИМЕ

Изградња аутопута E75 кроз Грделичку клисуру представља један од најзахтевнијих инфраструктурних подухвата на територији Републике Србије у последњих неколико деценија. Ова деоница специфична је по високим и стрмим косинама на којима су примењене бројне мере заштите. Предмет рада обухвата анализу стабилности косине 2, која се налази на деоници Горње Поље – Царичина долина. Изграђена је од формације анизотропног шкриљаца палеозојске старости, променљивог степена испуцалости и распаднутости, на основу чега су издвојене: дробинска зона шкриљаца  $S^{**}$ , зона јако распаднутих шкриљаца  $S^*$  и зона разломљених, испуцалих и делимично распаднутих шкриљаца  $S$ . Код ових шкриљаца анизотропност се одражава променом параметара смичуће отпорности у различитим правцима, што је последица постојања пукотина на дециметарском растојању. У погледу стабилности, неповољан је систем пукотина чије је пружање приближно паралелно правцу пружања косине, а које под нагибом  $45-60^\circ$  падају низ косину. Анализа стабилности косине ојачане микрошиповима и преднапрегнутим анкерима је у  $2D$  условима спроведена у програмском пакету *Slide2*, применом метода граничне равнотеже (Bishop и Spencer), за кружну клизну површ и без узимања у обзир порних притисака. За изотропне услове у терену, критична клизна површ налази се у горњем делу косине, а фактор сигурности који указује на њену стабилност износи  $F_s \approx 1.23$ . Код анализе за анизотропно понашање стенске масе, моделовање пукотина неповољног положаја, у оквиру средине  $S$ , извршено је применом дирекционог генерализованог анизотропног модела. Добијени резултати потврђују положај нестабилности констатоване на терену, а срачунати фактор сигурности износи  $F_s \approx 1.0$ , што указује на стање граничне равнотеже у ком се косина налази при узимању у обзир утицаја анизотропије. Овим је показано да утицај анизотропије драстично мења интерпретацију стабилности косине у конкретном случају и да се не може тек тако занемарити.

**Кључне речи:** анизотропија, смичућа чврстоћа, стабилност косине, испуцалост, дирекциони модели

## САДРЖАЈ

1. УВОД.....	1
2. ОПШТЕ О АНИЗОТРОПИЈИ.....	3
2.1. Појам и класификација анизотропије.....	3
2.2. Критеријуми лома.....	5
3. ГЕОЛОШКЕ И ИНЖЕЊЕРСКОГЕОЛОШКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ ПАЛЕОЗОЈСКОГ ШКРИЉЦА .....	7
4. ГЕОТЕХНИЧКИ МОДЕЛ ТЕРЕНА И ОТПОРНО-ДЕФОРМАБИЛНИ ПАРАМЕТРИ СТЕНСКЕ МАСЕ.....	13
5. ПРИМЕЊЕНЕ МЕРЕ ЗАШТИТЕ КОСИНЕ .....	16
6. АНАЛИЗА СТАБИЛНОСТИ КОСИНЕ .....	18
6.1. Опште о детерминистичкој анализи стабилности .....	18
6.2. Дирекциони модели чврстоће.....	20
6.3. Улазни подаци за програм <i>Slide2</i> .....	24
6.4. Анализа стабилности за изотропно понашање палеозојског шкриљца .....	26
6.5. Анализа стабилности за анизотропно понашање палеозојског шкриљца .....	28
7. Закључак.....	30
Списак литературе.....	32

## 1. УВОД

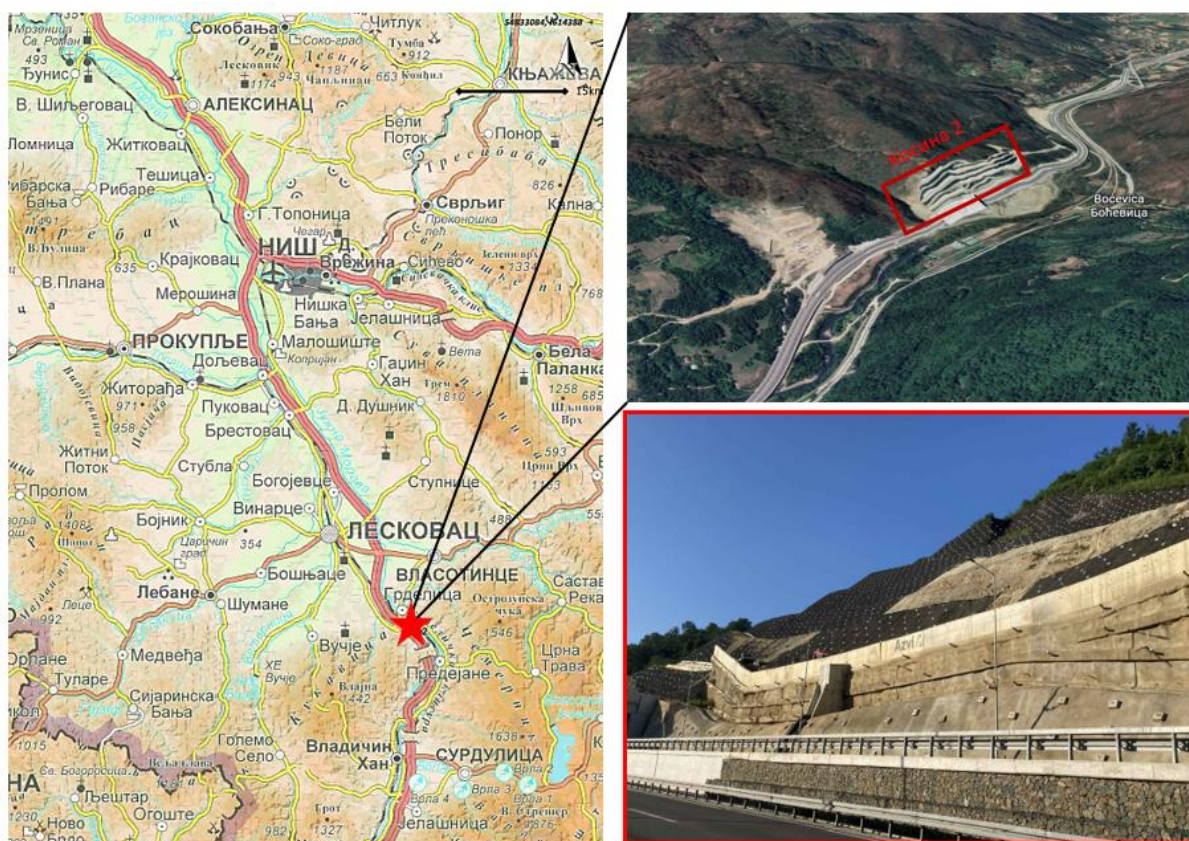
Иако се стене често разматрају као линеарно-еластичан, хомоген и изотропни материјал, овакав приступ омогућује ограничен увид у реално стање напона и деформација унутар стенске масе. У том смислу, стене је неопходно анализирати са аспекта тзв. *DIANE* материјала, односно дисконтинуалног, хетерогеног, анизотропног и нелинеарно-еластичног материјала. Бројним теоријским и експерименталним студијама показано је да анизотропија може бити релевантни утицајни фактор у многим инжењерским проблемима који се тичу понашања стенске масе. На пример, напонско-деформацијске анализе могу имати озбиљне грешке уколико се спроводе под претпоставком изотропне, уместо анизотропне стенске масе.

Током последњих неколико деценија, многи аутори су се озбиљно и предано бавили проблемом анизотропне стенске масе, како у теоретском, тако и у експерименталном погледу. Утицај анизотропије на чврстоћу стена испитиван је од стране следећих аутора: Donath (1964), Hoek (1964), McLamore и Gray (1967), Attewell и Sandford (1974), Tien и др. (2006), Saroglou (2007). Метаморфне стене попут филита и шкриљаца, као и гнајсева, понашају се анизотропно као последица постојања равни фолијације. На скорашњим истраживањима о анизотропији метаморфних стена радили су Zhang и др. (2011), Li и др. (2012), Cho и др. (2012), Saeidi и др. (2013) и други.

У светлу непредвидивог понашања стенске масе нарочито је могуће говорити о најзахтевнијој деоници аутопута Е75, како за пројектовање, тако и за изградњу - деоници дужине 25 km која пролази кроз Грделичку клисуру (слика 1.1). Изразито неприступачни терени кроз које ова деоница пролази изграђени су од формације веома анизотропног шкриљца палеозојске старости, једне од најстаријих формација на простору Републике Србије. Литолошки чланови променљивог степена распаднутости се у простору смењују на по неколико десетина метара, не само у вертикалном, већ и у хоризонталном правцу. Бројни изазови наметнути комплексном морфологијом и геолошком грађом клисуре превазиђени су изградњом више од двадесет мостова, два

тунела, три галерије, косина висине преко 120 m и укупне дужине 4 km, као и уградњом великог броја различитих заштитних и потпорних конструктивних елемената.

Уже предметно подручје рада јесте косина 2, која се налази на деоници Горње Поље – Царичина Долина, на левој долинској страни реке Јужне Мораве, на приближно 4 km удаљености од центра насеља Грделица (слика 1.1). У наставку рада, косина 2 биће разматрана са аспекта утицаја анизотропије на њену стабилност. Проблематика рада производ је вишегодишњих истраживања на основу којих се дошло до закључка да је анизотропија један од круцијалних утицајних фактора (не)стабилности косине. С тим у вези, најпре ће сажето бити обрађене теоријске поставке промене параметара смичуће отпорности палеозојског шкриљца у различитим правцима, а потом и упоредне анализе стабилности косине за изотропно и анизотропно понашање стенске масе.



Слика 1.1. Просторни положај предметне косине; доле десно део косине иза галерије фотографисан 2021. године

## 2. ОПШТЕ О АНИЗОТРОПИЈИ

### 2.1. Појам и класификација анизотропије

Анизотропија је карактеристика материјала да им се у различитим правцима посматрања мењају одређена својства. Стенске масе су готово увек анизотропни материјали, што је последица присуства дисконтинуитета, односно испуцалости. Дисконтинуитети су формирану у току стварања (седиментација, метаморфизам, магматизам) и накнадних тектонских покрета стенске масе. Анизотропија се може разматрати са аспекта чврстоће, деформабилности, брзине простирања еластичних таласа, водопропусности, напонског стања, односно свих релевантних својстава стенске масе.

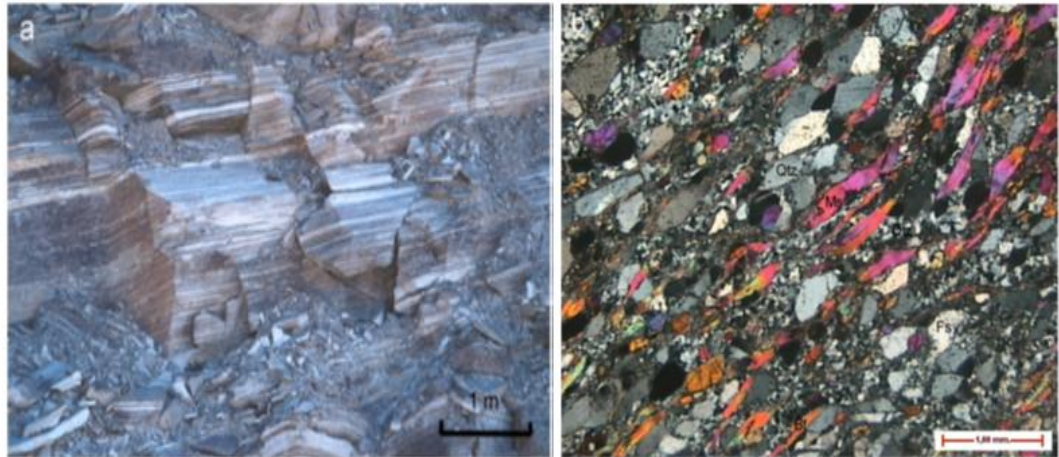
У зависности од размере посматрања, анизотропија може бити инхерентна и структурна анизотропија. Пример анизотропне стенске масе дат је на слици 2.1, где је приказана анизотропија у макро размери и на нивоу препарата.

Један од начина одређивања анизотропије на нивоу узорка јесте да се мерења у условима једноаксијалне компресије изврше тако да се угао под којим се наноси оптерећење  $\beta$  варира у односу на равни анизотропије. Класификацију анизотропије на нивоу узорка могуће је извршити на основу индекса анизотропије чврстоће  $R_C$ , који представља однос највеће и најмање једноаксијалне чврстоће (једначина 2.1). Угао  $\beta$  за који се очекује највећа вредност чврстоће износи  $0^\circ$  или  $90^\circ$ , док је угловни домен у оквиру ког се очекује најмања вредност чврстоће  $\beta=30-45^\circ$ , узме ли се у обзир да је то и типичан распон углова смичуће отпорности дуж дисконтинуитета. На основу података о чврстоћи седиментних и метаморфних стена, Ramamurthy (1993) је предложио класификацију дату у табели 2.1.

$$R_C = \frac{\sigma_{ci(90)}}{\sigma_{ci(min)}} \quad (2.1)$$

при чему су:  $\sigma_{ci(90)}$  и  $\sigma_{ci(min)}$  - максимална и минимална вредност једноаксијалне чврстоће у зависности од нагиба анизотропних равни.





Слика 2.1. а) Фолијација (тракаста текстура) гнајса; б) Оријентација минерала гнајса са слике а) на препарату под микроскопом (Saroglou и Tsiambaos, 2008)

На основу бројних испитивања на узорцима метаморфних стена, као и литературних података, Saroglou и Tsiambaos (2007) дошли су до следећих закључака:

1. Стене са великом чврстоћом на притисак ( $\sigma_{ci} > 100$  МПа) генерално показују низак степен анизотропије;
2. Стене са средњом чврстоћом на притисак ( $50 \text{ МПа} < \sigma_{ci} < 100 \text{ МПа}$ ) се углавном не могу описати конкретном класом анизотропије;
3. Стене са малом чврстоћом на притисак ( $25 \text{ МПа} < \sigma_{ci} < 50 \text{ МПа}$ ), иако ограниченог броја података, генерално показују умерени степен анизотропије.

Други начин одређивања анизотропије на узорку јесте на основу индекса анизотропије из опита тачкастог оптерећења,  $I_\alpha$  (једначина 2.2). У том случају, узорке интактне стене неопходно је испитати према препорукама ISRM-а (ISRM, 1985). Минимална вредност тачкасте чврстоће анизотропне стене очекује се када се оптерећење наноси паралелно равнима фолијације, као последица раздвајања по њима. Класификација анизотропије на основу индекса тачкасте чврстоће према ISRM (1985) дата је у табели 2.1.

$$I_\alpha = \frac{I_{\alpha(50)\perp}}{I_{\alpha(50)\parallel}} \quad (2.2)$$

при чему су:  $I_{\alpha(50)I}$  и  $I_{\alpha(50)II}$  - индекси тачкасте чврстоће управно и паралелно са равни анизотропије, за дијаметралне и аксијалне узорке сведене на пречник од 50 mm.

Табела 2.1. Класификација анизотропије на основу индекса анизотропије  $R_C$  и  $I_\alpha$

Опис	Индекс анизотропије $R_C$	Индекс анизотропије $I_\alpha$
<b>Квази изотропна (изотропна)</b>	1.0 – 1.1	1.0
<b>Делимично анизотропна</b>	1.1 – 2.0	
<b>Умерено анизотропна</b>	2.0 – 4.0	1.0 – 2.0
<b>Веома анизотропна</b>	4.0 – 6.0	2.0 – 4.0
<b>Изразито анизотропна</b>	> 6.0	> 4.0

## 2.2. Критеријуми лома

Постоје бројни критеријуми лома који се могу примењивати при анализама и моделовању анизотропних стена, како феноменолошки, тако и механистички, који стену разматрају као континуалну или дисконтинуалну средину. У наставку је дат сажети приказ неколико критеријума лома који се најчешће користе у случајевима разматрања анизотропије по параметрима чврстоће.

Mohr-Coulomb линеарни критеријум лома је критеријум у оквиру ког се анVELOпа напона лома представља правом линијом на дијаграму зависности нормални напон - смичући напон, што га чини једним од најпримењиванијих критеријума управо због своје једноставности и задовољавајуће тачности. Уколико се сва стања лома на дијаграму  $\sigma$ - $\tau$  прикажу Моровим круговима, анVELOпа напона их тангира под одређеним углом  $\varphi$ , са одсечком  $c$  на ординати, и може се у експлицитном облику изразити једначином:

$$\tau = c + \sigma_n \tan \varphi \quad (2.3)$$

где је  $c$  - кохезија (одражава природу материјала, а представља чврстоћу на смицање када је нормални напон једнак нули),  $\varphi$  - угао смичуће отпорности (одражава природу материјала, а представља угао нагиба под којим, при

одређеним условима, долази до смицања унутар стенске масе или по контактним површинама дисконтинуитета),  $\sigma_n$  - нормални напон на раван лома.

Barton и Bandis (1973, 1976) оформили су критеријум лома који се користи за дефинисање чврстоће на смицање дисконтинуитета. Ради бољег разумевања смичуће чврстоће дисконтинуитета, уводи се појам базног угла трења  $\varphi_b$ , који се може одредити опитом смицања на дисконтинуитетима или, алтернативно, опитом нагињања, док се остали параметри ( $JCS$  и  $JRC$ ) такође могу рутински одредити у теренским условима. Суштина критеријума огледа се у поступној промени чврстоће смицања са повећањем нормалног напона и може се изразити следећом једначином:

$$\tau = \sigma_n \cdot \tan \left[ JRC \cdot \log_{10} \left( \frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \varphi_b \right] \quad (2.4)$$

где је  $JRC$  - коефицијент храпавости пукотине,  $JCS$  - чврстоћа на притисак зидова пукотине,  $\sigma_n$  - нормални напон који делује на зид пукотине, а  $\varphi_b$  - базни угао трења.

На основу 130 опита директног смицања на дисконтинуитетима различите алтерисаности, Barton и Choubey (1977) су извршили ревизију свог критеријума уводећи резидуални угао трења  $\varphi_r$ , уместо базног угла трења:

$$\tau = \sigma_n \cdot \tan \left[ JRC \cdot \log_{10} \left( \frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \varphi_r \right] \quad (2.5)$$

Резидуални угао трења се може одредити из једначине:

$$\varphi_r = (\varphi_b - 20) + 20 \frac{r}{R} \quad (2.6)$$

где је  $r$  - број одскока мерен Шмитовим чекићем за природан дисконтинуитет, а  $R$  - број одскока мерен Шмитовим чекићем за неалтерисану и суву површ лома.

Оригинални Hoek-Brown критеријум лома формулисан 1980. године, модификован је од стране Saroglou и Tsiambaos 2008. године, како би се у обзир узео ефекат инхерентне анизотропије на чврстоћу интактне стене. У разматрање је, дакле, узета промена једноаксијалне чврстоће на притисак

интактног узорка у зависности од угла  $\beta$  (угао под којим се налазе равни анизотропије у односу на оптерећење) и параметар  $k_\beta$  који представља распон између минималне и максималне вредности чврстоће интактне анизотропне стене. Једначина којом се описује критеријум лома дата је у следећем облику:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{c\beta} \left( k_\beta m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{c\beta}} + 1 \right)^{0.5} \quad (2.7)$$

где је:  $\sigma_{c\beta}$  – једнооксијална чврстоћа на притисак за угао анизотропних равни  $\beta$ ;  $k_\beta$  – параметар који описује ефекат анизотропије,  $m_i$  – бездимензиона емпиријска константа за интактну стену.

Када је оптерећење управно на равни анизотропије, параметар  $k_\beta$  једнак је 1. Минимална вредност параметра  $k_\beta$  ( $k_{30}$ ) добија се када је оптерећење, тј. правац већег главног напона под углом  $\beta=30-45^\circ$  у односу на равни анизотропије.

Модификација НВ критеријума лома за анизотропну стенску масу да система, од стране Saroglou и др. (2018). Једначина којом се описује модификовани критеријум лома има следећи облик:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{c\beta} \left( k_\beta (m_{b,an} \frac{\sigma_3}{\sigma_{c\beta}} + s_{an})^a \right) \quad (2.8)$$

где је  $k_\beta$  – параметар који описује ефекат анизотропије;  $\sigma_1$  – већи главни напон;  $\sigma_3$  – мањи главни напон;  $m_{b,an}$  – редукована вредност параметра  $m_i$  за анизотропну стенску масу;  $\sigma_{c\beta}$  – једнооксијална чврстоћа на притисак интактног узорка стене за угао  $\beta$ ;  $s_{an}$ ,  $a$  – константе које се одређују на основу ARMR вредности.

### 3. ГЕОЛОШКЕ И ИНЖЕЊЕРСКОГЕОЛОШКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ ПАЛЕОЗОЈСКОГ ШКРИЉЦА

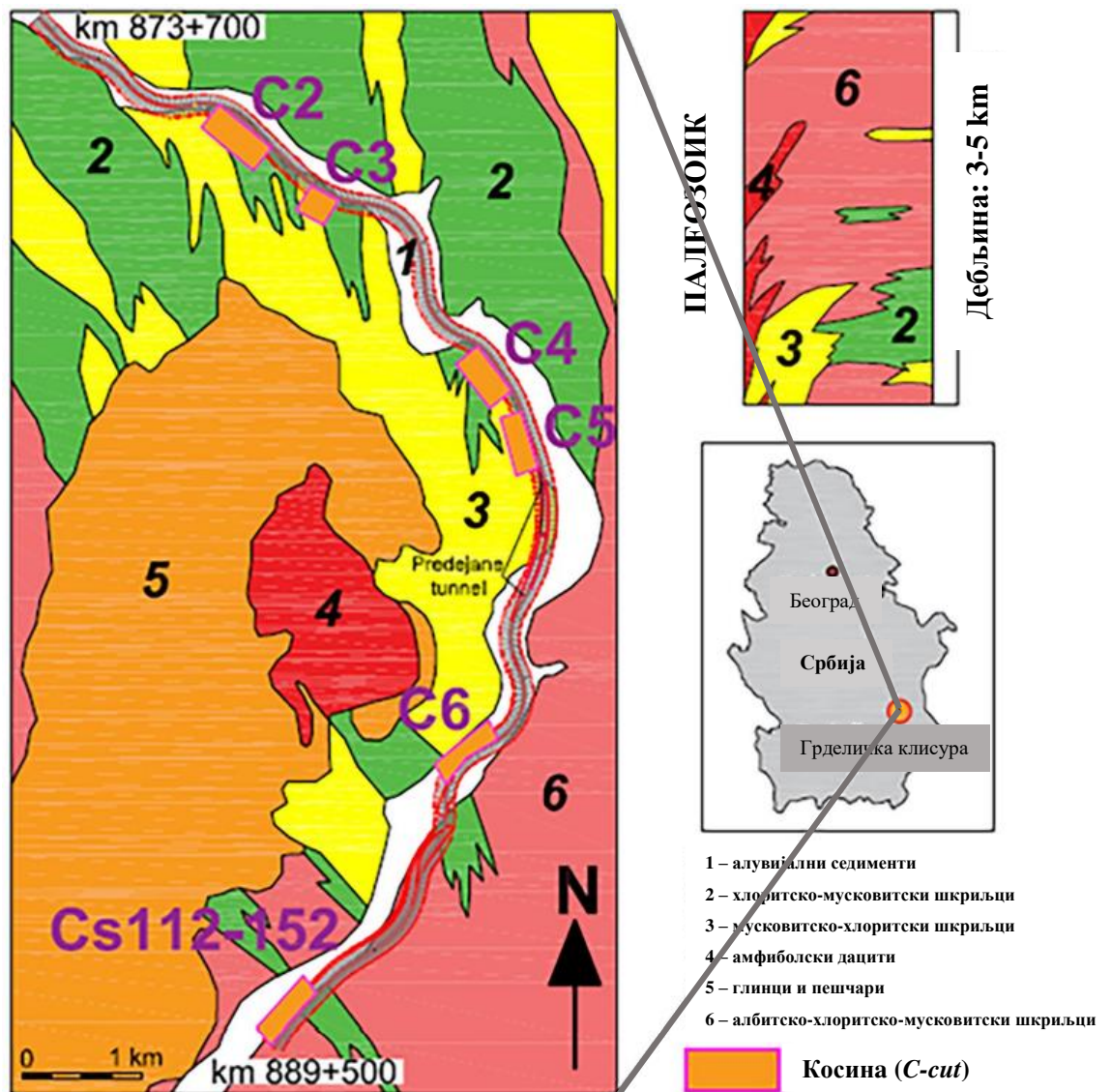
На истражном простору који обухвата косину 2 у више наврата извођена су инжењерскогеолошка и геотехничка истраживања - почев од нивоа Идејног пројекта 2002. године, нивоа Главног пројекта за који су детаљна теренска истраживања вршена у периоду новембар 2009 - фебруар 2010. године, преко додатних истраживања на косинама 2, 3 и 4 2014. и 2015. године, све до рушења

потпорне конструкције од микрошипова на косини у августу 2018. године, када се приступило детаљним инжењерскогеолошким и геотехничким истраживањима за потребе санације косине. Последњи сет допунских истраживања спроведен је 2019. године са циљем дефинисања евентуалног проширења зоне заштите косине. Резултати наведених истраживања омогућили су увид у комплексно геолошко-геотехничко стање на косини и разумевање промене понашања стенске масе током времена. С тим у вези, у наставку текста дат је сажети опис геолошке и инжењерскогеолошке грађе предметног подручја.

Грделичка клисура налази се у оквиру једног од најбоље проучених подручја горњег (власинског) комплекса Српско-македонске масе, посебно у тектонском погледу (слика 3.1). Она припада структурној целини Јужноморавском синклиноријуму. Синклиноријум је исепарисан бројним лонгитудиналним, трансверзалним и дијагоналним раседима. На тај начин читаво подручје је издељено на велики број мањих блокова (паркетна структура) чије су дуже осе оријентисане правцем ССЗ-ЈИИ. (Маровић, 2001)

У грађи овог подручја доминантне су стене рифео-камбријске старости, метаморфисане у условима доњег дела фације зелених шкриљаца, на температурама до највише 400°C и притисцима од 2 до највише 5 кВ. Метаморфни процеси били су полифазни. Најпре су били регионалног карактера, када су и формиране поменуте стене. Млађим тектонским процесима, вероватно алпским, стене су у плићим условима тектонски катаклазиране, када су им знатно ослабљена физичко-механичка својства.

У погледу литологије могу се издвојити: метаалевролити, актинолитско-епидотски шкриљци, хлоритско-актинолитски шкриљци и хлоритско-епидотски шкриљци. На слици 3.1. дат је приказ упрошћене геолошке карте (са стратиграфским стубом) на којој је маркиран положај косине 2, и осталих косина на деоници аутопута кроз Грделичку клисуру.



Слика 3.1. Упростићена геолошка карта ширег подручја Грделичке клисуре са стратиграфским стубом (Берисављевић и др., 2022)

Метаалевролити су изграђени од мусковита, хлорита, који је мање заступљен и кварца. Структуре су лепидобластичне са елементима гранобластичне и настали су регионалном метаморфозом ситнозрних кластичних седимената - алевролита (везана прашина, муљ).

Актинолитско-епидотски шкриљци су сиво зелене боје, шкриљаве текстуре, са финим плисирањем и тракастом текстуром. Настали су метаморфозом неке базичне (базалт, спилит) до интермедијарне стене (андезит). На слици 3.2. приказан је узорак актинолитско-епидотског шкриљца узет за минералошко-петролошка испитивања.

Хлоритско-актинолитски шкриљци су сиво до светло мрке боје, слабе шкриљаве текстуре. Изграђени су од хлорита, амфибола (актинолита), албита, епидота, цоисита, калцита и кварца. Структуре су гранобластичне са елементима лепидобластичне. Испресецани су пукотинама које су импрегнисане лимонитом, указујући на утицај рецентних атмосферских вода. На слици 3.2. приказан је узорак хлоритско-актинолитског шкриљца узет за минералошко-петролошка испитивања.

Хлоритско-епидотски шкриљци су масивне до слабо шкриљаве текстуре, изграђени од хлорита, албита, епидота, цоисита, серицита, калцита и кварца. Структуре су леподобластичне са елементима гранобластичне. Настали су метаморфозом неке базичне стене у нижим деловима фације зелених шкриљаца. (Саобраћајни институт ЦИП, 2019)



Слика 3.2. Узорак актинолитско-епидотског шкриљца (лево) и хлоритско-актинолитског шкриљца (десно)(ЦИП,2019)

Инжењерскогеолошку грађу предметне косине чине:

- насути материјала (n),
- елувијално-делувијална распадина шкриљаца ( $S^{e-d}$ ),
- дробинска зона шкриљаца  $S^{**}$ ,
- зона јако распаднутих шкриљаца  $S^*$  и
- зона разломљених, испуцалих и делимично распаднутих шкриљаца S.

У издвајању инжењерскогеолошких средина (зона) посебна пажња посвећена је изучавању испуцалости и распаднутости, имајући у виду да су ово једни од најбитнијих чинилаца када је реч о (не)стабилности предметне косине на свим репрезентативним нивоима посматрања

Антропогене творевине (n) везане су за површинске делове, односно за процес ископа и отварања косине пре изградње аутопута. Одликују се изразитом хетерогеношћу у гранулометријском саставу.

Када је реч о зони елувијално-делувијалне распадине шкриљаца ( $S^{e-d}$ ), она се карактерише сменом комада дробине потпуно деградираног шкриљца и земљастог прашинасто-песковитог материјала. Представља резидуалну земљасто-дробинску распадину основне стене или продукте таложења кретаног падинског материјала. Земљаним радовима на косини овај материјал је већински уклоњен.

Дробинска зона шкриљаца ( $S^{**}$ ) распрострањена је само локално на хипсометријски вишим деловима косине и захваћена процесом површинског распадања. Ову зону карактерише интензивна ситнопрслинска и пукотинска издељеност у којој доминира дробински материјал, тако да су само делимично очувана структурна и текстурна својства.

Зона јако распаднутих шкриљаца ( $S^*$ ) обухвата зону највећег тектонског напрезања током геолошке прошлости, у оквиру које су иницијално компакне стенске масе смицане, дробљене и мрвљене услед полифазних тектонских процеса. Окарактерисана је као зона са повећаном могућношћу лома и честим појавама осипања и откидања, а неретко и локалних клизања. Узимајући у обзир битне разлике у физичко-механичким својствима по дубини, овај комплекс је могуће поделити на три квазихомогене зоне. Највиши делови комплекса обухватају смену земљасто-глиновитих и дробинско-блоковских материјала. Са аспекта стабилности косине, ова зона је најнеповољнија, с обзиром на њен положај у конструкцији терена. Хлоритско-актинолитски шкриљац утврђен је на хипсометријски нижим котама у односу на претходни слој. За ову средину својствена је смена компактнијих партија шкриљаца са



мекшим-глиновитијим партијама. Хлоритско-епидотски шкриљац изграђује најниже делове комплекса. У односу на повлатни слој, ова средина је знатно мекша. (Саобраћајни институт ЦИП, 2019)

Зона кроз коју највећим делом пролази траса аутопута јесте зона разломљених, испуцалих и делимично распаднутих шкриљаца (S), представљена актинолитско-епидотским шкриљцима. Највећи део ове зоне је откривен тек након обимних земљаних радова у фази растерећења косине. За ову зону карактеристична је ситна блоковска издељеност са уочљивим механичким оштећењима. Формирани блокови су dm-m реда величине, а још се могу осмотрити и изражене пукотине које се међусобно пресецају. Ножични део косине је издељен на крупније блокове. Зидови пукотина су делимично измењени и у већем делу лимонитисани.

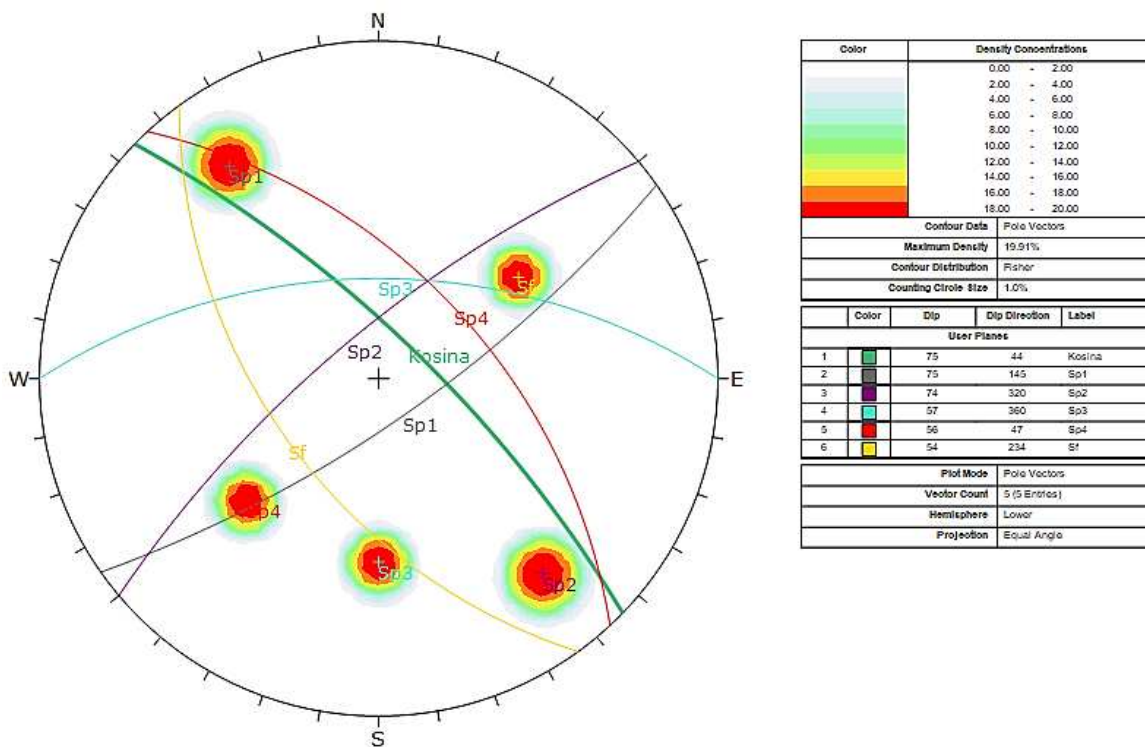
У оквиру ове зоне, у погледу елемената пада, издвојене су 4 фамилије пукотина. Извршено је груписање према њиховом пружању у две основне фамилије са супротним нагибима, али са релативно приближним падним углом, а посебно је груписана фолијација:

- фамилије пукотина  $Sp_1$  са  $Er: 145/75$  и  $Sp_2$  са  $Er: 320/74$
- фамилије пукотина  $Sp_3$  са  $Er: 360/57$
- фамилије пукотина фолијације  $S_f$  са  $Er: 234/54$  и  $Sp_4$  са  $Er: 047/56$ .

Приказ оријентације издвојених фамилија пукотина и фолијације, као и косине дат је на положајној лопти на слици 3.3.

Пукотине фамилија  $Sp_1$  и  $Sp_2$  су по пружању међусобно приближно паралелне, а по паду се разликују за мање од  $20^\circ$ . Оне су истовремено приближно управне на пукотине фамилије  $Sp_4$  и  $S_f$ . Имајући у виду правац пружања косине  $314-134^\circ$ , најзначајније је пружање пукотина система  $Sp_4$ , које је приближно паралелно пружању косине (слика 3.3). Учесталост свих пукотина је различита, најчешће је размак између њих дециметарског реда величине. У површинској зони пукотине су благо отворене и запуњене веома танком глиновитом испуном и по правилу интензивно лимонитисане. У дубљем

делу најчешће су стиснуте, равне до благо заталасане и углавном глатке. Величина монолита је променљива и варира у интервалу од неколико десетина  $\text{dm}^3$  у јаче испуцалим зонама и у приповршинским партијама, па све до реда величине  $\text{m}^3$ , у свежијим партијама и нижим деловима косине. (Саобраћајни институт ЦИП, 2015)

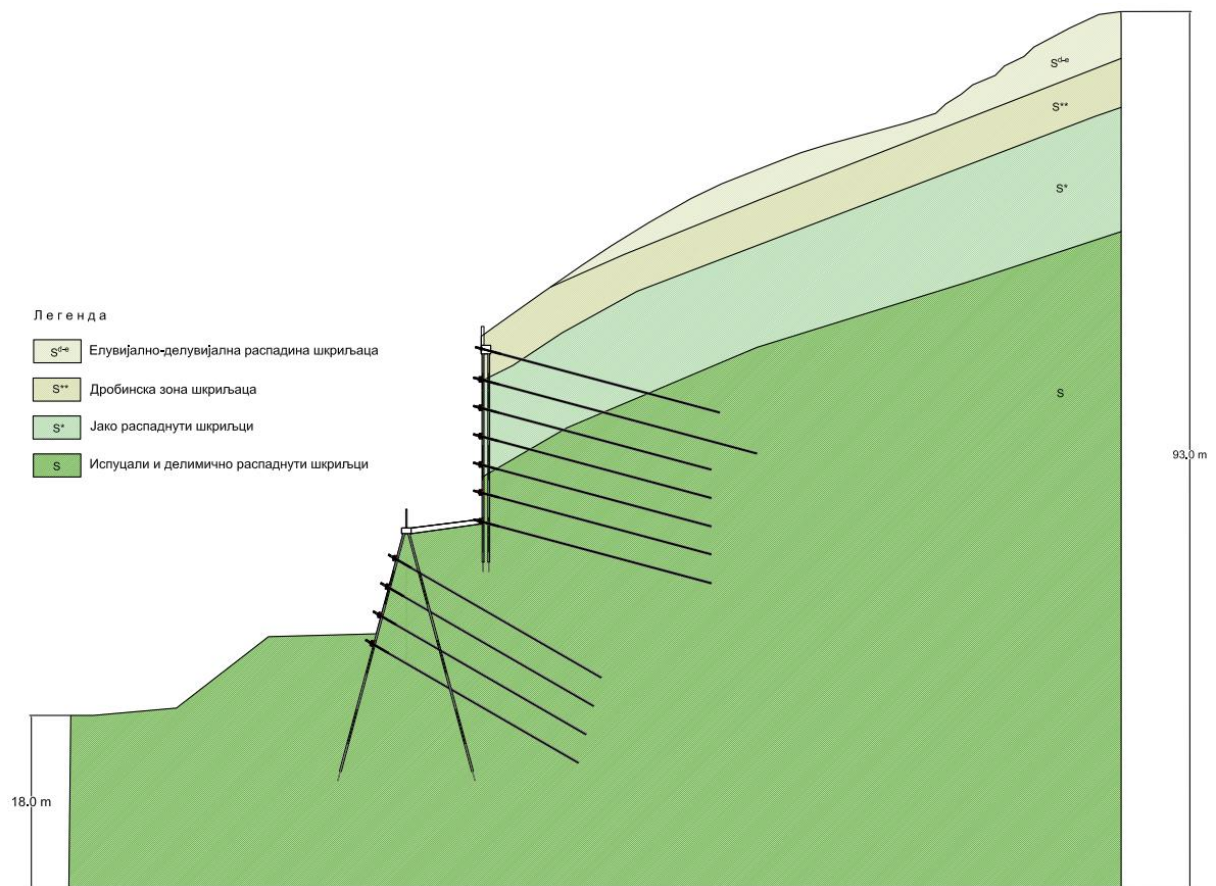


Слика 3.3. Приказ оријентације елемената склопа зоне разломљених, испуцалих и делимично распаднутих шкриљаца (S)

#### 4. ГЕОТЕХНИЧКИ МОДЕЛ ТЕРЕНА И ОТПОРНО-ДЕФОРМАБИЛНИ ПАРАМЕТРИ СТЕНСКЕ МАСЕ

Геотехнички модел терена који је формиран за потребе спровођења анализе стабилности косине 2 (поглавље бр. 6) приказан је на слици 4.1. Модел терена обухвата конфигурацију косине пре њеног глобалног лома који се догодио 2018. године – вршну косину блажег нагиба (сса  $30^\circ$ ), и берме испод ње, стрмијег нагиба, са уграђеним потпорним конструктивним елементима. Укупна висина косине узета у обзир при прорачунима и анализи стабилности износи 93 m. У погледу инжењерскогеолошке грађе терена, модел подразумева: елувијално-делувијалну распадину шкриљаца ( $S^{d-e}$ ), дробинску зону шкриљаца

(S\*\*), јако распаднуте шкриљце (S\*) и разломљене, испуцале и делимично распаднуте шкриљце (S).



Слика 4.1. Геотехнички модел предметне косине

У циљу што реалнијег сагледавања стања и понашања стенске масе на косини, као и спровођења потпуне анализе стабилности, неопходно је користити поуздано утврђене отпорно-деформабилне параметре стенске масе. Поузданост одређивања ових параметара у највећој мери зависи од врсте, обима и начина изведених истраживања и испитивања. На основу резултата лабораторијских испитивања изведених пре глобалног лома косине и повратних анализа, утврђени су параметри отпорности и деформабилности издвојених инжењерскогеолошких средина. Ови параметри су преузети из пројектне документације и дати у табелама 4.1. и 4.2.

Табела 4.1. Параметри смичуће отпорности издвојених средина (преузето из пројектне документације)

	Hoek-Brown критеријум $\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} (m_b \sigma_3 / \sigma_{ci} + S)^a$	Mohr-Coulomb критеријум <sup>1</sup> $\tau = c + \sigma_n \tan \varphi$	Barton-Bandis критеријум $\tau = \sigma_n \tan \left[ JRC \cdot \log_{10} \left( \frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \varphi_r \right]$
<b>n</b>		$\gamma = 21 \text{ kN/m}^3$ ; повратна анализа: $c = 5 \text{ kPa}$ ; $\varphi = 35^\circ - 45^\circ$	
<b>S<sup>d-e</sup></b>		$\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$ ; <sup>2</sup> $c = 15 \text{ kPa}$ ; $\varphi = 27^\circ$	
<b>S**</b>		$\gamma = 22 \text{ kN/m}^3$ ; <sup>2</sup> $c = 15 \text{ kPa}$ ; $\varphi = 27^\circ$	
<b>S*</b>	$\sigma_{ci} = 12 - 19 \text{ MPa}$ (усвојено $14 \text{ MPa}$ ); $GSI = 25$ ; $m_i = 10$ ;	$\gamma = 27 \text{ kN/m}^3$ ; $c = 40 \text{ kPa}$ ; $\varphi = 32^\circ$	
<b>S</b>	$\sigma_{ci} = 27 - 86 \text{ MPa}$ (усвојено $46 \text{ MPa}$ ); $GSI = 40$ ; $m_i = 11 - 16$ (усвојено $11$ );	$\gamma = 28 \text{ kN/m}^3$ ; $c = 120 \text{ kPa}$ ; $\varphi = 49^\circ$ ( $c = 6 - 27 \text{ kPa}$ ; $\varphi = 31 - 36^\circ$ ) усвојено: $c = 25 \text{ kPa}$ ; $\varphi = 35^\circ$	$JCS = 8 - 25 \text{ kPa}$ ; $JRC = 6 - 8$ $\varphi_r = 25^\circ$

Конверзија Hoek-Brown-ових у Mohr-Coulomb-ове параметре извршена је за косину висине  $10 \text{ m}$ , усвојену вредност константе  $m_i = 7$  за средину  $S^*$  и  $m_i = 10$  за средину  $S$ , и за фактор оштећења  $D = 0.7$ . Mohr-Coulomb-ови параметри смичуће чврстоће пукотина дефинисани су конверзијом из Barton-Bandis-овог критеријума лома, као и на основу опита смицања дуж пукотина на суседним локацијама.

Оно што је могуће уочити на основу резултата испитивања узорака јесте релативно широки опсег вредности једнооксијалне чврстоће на притисак, као и параметара смичуће отпорности  $c$  и  $\varphi$  добијених за узорке из средине испуцалих и делимично распаднутих шкриљаца  $S$ . Овакви резултати последица су постојања пукотина на релативно малом растојању, дуж којих је, због присуства глиновите материје на зидовима, смичућа чврстоћа незанемарљиво мања него ли што је то случај са стенским мостовима. Наведена запажања

<sup>1</sup> Линеарна зависност формулисана Mohr-Coulomb-овим критеријумом лома у лабораторијским условима је прихватљива за величине нормалног напона у распону  $0 - 300 \text{ kPa}$ .

<sup>2</sup> Параметри отпорности су преузети са суседних косина 3 и 4.

недвосмислено потврђују анизотропност грделичког шкриљца и оправдавају увођење утицаја анизотропије у анализу стабилности косине 2 (поглавље 6.)

Табела 4.2. Параметри деформабилности издвојених средина (преузето из пројектне документације)

	Модул стишљивости из едометарског опита $E_{oed} / E_{lin}^3$	Модул еластичности стенске масе $E_{rm}$ Генерализовани Hoek-Diederichs (2006), за MR=500	Поасонов коэффицијент $\nu$
<b>n</b>	усвојено $E_{lin}=10000$ kPa		0.35
<b>S<sup>d-e</sup>(S<sup>**</sup>)</b>	$E_{oed100-200}=7500-8333$ kPa		0.3
	$E_{oed200-400}=8200-9250$ kPa		
<b>S*</b>		211 MPa	0.25
<b>S</b>		1339 MPa	0.2

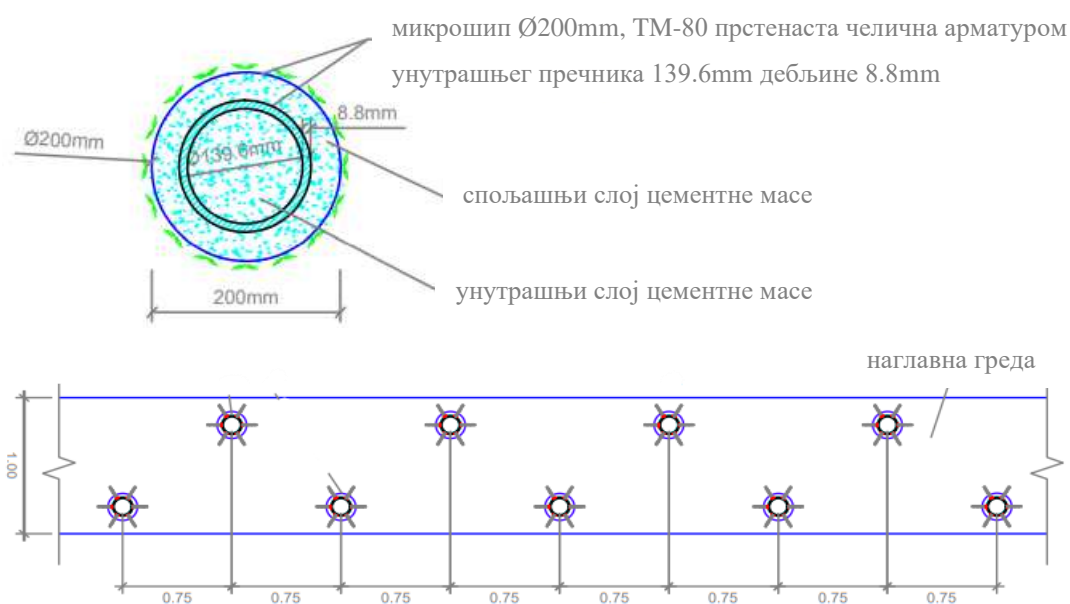
## 5. ПРИМЕЋЕНЕ МЕРЕ ЗАШТИТЕ КОСИНЕ

Деоница аутопута Е75 која пролази кроз Грделичку клисуру специфична је по изразито високим и стрмим косинама у кристаластим шкриљцима различитог степена распаднутости. Оне су у различитим фазама пројектовања представљале велики изазов за извођење истражних радова, како због неприступачности терена, обимних земљаних радова, тако и због могућности испадања блокова стенске масе и осипања материјала. Последица тога била је недовољна истраженост овог подручја, а самим тим и груба процена и екстраполација геолошких и геотехничких података, што је у више наврата подразумевало допунска истраживања, поступке препројектовања и примену различитих мера санације.

У оквиру пројекта за грађевинску дозволу из 2016. године, предложена је уградња различитих потпорних компоненти чијом би се комбинацијом дејстава постигла дугорочна стабилност косине и самим тим обезбедила ефикасна изградња и експлоатација тада будућег аутопута. У циљу заштите косине је том приликом изведено четири редова микрошипова, два реда у

<sup>3</sup> Претпостављени модул стишљивости насутог материјала.

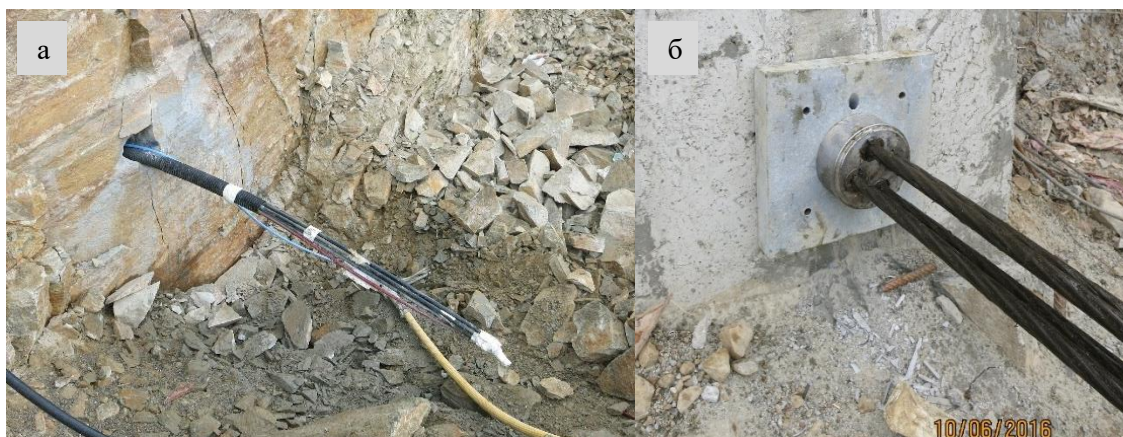
горњем делу косине и два реда на доњој берми (видети модел терена на слици 4.1). У конструктивном погледу, микрошипови су пречника  $\varnothing 200$  mm, дужине 22 – 26 m, са ТМ-80 прстенастом челичном арматуром (чврстоће на затезање 550 МПа) спољашњег пречника 139.6 mm и дебљине 8.8 mm. Ове челичне цеви запуњене су бетоном класе С25/30 са спољашње и унутрашње стране како би се формирао микрошип пречника 200 mm. Микрошипови у једном реду изведени су на растојању од 1.5 m и повезани бетонском наглавном гредом (слика 5.1).



Слика 5.1. Попречни пресек микрошипова и њихов распоред у плану (Пројекат санације косине 2 – ПГД, 2016)

Потпорна конструкција је поред микрошипова подразумевала и примену преднапрегнутих анкера, и то 7 редова анкера у горњем делу косине, и 4 реда анкера на доњој берми. Анкери су дужине 25 – 30 m, уграђени на међусобном растојању од 2 m. Дужина сидришне базе свих анкера износи 15 m. С обзиром да је реч о кабловским анкерима (слика 5.2), граница развлачења челичне арматуре при 0.1% деформације износи 218 kN, док је примењена сила преднапрезања величине 450 kN. Уграђени су кабловски анкери са 5 каблова, а пречник бушотине износио је 131 mm. Класа коришћеног челика за преднапрезање је Y1770 S7.

На лице косине је прскањем аплициран и торкрет, односно цементни бетон, у циљу заштите делова косине изложених дејству атмосферских утицаја и спречавања даље деградације испуцале стенске масе.



Слика 5.2. а) Изглед кабловског анкера уграђеног и бушотину у стенској маси; б) Глава преднапрегнутог анкера (сајле, котва, подложна плоча) (Берисављевић и др., 2021)

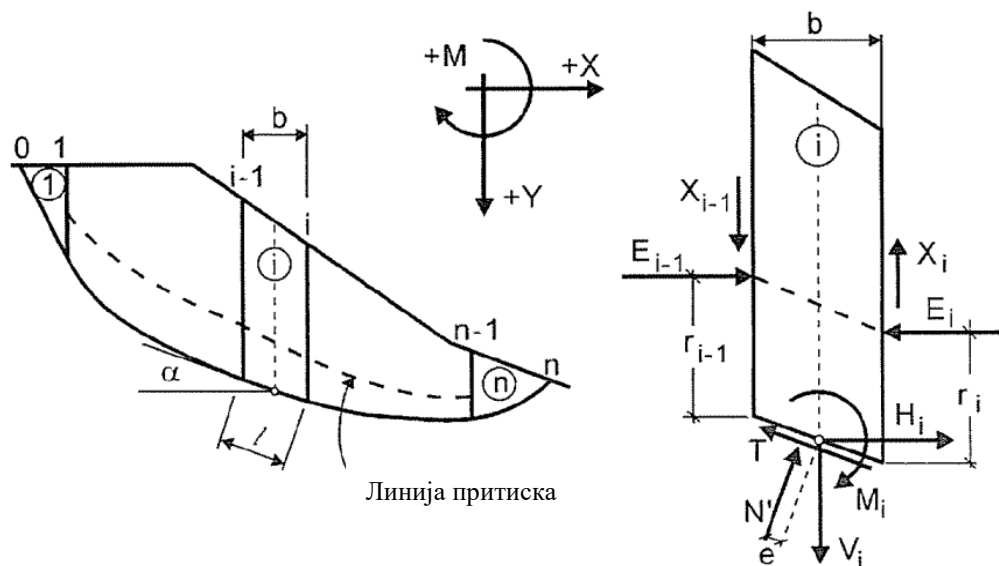
## 6. АНАЛИЗА СТАБИЛНОСТИ КОСИНЕ

### 6.1. Опште о детерминистичкој анализи стабилности

Анализа стабилности предметне косине спроведена је у програмском пакету *Slide2*, у оквиру ког је стабилност косина у тлу или стени могуће разматрати у дводимензионалним условима. Иако је проблем анализе стабилности суштински тродимензионалан, претпоставке о равном стању деформација дају ниже вредности фактора сигурности, односно вредности на страни сигурности. Програм *Slide2* специјализован је, између осталог, за прорачун фактора сигурности кружних и клизних површи произвољног облика. Анализе стабилности спроводе се применом метода граничне равнотеже, које подразумевају поделу потенцијалног клизног тела на вертикалне ламеле.

Методe граничне равнотеже које клизно тело деле на одређени број ламела (слика 6.1) могу бити приближне или тачне методе, у зависности од услова равнотеже у равни које задовољавају. Тачне методе ламела задовољавају услове равнотеже сила у два ортогонална правца и услов равнотеже момената. С обзиром да је проблем одређивања стабилности косине овим методама статички неодређен, основне претпоставке ових метода тичу се односа

компоненти међуламеларних сила. Методе које су коришћене за проверу стабилности предметне косине јесу метода Bishop-а и метода Spencer-а.



Слика 6.1. Силе које делују на карактеристичну ламелу (Максимовић, 2008)

Bishop (1955) је формулисао упрошћену методу која се базира на претпоставци о хоризонталним међуламеларним силама, уз занемаривање смичуће компонентне међуламеларних сила. Метода задовољава услове равнотеже момената и услов равнотеже вертикалних сила које делују на ламелу. Касније допуњује своју методу уводећи и утицај смичућих међуламеларних сила, при чему се поступак прорачуна значајно усложњава, а на крају добија ригорозније решење.

Spencer (1967) је дефинисао тачну методу која је иницијално настала за анализу кружних клизних површи. Задовољава све услове равнотеже и претпоставља константан нагиб међуламеларних сила. Касније је проширена како би могла да се примењује и за анализу сложених клизних површи. Спенсерова метода представља специјални случај метода код којих се функција нагиба међуламеларних сила може задати произвољно.

Концепт фактора сигурности представља један од најчешће примењиваних начина за процену стабилности косина. Дефиниција фактора сигурности која се користи у формулацији метода граничне равнотеже подразумева однос расположиве смичуће чврстоће и мобилисане чврстоће



потребне да клизно тело одржи у равнотежи (једначина 6.1). Фактор сигурности одређује се и сматра константним дуж хипотетичке клизне површи. Суштина примене овог концепта у анализама стабилности јесте дефинисање такозване критичне клизне површи, односно клизне површи дуж које фактор сигурности има најмању вредност за дате услове. У геотехничкој пракси, прихватљиве вредности фактора сигурности најчешће се крећу у распону од 1.2 до 1.5, када се сматра да је косина стабилна. Најнижа физички прихватљива вредност фактора сигурности једнака је 1.0, када се сматра да се косина налази у условима граничне равнотеже.

$$F_s = \frac{\tau_f}{\tau_m} \quad (6.1)$$

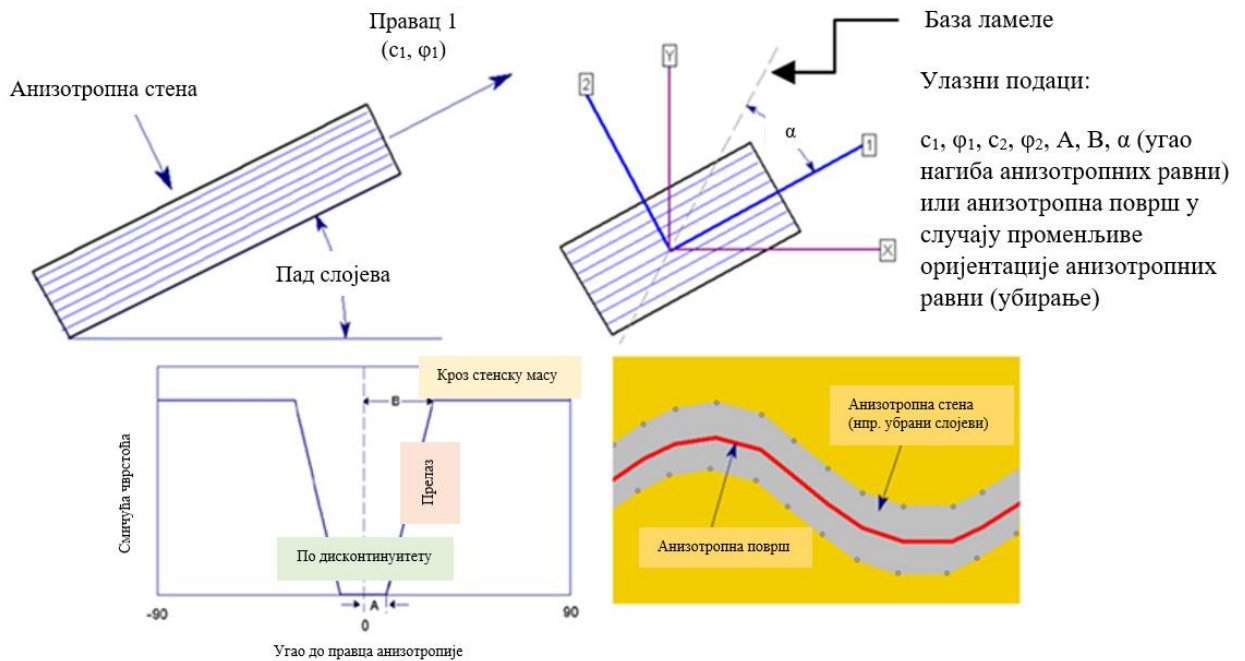
где је  $\tau_f$  – смичућа чврстоћа стенске масе, а  $\tau_m$  – мобилисана смичућа чврстоћа стенске масе.

## 6.2. Дирекциони модели чврстоће

Дирекциони модели чврстоће омогућавају да се клизним површима приликом нумеричких анализа задају различите вредности параметара смичуће чврстоће. Помоћу дирекционих модела, параметри се могу задати ослабљеним зонама (нпр. фолијација, слојевитост), које се налазе на веома блиском растојању (cm-dm реда величине) у стенској маси. Постоје бројни примери коришћења дирекционих модела за анализу анизотропне стенске масе, како у 2D, тако и у 3D условима. У наставку ће укратко бити речи о два дирекциона модела, који су имплементирани у програмске пакете *Slide2* и *RS2 (Rocscience Inc.)*.

Основна претпоставка дирекционих модела јесте да су равни анизотропије континуалне. Чврстоћа представља “осредњену вредност” између параметара пукотина и стенских мостова. Четири кључне компоненте дирекционих модела су: чврстоћа стенске масе, чврстоћа равни анизотропије, оријентација равни анизотропије и прелаз између чврстоће пукотина и чврстоће стенске масе.

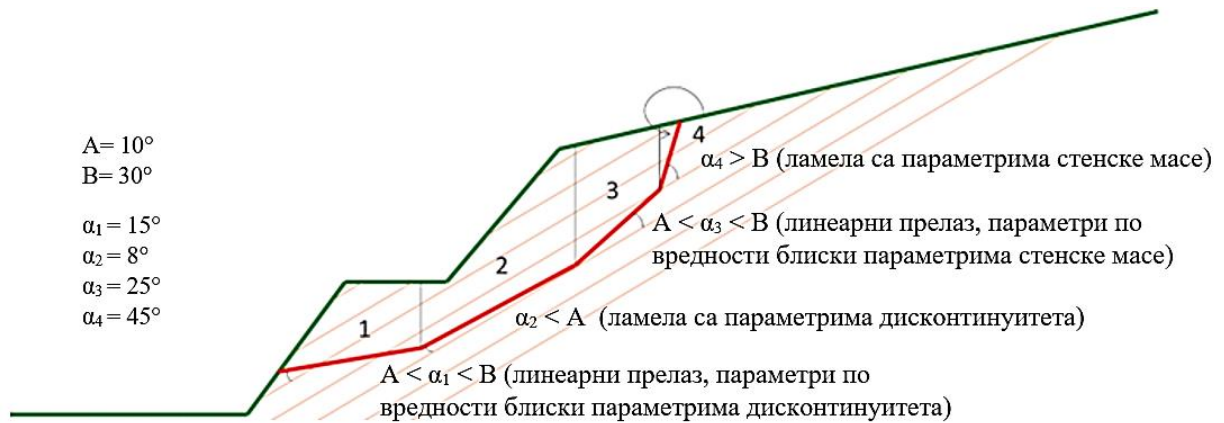
Анизотропни линеарни дирекциони модел прелазну зону између чврстоће стенске масе и пукотина у обзир узима преко угловних параметара  $A$  и  $B$  (слика 6.2). Параметар  $A$  означава распон углова у оквиру којих ће се бази ламеле, уколико се она нађе унутар тог угловног домена, приписати чврстоћа дисконтинуитета. Параметар  $B$  дефинише прелаз ка чврстоћи стенске масе. Уколико је нагиб ламеле већи од угла  $B$ , тада се бази ламеле приписује чврстоћа стенске масе. Уколико се нагиб ламеле налази између угловних параметара  $A$  и  $B$ , тада се чврстоћа у бази ламеле одређује линеарном функцијом. Ограничење овог модела је у томе што се приликом дефинисања параметара смичуће чврстоће дисконтинуитета и стенске масе, могу користити само Mohr-Coulomb-ови параметри.



Слика 6.2. Шематски приказ анизотропног линеарног модела (Берисављевић и др., 2021)

Параметри  $A$  и  $B$  се могу одредити на основу повратних анализа. Њихови распони су следећи (Bar и Weekes, 2017):  $A=5-10^\circ$  (у зависности од поузданости мерења елемената пада и карактеристика стенске масе) и  $B=5-30^\circ$  (на бази повратних анализа стабилних и нестабилних косина и DEM (*discrete element modelling*) моделирања, најчешће је  $B=15-30^\circ$ ).

На слици 6.3. приказан је пример одређивања параметара чврстоће за косину са издвојеном клизном површи која је издељена на више ламела. Према претходно објашњеном поступку, свакој од ламела су приписани параметри стенске масе или дисконтинуитета у зависности од нагиба ламела и угловних домена  $A$  и  $B$ .



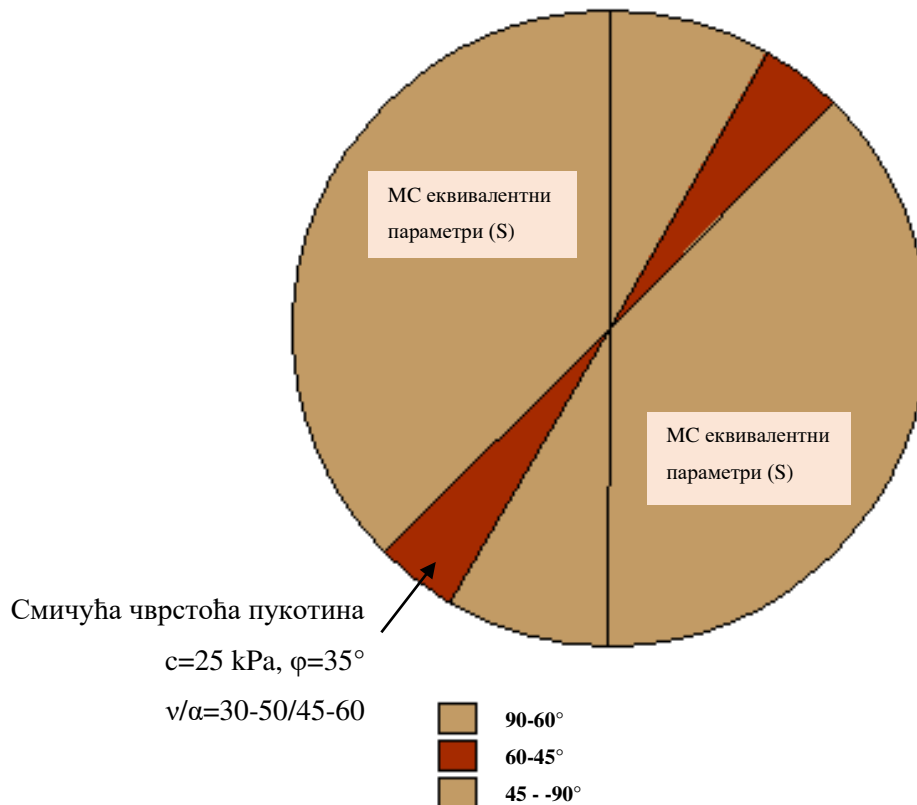
Слика 6.3. Пример приписивања параметара бази ламеле

Генерализовани анизотропни модел нема ограничења у погледу примене улазних параметара. Чврстоћа дисконтинуитета и стенске масе може бити описана било којим критеријумом лома. Приликом формулације модела, претпоставља се да су параметри дефинисани у дискретним угловним доменима. Овај модел може се проширити на три димензије, при чему се прелаз између чврстоће пукотина и стенске масе може представити линеарном функцијом.

Уколико се за пример узме фамилија пукотина на предметној косини са нагибом измереним дуж лица косине који износи  $45 - 50^\circ$ , а азимут падне праве се поклапа са азимутом лица косине, тада се у том угловном опсегу бази ламеле приписују параметри смичуће чврстоће дисконтинуитета. Код осталих угловних опсега меродавна је чврстоћа стенске масе. На слици 6.4. је дат графички приказ формулације генерализованог анизотропног модела за средину испуцалих и делимично распаднутих шкриљаца  $S$ .

Могућност примене дирекционих модела у конкретном случају грделичког шкриљаца заснива се на концепту пенетративних пукотина или

“ubiquitous joints”, према страниј литератури. Пукотине се у оквиру зоне испуцалих и делимично распаднутих шкриљаца налазе на растојању дециметарског реда величине, а узме ли се у обзир размера посматрања проблема, потпуно је оправдано моделовање на претходно описан начин.



Слика 6.4. Генерализовани анизотропни модел (Slide2)

Оно што је од значаја напоменути јесте то да геолошки модели испуцалих стенских маса готово никада нису потпуно тачни, а анизотропија је често присутна, па се она мора узети у обзир приликом анализа стабилности косина. Разматрање анизотропије има смисла само у случају када је њен утицај на стабилност ископа недвосмислено доказан, за шта је потребно извршити детаљна истраживања терена како би се установило присуство неповољно оријентисаних анизотропних равни и евентуално испитао утицај инхерентне анизотропије на чврстоћу узорака у лабораторијским условима. Анализа стабилности спроведена узимајући у обзир утицај анизотропије, даће ниже вредности фактора сигурности, него што би то био случај са изотропном стенском масом. (Берисављевић и др., 2021)

### 6.3. Улазни подаци за програм *Slide2*

Основни задатак овог рада јесте упоредно анализирање стабилности косине 2 у изотропном и анизотропном стању, и самим тим препознавање значаја утицаја анизотропије на понашање зелених шкриљаца Грделице. Потреба за овим лежи у бројним појавама деформација и нестабилности које су се континуирано дешавале на косини, све до глобалног лома који се догодио 2018. године, упркос примењеним мерама заштите.

Приликом анализе стабилности косина методама граничне равнотеже, сила од анкера се може узети у разматрање на начин да повећава отпорне или смањује гурајуће силе у једначини за одређивање величине фактора сигурности. У случају активних (преднапрегнутих) анкера, уобичајено је да се сила узме у обзир тако да смањи гурајуће силе.

Затезна чврстоћа кабловских анкера  $T_T$  може да се израчуна из следеће једначине:

$$T_T = n_c \cdot f_{p0.1k} \quad (6.2)$$

где је  $n_c$  – број каблова, а  $f_{p0.1k}$  – граница развлачења челичне арматуре при 0.1% деформације.

Чврстоћа на извлачење може се преко ефективних напона срачунати на следећи начин (*Geo5, User's guide*):

$$T_p = \frac{\pi \cdot d_h \cdot (K_a \cdot \sigma \cdot \tan \varphi + c)}{F_{sp}} \quad (6.3)$$

при чему је:  $d_h$  – пречник бушотине,  $K_a = \frac{1+(1-\sin \varphi)}{2}$ ,  $\sigma$  – вертикални геостатички напон, који се обично усваја за висину надслоја на половини дужине сидришне базе;  $\varphi$  - ефективни угао смичуће отпорности стенске масе;  $c$  – кохезија стенске масе,  $F_{sp}$  – фактор сигурности против лома извлачењем.

Чврстоћа главе анкера може се израчунати као (*Geo5, User's guide*):

$$T_h = \frac{\min(T_T, T_P \cdot L) \cdot (0.6 + 0.2 \cdot (S_{max} - 1))}{F_{sh}} \quad (6.4)$$

при чему је:  $L$  – дужина анкера;  $S_{\max}$  – највеће растојање између анкера;  $T_T$  – затезна чврстоћа анкера;  $T_p$  – чврстоћа анкера на извлачење;  $F_{sh}$  – фактор сигурности против лома главе анкера. (Берисављевић и др., 2021)

Прорачун улазних параметара за преднапрегнуте анкере за анализу стабилности у програму *Slide2*, извршен је на основу претходно дефинисаних једначина, а резултати су приказани у табели 6.1. Коришћена вредност фактора сигурности против лома извлачењем и лома главе анкера износи 1.35. Геометријски подаци уграђених анкера дати су у поглављу број 5.

Табела 6.1. Срачунате вредности сила за преднапрегнуте анкере

Ред анкера	$T_T$ (kN)	$T_p$ (kN)	$T_h$ (kN)
1		102	
2		164	
3		159	
4		176	
5		193	
6	$5 \cdot 218 = 1090$	210	646
7		227	
8		235	
9		249	
10		263	
11		277	

Смичућу силу микрошипова могуће је одредити на основу следеће једначине:

$$T_{max} = \frac{0.57 \cdot f_y}{F_s} \cdot \frac{A}{2} \quad (6.5)$$

где је:  $f_y$  – граница течења челика,  $A$  – површина попречног пресека микрошипа (површина кружног прстена),  $F_s$  – фактор сигурности против лома челика. На овај начин срачуната смичућа сила микрошипова изведених на косини 2 износи 493 kN, за сваки ред микрошипова појединачно. Коришћени фактор

сигурности против лома челика износи 1.15. Геометријски подаци уграђених микрошипова дати су у поглављу број 5.

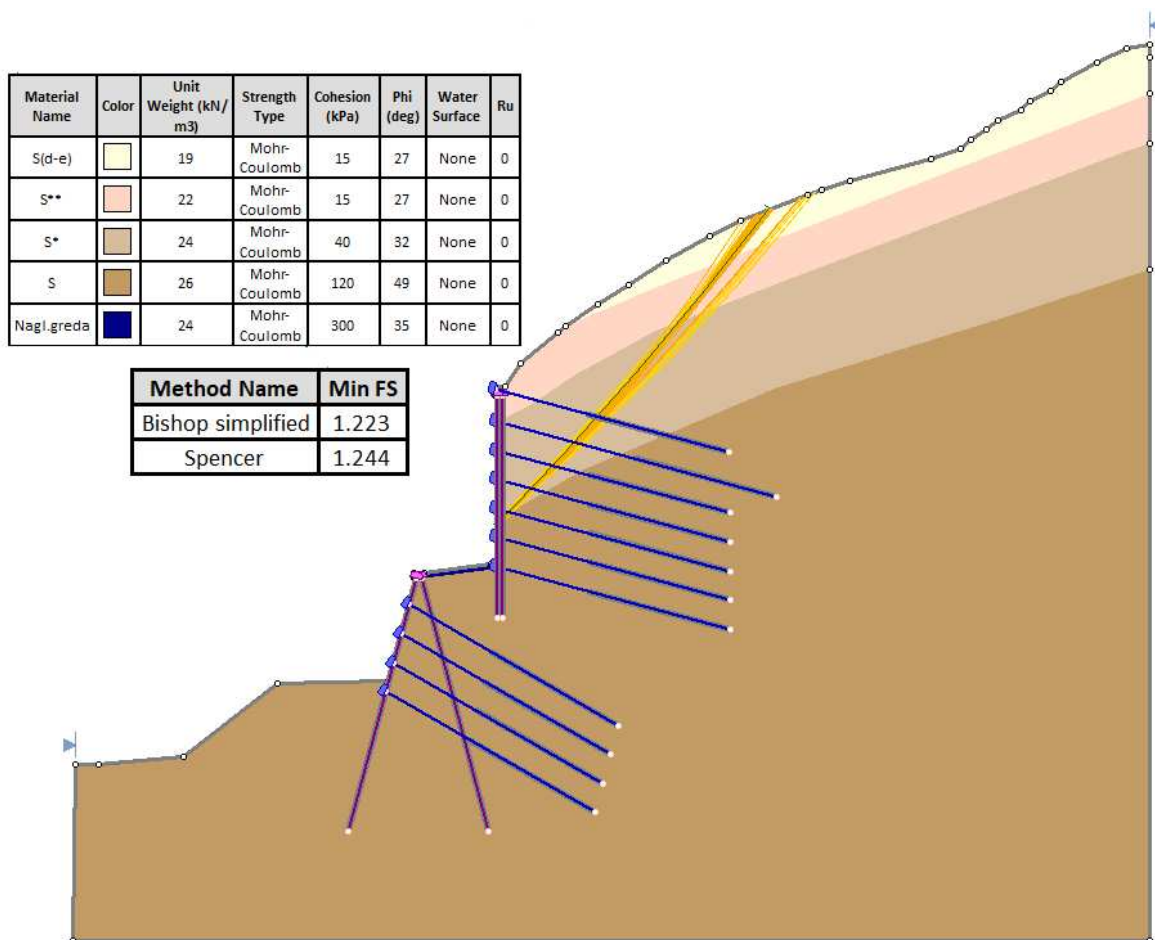
Анализа стабилности спроведена је за два сценарија (према *Slide2*), односно за изотропно и анизотропно понашање стенске масе, а добијени резултати ће у наставку текста бити приказани појединачно. Оно што им је заједничко, осим модела терена и улазних параметара примењених мера стабилизације косине, јесу и генералне поставке анализе (*Project settings* према *Slide2*). Ту спадају и одабране методе граничне равнотеже на основу којих ће стабилност косине бити анализирана. За прорачун фактора сигурности критичне клизне површи одабрана је клизна површ кружног облика и опција *Auto Refine Search* (према *Slide2*), који не захтева унос било каквих додатних података од стране корисника за даљи прорачун. Такође, анализе за оба сценарија спроведене су без узимања у обзир порних притисака.

Формирање кружне клизне површи карактеристично је углавном за тло или веома слабу и испуцалу стенску масу, у случајевима када су дисконтинуитети оријентисани повољно, тако да не може доћи до планарног клизања или клизања клина. Лом кроз стенску масу догодиће се и када је она здробљена, те су фрагменти који је изграђују значајно мањих димензија у односу на димензије косине, и може се поистоветити са тлом. Такође, у веома распаднутој стенској маси и код дисконтинуитета оријентисаних без нарочитог тренда може доћи до лома кружног облика. (Ноек, 2006) С тим у вези, иако је реч о стенској маси, у овом случају је одабрана кружна клизна површ, јер се ради о шкриљцима различитог степена распаднутости и испуцалости.

#### **6.4. Анализа стабилности за изотропно понашање палеозојског шкриљца**

Анализа стабилности без узимања у обзир утицаја анизотропије на понашање палеозојског шкриљца спроведена је за модел терена приказан у поглављу број 4. Инжењерскогеолошким срединама елувијално-делувијалној распадини шкриљаца ( $S^{d-e}$ ), дробинској зони шкриљаца ( $S^{**}$ ), јако распаднутим шкриљцима ( $S^*$ ) и разломљеним, испуцалим и делимично распаднутим

шкриљцима (S) приписани су физичко-механички параметри приказани у поглављу број 5, као и на слици 6.4. Потпорној конструкцији од микрошипова и преднапрегнутих анкера приписани су параметри отпорности приказани у потпоглављу 6.3. Прорачун фактора сигурности спроведен је за кружну клизну површ применом Bishop-ове и Spencer-ове методе граничне равнотеже, без узимања у обзир порних притисака. Резултати анализе графички су приказани на слици 6.4.



Слика 6.5. Фактори сигурности и положај критичне клизне површи за изотропно понашање шкриљца

Положај критичне клизне површи везује се за горњи део косине са два паралелно уграђена реда микрошипова и седам редова преднапрегнутих анкера. Фактор сигурности за критичну клизну површ, односно најмања срачуната вредност фактора сигурности износи 1.223 према Bishop-у и 1.244 према Spencer-у. Тумачено са аспекта стабилности косине за задате услове, фактор сигурности  $F_s \approx 1.23$  указује на то да би се за изотропно стање косина



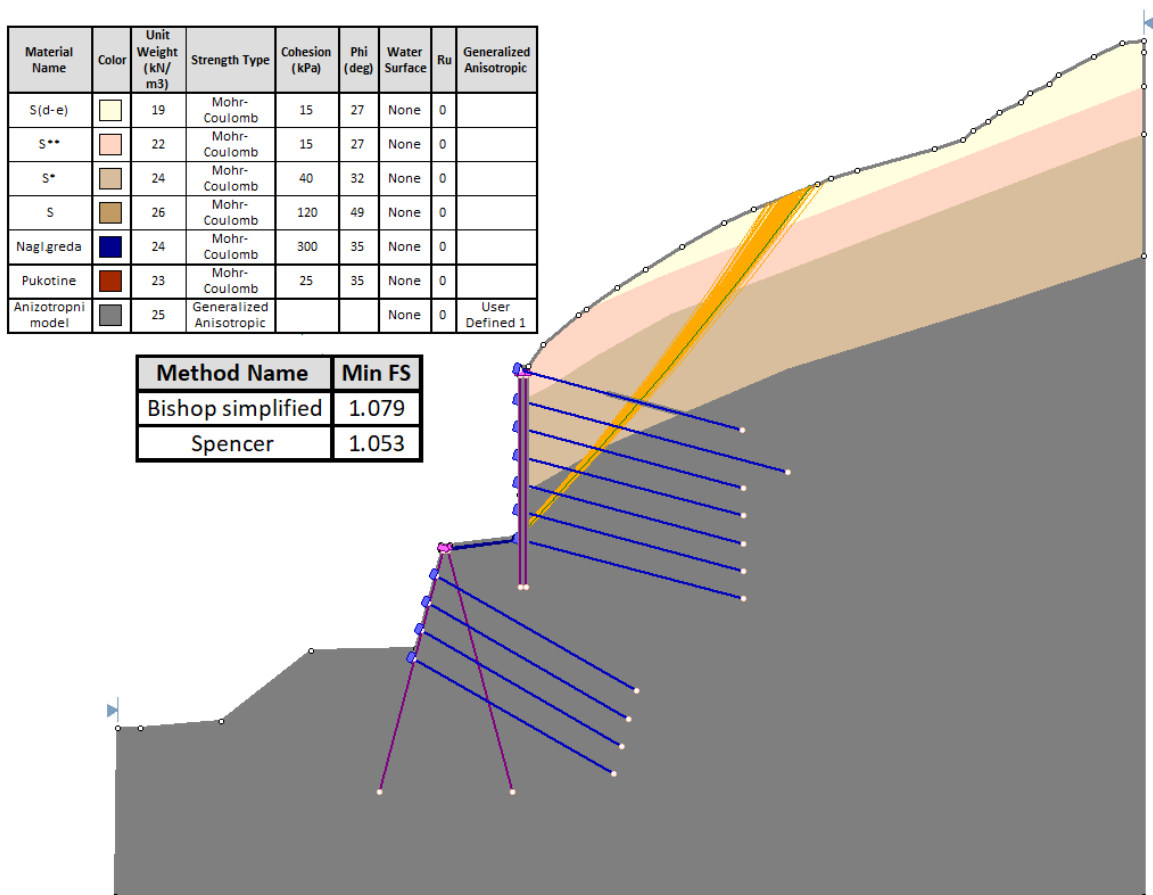
могла сматрати стабилном. Оваква интерпретација добијених резултата последично доводи до закључка да би потпорна конструкција од микрошипова и преднапрегнутих анкера у (тада) будућности била довољна и ефикасна мера заштите косине при даљој изградњи и експлоатацији аутопута.

### **6.5. Анализа стабилности за анизотропно понашање палеозојског шкриљца**

Косина 2 анализирана је и са аспекта утицаја анизотропије на њену стабилност, односно за случај реалног стања са терена, без занемаривања очигледне промене параметара смичуће отпорности дуж дисконтинуитета. Када је реч о моделу терена, карактеризацији средина које га изграђују и потпорној конструкцији од микрошипова и анкера - анализа је спроведена аналогно претходном случају изотропног понашања. При прорачуну сила за анкере као меродавни су коришћени параметри стенске масе у којој се налази сидришна база, с обзиром на однос положаја анкера и пукотина у конструкцији терена.

Међутим, оно што суштински разликује анизотропни случај јесте увођење пукотина у анализу стабилности, као и формирање анизотропног дирекционог модела пукотина. Са аспекта стабилности косине, најкритичнијег положаја су пукотине система  $S_{p4}$ , с обзиром да су пружања приближно паралелног пружању косине и да падају ка траси пута под углом  $\alpha=45-60^\circ$ . Углавном су равне и глатке са траговима смицања, а на њиховим зидовима се неретко може уочити танак филм глиновитог материјала.

Пукотине су са параметрима усвојеним на основу теренских испитивања (поглавље бр. 4) приписане средини  $S$ , односно испуцалим и делимично распаднутим шкриљцима. Потом је применом генерализованог анизотропног модела дефинисан угловни опсег у оквиру ког се бази ламеле клизног тела приписује смичућа чврстоћа пукотина (слика 6.4). Прорачун фактора сигурности потенцијалне критичне клизне површи извршен је, такође, за површ кружног облика и исте методе граничне равнотеже као и код изотропног случаја. Резултати анализе графички су приказани на слици 6.6.



Слика 6.6. Фактори сигурности и положај критичне клизне површи за анизотропно понашање шкриљца

Критична клизна површ и у овом случају свој положај заузима у горњем делу косине, што одговара положају нестабилности која је констатована на терену. Фактор сигурности према Bishop-у износи 1.079, а према Spencer-у 1.053. Физичко значење фактора сигурности  $F_s \approx 1.0$  подразумева да се косина налази у стању граничне равнотеже, односно да у сваком тренутку може доћи до лома. С тим у вези, на примеру изразито анизотропног шкриљца Грделице показано је да анализа стабилности спроведена узимајући у обзир утицај анизотропије заиста даје ниже вредности фактора сигурности, него што је то случај са изотропном стенском масом, о чему је и дискутовано у потпоглављу 6.2.

Овако добијени резултати не говоре у прилог ефикасности (тада) примењених мера стабилизације и заштите косине, већ напротив потврђују природу и геометрију лома стенске масе који се догодио 2018. године (слика

6.7). Важно је напоменути да вредност фактора сигурности не треба узимати у обзир једнозначно и без поговора. У овако комплексним случајевима од круцијалног је значаја, пре свега, разумети природу појаве нестабилности, а тек онда разматрати резултате програмских анализа и физичко значење фактора сигурности.



Слика 6.7. Глобални лом косине 2018. године (преузето са: <https://www.juznevesti.com>)

## 7. Закључак

Предметно подручје припада најзахтевнијој деоници аутопута Е75, како за пројектовање, тако и за изградњу. Непроступачни терени Грделичке клисуре кроз које ова деоница пролази изграђени су од формације веома анизотропног шкриљаца палеозојске старости који је специфичан по варијабилном степену испуцалости и распаднутости. С тим у вези, у инжењерскогеолошком погледу, могуће је разликовати три средине: дробинску зону шкриљаца  $S^{**}$ , зону јако распаднутих шкриљаца  $S^*$  и зону разломљених, испуцалих и делимично распаднутих шкриљаца  $S$ .

Предмет рада подразумева разматрање утицаја анизотропије, односно промене параметара смичуће чврстоће у различитим правцима стенске масе, на стабилност косине 2. Стенске масе су готово увек анизотропни материјали, што је последица присуства дисконтинуитета, а с обзиром да је испуцалост

палеозојског шкриљца један од кључних утицајних фактора (не)стабилности предметне косине на свим репрезентативним нивоима посматрања, потреба за анализом овог типа је у потпуности оправдана.

Анализа стабилности предметне косине спроведена је за случај изотропног и анизотропног понашања палеозојског шкриљца, у програмском пакету *Slide2*, у оквиру ког је стабилност могуће разматрати у дводимензионалним условима, применом метода граничне равнотеже. При моделовању и прорачунима, у обзир је узета конфигурација косине пре глобалног лома стенске масе 2018. године, са уграђеним потпорним елементима – микрошиповима пречника 200 mm, дужине 22 – 26 m и преднапрегнутим анкерима дужине 25 – 30 m. Прорачун фактора сигурности извршен је за кружну клизну површ применом Bishop-ове и Spencer-ове методе, без узимања у обзир порних притисака.

У случају изотропног понашања, критична клизна површ лоцирана је у горњем делу косине, а срачунати минимални фактор сигурности  $F_s \approx 1.23$  указује на то да би се, за задате услове, косина могла сматрати стабилном. Овакво тумачење резултата доводи до закључка да би потпорна конструкција од микрошипова и преднапрегнутих анкера у (тада) будућности била довољна и ефикасна мера заштите косине при даљој изградњи и експлоатацији аутопута. За анизотропни случај, у анализу су уведене и пукотине у оквиру средине кроз коју највећим делом пролази траса аутопута – S, чије је пружање приближно паралелно пружању косине, а под нагибом  $\alpha=45-60^\circ$  падају низ косину, што их чини неповољним по питању стабилности. Дефинисање параметара отпорности дуж клизне површи извршено је дирекционим моделовањем пукотина, конкретно применом генерализованог анизотропног модела. Критична клизна површ и у овом случају свој положај заузела је у горњем делу косине, што одговара положају нестабилности која је констатована на терену. Минимални фактор сигурности добијен узимањем у обзир анизотропије износи  $F_s \approx 1.0$  што у физичком смислу значи да се косина налази у стању граничне равнотеже.

На примеру палеозојског шкриљца Грделице је упоредним анализирањем стабилности косине за изотропно и анизотропно понашање показано да фактор сигурности може варирати од вредности која дефинише стабилну косину, до вредности која указује на могућност лома у сваком тренутку. Овакав закључак потврђује полазну чињеницу овог рада, а која се односи на анализу стенске масе са аспекта дисконтинуалног, хетерогеног, анизотропног и нелинеарно-еластичног материјала, у циљу избегавања катастрофалних последица неадекватно спроведених анализа.

### Списак литературе

Attewell, P., Sandford, M. (1974) *Intrinsic Shear Strength of a Brittle, Anisotropic Rock – Experimental and Mechanical Interpretation*. Int. J. Rock Mech. And Min. Sci. and Geomech.

Bar, N., Weekes, G. (2017) *Directional shear strength models in 2D and 3D limit equilibrium analyses to assess the stability of anisotropic rock slopes in the Pilbara region of Western Australia*. Australian Geomechanics

Barton, N. (1973) *Review of a new shear strength criterion for rock joints*. Engineering Geology

Barton, N. (1976) *The shear strength of rock and rock joints*. Int. J. Rock Mech. and Min. Sci. and Geomech.

Barton, N., Choubey, V. (1977) *The shear strength of rock joints in theory and practice*. Rock Mech

Берисављевић, З., Берисављевић Д., Марјановић М. (2021) *Стабилност косина у стенској маси*. Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет

Берисављевић, Д., Берисављевић З., Мелентијевић С. (2022) *The shear strength evaluation of rough and infilled joints and its indications for stability of rock cutting in schist rock mass*. Bulletin of Engineering Geology and Environment. doi: 10.1007/s10064-022-02580-8

Bishop, A.W. (1955) *The use of slip circle in the stability analysis of slopes*. Geotechnique 5

Cho, J.W., Kim, H., Jeon, S., Min, K.B. (2012) *Deformation and strength anisotropy of Asan gneiss, Boryeong shale and Yeoncheon schist*. Int. Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences

Donath, F. (1964) *Strength variation and Deformational behaviour in anisotropic rock*. In W.R. Judd. (Ed.) *State of Stress in the Earth's Crust*. New York, Elsevier

Hoek, E. (1964) *Fracture of anisotropic rock*. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy

Hoek, E. (2006) *Practical Rock Engineering*

ISRM. (1985) *Suggested method for determining point load strength*. International journal of rock mechanics and mining sciences and geomechanics abstracts

Li, D., Wong, L.N.Y., Liu, G., Zhang, X. (2012) *Influence of water content and anisotropy on the strength and deformability of low porosity meta-sedimentary rocks under triaxial compression*. Engineering Geology

Маровић, М. (2001) *Геологија СЦГ (предавања студентима петрологије и геофизике) – скрипта*. Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет

McLamore, R., Gray, K.E. (1967) *The mechanical behaviour of anisotropic sedimentary rocks*. Amer. Soc. Mech. Engrs. Trans.

Ramamurthy, T. (1993) *Strength and Modulus Responses of anisotropic rocks*. Comprehensive rock engineering, Pergamon Press, Oxford.

Saeidi, O., Vaneghi, R.G., Gholami, R., Rasouli, V. (2013) *A modified empirical criterion for strength of transversely anisotropic rocks*. Bulletin of Engineering Geology and Environment. doi: 10.1007/s10064-013-0472-9

Saroglou, H., Qi, S., Guo, S., Wu, F. (2018) *ARMR, a new classification system for the rating of anisotropic rock masses*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment. doi: 10.1007/s10064-018-1369-4

Saroglou, H., Tsiambaos, G. (2008) *A modified Hoek-Brown criterion for anisotropic intact rock*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. doi: 10.1016/j.ijrmms.2007.05.004

Saroglou, H., Tsiambaos, G. (2007) *Classification of anisotropic rocks*. Proceedings of 11<sup>th</sup> International Congress of Rock Mechanics

Spencer, E. (1967) *A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel interslice forces*. Geotechnique 17

Tien, Y.M., Kuo, M.C., Juang C.H. (2006) *An experimental investigation of the failure mechanism of simulated transversely isotropic rocks*. Int. Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences

Zhang, X.P., Wong, L.N.Y., Wang, S.J., Han, G.Y. (2011) *Engineering properties of quartz mica schist*. Engineering Geology

Геотехнички елаборат о изведеним истраживањима и испитивањима за израду допуне главног пројекта аутопута Е75, деоница: Горње поље – Царичина долина, Лот 1: Пут и мостови од Грделице – Тунел Предејане у зони засека 2. Саобраћајни Институт ЦИП д.о.о., Београд, 2015.

Геотехнички елаборат о геотехничким истраживањима терена за потребе санације косине бр. 2 од km: 876+075 до km: 876+225 на аутопуту Е75, ЛОТ- 1, деоница Горње поље – Царичина Долина. Саобраћајни Институт ЦИП д.о.о., Београд, 2019

Пројекат санације косине 2 у оквиру Пројекта за грађевинску дозволу, Аутопут Е75: Предејане (Горње Поље) – Царичина долина (Лот 1), Косина 2, km: 875+505 до km: 876+240. Грађевински факултет, Универзитет у Београду, 2016

## ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ ЗАВРШНОГ РАДА

Име и презиме студента Ксенија Мицић

Број индекса Г 601/21

### И з ј а в љ у ј е м

да је завршни рад под насловом

Утицај анизотропије на стабилност косине 2 у Грделичкој клисури

---

---

---

---

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да завршни рад у целини ни у деловима није био предложен за стицање друге дипломе на студијским програмима Рударско-геолошког факултета или других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

У Београду, \_\_\_\_\_

Потпис студента

---



**ИЗЈАВА**  
**О ИСТОВЕТНОСТИ ШТАМПАНЕ И ЕЛЕКТРОНСКЕ ВЕРЗИЈЕ**  
**ЗАВРШНОГ РАДА**

Име (име родитеља) и презиме студента Ксенија (Драган) Мицић

Број индекса Г 601/21

Студијски програм Геотехника

Наслов рада Утицај анизотропије на стабилност косине 2 у Грделичкој клисури

Ментор Доц. др Зоран Берисављевић

Изјављујем да је штампана верзија мог завршног рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради одлагања у Дигиталном репозиторијуму Рударско-геолошког факултета.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити у електронском каталогу и у публикацијама Рударско-геолошког факултета.

У Београду, \_\_\_\_\_

**Потпис студента**

\_\_\_\_\_

## ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ ЗАВРШНОГ РАДА

Овлашћујем библиотеку Рударско-геолошког факултета да у Дигитални репозиторијум унесе мој завршни рад под насловом:

Утицај анизотропије на стабилност косине 2 у Грделичкој клисури

---

---

који је моје ауторско дело.

Завршни рад са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Мој завршни рад одложен у Дигиталном репозиторијуму Рударско-геолошког факултета је *(заокружити једну од две опције)*:

I. редуковано доступан кроз наслов завршног рада и резиме рада са кључним речима;

II. јавно доступан у отвореном приступу, тако да га могу користити сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се уз сагласност ментора одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

*(Заокружите само једну од шест понуђених лиценци. Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве.)*

У Београду, \_\_\_\_\_

**Потпис ментора**

**Потпис студента**

---

---

1. **Ауторство.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.
  2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.
  3. **Ауторство – некомерцијално – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.
  4. **Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.
  5. **Ауторство – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.
  6. **Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.
-