

# Дефинисање механичких својстава алтерисаног стенског материјала лабораторијским методама

Вељко М. Рупар



Дигитални репозиторијум Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду

**[ДР РГФ]**

Дефинисање механичких својстава алтерисаног стенског материјала лабораторијским методама | Вељко М. Рупар | | 2022 | |

<http://dr.rgf.bg.ac.rs/s/repo/item/0006224>

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ  
РУДАРСКО – ГЕОЛОШКИ ФАКУЛТЕТ

Вељко М. Рупар

**ДЕФИНИСАЊЕ МЕХАНИЧКИХ СВОЈСТАВА АЛТЕРИСАНОГ  
СТЕНСКОГ МАТЕРИЈАЛА ЛАБОРАТОРИЈСКИМ МЕТОДАМА**

Докторска дисертација

Београд, 2021.

UNIVERSITY OF BELGRADE  
FACULTY OF MINING AND GEOLOGY

Veljko M. Rupar

**DETERMINATION MECHANICAL PROPERTIES OF ALTERED  
ROCK MATERIAL BY LABORATORY METHODS**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2021



Ментор:

---

**Др Владимир Чебашек, ванредни професор**  
Универзитет у Београду - Рударско-геолошки факултет  
Ужа научна област: Механика стена

Чланови комисије:

---

**Др Небојша Гојковић, редовни професор**  
Универзитет у Београду - Рударско-геолошки факултет  
Ужа научна област: Механика стена

---

**Др Радоје Пантовић, редовни професор**  
Универзитет у Београду - Технички факултет у Бору  
Ужа научна област: Рударство и геологија

Датум одбране: \_\_\_\_\_





## Сажетак

Основни циљ овог рада је да представи методологију одређивања механичких својстава хетерогеног стенског масива који изграђују дацит (Д) и алтерисани дацит (АД), где је уочена је зона постепеног преласка од алтерисаног дацита до дацита. Механичка својства стенског масива у тој зони утврђена су на основу лабораторијских испитивања једноосне и троосне чврстоће на притисак стенског материјала композитних узорак. Композитни узорци су се састојали од дискова стенског материјала, при чему је висина дискова  $h$  дефинисала различити процентуални удео појединог стенског материјала, дацита (Д), који представља чвршћу компоненту, и алтерисаног дацита (АД), који представља слабију компоненту у пробним телима. Функционална зависност промене параметара чврстоће стенског материјала (једноосне чврстоће на притисак, троосне чврстоће на притисак непоремећеног стенског материјала и материјалне константе) са повећањем учешћа "слабијег" стенског материјала утврђена је на основу резултата испитивања једноосне и троосне чврстоће на притисак. Учешће алтерисаног дацита директно утиче на начин и механизам лома током испитивања. Једноосна чврстоћа на притисак ( $\sigma_{ci}^{UCS}$ ) и троосна чврстоћа на притисак непоремећеног стенског материјала ( $\sigma_{ci}^{TX}$ ) опадају експоненцијално са повећањем процентуалног учешћа АД.

Утврђене зависности  $\sigma_{ci}^{TX}$  и константе  $m_i$  дефинишу поузданије вредности параметара чврстоће стенске масе, које се, заједно са одговарајућим системима класификације стенског масива, могу користити као основа за процену параметара стенског масива. У оквиру овог рада је коришћена GSI класификација којом се врши редуковање чврстоће стенског масива на основу заступљених геолошких услова у стенском масиву. Стога, на основу свих израчунатих параметара чврстоће за различите процентуалне садржаје АД (0-100%), могуће је прогнозирати параметре чврстоће хетерогеног стенског масива на прелазу чврсте компоненте (Д) и слабе компоненте (АД).

Вредности параметара чврстоће стенског масива утврђене на претходно описани начин су биле основа за израду геомеханичких модела помоћу којих је извршена анализа стабилности косина. Анализа стабилности косина је извршена на карактеристичном профилу у правцу напредовања површинског копа, са променљивим углом нагиба завршне косине који се кретао у распону 20-70°, где је анализом обухваћено два случаја: са и без коришћења транзиционе зоне. Транзициона зона је разматрана на растојању границе Д и АД од горње равни косине у распону од 0-140 m са кораком од 20 m. На тај начин је за вредност фактора сигурности  $F_s=1,3$  за сваки случај посебно, утврђен максимални угао нагиба завршне косине.

**Кључне речи:** дацит, алтерисани дацит, једноосна чврстоћа на притисак, троосна чврстоћа на притисак, композитни узорци, механика стена, стабилност косина

**Научна област:** Рударско инжењерство

**Ужа научна област:** Механика стена

**УДК број:** 624.12:622.83(043.3)



## Abstract

The aim of this paper presents a methodology for determining mechanical properties of heterogeneous rock mass composed of dacite (D and altered dacite (AD), where zone of gradual transition from altered dacite to dacite was observed in the rock mass. The mechanical properties of the rock mass in that zone was determined based on laboratory tests of uniaxial and triaxial compressive strength of the rock material on composite samples. The composite samples consisted of rock material discs, with the height (h) of the discs defining different volumetric percentages of rock material dacite (D), which represent hard component, and altered dacite (AD), which represent weaker component in specimens. However, the functional dependence on the strength parameter alteration of the rock material (uniaxial compressive strength, intact uniaxial compressive strength, and material constant) with an increase in the participation of "weaker " rock material was determined based on the test results of uniaxial and triaxial compressive strength. The participation of altered dacite directly affects the mode and mechanism of failure during testing. Uniaxial compressive strength ( $\sigma_{ci}^{UCS}$ ) and intact uniaxial compressive strength ( $\sigma_{ci}^{TX}$ ) decrease exponentially with increased AD volumetric participation.

The dependences of the  $\sigma_{ci}^{TX}$  and constants  $m_i$  define more reliable values of rock mass strength parameters, which can be used, together with rock mass classification systems, as a basis for estimating rock mass parameters. Within this paper, the GSI classification was used, which reduces the strength of the rock mass based on the represented geological conditions in the rock mass. Therefore, it is possible to predict the strength parameters of the heterogeneous rock mass at the transition of hard component (D) and weak component rock (AD) based on all calculated strength parameters for different participation of AD (0-100%).

The values rock mass strength parameters was determined were the basis for the development of geomechanical models by which the analysis of slope stability was performed. Slope stability analysis was performed on a characteristic profile in the direction of open pit advancement, with a variable final slope angle of the ranging from 20-70°, where the analysis included two cases: with and without the use of the transition zone. The transition zone was considered for the distances of the boundary D and AD from the upper plane in the range of 0-140 m with a step of 20 m were considered. That way for the value of the safety factor  $F_s = 1.3$ , for each case separately, the maximum allowed final slope angle of the was determined.

**Keywords:** dacite; altered dacite; uniaxial compressive strength; triaxial compressive strength; composite samples, rock mechanics, rock stability

**Scientific field:** Mining engineering

**Scientific subfield:** Rock mechanics

**UDC:** 624.12:622.83(043.3)



## Садржај:

<b>1</b>	<b>Увод</b>	<b>1</b>
1.1	Литературни преглед	2
1.2	Полазне хипотезе, циљеви и предмет истраживања	3
1.3	Научне методе истраживања	4
1.4	Научни допринос дисертације	4
1.5	Организација тезе	5
<b>2</b>	<b>Геомеханичко пројектовање у рударству</b>	<b>7</b>
2.1	Истраживање локације и истражно бушење	8
2.2	Лабораторијска испитивања	9
<b>3</b>	<b>Критеријуми лома стенског материјала</b>	<b>10</b>
3.1	Примена Хоек-Броун-овог критеријум лома на стенски масив	10
3.2	Примена Моир-Куломб-ов критеријум лома на стенски масив	19
<b>4</b>	<b>Дефинисање услова и параметара за потребе геомеханичког пројектовања</b>	<b>22</b>
4.1	Истражни радови	22
4.2	Геолошка грађа лежишта	23
4.3	Генеза лежишта	23
4.4	Хидрогеолошке карактеристике истражног простора	24
4.5	Инжењерско-геолошке карактеристике истражног простора	24
4.6	Минералогско – петрографске карактеристике дацита	24
4.7	Дефинисање величине транзиционе зоне	28
4.8	Лабораторијска испитивања хетерогеног стенског материјала	29
4.8.1	Методологија припреме пробних тела за испитивање	30
4.8.2	Специфична тежина	33
4.8.3	Запреминска тежина	35
4.8.4	Садржина воде	36
4.8.5	Једноосна чврстоћа на притисак	37
4.8.6	Троосна чврстоћа на притисак (триаксијални опит)	42
4.8.6.1	Историјски развој испитивања троосне чврстоће на притисак	42
4.8.6.2	Поступак и начин испитивања троосне чврстоће на притисак	43
<b>5</b>	<b>Рачунски параметари стенског масива</b>	<b>54</b>
5.1	Статистичка обрада података лабораторијских испитивања	54
5.2	GSI (Geological strength index) класификација	55
5.3	Процена вредности фактора оштећења стенског масива	56
5.4	Усвојене вредности рачунских параметара	58
<b>6</b>	<b>Анализа утицаја физичко-механичких својстава стенског материјала на стабилност косине</b>	<b>59</b>
6.1	Метода коначних елемената	61
6.2	Анализа стабилности косина на растојању границе од 0 m	62
6.3	Анализа стабилности косина на растојању границе од 20 m	70
6.4	Анализа стабилности косина на растојању границе од 40 m	75
6.5	Анализа стабилности косина на растојању границе од 60 m	80
6.6	Анализа стабилности косина на растојању границе од 80 m	86
6.7	Анализа стабилности косина на растојању границе од 100 m	93
6.8	Анализа стабилности косина на растојању границе од 120 m	100
6.9	Анализа стабилности косина на растојању границе од 140 m	106
6.10	Анализа резултата прорачуна стабилности косине	112
<b>7</b>	<b>Закључак</b>	<b>115</b>
<b>8</b>	<b>Литература</b>	<b>117</b>
	Списак прилога	121



## Списак слика:

Слика 1. Ток истраживања у рударству са детаљним освртом на истраживање локације [13].....	7
Слика 2 Утицај вредности константе $m_i$ на: а) облик обвојнице, б) угао унутрашњег трења [28] .....	15
Слика 3. Приказ преласка са непоремећеног на испуцао стенски масив [19] .....	16
Слика 4. Профили храпавости за различите вредности JRC [30].....	17
Слика 5. Mohr-ови кругови напона и обвојница за различите вредности бочног оптерећења.....	20
Слика 6. Веза максималног и минималног главног напона код НВ и МС критеријума лома [27].....	21
Слика 7. Положај истражних бушотина ПК "Ђерамиде" .....	22
Слика 8. Макроскопски изглед: а) Д, б) узорак Б-14 (134,1-134,8), ц) АД. ....	25
Слика 9. Микроскопски изглед кварцлатита "Ђерамиде"; а) узорак Б-14; б) АД .....	26
Слика 10. Алтерисани фенокристали плагиокласа; а) узорак Д; б) узорак Б-14 (134,1-134,8).....	26
Слика 11. Микроскопски изглед кварцлатита "Ђерамиде" - узорак АД .....	27
Слика 12. Микроскопски изглед узорка Б-14 (134,1-134,8) .....	27
Слика 13. Илустративни приказ литолошког стуба истражне бушотине .....	28
Слика 14. Дијаграм тока примене Ноек-Brown критеријума и GSI система класификације [17].....	30
Слика 15. Анализирана косина површинског копа "Ђерамиде" .....	31
Слика 16. Поступак припреме пробних тела за лабораторијска испитивања:.....	32
Слика 17. Шема припреме испитиваних узорака .....	32
Слика 18. Изглед раслојавања стенског материјала.....	33
Слика 19. Изглед пробних тела припремљених за испитивање: .....	33
Слика 20. Испитивање специфичне тежине стенског материјала .....	34
Слика 21. Припремљени узорци за испитивање запреминске тежине: а) АД, б) Д.....	35
Слика 22. Нормална расподела запреминске тежине у природном стању влажности.....	36
Слика 23. Опрема за испитивање влажности: а) лабораторијска сушница, б) лабораторијска вага. ....	36
Слика 24. Утицај пречника пробног тела на вредности једноосне чврстоће на притисак [42] .....	39
Слика 25. Изглед пробних тела након лома – једноосна чврстоћа на притисак: а) 0% АД, б) 10% АД, ц) 30% АД, д) 50% АД, е) 70% АД, ф) 100 % АД [12] .....	39
Слика 26. Упоредни приказ резултата $\sigma_{ci}^{UCS}$ са различитим процентом АД .....	40
Слика 27. Упоредни приказ резултата испитивања композитних узорака .....	41
Слика 28. Различита троосна испитивања: (а) мермера и (б) пешчара [46].....	43
Слика 29. Основни делови опреме за испитивање троосне чврстоће на притисак .....	44
Слика 30. Опрема за испитивање троосне чврстоће на притисак: а) хидрауличка преса, б) Ноек-ова триаксијална ћелија и ц) пумпа за одржавање константног бочног притиска.....	44
Слика 31. Изглед пробних тела након лома – троосна чврстоћа на притисак: а) 0% АД, б) 10% АД, ц) 30% АД, д) 50% АД, е) 70% АД, ф) 100 % АД [12].....	45
Слика 32. Упоредни приказ зависности максималног и минималног напона .....	46
Слика 33. Упоредни приказ дијаграма нормалних и тангенцијалних напона.....	47
Слика 34. Упоредни приказ нормалних и тангенцијалних напона за различите уделе АД .....	48
Слика 35. Вредности $\sigma_{ci}^{TX}$ стенског материјала са различитим уделом АД .....	49
Слика 36. Упоредни приказ вредности $\sigma_{ci}^{UCS}$ и $\sigma_{ci}^{TX}$ са различитим уделом АД .....	49
Слика 37. Вредности материјалне константе $m_i$ за различите процентуалне уделе АД .....	50
Слика 38. Упоредни приказ вредности $\sigma_{ci}^{TX}$ .....	51
Слика 39. Упоредни приказ вредности материјалне константе $m_i$ .....	51
Слика 40. Вредности GSI фактора .....	56
Слика 41. Положај анализираних профила на површинском копу "Ђерамиде".....	59
Слика 42. Приказ анализираних случајева са различитим угловима $\alpha_z$ и растојањима прелаза .....	60
Слика 43. Приказ величине транзиционе зоне .....	60
Слика 44. Изглед модела са дискретизацијом мреже коначних елемената без ТЗ .....	61
Слика 45. Изглед модела са дискретизацијом мреже коначних елемената са ТЗ .....	62
Слика 46. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 0 m ( $\alpha_z=40^\circ$ - без ТЗ).....	63
Слика 47. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 0 m ( $\alpha_z=40^\circ$ - са ТЗ).....	63
Слика 48. Положај лома на растојању границе од 0 m ( $\alpha_z=40^\circ$ - са ТЗ – целокупна косина) .....	64
Слика 49. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 0 m ( $\alpha_z=50^\circ$ - без ТЗ).....	64
Слика 50. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 0 m ( $\alpha_z=50^\circ$ - са ТЗ).....	65
Слика 51. Положај лома на растојању границе од 0 m ( $\alpha_z=50^\circ$ - са ТЗ – целокупна косина) .....	65
Слика 52. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 0 m ( $\alpha_z=60^\circ$ - без ТЗ).....	66
Слика 53. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 0 m ( $\alpha_z=60^\circ$ - са ТЗ).....	66
Слика 54. Положај лома на растојању границе од 0 m ( $\alpha_z=60^\circ$ - са ТЗ – целокупна косина) .....	67
Слика 55. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 0 m ( $\alpha_z=70^\circ$ - без ТЗ).....	67





Слика 116. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 120 m ( $\alpha_z=50^\circ$ - без T3).....	103
Слика 117. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 120 m ( $\alpha_z=50^\circ$ - са T3).....	104
Слика 118. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 120 m ( $\alpha_z=60^\circ$ - без T3).....	105
Слика 119. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 120 m ( $\alpha_z=60^\circ$ - са T3).....	105
Слика 120. Упоредни приказ зависности $F_s$ и $\alpha_z$ на растојању прелаза од 120 m .....	106
Слика 121. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 140 m ( $\alpha_z=20^\circ$ - без T3).....	107
Слика 122. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 140 m ( $\alpha_z=20^\circ$ - са T3).....	107
Слика 123. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 140 m ( $\alpha_z=30^\circ$ - без T3).....	108
Слика 124. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 140 m ( $\alpha_z=30^\circ$ - са T3).....	108
Слика 125. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 140 m ( $\alpha_z=40^\circ$ - без T3).....	109
Слика 126. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 140 m ( $\alpha_z=40^\circ$ - са T3).....	109
Слика 127. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 140 m ( $\alpha_z=50^\circ$ - без T3).....	110
Слика 128. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 140 m ( $\alpha_z=50^\circ$ - са T3).....	110
Слика 129. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 140 m ( $\alpha_z=60^\circ$ - без T3).....	111
Слика 130. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 140 m ( $\alpha_z=60^\circ$ - са T3).....	111
Слика 131. Упоредни приказ зависности $F_s$ и $\alpha_z$ на растојању прелаза од 140 m .....	112
Слика 132. Дијаграм зависности $\alpha_z$ са различитим растојањем прелаза Д и АД.....	113





## Списак табела

Табела 1. Одређивање константи за непоремећени стенски масив [18] .....	13
Табела 2. Вредности материјалне константе $m_i$ за различите врсте стенског материјала [26] .....	14
Табела 3. Опсег вредности нормалног напона и базног угла трења [29] .....	17
Табела 4. Распон карактеристика стенских маса [28] .....	18
Табела 5. Одређивање Геолошког индекса чврстоће (GSI) [19] .....	19
Табела 6. Положај и врста истражних радова на ПК "Ћерамиде" .....	22
Табела 7. Параметри чврстоће Нок-Броун-овог критеријума лома .....	45
Табела 8. Параметри чврстоће на смицање Моџ-Кулоуб-овог критеријума лома .....	47
Табела 9. Средње вредности коефицијента варијације [57] .....	55
Табела 10. Вредности фактора оштећења стенског масива (D) [27] .....	57
Табела 11. Рачунски параметри стенског материјала за Нок-Броун-ов критеријум лома .....	58
Табела 12. Вредности фактора сигурности на растојању границе од 0 m .....	69
Табела 13. Вредности фактора сигурности на растојању границе од 20 m .....	74
Табела 14. Вредности фактора сигурности на растојању границе од 40 m .....	79
Табела 15. Вредности фактора сигурности на растојању границе од 60 m .....	86
Табела 16. Вредности фактора сигурности на растојању границе од 80 m .....	92
Табела 17. Вредности фактора сигурности на растојању границе од 100 m .....	99
Табела 18. Вредности фактора сигурности на растојању границе од 120 m .....	106
Табела 19. Вредности фактора сигурности на растојању границе од 140 m .....	112
Табела 20. Збирни резултати анализе прорачуна стабилности са и без T3 .....	113
Табела 21. Максималне вредности углова нагиба завршне косине $\alpha_z$ .....	114



## 1 Увод

Стабилност косина је актуелна тема при изради сваког рударског пројекта. Основу за пројектовање стабилних косина представљају геомеханички модели који су формиран на основу својства стенског материјала, која је потребно утврдити на језгру из картираних истражних бушотина, сходно условима који владају у стенском масиву. Изучавање понашања стенског материјала у различитим условима представља основни задатак механике стена. Ово понашање дефинише се неким од познатих критеријума лома стенског материјала, који се одређују емпиријски и испитивањем троосне чврстоће на притисак. Испитивање троосне чврстоће на притисак има за циљ да опонаша услове у којима се стенски материјал налази под деловањем одређеног напонског стања, а што је приликом испитивања одређено кроз бочни притисак којем је пробно тело изложено.

Стога је потребно спровести детаљна теренска истраживања локације, као и свих литолошких чланова у оквиру којих ће бити изграђен рударски објекат. Иницијална истраживања ће обухватити испитивања узорка стенског материјала добијених из истражних бушотина, у циљу сагледавања распона вредности чврстоће. Поред одређивања специфичне запреминске тежине, запреминске тежине у природном стању влажности, садржине воде и једноосне чврстоће на притисак на припремљеним пробним телима из блокова стенског материјала извешће се већи обим испитивања троосне чврстоће на притисак у Ноек-овој троосној ћелији. На основу свега наведеног, најважнији задатак ће бити да се изврши адекватна процена параметара чврстоће свих материјала који су заступљени у оквиру геомеханичких модела за анализу стабилности косина. Процена чврстоће стенског маива неће бити емпиријска, већ ће се триаксијалним испитивањима, за одређене вредности бочног притиска, одредити параметри неопходни за одређивање критеријума лома и чврстоће на смицање стенског материјала

Бројни рударски објекти, било да се ради о тунелима, косинама или подземним објектима, се углавном изводе у хетерогеним стенским материјалима, различитих механичких својстава. Хетерогени стенски материјали се одликују великом анизотропношћу, што може да има утицај на резултате лабораторијских испитивања анализираних радне средине. Да би се дефинисао степен хетерогености, израђена су пробна тела са различитом процентуалном заступљеношћу чврсте и слабе компоненте. Композитни узорци се састоје од дискова два стенска материјала и то: дацита (Д) који представља чвршћу компоненту и алтерисаног дацита (АД) који представља слабију компоненту. Лабораторијска испитивања композитних узорка стенског материјала имају за циљ да утврде како се чврстоћа стенског материјала мења при различитој процентуалној заступљености чвршћег и слабијег стенског материјала. Испитивања су извођена на композитним узорцима са 10, 30, 50, 70 % процентуалног удела слабије компоненте. На основу утврђених података о промени (опадању) чврстоће са процентуалним садржајем (0, 10, 30, 50, 70 и 100%) слабије компоненте у композитним узорцима могуће је дефинисати функционалну зависност (експоненцијалну и линеарну) којом је могуће одредити параметре чврстоће за сваки процентуални садржај (0-100%) слабије компоненте у испитиваном узорку.

Суштина ове дисертације је врло добро сажета у раду који су представили Marachi и др. [1] која гласи:

*"Ниједна анализа стабилности косина, без обзира на то колико била компликована и теоретски тачна, не може бити корисна за пројектовање ако је извршена погрешна процена улазних параметара чврстоће стенског материјала"*





## 1.1 Литературни преглед

Одређивање механичких својстава хетерогених стенских материјала представља велики изазов у механици стена. Хетерогене стенске масе се састоје од два или више литолошких чланова који имају различита својства. До сада је изведен ограничен број истраживања механичких својстава хетерогених стенских материјала која су се бавила испитивањем једноосне чврстоће на притисак композитних узорака. Tziallas и др. [2] су једини спровели испитивања при троосном притиску за само једну процентуалну заступљеност слабијег стенског материјала.

Tziallas и др. [2] су испитивали флишне формације састављене од пешчара и силтита. Они су на основу заступљености појединих литолошких чланова на терену, формирали композитне узорке одређеног односа пешчара и силтита и на тај начин у лабораторијским условима симулирали реално стање на терену. Duffault [3] је објавио студију о моделирању и симулацији хетерогених стенских маса уводећи термин "сендвич" (појединачни или вишеструки) стенски масив. Goodman [4] је у својој књизи нагласио да стенски масив који се састоје од најмање два литолошка члана који имају различита геомеханичка својства представљају сложени геотехнички проблем. Са друге старне, Z. Mohamed и др. [5] су први применили испитивање једноосне чврстоће на композитним узорцима. Овим истраживањима су обухваћени композити пешчара и силтита са циљем да се симулирају тропски услови који владају на том подручју. За испитивања су припремљени композитни узорци са 10%, 20% и 30% удела слабијег стенског материјала од укупне висине узорка, док је гипс коришћен као везивни материјал између дискова стенског материјала. Liu и други [6] су за потребе одређивања чврстоће носећих стубова подземних просторија формираних у стенском масиву испитивали композитне узорке састављене од стенског материјала различитих чврстоћа и угља. Berisavljević и др. [7] су у свом раду истраживали како се мења чврстоћа композитних узорака израђених од пешчара и силтита за потребе изградње косина на државном аутопуту. Liang и др. [8] спровели су лабораторијске анализе на природним слојевитим узорцима који се састоје од камене соли и анхидрита ради процене чврстоће стенског материјала за потребе изградње просторија за складиштење течности, гаса и чврстог отпада. Gresco и др. [9] су спровели испитивање композитних узорака израђених од различитих комбинација гранита, мермера и кречњака из Вићенце од којих су изграђени стубови и зидови Катедрале ради дефинисања параметара чврстоће и механизма лома. Својства непоремећеног стенског материјала  $\sigma_{ci}$  и  $m_i$  за хомоген стенски масив треба пажљиво размотрити. Коришћење својстава чврстог стенског материјала за одређивање укупне чврстоће стенског масива није прикладно. С друге стране, коришћење непоремећених својстава слабијег стенског материјала је превише конзервативно јер диск чврсте компоненте стенског материјала свакако доприноси укупној чврстоћи стенског масива. Marinós и Hoek [10] су предложили пропорције непоремећених параметара чврстоће  $\sigma_{ci}$  и  $m_i$  за процену хетерогених својстава стенског масива. Marinós [11] је предложио модификоване пропорције вредности за хетерогене типове стенског материјала које треба узети у обзир за одређивање својстава "непоремећеног стенског материјала" ( $\sigma_{ci}$  и  $m_i$ ) на основу Marinós и Hoek [10]. Rupar и др. [12] су представили методологију за одређивање механичких својстава композитних узорака састављених од дацита и алтерисаног дацита при испитивању чврстоће на притисак у једноосним и троосним условима.



Ова дисертација има за циљ да, на основу резултата лабораторијских испитивања једноосне чврстоће на притисак и троосног испитивања композитних узорака, истражи утицај варијације процентуалног учешћа слабијег стенског материјала на параметре чврстоће хетерогеног стенског масива. Такође, представљена је методологија за одређивање механичких својстава једноосне и троосне чврстоће на притисак на већем броју композитних узорака са различитим учешћем слабијег стенског материјала - алтерисаног дацита.

## 1.2 Полазне хипотезе, циљеви и предмет истраживања

Циљ докторске дисертације јесте одређивање механичких својстава дацита (Д) и алтерисаног дацита (АД) у једноосним и троосним условима напрезања. Након тога, одредиће се и механичка својстава прелазне зоне између Д и АД, која ће представљати транзициону зону, припремом, израдом и испитивањем композитних узорака са различитим процентуалним уделом слабијег стенског материјала (алтерисаног дацита) у испитиваном узорку. Резултати испитивања механичких својстава монолитних и композитних узорака биће имплементирани у предходно припремљене геомеханичке моделе, за тренутно стање косина површинског копа "Ђерамиде".

Хипотеза од које се полази заснована је на чињеници да литолошки прелаз између два материјала није увек могуће тачно одредити, па ће се испитивањем на композитним узорцима, састављеним од различитог процента АД у испитиваном узорку, тачно утврдити зависност чврстоће од процентуалног садржаја чврстог, односно слабог стенског материјала.

Постављене су следеће хипотезе:

- При изради геомеханичког модела, прелаз између материјала (у овом случају компактног дацита и алтерисаног дацита) није могуће јасно утврдити. На основу израђене 4 истражне бушотине биће јасно дефинисана прелазна зона која ће, у литолошком погледу, представљати посебан материјал са својим параметрима чврстоће.
- Различитим процентуалним садржајем алтерисаног дацита, као слабијег материјала, у укупном запреминском уделу испитиваних узорака биће дефинисани параметри чврстоће стенског материјала прелазне зоне за сваки процентуални удео АД.

Очекивани резултати:

- Успостављање критеријума за дефинисање параметара чврстоће хетерогених стенских материјала.
- Утврђивање функционалних зависности параметара чврстоће стенског материјала ( $\sigma_{ci}$  и  $m_i$ ) за различити процентуални садржај слабијег стенског материјала, односно алтерисаног дацита.
- Утврђивање облика и положаја клизне равни, као и услова под којим долази до појаве нестабилности косина израђених у испитиваном стенском масиву на основу анализа стабилности косина на припремљеним геомеханичким моделима.



### 1.3 Научне методе истраживања

Докторска дисертација се заснива на литературном прегледу досадашњих истраживања из научне области механика стена и геомеханика и биће реализована кроз три фазе истраживања, и то:

- Теоријска анализа: односи се на проучавање досадашњих теоријских сазнања и нових резултата везаних за одређивање механичких својстава хетерогених стенских материјала. Методологија научног истраживања у оквиру дисертације је прилагођена проблему, програму и циљевима истраживања која обухватају анализу постојећих литературних извора из области лабораторијских испитивања хетерогених стенских материјала. На основу увида у претходна истраживања, дефинисан је правац даљих истраживања који има за циљ проналажења нових сазнања која до сада нису обрађивана, а која су проистекла из резултата и анализа разматрана овим испитивањима.
- Прикупљање података: ова фаза истраживања обухвата обилазак и рекогносцирање терена, прикупљање, проучавање и испитивање неопходних узорака стенског материјала у циљу одређивања механичких својстава везаних за проблематику механике стена, као и њихову анализу и интерпретацију истих.
- Обрада и анализа података: обухвата спровођење експеримената, приказ и анализа резултата изведених лабораторијских испитивања. Исход ове фазе истраживања су нова сазнања о механичким својствима стенског материјала, како дацита и алтерисаног дацита, тако и стенског материјала у прелазној зони. Механичка својства транзиционе (прелазне) зоне биће дефинисана на основу резултата лабораторијских испитивања композитних узорака различитог процентуалног садржаја алтерисаног дацита (АД) у испитиваном узорку. Кроз дводимензионалну анализу стабилности косина коришћењем методе коначних елемената извршиће се, на основу дефинисаних параметара чврстоће заступљених стенских материјала, прорачуни и анализа стабилности косина са циљем дефинисања максималних углова нагиба косина.

### 1.4 Научни допринос дисертације

Тема докторске дисертације обухвата истраживање веома актуелне и значајне проблематике из области механике стена и стабилности косина у сложеним условима радне средине. Посебна пажња биће посвећена детаљном изучавању и анализи параметара чврстоће на смицање стенског масива који су одређени на основу испитивања троосне чврстоће на притисак, као и анализи утицаја дефинисаних параметара на реално стање израђених косина на површинском копу. Оваквим приступом ће се, поред постојећих емпиријских метода које се примењују за утврђивање параметара чврстоће на смицање, дефинисати методологија за утврђивање ових параметара у сложеним условима радне средине на основу истраживања која обухватају и програм лабораторијских геомеханичких испитивања.



На основу дефинисаних истраживања, очекује се да ће предложена дисертација пружити научни допринос кроз:

- Проширење постојећих достигнућа о испитивањима чврстоће на притисак у циљу утврђивања параметара критеријума лома и чврстоће на смицање стенског материјала.
- Укључивањем бочног притиска приликом испитивања троосне чврстоће на притисак ће се опонашати услови напонског стања који владају у стенском масиву и таквим приступом ће се, за одређену висину/дубину површинског копа, одредити параметри критеријума лома и чврстоће на смицање стенског материјала.
- Предвиђеном методологијом се тежи да се приликом дефинисања параметара критеријума лома и чврстоће на смицање стенског материјала субјективни утицај сведе на најмању могућу меру.
- Сазнања о механичким својствима транзиционе (прелазне) зоне дацита и алтерисаног дацита, могуће је применити приликом геомеханичког пројектовања косина изграђених од материјала са сличним параметрима чврстоће, као и код материјала битно различитих механичких својстава. Такође, у зависности од положаја и величине заступљености појединих материјала у телу косине биће могуће адекватно предвидети механизам лома.

## 1.5 Организација тезе

План истраживања је хронолошки конципиран на следећи начин:

- Анализа литературних извора из области испитивања хетерогених стенских материјала,
- Теренска истраживања (картирање литолошких чланова и узимање блокова стенског материјала из којих ће се припремити већи број пробних тела за лабораторијска испитивања),
- Лабораторијска испитивања (на монолитним и композитним узорцима стенског масива),
- Статистичка обрада података и припрема за анализу стабилности на карактеристичном профилу,
- Прорачун и анализа стабилности геомеханичких модела,
- Приказ резултата прорачуна стабилности косине.

Структура рада пратиће план истраживања, уз примену основних принципа и правила за писање докторске дисертације која ће бити изложена кроз 8 поглавља. На почетку је приказан списак слика и табела. Након уводног поглавља где ће се обрадити значај и циљ самог истраживања, докторска дисертација биће изложена кроз следећа поглавља:

**Поглавље 2** представља суштински принцип самог одабира локације за експлоатацију, потребних активности које треба спровести при истраживању и лабораторијском испитивању, помоћу којих би се створили услови за пројектовање



самог објекта, односно параметре које треба одредити да би се створили услови за геомеханичко пројектовање.

**Поглавље 3** обухвата приказ најчешће коришћених критеријума лома којима се дефинише чврстоћа стенског материјала, где ће се посебан осврт дати на Hoek-Brown-ов критеријум лома који ће бити коришћен за даљу анализу стабилности косине.

**Поглавље 4** представља основне постулате о утицају хетерогености на чврстоћу стенског масива. Приказани су резултати испитивања специфичне тежине, запреминске тежине у природном стању влажности, садржине воде, као и једноосне и троосне чврстоће на притисак монолитних и композитних узорака.

**Поглавље 5** се надовезује на предходно поглавље и састоји у избору рачунских параметара чврстоће обзиром да је неопходно параметре утврђене лабораторијским испитивањима превести на стенски масив, као и квантификације GSI класификационог система за све коришћене материјале за прорачун стабилности косине.

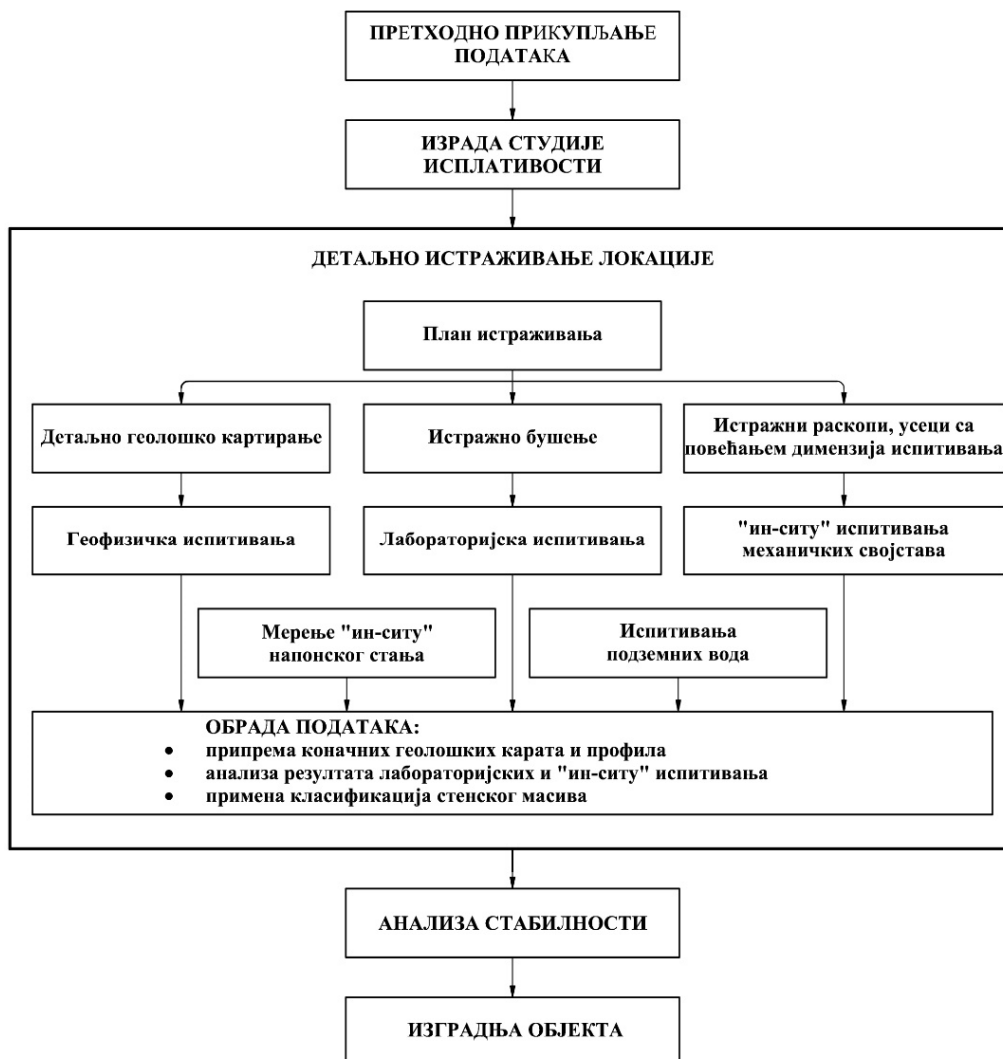
**Поглавље 6** представља анализу стабилности косина за предходно утврђене параметре чврстоће стенског материјала. Приказани су резултати анализе прорачуна стабилности косина на карактеристичном профилу при различитим вредностима углова нагиба завршне косине у циљу одређивања вредности максималног угла нагиба завршне косине. Такође, анализа је извршена са и без коришћења параметара чврстоће транзиционе зоне, а за различиту позицију литолошке границе материјала Д и АД.

**Поглавље 7** обухвата сумирани приказ резултата испитивања који су проистекли из ове дисертације, закључна разматрања и препоруке за даља истраживања из ове тематике.

**Поглавље 8** представља списак коришћене литературе.

## 2 Геомеханичко пројектовање у рударству

Пројектовање у рударству садржи елементе као што су одабир локације где ће се изводити експлоатација, одређивање величине и облика објекта, њихову оријентацију и изглед, као и дефинисање начина откопавања (континуално или дисконтинуално откопавање). Након избора локације и величине објекта потребно је дефинисати план истраживања који треба да садржи положај и величину истражних бушотина из којих је потребно детаљно картирати сваку заступљену радну средину. За потребе геомеханичког пројектовања, из језгра истражних бушотина, неопходно је утврдити својства стенског материјала сваког заступљеног литолошког члана. Затим је потребно одредити величину примарног напонског стања, као и праћење промена напонског стања услед отварања објекта (косина или подземног ископа), као и стање нивоа подземних вода. Ток истраживања која треба спровести од почетног стања које представља претходно прикупљање података до крајњег - саме изградње објекта приказано је на слици 1.



Слика 1. Ток истраживања у рударству са детаљним освртом на истраживање локације [13]



## 2.1 Истраживање локације и истражно бушење

Да би се резерве предвиђене за експлоатацију потврдиле неопходно је израдити истражне бушотине. Ноек Е. [13] наглашава да стандардна процедура као ни препоруке приликом планирања програма испитивања локације не постоје. Ово се односи на обе фазе истраживања, на претходно и детаљно истраживање локације. Ток претходног и детаљног истраживања је приказан на слици 1.

Основни циљ претходног истраживања локације је да се утврди економичност, односно да ли има сврхе планирати детаљно истраживање. Претходна оцена локације обухвата утврђене и анализиране геолошке податке као што су [14]:

- врста стенског материјала,
- моћност и својства јаловине,
- пукотине великих размера као што су главни раседи,
- ниво подземних вода (НПВ) и
- стенски материјал слабијих механичких својстава.

Током истраживања претходне оцене локације неопходно је познавање:

- расположиве геолошке карте, доступна литература и познавање локалитета,
- фотогеолошка истраживања анализираних подручја.

Фотогеолошка истраживања указују на валидност постојећих аеро снимања испитиване локације. Уколико расположиви снимци нису одговарајући потребно их је поновити. На основу фотогеолошких истраживања могу се утврдити подаци о топографији, литологији, геолошким структурама и стању пукотина.

Циљ претходног истраживања локације је да се утврди регионална геолошка грађа у непосредној околини анализираних објекта. Одређивање регионалне геологије засновано је на анализи података који су прикупљени на основу локалног знања и снимака ове области, детаљним картирањем површинских изданака, ограниченом обиму истражног бушења и испитивања подземних вода. У оквиру ове фазе истраживања, могуће је на језгру из бушотина извршити одређена лабораториска испитивања узорака стенског материјала. На основу резултата ових истраживања и испитивања потребно је израдити прелиминарне геолошке карте и профиле који би створили реалну слику о стању у стенском масиву. Израда и интерпретација геолошких карти и профила је важна за планирање следеће фазе програма истраживања локације. У случају појаве већих пукотина као што су раседи, где се фотогеолошким истраживањима не могу одредити подаци о геолошкој структури, онда се примењују геофизичке методе. Најефикасније методе за ове потребе су сеизмичка и геоелектрична испитивања [14].

На основу података прикупљених претходним истраживањем локације, утврђивањем саме изводљивости израђених претходних истраживања биће спроведена детаљна истраживања локације. Ова фаза истраживања локације ће укључивати детаљно истражно бушење, геолошко картирање, геофизичка истраживања и геомеханичка испитивања.

Циљ истражног бушења је да: потврди интерпретацију дефинисане геолошке грађе, испита језгра и саме бушотине у циљу утврђивања квалитета и својстава стенског





масива, истражи стање нивоа подземних вода и оно што је за геомеханичко пројектовање важно обезбеди језгра за геомеханичка испитивања и минералошко-петрографске анализе.

## 2.2 Лабораторијска испитивања

Лабораторијске методе испитивања механичких својстава стенског материјала су генерално добро дефинисане, а сам начин и процедура испитивања појединих својстава су одређене препорукама Међународног друштва за механику стена (ISRM) и Америчког друштва за испитивање материјала (ASTM). Приликом испитивања сваке величине у оквиру овог рада, коришћени су ови стандарди и препоруке.

Механичка својства стенског материјала зависе у највећој мери од његовог минералног састава, распореда минералних зрна и структурних пукотина које су у стенском масиву настале током дуге геолошке историје генезом или тектонским силама. Сходно томе, механичка својства стенског материјала варирају не само између различитих типова стена, већ и између пробних тела номинално истог стенског материјала. Стога се механичка својства стенског материјала могу одређивати на узорцима стандардних облика и димензија који су дефинисани у препорукама ISRM и ASTM, док се приближне вредности механичких својстава за различите типове стенског материјала могу проценити из табеларних података досадашњих истраживања. Из тог разлога, лабораторијско испитивање нужно игра велику улогу у механици стена [15].





### 3 Критеријуми лома стенског материјала

Лабораторијске податке утврђене на узорку непоремећеног стенског материјала, неопходно је превести на in-situ стенски масив, што у геомеханици представља велики изазов. У зависности од испитиване радне средине користе се различити критеријуми лома стенског материјала. Ако узмемо у обзир да ће у оквиру овог рада бити речи о чврстим стенским материјалима, користиће се критеријуми који уз примену одговарајућих класификационих система омогућавају превођење података утврђених лабораторијским испитивањима на сам стенски масив. У геомеханици најчешће су у примени Ноек-Brown-ов и Mohr-Coulomb-ов критеријум лома, као и комбинација ова два критеријума лома, па ће се посебна пажња усмерити на утврђивање потребних улазних података за наведена два критеријума лома.

#### 3.1 Примена Ноек-Brown-овог критеријум лома на стенски масив

Изворни Ноек-Brown-ов критеријум лома [16] је од свог настанка 1980. године претрпео низ допуна, па се данас уопштен Ноек-Brown-ов критеријум лома [17] примењује помоћу једначине:

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \cdot \left( m_b \cdot \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right)^a, \quad (1)$$

где су:

- $\sigma_1'$  – максимални главни напон у тренутку лома
- $\sigma_3'$  – минимални главни напон у тренутку лома
- $\sigma_{ci}$  – једноосна чврстоћа на притисак непоремећеног стенског материјала,
- $m_b$  – материјална константа
- $s, a$  – константе стенског масива

Као допуна њиховог општег критеријума лома Ноек и др. [18] су предложили поступак за одређивање параметара  $s, a$  и  $m_i$  неопходних за овај критеријум. GSI класификационим системом се одређују параметри којима се врши редуковање чврстоће непоремећеног стенског материјала у циљу утврђивања рачунских параметара чврстоће стенског масива на основу заступљених геолошких услова у стенском масиву. Ноек и Brown [19] су истакли да овај класификациони систем треба применити на стенски масив у изворном стању. Циљ коришћења GSI класификационог система је да се одреде својства стенског масива, па се константе могу одредити помоћу једначина:

$$m_b = m_i \cdot e^{\frac{GSI-100}{28-14D}}, \quad (2)$$

$$s = e^{\frac{GSI-100}{9-3D}}, \quad (3)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left( e^{\frac{GSI}{15}} - e^{\frac{20}{3}} \right), \quad (4)$$



где су:

$GSI$  – геолошки индекс чврстоће

$m_i$  – материјална константа непоремећеног стенског материјала

$D$  – фактор којим се одређује степен утицаја минирања и релаксације напона на стенску масу

Детаљнији опис и начин одређивања, као и утврђене вредности параметара  $GSI$ ,  $m_i$  и  $D$  за прорачун и анализу стабилности косина дата су у поглављу 4.8.6.

При испитивању троосне чврстоће на притисак вредности на апсциси, односно вредности минималног главног напона  $\sigma_3$  крећу се у интервалу  $\sigma_t < \sigma_3 < \sigma_{3max}'$  [20], па је тако потребно за сваки материјал одредити овај интервал. Стога је могуће, коришћењем програмског пакета RocData, одредити граничне вредности чврстоће на истезање помоћу једначине:

$$\sigma_t = -\frac{s \cdot \sigma_{ci}}{m_b} \quad (5)$$

Одређивање горње граничне вредности бочног притиска за косине може се одреди преко једначине:

$$\frac{\sigma_{3max}'}{\sigma_{cm}'} = 0.72 \cdot \left( \frac{\sigma_{cm}'}{\gamma \cdot H} \right)^{-0.91} \quad (6)$$

Walmer [21] је извео једначину којом је могуће, коришћењем утврђених података на основу лабораторијских испитивања за максимални и минимални главни напон, израчунати нормални и смичући напон за сваку тачку уопштеног Ноек–Brown–овог критеријума који су представљени једначинама:

$$\tau = (\sigma_1' - \sigma_3') \cdot \frac{k}{k^2 + 1}, \quad (7)$$

$$\sigma_n' = \frac{\sigma_1' + \sigma_3'}{2} - \frac{\sigma_1' - \sigma_3'}{2} \cdot \frac{k^2 - 1}{k^2 + 1}, \quad (8)$$

где  $k$  представља нагиб обвојнице уопштеног Ноек–Brown–овог критеријума и израчунава се према једначини:

$$k^2 = \frac{d\sigma_1'}{d\sigma_3'} = 1 + a \cdot m_b \cdot \left( m_b \cdot \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right)^{a-1} \quad (9)$$

Параметар  $\sigma_{3max}'$  представља горњу границу вредности бочног притиска, док параметар  $\sigma_t$  представља доњу граничну вредност чврстоће на истезање до којих је разматрана веза између Ноек–Brown–овог и Mohr–Coulomb–овог критеријума лома и треба их одредити за сваки случај посебно. Препоруке за одређивање вредности  $\sigma_{3max}'$  се могу разматрати за два случаја: за косине површинског копа и за тунеле различитих геометријских параметара. Па су тако за различити процентуални садржај АД у испитваном узорку стенског материјала, уз коришћење програмског пакета



RocData верзија: 5.013, фирме Rocscience Inc. из Торонта, утврђене вредности  $\sigma_{3max}$  и  $\sigma_t$  за косине површинског копа коришћењем једначине 5 и 6 (Табела 7).

Троосна испитивања чврстоће на притисак која су спровели Ramsey и Chester [22] и Bobich [23] представљају ретке поуздане податке који укључују испитивања чврстоће на истезање директном методом. Они су уз укључење параметра Ноек-Brown-овог стенског материјала  $m_i$ , предложили приближни однос између чврстоће на притисак непоремећеног стенског материјала и чврстоће на истезање који гласи:

$$\sigma_{ci} / |\sigma_t| = 0.81 \cdot m_i + 7 \quad (10)$$

Модул стенског масива се одређује преко једначине коју су поставили Ноек и Diederichs [24] на основу мерења модула деформација стенске масе које су изводили у оквиру истраживања у Кини и она гласи:

$$E_m = E_i \left( 0.02 + \frac{1 - \frac{D}{2}}{1 + e^{\left( \frac{60 + 15D - GSI}{11} \right)}} \right), \quad (11)$$

где  $E_i$  представља модул за непоремећен стенски материјал и одређује се преко једначине:

$$E_i = MR \cdot \sigma_{ci}. \quad (12)$$

Ноек и Diederichs [24] препоручују да уколико не постоје лабораторијски подаци о испитивањима модула деформације могуће је користити једначину:

$$E_m = 100000 \left( \frac{1 - \frac{D}{2}}{1 + e^{\left( \frac{75 + 25D - GSI}{11} \right)}} \right). \quad (13)$$

У зависности од стања структуре стенског масива и површине дисконтинуитета могуће је применити уопштени Ноек-Brown-ов критеријум, а уколико подаци о чврстоћи нису одређени лабораторијским испитивањима, за процену параметара чврстоће може се користити Табела 1.

Табела 1. Одређивање константи за непоремеђени стенски масив [18]

УОПШТЕНИ НОЕК–BROWN–ОВ КРИТЕРИЈУМ		СТАЊЕ ПОВРШИНА ЗИДОВА ПУКОТИНА		ВРЛО ДОБРО		ДОБРО		ЗАДОВОЉАВАЈУЋЕ		ЛОШЕ		ВРЛО ЛОШЕ																							
$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \cdot \left( m \cdot \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$ <p><math>\sigma_1'</math> – максимални главни напон у тренутку лома  <math>\sigma_3'</math> – минимални главни напон у тренутку лома  <math>\sigma_{ci}</math> – једноосна чврстоћа на притисак непоремеђеног стенског материјала  <math>m, s, a</math> – константе које зависе од састава, структуре и стања површина стенског масива</p>		Врло храпаве, свеже, нераспаднуте површине		Храпаве, делимично распаднуте површине са мрљама од рђе		Глатке, умерено распаднуте или алтерисане површине		Глатке, изразито распаднуте површине прекривене збијеним материјалом или са испуном од шилъатих комада		Глатке, изразито распаднуте површине прекривене или са испуном од меке глине																									
		СТРУКТУРА СТЕНСКОГ МАСИВА																																	
	<b>БЛОКОВИТА</b> Врло добро укљештен непоремеђен стенски масив који се састоји од коцкастих блокова дефинисаних са три ортогонална система дисконтинуитета	$m_b/m_i$	0.60	0.40	0.26	0.16	0.08	$s$	0.190	0.062	0.015	0.003	0.0004	$a$	0.5	0.5	0.5	$E m$	75 000	40 000	20 000	9 000	3 000	$\mu$	0.2	0.2	0.25	0.25	0.25	$GSI$	85	75	62	48	34
	<b>ВРЛО БЛОКОВИТА</b> Укљештен, делимично поремеђен стенски масив са вишестраним блоковима дефинисаних са четири или више система дисконтинуитета	$m_b/m_i$	0.40	0.29	0.16	0.11	0.07	$s$	0.062	0.021	0.003	0.001	0	$a$	0.5	0.5	0.5	$E m$	40 000	24 000	9 000	5 000	2 500	$\mu$	0.2	0.25	0.25	0.25	0.25	$GSI$	75	65	48	38	25
	<b>БЛОКОВИТА/УСЛОЈЕНА</b> Наборан и испуцао стенски масив са више дисконтинуитета који се пресецају формирајући шилъате блокове	$m_b/m_i$	0.24	0.17	12	0.08	0.06	$s$	0.012	0.004	0.001	0	0	$a$	0.5	0.5	0.5	$E m$	18 000	24 000	6 000	3 000	2 000	$\mu$	0.25	0.25	0.25	0.3	0.3	$GSI$	60	65	40	30	20
	<b>ЗДРОБЉЕНА</b> Слабо укљештен, изразито испуцао стенски масив са измешаним шилъатим и заобљеним блоковима	$m_b/m_i$	0.17	0.12	0.08	0.06	0.04	$s$	0.004	0.001	0	0	0	$a$	0.5	0.5	0.5	$E m$	10 000	6 000	3 000	2 000	1 000	$\mu$	0.25	0.25	0.3	0.3	0.3	$GSI$	50	40	30	20	10

\*Вредности параметара  $m_b/m_i$ ,  $s$ ,  $a$ ,  $E$  и  $\mu$  код примене уопштеног Ноек–Brown–овог критеријума лома зависе од структурних карактеристика масива и стања површина пукотина.

Вредности за константу  $m_i$  се могу израчунати на основу испитивања троосне чврстоће на притисак пробних тела непоремеђеног стенског материјала за различите вредности бочног притиска. Алтернатива овом начину утврђивања вредности  $m_i$ , са



којом се често сусрећу пројектанти из области геомеханике, је усвајање вредности на основу постепених резултата претходних испитивања. До сада постоје неколико различитих истраживања [10], [18], [25]–[27] за процену вредности константе  $m_i$ , која су заснована на објављеним резултатима испитивања троосне чврстоће на притисак за различите врсте стенског материјала. Вредност константе  $m_i$  зависи од врсте стенског материјала и величине заступљених зрна у непоремећеном стенском материјалу, табела 2. Процедуре и начин одређивања материјалне константе  $m_i$  детаљно су представљена у поглављу 4.8.6.

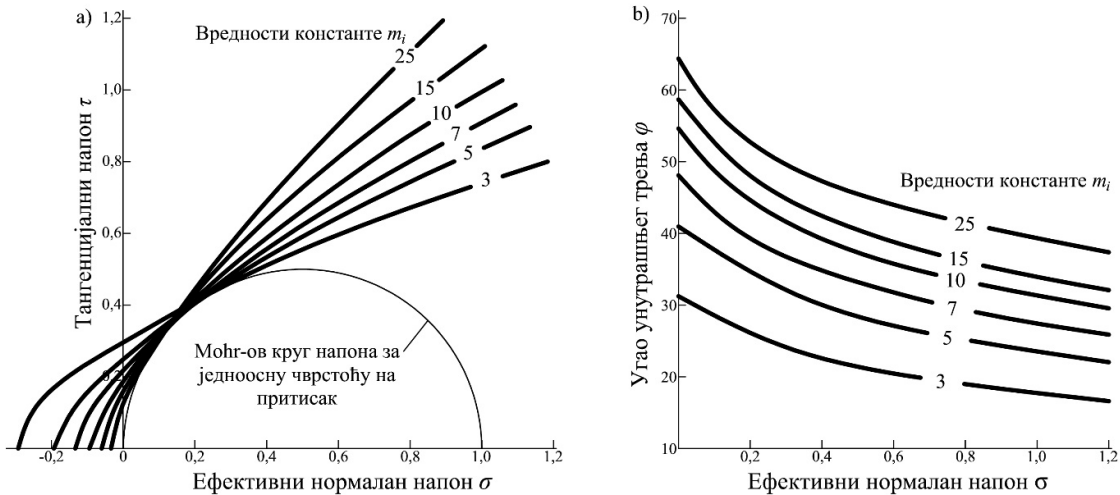
Табела 2. Вредности материјалне константе  $m_i$  за различите врсте стенског материјала [26]

Врста стене	Класа	Група	Текстура			
			Крупнозрна	Средња	Фина	Врло фина
СЕДИМЕНТНЕ	Кластичне		Конгломерат (21 ± 3)	Пешчар 17 ± 4	Алевролит 7 ± 2	Глинац 4 ± 2
			Бреча 19 ± 5		Граувака (18 ± 3)	Шкриљац (6 ± 2)
						Лапорац 7 ± 2
	Некластичне	Карбонатне	Кристалсти кречњак (12 ± 3)	Спартиц кречњак (10 ± 2)	Мимикритски кречњак (9 ± 2)	Доломит (9 ± 3)
		Евапорати		Гипс 8 ± 2	Анхидрит 12 ± 2	
		Органске				Креда 7 ± 2
МЕТАМОРФНЕ	Нефолиатисане		Мермер 9 ± 3	Корнит (19 ± 4)	Кварцит 20 ± 3	
				Металешчар (19 ± 3)		
	Делимично фолиатисане		Мигматит (29 ± 3)	Амфиболит 26 ± 6		
	Фолиатисане		Гнајс 28 ± 5	Шкриљац 12 ± 3	Филити (7 ± 3)	Аргилошист 7 ± 4
МАГМАТСКЕ	Плутонске	Светле	Гранит 32 ± 3	Диорит 25 ± 5		
			Гранодиорит (29 ± 3)			
		Тамне	Габро 27 ± 3	Долерит (16 ± 5)		
	Норит 20 ± 5					
	Хипобисалне		Порфирит (20 ± 5)		Дијабаз (15 ± 5)	Перидотит (25 ± 5)
	Вулканске	Изливне		Риолит (25 ± 5)	Дацит (25 ± 3)	Обсидијан (19 ± 3)
				Андезит 25 ± 5	Базалт (25 ± 5)	
		Пирокластичне	Агломерат (19 ± 3)	Бреча (19 ± 5)	Туф (13 ± 5)	

Вредност материјалне константе  $m_i$  на досадашњим објављеним резултатима испитивања троосне чврстоће на притисак за дацит, који је предмет овог рада, износи  $25 \pm 3$ , табела 2, што ће се у оквиру овог рада на основу детаљних испитивања троосне чврстоће на притисак посебно анализирати.

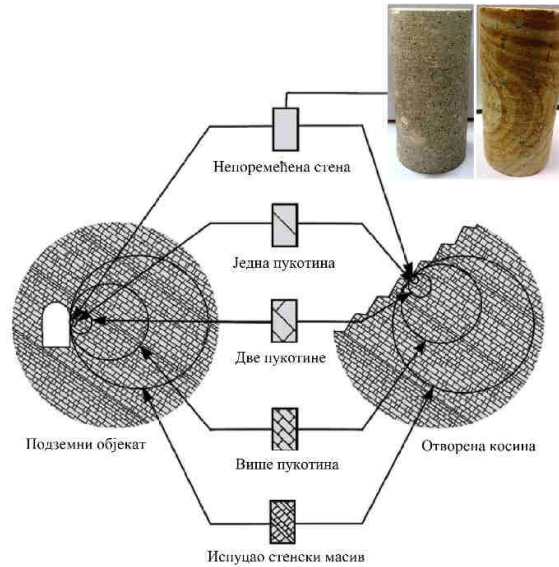
Приказ утицаја различитих вредности константе  $m_i$  на облик обвојнице Mohr-овог круга напона и угао унутрашњег трења за непоремећен стенски материјал приказан је на слици 2. Може се уочити да високе вредности материјалне константе  $m_i = 15-25$  представљају стрмо нагнуте обвојнице Mohr-ових кругова и високе вредности угла

унутрашњег трења при ниским вредностима ефективних нормалних напрезања [28]. Ове велике вредности материјалне константе  $m_i$  обично се повезују са кртим магматским и метаморфним стенама, као што су андезити, гнајс и гранити. Ниже вредности материјалне константе  $m_i = 3-7$ , дају ниже вредности угла унутрашњег трења, а и имају тенденцију да буду повезане са више пластичним карбонатним стенским материјалима као што су кречњак и доломит.



Слика 2 Утицај вредности константе  $m_i$  на: а) облик обвојнице, б) угао унутрашњег трења [28]

При пројектовању неког подземног објекта или косина, инжењер пројектант мора да истражи својства стенског материјала у којем се треба извести неки објекат. Сваки стенски материјал, било да се анализира макроскопски или микроскопски, у суштини представља нехомогену и анизотропну средину [19]. И поред познавања "in situ" и лабораторијских својстава стенског материјала, неопходно је предвидети понашање материјала приликом пројектовања. Такође, велика пажња се мора посветити структурним карактеристикама стенског масива. Поједностављен приказ утицаја величине пукотина и њихов међусобни размак на избор модела понашања стенског масива приказан је на слици 3. У микро размери која се овде разматра, стенски масив се у суштини третира као континуум. Ово се може поистоветити са стандардном величином језгра добијеном истражним бушењем, као и језгровањем блокова околног стенског масива. Узорак величине језгра потребно је да се испита у лабораторијским условима како би се на њему утврдили параметри чврстоће. Након тога, неопходно је утврђене параметре превести на стенски масив коришћењем признатих класификационих система и критеријума лома.



Слика 3. Приказ преласка са непоремећеног на испуцао стенски масив [19]

На следећем примеру, слика 3, кроз стенски масив се прелази једним системом пукотина и тада је материјал као такав веома анизотропан. Уколико непоремећени стенски материјал има високе вредности чврстоће, лом и деформације ће у највећој мери зависити од чврстоће површине дисконтинуитета, као и оријентације пукотина у односу на услове оптерећења. Понашање смицања дисконтинуитета зависи од различитих случајева површине пукотина и дефинисаних услова оптерећења. Величина трења и храпавост површина зидова пукотина су нека од својстава која могу да утичу на вредности саме чврстоће стенског материјала. Код стенских материјала са једним или више система пукотина неопходно је утврдити храпавост површина зидова и базни угао трења саме пукотине [20]. Храпавост површина зидова пукотина зависи од начина њиховог настанка и од минералшко-петрографских карактеристика стенског материјала у коме су пукотине настале. Barton [29] је предложио емпиријски критеријум лома за пукотине, који је и данас један од најчешће коришћених, где се чврстоћа на смицање површине зидова пукотине одређује постепено са повећањем нормалног напона на базни угао трења за равну површину и изражава се као:

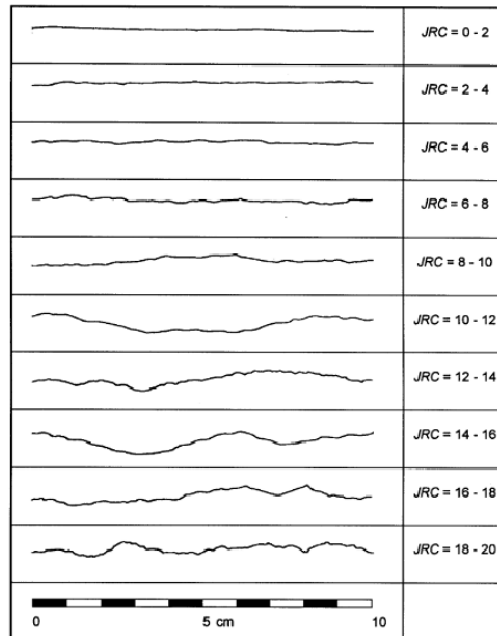
$$\tau = \sigma_n \tan(\phi_b + JRC \cdot \log_{10}(JCS / \sigma_n)) \quad (14)$$

где су:

- $\tau$  - највећа чврстоћа на смицање
- $\sigma_n$  - нормалан напон на површину смицања
- $\phi_b$  - базни угао трења
- $JRC$  - коефицијент храпавости зидова пукотина
- $JCS$  - чврстоћа на притисак зидова пукотине

Коефицијент храпавости зидова пукотина ( $JRC$ ) према препорукама које дају Barton и Choubey [30] могуће је проценити на основу слике 4, а оријентационе вредности у зависности од стања пукотина, за нормалан напон на површину смицања  $\sigma_n$  и базни угао трења  $\phi_b$  приказане су у табели 3, док се вредност  $JCS$  доста поуздано може одреди уз употребу Шмитовог чекића [31].





Слика 4. Профили храпавости за различите вредности JRC [30]

Табела 3. Опсег вредности нормалног напона и базног угла трења [29]

Врста стене	Нормалан напон на површину смицања $\sigma_n$ (MPa)	Базни угао трења $\phi_b$ (°)
Амфиболит	0,1 - 4,2	32
Базалт	0,1 - 8,5	31 - 38
Конгломерат	0,3 - 3,4	35
Креда	0 - 0,4	30
Доломит	0,1 - 7,2	27 - 31
Гнајс (ушкриљен)	0,1 - 7,9	23 - 29
Гранит (финозрн)	0,1 - 7,5	29 - 35
Гранит (крупнозрн)	0,1 - 7,5	31 - 35
Кречњак	0 - 8,3	33 - 40
Порфирит	0 - 13,3	31
Пешчар	0 - 7,3	25 - 35
Глинац	0 - 0,3	27
Силтит	0 - 7,5	27 - 31
Глинени шкриљац	0 - 1,1	25 - 30







Како се однос између размака пукотина и нестабилног подручја даље повећава, односно како се број пукотина повећава, сматра се да се стенски масив понаша више као дисконтинуум, где се поједини блокови стенског материјала могу слободно ротирати или одвојити. У том случају, померања нису свуда континуирана, те је поред наведених својстава појединачних пукотина, потребно проценити величину и бројност пукотина, као и правац и оријентацију у околном стенском масиву. Коначно, када је размак дисконтинуитета мали у поређењу са величином анализираниог објекта (косине површинског копа или подземног објекта), стенски масив се може третирати као псеудоконтинуум. Својства стенског масива у овом случају није могуће утврдити лабораторијским испитивањима и тада је потребно извршити испитивања на самом терену. Међутим, испитивања на терену могу у великој мери зависити од места



испитивања и као таква могу имати веома променљиве резултате. Само меродавност утврђених резултата, узимајући у обзир њихову поузданост, параметри чврстоће могу имати механичко, а не статистичко значење. Тренутно постоје само емпиријски критеријуми лома за квантификацију механичког понашања стенског масива.




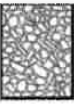
Опште карактеристике стенских маса у зависности од стања стенског масива у погледу испуцалости, поступка и могућности испитивања узорака у лабораторији су приказане у табели 4.

Табела 4. Распон карактеристика стенских маса [28]

Стање масива	Опис	Карактеристике чврстоће	Испитивање чврстоће	Теоријско разматрање
	Чврста напоремеђена стенска маса	Крт, еластичан и изотропан материјал	Троосна испитивања на узорцима у лабораторији која су релативно јефтина и дају поуздане резултате	Може се представити као изотропна, еластична, крта стенска маса чије понашање је разумљиво за практичну примену
	Чврста стенска маса са једним системом пукотина	Анизотропан материјал чија својства зависе од чврстоће и оријентације пукотина	Троосна испитивања на узорцима са нагнутим пукотинама. Директно смицање дуж дисконтинуитета.	Одговара пукотини чије је понашање довољно разумљиво за практичну примену
	Масивна стенска маса са два система пукотина	Анизотропан, чврстоћа зависи од броја, чврстоће на смицање и континуалности пукотина	Лабораторијска испитивања су тешко изводљива због поремеђености узорака и ограничења у димензијама опреме	Понашање је мало разумљиво због комплексности веза између блокова
	Испуцала стенска маса	Изотропан, при ниском нивоу напона са израженим ефектом дилатанције, а при вишим нивоима напона дробљењем зрна	Троосна испитивања на узорцима је тешко извести због поремеђености узорака и проблема приликом припреме	Понашање веома мало разумљиво, због комплексности интеракције незаобљених комада стенске масе
	Збијени камени набачај	Изотропан, при ниском нивоу напона са израженим ефектом дилатанције у односу на "ин ситу" стенску масу	Троосна испитивања је једноставно извести али су скупа због великих димензија потребне опреме	Понашање збијеног каменог набачаја одговара понашању крупнозрних материјала чије је понашање објашњено принципима механике тла
	Растресита стенска маса	Лоша збијеност и растреситост омогућавају померање фрагмената са великом покретљивости материјала	Троосна или испитивања у условима директног смицања је једноставно извести али су скупа због великих димензија потребне опреме	Понашање растресите депоноване стенске масе довољно разумљиво за практичну примену

Опште карактеристике стенског масива за утврђивање GSI система класификације у зависности од стања површина зидова дисконтинуитета и структуре стенског масива су приказане у табели 5. За сваки од материјала који су заступљени у оквиру будућих анализираних геомеханичких модела који ће бити израђени за потребе овог рада примењен је GSI систем класификације у зависности од стања површине зидова дисконтинуитета и структуре стенског масива и приказано је на слици 40.

Табела 5. Одређивање Геолошког индекса чврстоће (GSI) [19]

ГЕОЛОШКИ ИНДЕКС ЧВРСТОЋЕ На основу изгледа стенског материјала, изаберите категорију за коју сматрате да најбоље описује просечни неопремеђени стенски масив затечен "in situ". Треба имати на уму да чела радилишта која су израђена минирањем могу да пруже погрешну слику о квалитету дубљих делова стенског масива. Због оштећења услед минирања неопходно је извршити одређене корекције на основу детаљне анализе језгра из бушотина и чела радилишта која су израђена пре-сплит или глатким минирањем. Такође, веома је важно да се има на уму да се Нок-Броун-ов критеријум треба применити на стенске масиве код којих је величина појединих блокова мала у односу на величину ископа који се анализира.		СТАЊЕ ПОВРШНА	ВРЛО ДОБРО Врло крхаве, свеже, нераспадане површине	ДОБРО Крхаве, делимично распадане површине са мрљама од рђе	ЗАДОВОЉАВАЈУЋЕ Глатке, умерено распадане или алтерисане површине	ЛОШЕ Глатке, изразито распадане површине прекривене збијеним материјалом или са испуном од шљатка комода	ВРЛО ЛОШЕ Глатке, изразито распадане површине прекривене или са испуном од меле глине
СТРУКТУРА							
 <b>БЛОКОВИТА</b> Врло добро укљештен непоремеђен стенски масив који се састоји од коцкастих блокова дефинисаних са три ортогонална система дисконтинуитета		80	70				
 <b>ВРЛО БЛОКОВИТА</b> Укљештен, делимично поремеђен стенски масив са вишестраним блоковима дефинисаних са четири или више система дисконтинуитета			60	50			
 <b>БЛОКОВИТА/УСЛОЈЕНА</b> Наборан и испуцао стенски масив са више дисконтинуитета који се пресецају формирајући шљатке блокове				40			
 <b>ЗДРОБЉЕНА</b> Слабо укљештен, изразито испуцао стенски масив са измешаним шљатким и заобљеним блоковима					30	20	10
	← УМАЊЕЊЕ УКЉЕШТЕЊА КОМАДА СТЕНСКОГ МАТЕРИЈАЛА						

### 3.2 Примена Mohr-Coulomb-ов критеријум лома на стенски масив

Mohr-Coulomb-ов критеријум лома [32] је најједноставнији и најчешће примењен критеријум лома код полувезаних и невезаних стенских материјала. Он се може користити за анализу података одређених помоћу лабораторијских испитивања директног смицања и троосне чврстоће на притисак. Коришћењем података утврђених директним смицањем, за различите вредности нормалног напона  $\sigma$  одређује се



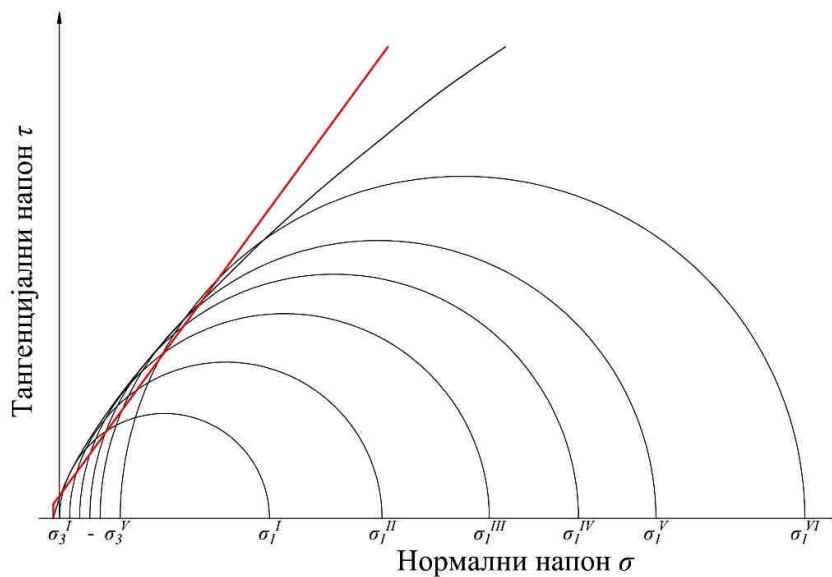
вредност смичућег напона  $\tau$ . Mohr-Coulomb-ов критеријум лома је у овом случају представљен једначином:

$$\tau = c + \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad (15)$$

где су:

- $\tau$  – смичући напон у тренутку лома
- $c$  – кохезија,
- $\sigma$  – нормалан напон
- $\varphi$  – угао унутрашњег трења.

Mohr-ови кругови напона у тренутку лома се одређују лабораторијски помоћу испитивања троосне чврстоће на притисак при различитим вредностима бочног притиска ( $\sigma_3$ ). Да би се одредила обвојница Mohr-ових кругова напона потребно је извршити више опита са различитим вредностима бочног притиска ( $\sigma_3$ ). У тренутку лома сваки Mohr-ов круг одређен је вредностима  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$ , док крива која тангира тако одређене кругове се назива обвојница Mohr-ових кругова напона (слика 5).



Слика 5. Mohr-ови кругови напона и обвојница за различите вредности бочног оптерећења

Већина програмских пакета развијених за анализу стабилности косина захтева као улазне податке Mohr-Coulomb-овог критеријума лома одговарајуће вредности угла унутрашњег трења  $\varphi$  и кохезије  $c$  за сваки коришћени материјал засебно. При испитивању стенског материјала помоћу троосне чврстоће на притисак апроксимација криве се врши за вредности минималног главног напона  $\sigma_3$  у границама интервала  $\sigma_1 < \sigma_3 < \sigma_{3max}$ , слика 6. На овај начин је могуће одредити угао унутрашњег трења  $\varphi'$  и кохезију  $c'$  помоћу једначина:

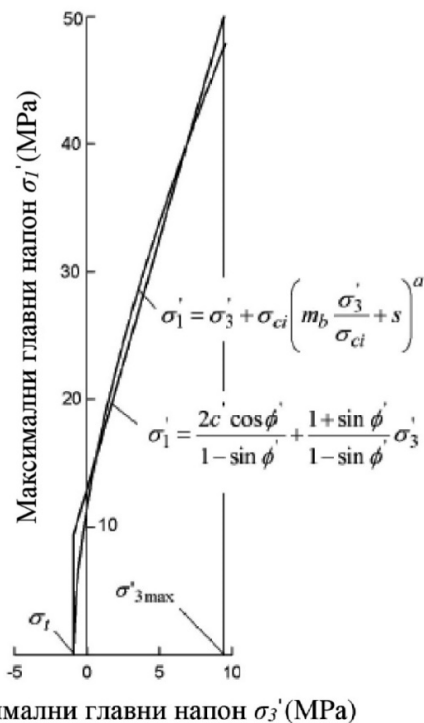
$$\varphi' = \arcsin \left[ \frac{6 \cdot a \cdot m_b \cdot (s + m_b \cdot \sigma_{3n}')^{a-1}}{2 \cdot (1+a) \cdot (2+a) + 6 \cdot a \cdot m_b \cdot (s + m_b \cdot \sigma_{3n}')^{a-1}} \right] \quad (16)$$

$$c' = \frac{\sigma_{ci} \cdot [(1+2 \cdot a) \cdot s + (1-a) \cdot m_b \cdot \sigma_{3n}'] \cdot (s + m_b \cdot \sigma_{3n}')^{a-1}}{(1+a) \cdot (2+a) \sqrt{1 + \frac{6 \cdot a \cdot m_b \cdot (s + m_b \cdot \sigma_{3n}')^{a-1}}{(1+a) \cdot (2+a)}}} \quad (17)$$

где је:  $\sigma_{3n}' = \frac{\sigma_{3\max}'}{\sigma_{ci}}$ .

На основу података одређених испитивањима троосне чврстоће на притисак при различитим вредностима минималног главног напона  $\sigma_3'$  одређује се вредност максималног главног напона  $\sigma_1'$ , па је Mohr-Coulomb-ов критеријум лома у овом случају представљен једначином:

$$\sigma_1' = \frac{2 \cdot c' \cdot \cos \phi'}{1 - \sin \phi'} + \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} \cdot \sigma_3' \quad (18)$$



Слика 6. Веза максималног и минималног главног напона код НВ и МС критеријума лома [27]

Резултати испитивања угла унутрашњег трења и кохезије узорака стенског материјала дацита и алтерисаног дацита су приказани у поглављу 4.8.6.

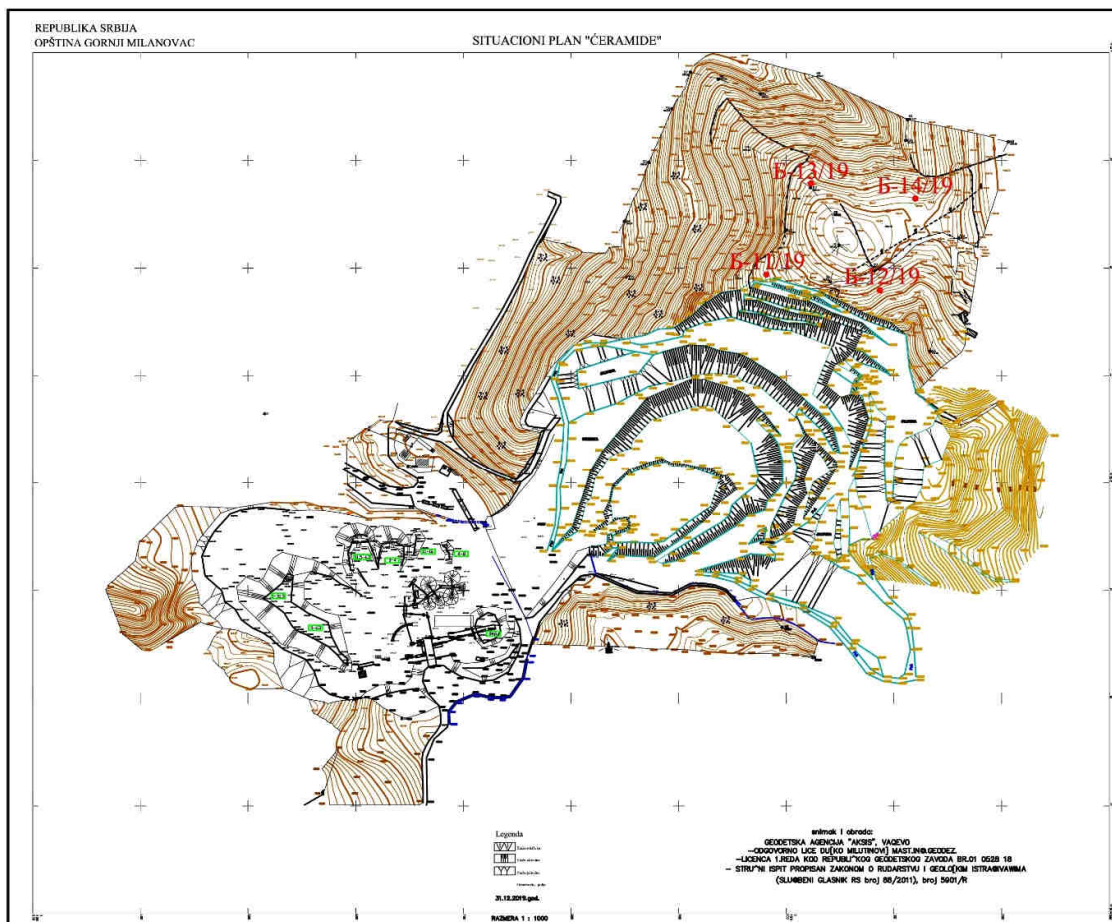
## 4 Дефинисање услова и параметара за потребе геомеханичког пројектовања

### 4.1 Истражни радови

Изведени геолошки истражни радови су засновани, пре свега, на дубинском истражном бушењу, геолошком картирању и лабораторијским испитивањима узорак стенског материјала. Током истраживања, која су обухваћена овим радом, избушене су 4 бушотине, укупне дужине бушења 535 m [33]. Подаци о изведеним бушотинама са координатама (положајем) и дужином бушења приказане су у табели 6. и графички на слици 7.

Табела 6. Положај и врста истражних радова на ПК "Ћерамиде"

Ознака бушотине	Координате бушотине			Дубина (m)
	X	Y	Z	
Б11-19	4890194,15	7458981,43	578,07	130
Б12-19	4890179,31	7459086,88	582,80	132
Б13-19	4890278,53	7459023,07	586,14	136
Б14-19	4890264,65	7459119,79	587,67	137
	Укупно			535



Слика 7. Положај истражних бушотина ПК "Ћерамиде"





Истражно бушење је вршено са језгровањем, гарнитуром типа GCP 300 [33], са пречником PQ– 83 mm. Језгра бушотина су на прописан начин пакована у сандуке, означавана, складиштена и чувана.

## 4.2 Геолошка грађа лежишта

Лежиште дацита "Ђерамиде" припада вулканској области Рудник–Љиг у оквиру које су издвојене три веће масе ефузивних стенских материјала. У оквиру вулканске области преовлађују сарматски кварцлатитско-дацитски ефузивни са пратећим пирокластитима. Лежиште дацита је једноставне геолошке грађе и суштински садржи три категорије дацитских стенских материјала и седименте кредног флиша. Дацит је у приповршинском делу грусификован, а затим следи зона алтерисаног дацита. Зона алтерисаног дацита (АД) је жућкасте боје због изражене лимонитизације биотита. Након алтерисаног дацита је свеж дацит (Д) сиве боје, порфирске структуре са израженим крупним фенокристалима фелдспата.

## 4.3 Генеза лежишта

На основу интерпретације података прикупљених истражним бушењем из картиране јединице на локалитету "Ђерамиде" утврђен је следећи распоред геолошких јединица

- флиш апта ( $K_1^4$ ),
- дацит (αα).

### Дацит (αα)

Стена је светлосиве боје са уочљивим фенокристалима плагиокласа, ситнијим честицама кварца и бојеног минерала. Лучена је стубасто до паралелопипедно. Карактеристична су три система пукотина лучења који издељују стенски масив. Основни систем пукотина има елементе пружања и пада од 150/50, пенетративан је и одговара раседним огледалима. Други и трећи систем су са елементима пружања и пада од 230/40 и 310/35. Стенски масив је изграђен од фенокристала интермедијарног плагиокласа, кварца и бојених минерала биотита и хорнбленде [33]. Детаљнији опис минералашко-петрографских карактеристика дат је у поглављу 4.6. Код бојених минерала изражена је опакитизација и хлоритизација, а у основи стенског масива констатује се хлоритизација и повремена калцитизација. Стенски масив те зоне је детерминисан као дацит. Грусификовани дацит издвојен је изнад претходно картиране јединице. Представља зону површинске деградације претходне картиране јединице и представља јаловински материјал.

### Флиш апта ( $K_1^4$ )

Седименти аптског флиша распрострањени су углавном крупнозрним, банковитим слабо везаним пешчарима и глиновитим пешчарима у смени са тамносивим песковитим глинцима у којима има и појава угља, као и сочивима кречњака са фауном у флишу. Једна од одлика аптског флиша јесте и та да садржи обиље калцитских жица и жилица [33]. Налазак сочива субспрудних кречњака који се прослојавају са седиментима аптског флиша говори о повременим повољним условима за егзистенцију организама спрудних фауна. Дебљина кречњака апта не прелази 50 m. Песковити седименти аптске флишне серије се ритмично смењују са алевролитима.



На доњим површинама секвенци честе су седиментне текстуре и то отисци трагова течења, ерозиони канали, остаци трагова вучења и многобројни биоглифи.

#### 4.4 Хидрогеолошке карактеристике истражног простора

На ширем простору који гравитира ка лежишту не постоје стални водотокови нити издани. Јужном границом лежишта у зони основне-манипулативне етаже копа (кота 485 м) протиче поток Брезовица који одводи оборинске воде са копа. Поток је у зони копа регулисан. Ниво хидрографске мреже на подручју лежишта је у зони потока Брезовица и то у њиховом доњем делу почевши од коте 310 м. Истражним бушотинама рађеним 2003. године није констатован ниво подземних вода до коте 410 м, која је набушена као доњи експлоатациони ниво [34]. Имајући у виду да лежиште захвата јужне падине брда Брег и то од коте 566 м, па до коте 470 м, могу се очекивати у време интензивнијих падавина јављање бујичних токова дуж етажа копа у оквиру подручја констатованих раседних зона. У делу лежишта у ком се у кровинском нивоу налази грусификовани дацит, дезагрегованом, трошном материјалу који може бити захваћен бујичним токовима могућа су засипања продуктивних етажа копа. Такве појаве могуће је спречити пројектовањем одговарајућих косина и висина етажа копа, као и изградњом одводних канала. Сагледано у целини лежиште "Ћерамиде" има повољне хидрогеолошке услове за експлоатацију и сем наведених појава, које је могуће технички решити, не постоје друга ограничења.

#### 4.5 Инжењерско-геолошке карактеристике истражног простора

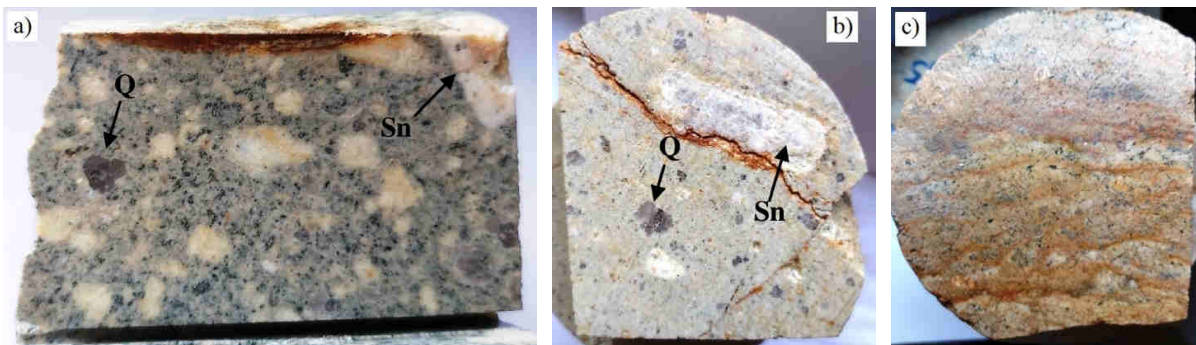
У оквиру лежишта издвојене су три категорије дацитских стенских материјала, као и седименти кредног флиша, те је са геомеханичког аспекта средина анизотропна. Дацити прве фазе изливања, односно сиви дацити (Д), имају висока механичка својства и представљају комплекс чврстих стенских материјала са аспекта геомеханичких карактеристика. Дацити друге фазе изливања, односно алтерисани дацити (АД), су нижих механичких својстава од сивог дацита (Д). Површински грусификовани дацит, као и седименти флиша представљају комплекс меких стенских материјала са знатно нижим геомеханичким својствима. Како је у овом погледу стенског масива лежиште анизотропно, са циљем дефинисања геомеханичких својстава стенског масива, извршена су геомеханичка испитивања узорака светло сивог дацита (Д) и мрко жутог алтерисаног дацита (АД). [35].

#### 4.6 Минералошко – петрографске карактеристике дацита

Од суштинске важности при испитивању механичких особина је познавање минералошко – петрографских карактеристика стенског материјала. Резултати досадашњих истраживања показују да на вредности чврстоће стенског материјала значајно утичу микроструктурне карактеристике од којих су најважније: учешће главних минералних елемената и њихов међусобни утицај [51], величина минералних зрна [52], међусобни распоред минералних зрна и њихов облик [53], међусобни контакт између појединих зрна унутар самог узорка [54] и степен алтерације стенског материјала [55]. Испитивањем минералошко – петрографског састава су обухваћени следећи узорци: алтерисани дацит (АД), дацит (Д) и материјал из истражне бушотине ознаке Б-14 (134,1-134,8).

### Макроскопски опис узорака Д, АД и Б-14 (134,1-134,8)

Испитивани узорци Д, АД и узорка из истражне бушотине ознаке Б-14 (134,1-134,8) су стене доминантно сиве боје. Степен и врста алтерације утичу на промену интензитета боје те она варира од светло сиве до окерсиве боје - интензивно лимонитисане стене (слика 8). Макроскопски се уочавају крупни, скоро идиоморфни фенокристали санидина чије димензије варирају од 0,5 x 1 cm до 2 x 4 cm (слика 8a). Код узорка кварцлатита светлосиве боје уочава се маркантна пукотина запуњена лимонитом (слика 8б). Док узорак кварцлатита има окерсиву боју услед интензивне лимонитизације (слика 8ц). Макроскопски се могу запазити и неправилни кристали кварца, често овалних форми пречника до 0,3 cm, као и ретке листасте форме биотита. Текстура је масивна.



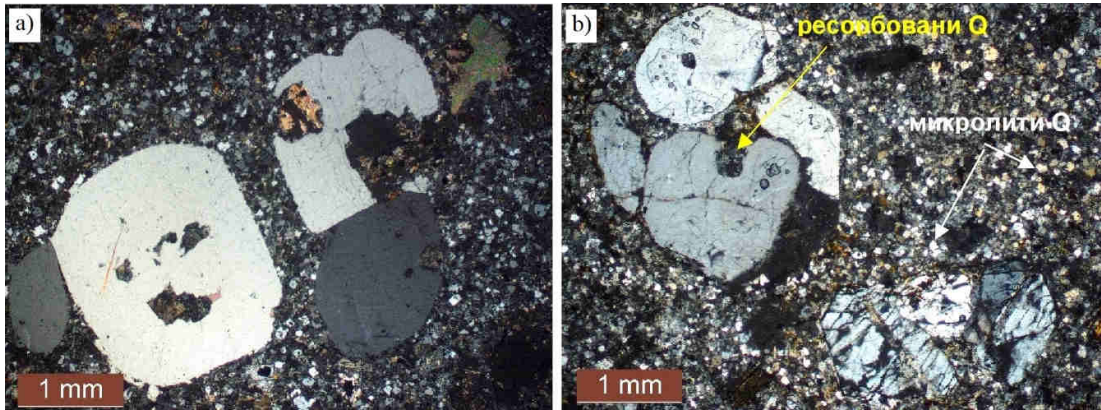
Слика 8. Макроскопски изглед: а) Д, б) узорак Б-14 (134,1-134,8), ц) АД.

### Микроскопски опис узорака Д, АД и Б-14 (134,1-134,8)

Сви испитивани узорци показују исте структурно-текстурне карактеристике, као и минерални састав, само је интензитет секундарних измена, калцитизације, лимонитизације и хлоритизације другачији. Испитивани кварцлатитити су стенски материјали холокристаласто порфирске структуре са микрокристаластом основном масом и фенокристалима кварца, плагиокласа, санидина, биотита и хорнбленде. Акцесорни (пратећи) састојци су апатит, циркон и металични минерали, док су од секундарних минерала запажени калцит, серицит, хлорит и оксиди/хидроксиди гвожђа.

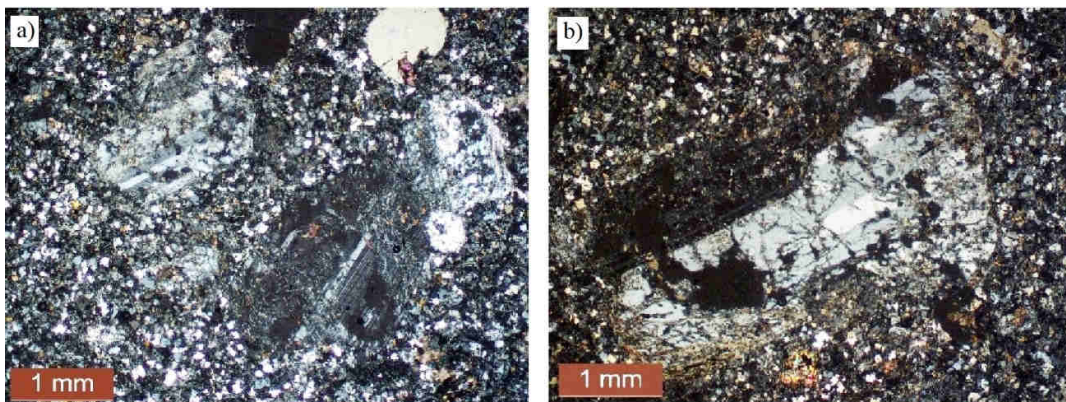
Кварц се јавља у изометричном облику, најчешће хипидиоморфних, заобљених форми, димензија до 0,2 cm у пречнику (слика 9a). Заобљена зрна кварца су често неправилних форми услед изражене ресорбције фенокристала кварца и микролити кварца маркиране задирањем основне масе у фенокристале (слика 9б). Зрна су најчешће испуцала уз присутне бројне микропрслине од којих су неке и запуњене секундарним минералима. У кристалима кварца уочавају се појкилитски уклопљени кристали акцесорних састојака, апатита и циркона. Осим крупних фенокристала, кварц је присутан у значајној количини и у форми микролита основне масе. Просечна величина микролита је око 0,1 mm у пречнику у свим испитиваним узорцима.





Слика 9. Микроскопски изглед кварцлатита "Ђерамиде"; а) узорак Б-14; б) АД

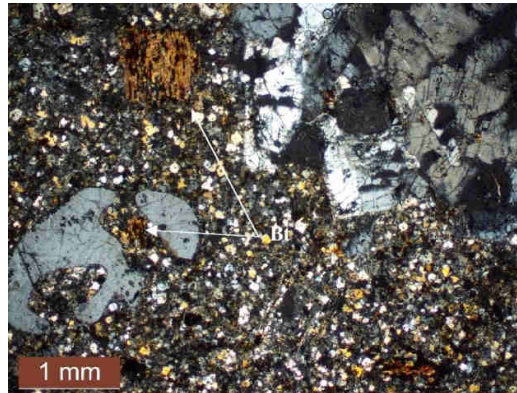
Плагиокласи се јављају у облику призматичних хипидиоморфних форми, димензија до 1 x 3 mm, најчешће величине од 0,3 x 1,5 mm. Редовно показују ламеларно ближњење, али је уочена и појава зонарних кристала плагиокласа. У свим испитиваним узорцима, кристали плагиокласа су испуцали, а пукотине су запуњене калцитом и серицитом (слика 10). Интензитет алтерације фенокристала плагиокласа (калцитизација и серицитизација) је израженији у узорцима Б-14 у односу на узорке дацита где доминира лимонитизација.



Слика 10. Алтерисани фенокристали плагиокласа; а) узорак Д; б) узорак Б-14 (134,1-134,8)

Санидин се јавља у фенокристалима идиоморфног до хипидиоморфног облика различитих димензија, најчешће величине од 0,5 mm до преко 5 mm. Макроскопски је уочено да се често јавља у изузетно крупним кристалима, дужине и неколико cm што је разлог да често тако крупна зрна нису ни захваћена петрографским препаратом. Санидин се јавља у карлсбадски двојно ближњеним кристалима и често са појкилитски уклопљеним лискама биотита, зрна кварца и ламеларно ближњених плагиокласа. Поједини кристали санидина показују трагове ресорпције углавном по рубовима зрна.

Биотит се јавља у лискама идиоморфног до хипидиоморфног облика, величине од 0,3 x 1 mm и ређе крупнијим формама 0,5 x 2 mm. Лиске биотита се карактеришу slabим полихроизмом у зелено-браон боји. Углавном се јављају измењени, слабо хлоритисани биотити, са концентрисањем металичних минерал дуж чијих равни цепљивости се запажа издвајање металичних минерала (слика 11). Присуство појединих "исправних" лиски биотита указује да је стенски материјал био изложен дејству хидротермалних раствора.

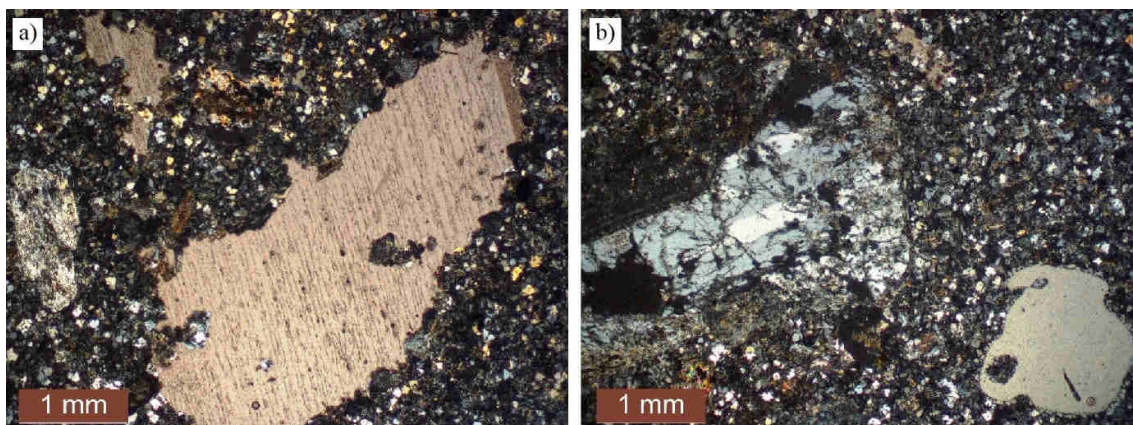


Слика 11. Микроскопски изглед кварцлатита "Герамиде" - узорак АД

Хорнбленда се јавља у облику хипидиоморфних кристала величине до 0,2 x 0,5 mm. Уочава се полихроизам у тамнијим нијансама смеђе боје. Већина зрна хорнбленде је испуцала и изломљена и интензивно измењена уз концентрисање металичних минерала.

Акцесорни минерали су представљени апатитом, цирконом и металичним минералима. Углавном су идиоморфног облика, величине до 0,5 mm уклопљени у фенокристалима.

Секундарни минерали су представљени калцитом, хлоритом и серицитом. Хлорит се јавља као продукт алтерације биотита и хорнбленде, у облику хипидиоморфних лиски величине до 0,2 mm. Калцит се јавља дуж пукотина и прслина фенокристала, али је интензивно присутан и у шупљинама и основној маси стенског материјала, посебно у узорку Б-14 (134,1-134,8) (слика 12а). Уочава се шупљина запуњена секундарним калцитом, док је основна маса изграђена од микролита кварца, плагиокласа, бојених минерала и прожета калцитом, хлоритом, металичним минералима са присутним фенокристалом ресорбованог кварца и испуцалим и алтерисаним фенокристалом плагиокласа (слика 12б).



Слика 12. Микроскопски изглед узорка Б-14 (134,1-134,8)

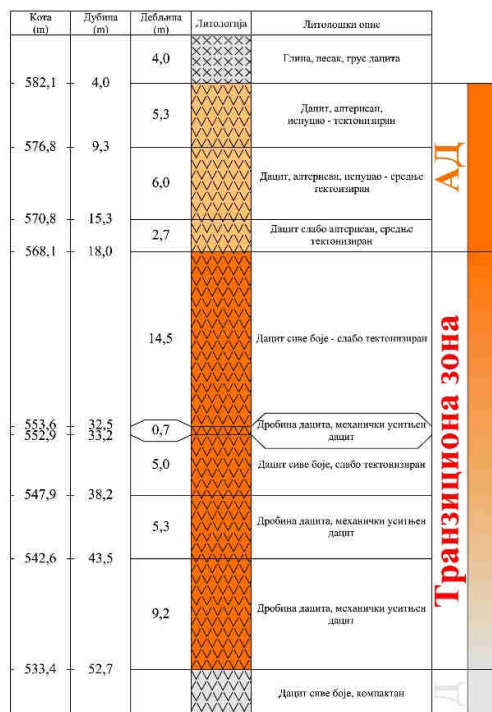
Основна маса је холокристалоасто порфирске структуре изграђена од микролита кварца, плагиокласа, бојених састојака калцита, хлорита и мале количине вулканског стакла. Величина микролита је од 0,1 - 0,2 mm.



На основу испитивања на узорцима Д, АД и узорка ознаке Б-14 може се уочити да на механичка својства стенског материјала највише утичу минералошко петрографске карактеристике кварца и биотита. Параметри чврстоће испитиваног материјала су директно пропорционални садржају честица кварца и биотита, па тако стенски материјали са већим присуством ситнијих честица кварца показују веће вредности чврстоће, док узорци са већим присуством биотита имају мању отпорност према деловању спољашњих сила, односно мању чврстоћу [56].

#### 4.7 Дефинисање величине транзиционе зоне

Прецизно одређивање границе између алтерисаног дацита (АД) и дацита (Д) било је немогуће путем анализе доступне геолошке документације, картирања језгра из истражних бушотина и отворених косина површинског копа. Међутим, узимајући у обзир важност генезе и својстава стенског материјала у овој зони (екструзивне магматске стене) може се закључити да су се промене у стенском масиву дешавале постепено. Накнадним тумачењем геолошке структуре (слика 13) издвојене су три зоне: алтерисани дацит (АД), транзициона зона (ТЗ) и компактан дацит (Д).



Слика 13. Илустративни приказ литолошког стуба истражне бушотине

Транзициона зона представља интервал у којем је дошло до постепене промене у стенском масиву (Д - АД) и дефинисана је од картираног доњег дела алтерисаног дацита до картираног горњег дела компактног дацита. Увидом у литолошки стуб свих истражних бушотина (прилог 1) које су израђене за потребе утврђивања геолошких резерви површинског копа могуће је на основу картираних литолошких чланова уочити следеће:

- истражна бушотина Б11-19 нема прелаз, тј. одмах испод картираног алтерисаног дацита појављује се компактан дацит.



- истражна бушотина Б12-19 има транзициону зону која се појављује на дубини у распону 18,3 - 28,2 m, тако да је све укупно разлика 9,9 m.
- истражна бушотина Б13-19 има транзициону зону која се појављује на дубини у распону 18,0 - 52,7 m, тако да је све укупно разлика 34,7 m.
- истражна бушотина Б14-19 има транзициону зону која се појављује на дубини у распону 10,1 – 41,8 m, тако да је све укупно разлика 31,7 m.

На основу свега наведеног величина транзиционе зоне је дефинисана као средња вредност величине транзиционе зоне картираног језгра из израђених истражних бушотина. Приликом дефинисања величине ове зоне, бушотина где није постојала транзициона зона није узета у разматрање. На претходно приказан начин је утврђена величина транзиционе зоне која износи око 25m.

#### 4.8 Лабораторијска испитивања хетерогеног стенског материјала

Испитивања физичко-механичких својстава су извршена на непоремећеним узорцима из језгра бушотина и из блокова стенског материјала из којих је помоћу бушилице и дијамантске круне извађено језгро. Сва лабораторијска испитивања су изведена на основу савремених метода и приступа у примењеној механици стена, а у складу са препорукама Међународног друштва за механику стена (ISRM) и Америчког друштва за испитивање материјала (ASTM).

Приликом извођења истражног бушења 2019. године на ПК "Ћерамиде" узето је 10 узорака за испитивање физичко-механичких својстава дацита, од којих је извучено укупно 22 пробна тела. Истражне бушотине су извођене са пречником бушотине од  $\varnothing$  82 mm. Из блокова стенског материјала, језгровањем је израђено укупно 60 пробних тела пречника  $\varnothing$  54 mm. Пробна тела су се састојала од стенског материјала Д и АД, као и композитних узорака различитог процентуалног садржаја алтерисаног дацита у испитиваном узорку.

Према постављеном програму и предмету наведеним испитивањима обухваћени су следећи параметри:

- Специфична тежина
- Запреминска тежина,
- Садржина воде,
- Једноосна чврстоћа на притисак
- Троосна чврстоћа на притисак.

Лабораторијски одређене вредности троосне чврстоће на притисак непоремећеног стенског материјала  $\sigma_{ci}^{TX}$  и материјалне константе  $m_i$  Ноек-Brown-овог критеријума лома уз примену GSI система класификације и процене фактора оштећења стенског масива D представљају основу за дефинисање механичких својстава потребних за анализу стабилности геомеханичких модела. Сходно дијаграму тока примене Ноек-Brown-овог критеријума лома, слика 14, предвиђено је одређивање минималних и максималних главних напона неопходних за даљу анализу. Након тога се приступа примени претходно припремљених геомеханичких модела на којима се врши пројектовање самог објекта. Полазна основа за поступак описан у дијаграму тока је одређивање својстава непоремећеног стенског материјала (слика 14), а што обухвата лабораторијске методе одређивања једноосне и троосне чврстоће на притисак на

пажљиво прикупљеним и припремљеним узорцима језгра стена [17]. Велику пажњу треба посветити томе да се језгро извади из хомогеног блока стенског материјала у коме ће доћи до лома кроз непоремећени стенски материјал. Ови узорци се испитују користећи тренутне методе и стандарде наведене у ISRM предложеним методама [36].

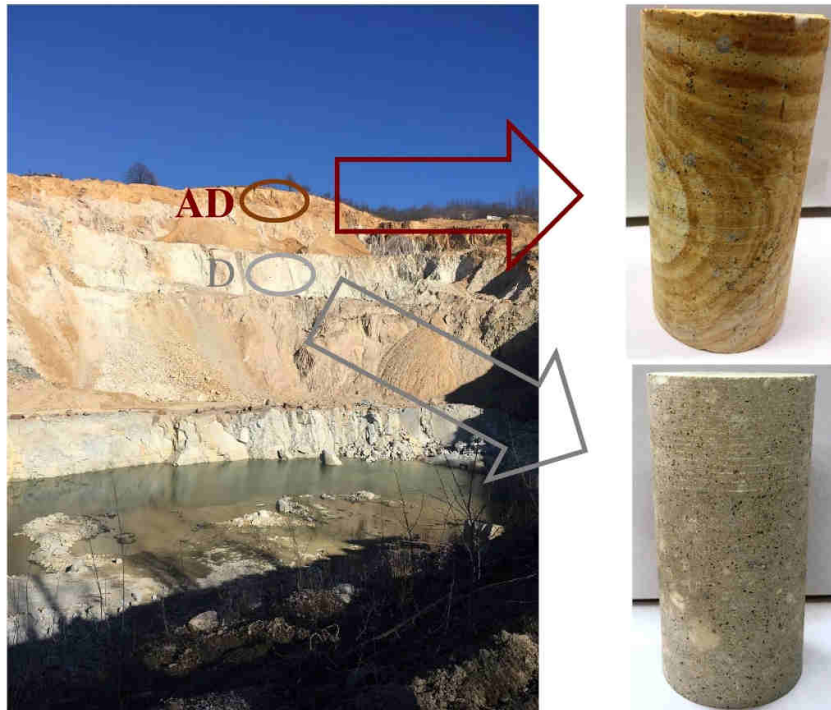


Слика 14. Дијаграм тока примене Ноек-Броун критеријума и GSI система класификације [17]

Потребно је нагласити да у оквиру ове дисертације нису разматрани и испитивани параметри деформабилности, тако да ће се занемарити, односно биће усвојене вредности које програмски пакет за анализу стабилности косине користи као иницијалне.

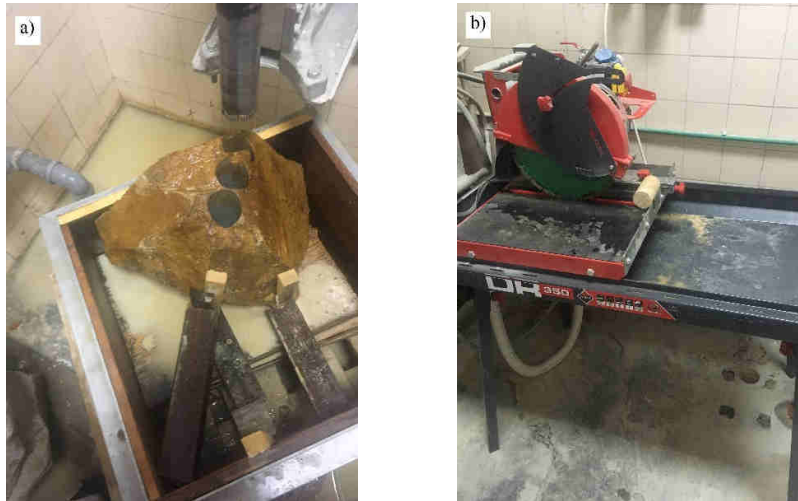
#### 4.8.1 Методологија припреме пробних тела за испитивање

Лабораторијска испитивања једноосне и троосне чврстоће на притисак су изведена на узорцима једнородног материјала и композитним узорцима за чије формирање су узети блокови непоремећеног стенског материјала (максималних димензија 30 x 30 x 30 cm). Узорци алтерисаног дацита су узети са етажe површинског копа на коти 575 m надморске висине и дацита на коти 505 m надморске висине (слика 15), херметички умотани у полиетиленске вреће и транспортовани у лабораторију.

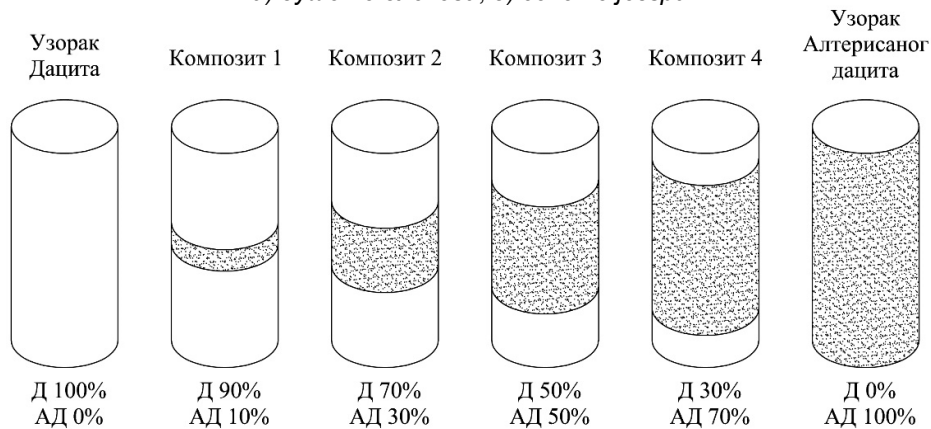


Слика 15. Анализирана косина површинског копа "Ћерамиде"

Цилиндрични узорци стенског материјала пречника 54 mm извађени су висококвалитетном лабораторијском машином за језгоровање са дијамантским наставком. Затим су крајеви узорака и дискови исечени, полирани, и обликовани према потребном односу висине и пречника са толеранцијама према Америчком друштву за испитивање материјала - ASTM [37] (слика 16). На поменути начин су формирана пробна тела од монолитног стенског материјала (100% Д и 100% АД) и израђени дискови стенског материјала који формирају композитне узорке. Дискови стенског материјала коришћени су за формирање група композитних узорака који су садржали 10%, 30%, 50% и 70% процентуалног удела слабијег стенског материјала (алтерисани дацит) (слика 17). Битно је истаћи да током формирања композитних узорака није коришћен везивни материјал између дискова стенског материјала. Употреба гипса за повезивање одвојених дискова [5] показала се као неадекватна због лома гипса при мањим оптерећењима, узрокујући померање дискова и уводећи неуједначену расподелу напрезања по равнима контакта дискова. Tziallas и др. [2] су утврдили да је употреба гипса за повезивање одвојених дискова непотребна, с обзиром на положај површина лома и чињеницу да приликом испитивања нису примећена померања дискова, чак ни при већим притисцима. Према овим налазима су припремљени композитни узорци који ће се користити током овог испитивања.



Слика 16. Поступак припреме пробних тела за лабораторијска испитивања:  
а) бушење блокова, б) сечење језгра



Слика 17. Шема припреме испитиваних узорака

Из блокова стенског материјала узорка АД је било веома тешко извадити квалитетно језгро и свести га на завршни облик, па је било потребно узети много више блокова стенског материјала АД од самог Д. Код блокова АД површински омотач је алтерисан, док након језгровања није примећено да се изнутра налази део свежег дацита, слика 18. У просеку је сваки 15. блок узорка АД могао да се искористи, односно било је могуће да се извуче целокупан узорак АД без прослојака свежег дацита. Овај феномен се може приписати томе да се у површинском делу копа услед атмосферских падавина и кретања воде кроз пукотине ствара алтерација самог стенског материјала.





Слика 18. Изглед раслојавања стенског материјала

Димензије пробних тела која се користе за испитивање једноосне чврстоће на притисак се разликују у зависности од препорука и стандарда (ASTM и ISRM). Према ASTM [37] пречник пробног тела не сме бити мањи од 47 mm (ASTM) са односом висине и пречника 2-2.5:1, а време трајања опита треба да износи 2-15 минута. ISRM [38] препоручује да пречник пробног тела не сме бити мањи од 54 mm (ISRM), док однос висине и пречника треба да буде 2.5-3:1, а време трајања опита 5-10 минута. Увидом у досадашња истраживањима [2], [7] пречник пробних тела припремљених за испитивање једноосне и троосне чврстоће на притисак је износио 54 mm, а однос висине и пречника пробних тела се кретао у распону 2-2.5:1. Имајући у виду да су овим истраживањем поред испитивања једноосне чврстоће на притисак предвиђена и испитивања троосне чврстоће на притисак за испитивања су формирана пробна тела која су била условљена величином триаксијалне ћелије пречника 54 mm са односом висине и пречника од 2:1. Свеукупно, за лабораторијска испитивања је припремљено укупно 60 пробних тела, 30 за потребе испитивања једноосне чврстоће на притисак и 30 пробних тела за испитивање троосне чврстоће на притисак, слика 19.



Слика 19. Изглед пробних тела припремљених за испитивање:  
а) једноосне чврстоће на притисак и б) троосне чврстоће на притисак

#### 4.8.2 Специфична тежина

Испитивањем специфичне тежине су обухваћена 3 узорка: дацит (Д), алтерисани дацит (АД) и узорак из истражне бушотине Б-14 (134,1-134,8). За сваки узорак је вршено испитивање на 5 проба. Процедура припреме узорака за испитивање специфичне тежине је таква да се одабере репрезентативан узорак који садржи

најмање 10 комада стенског материјала од којих сваки има масу од најмање 50 g. Узорак се најпре осуши у лабораторијској сушници на  $105^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$  током периода од најмање 24 сата како би се одстранила влажност. Затим се узорак припрема дробљењем и мљењем на величину од око  $100\ \mu\text{m}$ , а важно је да величина зрна не прелази  $150\ \mu\text{m}$  [39]. Као апарат за мерење специфичне тежине користи се пикнометар одређене запремине, у овом случају  $250\ \text{cm}^3$ . На почетку испитивања, неопходно је избежарити пикнометар, односно измерити масу пикнометра пуног воде. Пикнометар се испразни и осуши, а уз помоћ левка додаје се око 80g спрашеног стенског материјала и додаје се довољно течности да се потпуно накваси узорак. Након тога се приступа загревању пикнометра са материјалом и водом око 20 минута за сваки узорак ради уклањања ваздуха између минералних зрна стенског материјала. Пикнометар се затим охлади и ниво течности се прецизно допуни до  $250\ \text{cm}^3$ . На тај начин је могуће одредити запремину  $V_s$  узорка без пора и шупљина где је, уз познату тежину узорка у сувом стању, могуће одредити специфичну тежину према једначини:

$$\gamma_s = \frac{G_s}{V_s} \quad (19)$$

где су:

$G_s$  - тежина узорка у сувом стању, kN,  
 $V_s$  - запремина узорка без пора и шупљина,  $\text{m}^3$ .

Резултати испитивања специфичне тежине узорка алтерисаног дацита крећу се у границама од 24,72 до 25,30 kN/ $\text{m}^3$  са средњом вредношћу од 25,08 kN/ $\text{m}^3$ , узорка дацита у границама од 25,12 до 25,58 kN/ $\text{m}^3$  са средњом вредношћу од 25,33 kN/ $\text{m}^3$  и приказани су у прилогу 2, узорка из истражне бушотине Б-14 (134,1-134,8) у границама од 24,77 до 25,08 kN/ $\text{m}^3$  са средњом вредношћу од 24,95 kN/ $\text{m}^3$ , а изглед испитиваних пикнометра приказан је на слици 20.



Слика 20. Испитивање специфичне тежине стенског материјала

### 4.8.3 Запреминска тежина

Узорци за испитивање запремиске тежине у природном стању влажности су неправилног облика. Методологија испитивања се састоји у мерењу масе узорака пре и након потапања у парафин. Затим се узорак потапа у стаклену посуду која је претходно напуњена водом. Потребно је водити рачуна да узорак не додирује зидове и дно посуде. На тај начин се мери истиснута течност, која уједно представља и запремину узорака са порама и шупљинама. Испитивања је потребно урадити на минимум 5 пробних тела. За испитивање запремиске тежине у природном стању је узето укупно 104 узорака стенског материјала, 50 узорака алтерисаног дацита и 54 узорака дацита. Изглед и начин припреме узорака приказан је на слици 21.



Слика 21. Припремљени узорци за испитивање запреминске тежине: а) АД, б) Д

Запреминска тежина у природном стању [40] одређује се као однос тежине и запремине узорка у природном стању влажности:

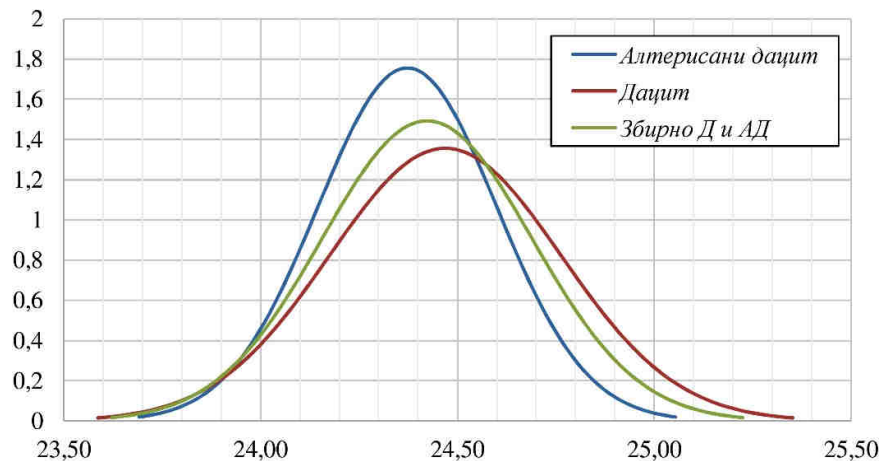
$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (20)$$

где је:

$G$  - тежина узорка у природном стању влажности,  $\text{kN}$ ,  
 $V$  - запремина узорка са порама и шупљинама,  $\text{m}^3$ .

Резултати испитивања запреминске тежине у природном стању влажности узорка алтерисаног дацита крећу се у границама од  $24,00$  до  $24,82 \text{ kN/m}^3$  са средњом вредношћу од  $24,37 \text{ kN/m}^3$ , узорка дацита у границама од  $23,83$  до  $24,97 \text{ kN/m}^3$  са средњом вредношћу од  $24,47 \text{ kN/m}^3$ , збирних узорака Д и АД крећу се у границама од  $23,83$  до  $24,97 \text{ kN/m}^3$  са средњом вредношћу од  $24,42 \text{ kN/m}^3$ , узорка из истражне бушотине Б-14 (134,1-134,8) у границама од  $23,83$  до  $24,40 \text{ kN/m}^3$  са средњом вредношћу од  $24,06 \text{ kN/m}^3$  и приказани су у прилогу 3. На основу резултата испитивања запреминске тежине у природном стању влажности, урађена је анализа према нормалној расподели за израчунате вредности материјала Д и АД, као и збирно што је приказано на слици 22.

### Запреминска тежина



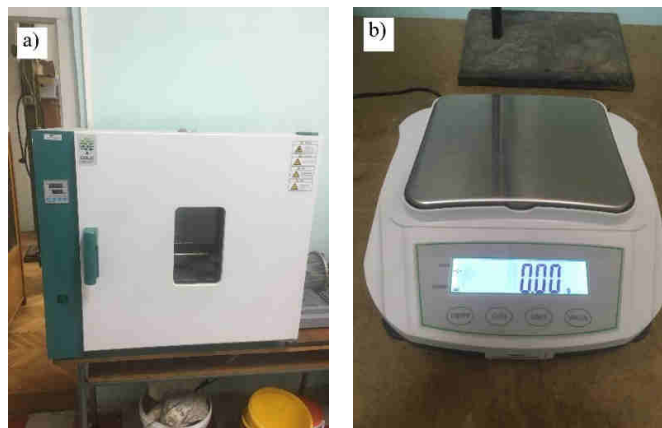
Слика 22. Нормална расподела запреминске тежине у природном стању влажности

Увидом у резултате нормалне расподеле, слика 22, јасно се може уочити да је веће растурање података код испитиваних узорака Д, у односу на АД. Објашњење треба тражити у томе да су узорци свежег дацита (Д), поред блокова са етажа, узимани по целокупној вертикали бушотине, па је самим тим и вероватноћа растурања већа. Оно што се може закључити из приложеног је да ова два стенска материјала (Д и АД) заправо представљају један материјал у погледу запреминске тежине.

#### 4.8.4 Садржина воде

Опрема потребна за испитивање садржине воде се састоји из следећег:

- Лабораторијске сушнице која може да одржава температуру од  $105^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$  током периода од најмање 24 сата (слика 23а).
- Лабораторијске ваге одговарајућег капацитета, која може да мери са тачношћу од 0,01g масе узорка (слика 23б).



Слика 23. Опрема за испитивање влажности: а) лабораторијска сушница, б) лабораторијска вага.

Процедура опита је таква да се одабере репрезентативан узорак који садржи најмање 10 комада стенског материјала од којих сваки има масу од најмање 50 g или минималну величину десет пута већу од максималне величине зрна. За испитивање



су узимани узорци из блокова стенског материјала за одређивање вредности Д и АД, као и узорка из истражне бушотине Б-14 (134,1-134,8). Маса комада стенског материјала се прво измери на лабораторијској ваги  $m$ , а затим се приступа сушењу у лабораторијској сушници, до сталности масе, након чега се мери маса тако осушеног узорка  $m_s$ . При испитивању је изузетно вођено рачуна да се задржи природна влажност стенског материјала, тако да су се сва испитивања изводила најкасније у периоду од 24 часова од самог узимања узорка са терена. Сва испитивања садржине воде су извођена према препорукама које даје ISRM [39] и одређује се преко обрасца:

$$w = \frac{m_w}{m_s} = \frac{m - m_s}{m_s} \cdot 100\% \quad (21)$$

Резултати испитивања садржине воде узорка алтерисаног дацита крећу се у границама од 7,52 до 8,87 % са средњом вредношћу од 8,21 %, а узорка дацита у границама од 6,98 до 7,80 % са средњом вредношћу од 7,36 % и узорка из истражне бушотине Б-14 (134,1-134,8) у границама од 7,03 до 7,85 % са средњом вредношћу од 7,40 % и приказани су у прилогу 4.

#### 4.8.5 Једноосна чврстоћа на притисак

Испитивања једноосне чврстоће на притисак су изведена на хидрауличној преси која може да обезбеди довољну силу при испитивању. Приликом испитивања је наношена сила која је била управна на основицу пробног тела. Време трајања сваког опита се кретало од 5 до 10 минута са прираштајем оптерећења од 0,1 до 0,3 kN/s. Пробна тела су испитивана на собној температури која је износила  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  и време између узимања узорка на терену и самог испитивања није било дуже од 15 дана. Једноосна чврстоћа на притисак представља однос максималне силе која је забележена у тренутку лома и површине узорка која је била у контакту са пресом.

$$\sigma_{ci}^{UCS} = \frac{P}{A} \quad (22)$$

где је:

- $P$  – максимална сила у моменту лома,
- $A$  – површина попречног пресека испитиваног узорка.

Резултати испитивања једноосне чврстоће на притисак узорка из истражних бушотина су приказани у прилогу 5, док су резултати испитивања једноосне чврстоће на притисак узорка из блокова стенског материјала приказани у прилогу 6. Вредности једноосне чврстоће на притисак за узорке дацита из истражних бушотина (пречник пробних тела  $\varnothing 82$  mm) се крећу од 79,69 до 95,78, са средњом вредношћу од 86,90 МПа. За узорке алтерисаног дацита из истражних бушотина вредности једноосне чврстоће на притисак се крећу од 26,25 до 28,62 МПа, са средњом вредношћу од 27,44 МПа. Такође, овде је потребно нагласити да се приликом анализе издвојио узорак из истражне бушотине ознаке Б-14 (134,1-134,8) код којег су вредности једноосне чврстоће на притисак знатно мање у односу на дацит и крећу се од 29,86 до 31,65 МПа, са средњом вредношћу од 30,77 МПа. Увидом у резултате једноосне чврстоће на притисак из истражних бушотина ознаке Б-14 (134,1-134,8) могуће је уочити да ова зона има механичка својства која оквирно одговарају својствима АД, где се као



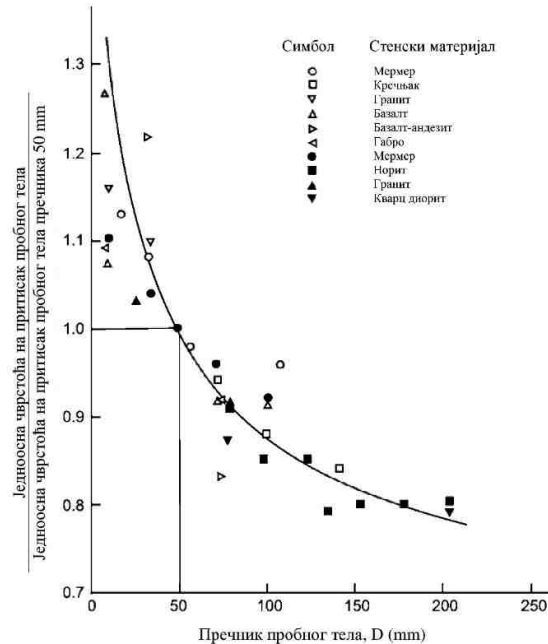


последица тих дешавања може сматрати кретање хидротермалних вода у дубљим зонама површинског копа. На основу тога могуће претпоставити и да између дацита и доње зоне постоји одређена прелазна зона, обзиром да постоје велике разлике у чврстоћи.

Претходно се заснива на претпоставкама, пошто је тешко дати одређене закључке на основу испитивања 2 пробна тела. Овде је потребно нагласити да се прелаз између дацита и зоне на дубини од 135 m није разматрао, већ само прелаз између Д и АД. Свакако овај прелаз је могуће разматрати као препоруку за даљи ток истраживања.

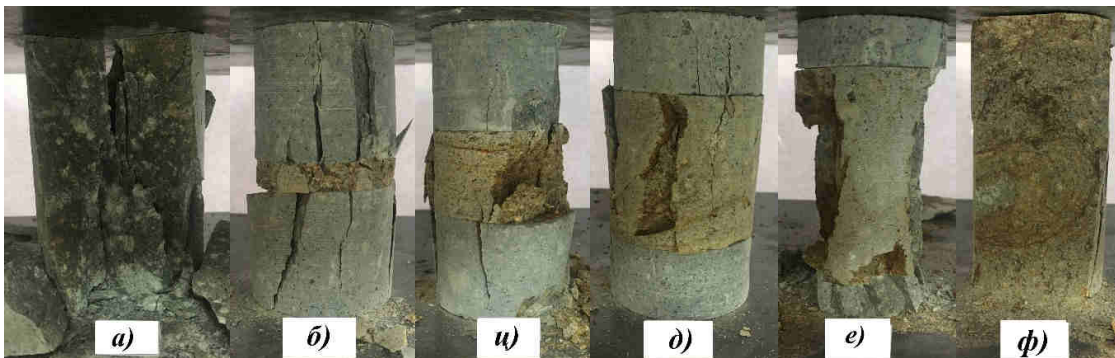
Вредности једноосне чврстоће на притисак узорака свежег дацита из блокова стенског материјала (пречник пробних тела  $\varnothing$  54 mm) се крећу од 101,16 до 106,77 МПа, са средњом вредношћу од 103,72 МПа. За узорке алтерисаног дацита вредности једноосне чврстоће на притисак се крећу од 32,70 до 34,85 МПа, са средњом вредношћу од 33,90 МПа. Код композитних узорака, минимални проценат алтерисаног дацита је 9,8% и вредност једноосне чврстоће на притисак износи 57,87 МПа, док је максимални проценат алтерисаног дацита 70,2% где је једноосна чврстоћа на притисак 34,42 МПа.

Увидом у резултате испитивања једноосне чврстоће на притисак може се закључити да су параметри једноосне чврстоће на притисак узорака из истражних бушотина у односу на узорке из блокова стенског материјала осетно ниже. Ово се може приписати томе да са повећањем пречника пробног тела се увећава и запремина самог пробног тела, па самим тим се значајно увећава вероватноћа утицаја хетерогености материјала на вредности механичких својстава стенског материјала. У оквиру овог истраживања на узорцима из истражних бушотина пречника 82 mm одређене су вредности једноосне чврстоће на притисак које су за око 17 % мање у односу на вредности које су одређене на узорцима из блокова стенског материјала пречника 54 mm. Jamshidi и др [41] су испитивали утицај пречника у распону од 38-74 mm на вредности једноосне чврстоће на притисак где су утврдили да се вредност једноосне чврстоће на притисак смањује за просечно око 20% са повећањем пречника пробног тела. Ноек и Brown су испитивали различите стенске материјале и представили одређену зависност, где су једноосну чврстоћу на притисак упросечили за вредност једноосне чврстоће на притисак за узорак пречника 50 mm (слика 24). Величина смањења једноосне чврстоће на притисак зависи од порозности, микропукотина, величине, распореда и облика минералних зрна [42].



Слика 24. Утицај пречника пробног тела на вредности једноосне чврстоће на притисак [42]

Изглед пробних тела након испитивања са карактеристичним облицима лома монолитних и композитних пробних тела за различити процентуални удео алтерисаног дацита при испитивању једноосне чврстоће на притисак приказан је на слици 25. Збирни приказ свих карактеристичних облика лома на пробним телима дат је у прилогу 6. Приликом испитивања једноосне чврстоће на притисак код узорка свежег дацита долази до кртог лома и пукотине су вертикалне, а што се може видети на слици 25а. Код припремљених композита слика 25бцде, до лома долази у слабијем стенском материјалу (алтерисаном дациту), док се на испитиваним узорцима може приметити да се лом шири у дисковима свежег дацита што указује да није потребно користи никакво везивно средство између дискова. Након лома, пукотине се шире кроз целокупан композитни узорак [43], што се јасно види на слици 25б. Узорак алтерисаног дацита, слика 25ф, има ламинарну структуру и лом се дешава у правцу равни ламинације.

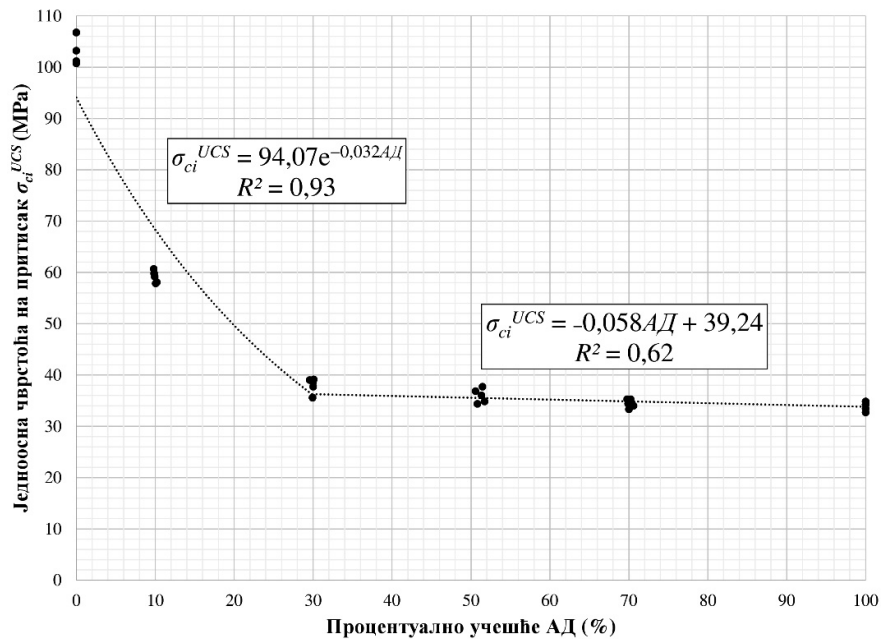


Слика 25. Изглед пробних тела након лома – једноосна чврстоћа на притисак: а) 0% АД, б) 10% АД, ц) 30% АД, д) 50% АД, е) 70% АД, ф) 100 % АД [12]

На основу резултата испитивања израђен је дијаграм зависности једноосне чврстоће на притисак  $\sigma_{cl}^{UCS}$  од процентуалног удела алтерисаног дацита (АД%), слика 26. Сходно предходно изведеним истраживањима [2], [7], резултати за интервал од 0 до



30% учешћа АД су апроксимирани експоненцијалном и линеарном функцијом за интервал од 30 до 100 % учешћа АД.



Слика 26. Упоредни приказ резултата  $\sigma_{ci}^{UCS}$  са различитим процентом АД

Зависност промене једноосне чврстоће на притисак ( $\sigma_{ci}^{UCS}$ ) и процентуалног учешћа алтерисаног дацита (АД%) која је приказана на дијаграму је подељена у две зоне:

- прва зона представља вредности процентуалног удела алтерисаног дацита од 0 до 30%, где вредност  $\sigma_{ci}^{UCS}$  експоненцијално опада са повећањем процентуалног удела алтерисаног дацита у испитиваном узорку и дефинисана је једначином:

$$\sigma_{ci}^{UCS} = 94,07 \cdot e^{-0,032 \cdot АД} \quad (23)$$

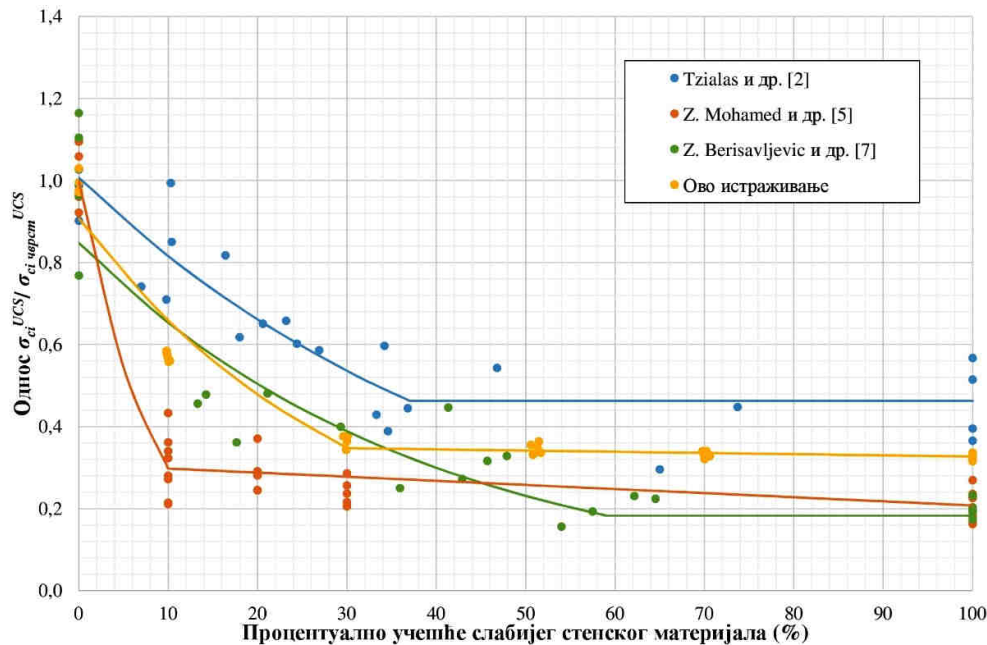
- друга зона представља вредности процентуалног удела алтерисаног дацита од 30 до 100%, где вредност  $\sigma_{ci}^{UCS}$  линеарно благо опада са повећањем процентуалног удела алтерисаног дацита у испитиваном узорку и дефинисана је једначином:

$$\sigma_{ci}^{UCS} = -0,058 \cdot АД + 39,24 \quad (24)$$

Иако је у првој зони коефицијент корелације  $R^2=0,93$ , што се класификује као одлична корелација [44], са дијаграма се јасно може уочити да линија не пролази кроз скуп тачака за 0 и 10% алтерисаног дацита, па за вредности од 0 до 10% има стрм пад, док за вредности од 10 до 30% пад криве је блажи. Стога је потребно нагласити да је потребно извршити доистраживања којима би се утврдиле вредности једноосне чврстоће на притисак  $\sigma_{ci}^{UCS}$  за удео између 0 и 10 %, као и између 10 и 30 % алтерисаног дацита (АД%).

Овим истраживањем су обухваћена лабораторијска испитивања чврстоће композитних пробних тела која су се састојала од свежег дацита и алтерисаног дацита, а што до сада није био предмет истраживања. У претходним истраживањима

се, у циљу упоређивања резултата испитивања композитних материјала, користио однос чврстоће на притисак сваког композитног пробног тела и чврстоће на притисак чвршћег материјала. Имајући у виду вредности једноосне чврстоће на притисак стенског материјала свежег дацита и алтерисаног дацита које су утврђене овим истраживањем и у овом раду је примењен исти приступ. На основу претходно приказаног поступка конструисан је дијаграм зависности односа једноосне чврстоће на притисак сваког испитаног пробног тела и средње вредности чврстоће на притисак чврстог стенског материјала  $\sigma_{ci}^{UCS} / \sigma_{ci\text{ чврст}}^{UCS}$  и процентуалног удела алтерисаног дацита (АД%). На дијаграму су приказани резултати испитивања композитних узорка свежег дацита и алтерисаног дацита, као и резултати досадашњих истраживања и испитивања композитних узорка [2], [5], [7], слика 27.



Слика 27. Упоредни приказ резултата испитивања композитних узорка

Tziallas и други [2] су у свом раду нагласили да опадање криве, са повећањем процентуалног садржаја слабијег материјала, директно зависи од односа једноосне чврстоће на притисак чврстог и слабог стенског материјала. Њихово истраживање показује да је  $\sigma_{ci\text{ слаб}} / \sigma_{ci\text{ чврст}} = 2.2$  и крива има умерен пад до око 38% удела слабијег стенског материјала, након чега су утврђене вредности које су приближне вредностима једноосне чврстоће на притисак слабијег стенског материјала. Код Z. Mohamed и др. [5] однос  $\sigma_{ci\text{ слаб}} / \sigma_{ci\text{ чврст}} = 4.4$  и крива има стрм пад до 10% удела слабијег стенског материјала при чему чврстоћа опада за око 70%, након чега линеарно опада до 100% вредности једноосне чврстоће на притисак слабијег стенског материјала. Код Берисављевића и др. [7] однос  $\sigma_{ci\text{ слаб}} / \sigma_{ci\text{ чврст}} = 5$ , па иако је тај однос већи него у претходна два случаја, крива има умеренији пад до око 59% удела слабијег стенског материјала након чега има вредност једноосне чврстоће на притисак слабијег стенског материјала. Код Рупар и др. [12] је утврђено да је однос  $\sigma_{ci\text{ слаб}} / \sigma_{ci\text{ чврст}} = 3.1$  и крива има умерено стрм пад до 30% удела слабијег стенског материјала, након чега благо линеарно опада до 100% вредности слабијег стенског материјала.

Упоредјујући вредности овог истраживања са осталима, слика 27, може се уочити да криве код Tziallas и др. [2] и Берисављевића и др. [7], у интервалу од 0 до 30 %, има

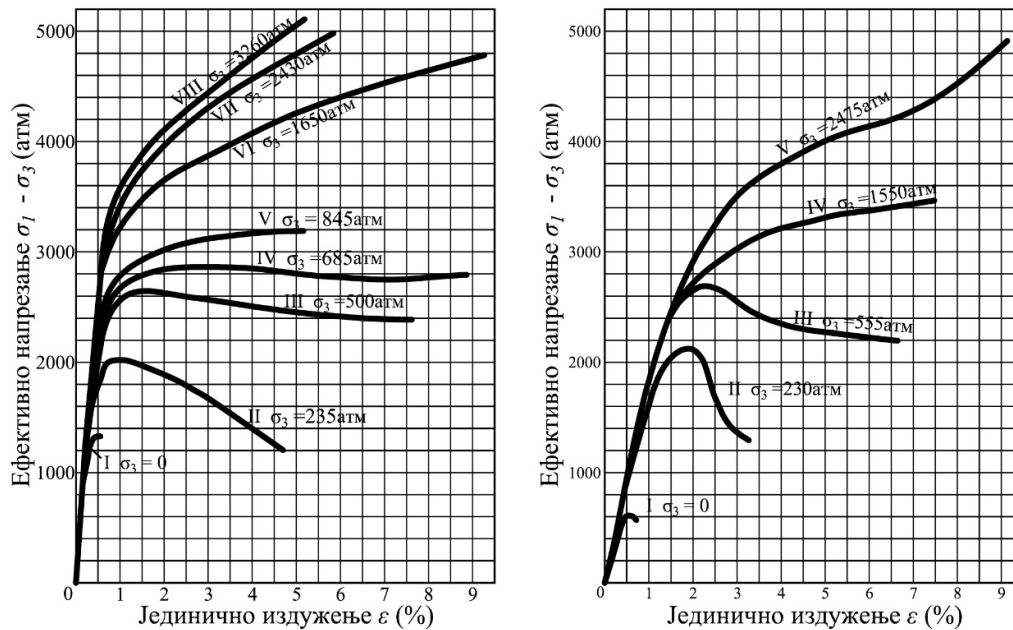


исти и у односу на ово истраживање незнатно блажи пад, при чему се вредности односа  $\sigma_{ci} / \sigma_{ci \text{ чврст}}$  постепено смањују. За разлику од претходних, код Z. Mohamed и др. [5] та крива има знатно стрмији пад тј. утврђена је велика разлика у чврстоћи при испитивању узорака са 0 и 10% вредности слабијег узорка стенског материјала. Експоненцијална крива, код Tziallas и др. [2] се завршава на вредности од 37% слабијег стенског материјала и односу  $\sigma_{ci} / \sigma_{ci \text{ чврст}} = 0.47$ , код Z. Mohamed и др. [5] на вредности 10 % и односу  $\sigma_{ci} / \sigma_{ci \text{ чврст}} = 0.30$ , док код Берисављевића и др. [7] се завршава на вредности од 59% слабијег стенског материјала и односу  $\sigma_{ci} / \sigma_{ci \text{ чврст}} = 0.18$ . Код истраживања Rupaг и др. [12] експоненцијална крива се завршава на вредности од 30% слабијег стенског материјала и односу  $\sigma_{ci} / \sigma_{ci \text{ чврст}} = 0.34$ . Након наведених вредности, код Tziallas и др. [2] и Берисављевића и др. [7] однос  $\sigma_{ci} / \sigma_{ci \text{ чврст}}$  је константан до 100% вредности слабијег стенског материјала, а код Z. Mohamed и др [5] вредности су мање и линеарно опадају као и у овом истраживању. Опадање вредности односа  $\sigma_{ci} / \sigma_{ci \text{ чврст}}$  код Rupaг и др. [12] је знатно мањи у односу на вредности које су утврдили Z. Mohamed и др. [5] и имајући у виду интервале вредности односа  $\sigma_{ci} / \sigma_{ci \text{ чврст}}$  за поједине процентуалне уделе слабијег стенског материјала може се закључити да и у овом интервалу се вредности односа  $\sigma_{ci} / \sigma_{ci \text{ чврст}}$  могу сматрати приближно константим.

#### **4.8.6 Троосна чврстоћа на притисак (триаксијални опит)**

##### **4.8.6.1 Историјски развој испитивања троосне чврстоће на притисак**

Троосна чврстоћа на притисак (триаксијални опит) код чврстих стенских материјала је први пут испитана још давне 1910. Године, када је Theodore von Karman пројектовао прву триаксијалну испитну ћелију за испитивање кртих стенских материјала. Он је своја истраживања заснивао на узорцима мермера из каменолома Carrara и пешчара из Mutenberg-а комбинујући различите константне бочне притиске који су се кретали и до 600 МПа, демонстрирајући промене од кртог до пластичног понашања стенског материјала. Разлог за одабир ових врста стена био је тај што је тражио релативно хомогене и изотропне стенске материјале. Дошао је до закључка да резултати испитивања на пешчарима у великој мери зависе од садржине воде, па је своја испитивања спровео на сувим узорцима. Након низа неуспешних испитивања, успео је да на 10 узорака мермера и 6 узорака пешчара добије корисне резултате (слика 28) [45]. Karman-ова ћелија за испитивање троосне чврстоће на притисак је била робусна и имала је доста недостатака, али принцип који је он поставио се и данас користи.



Слика 28. Различита троосна испитивања: (а) мермера и (б) пешчара [46]

Ноек и Franklin [47] су 1968. године конструисали триаксијалну ћелију која се показала као врло практично решење. Ћелија је тешка само 4,5 kg и користи самозаптивајућу гумену кошуљицу, са могућношћу остварења бочног притиска од око 70 MPa. Поступак испитивања троосне чврстоће на притисак је веома брз и не захтева прањњење хидрауличне течности нити демонтажу између испитивања, само је потребно одстранити ваздух из ћелије уколико се појави између два испитивања. Хидраулична течност преко кошуљице врши равномерни притисак дуж целог испитиваног узорка, а затим се помоћу хидрауличне пресе врши аксијално оптерећење, све до лома узорка. Оваква конструкција ћелије се и данас успешно користи за потребе испитивања троосне чврстоће на притисак. Приказани тип ћелије је коришћен у овом раду за испитивање триаксијалне чврстоће, слика 29.

#### 4.8.6.2 Поступак и начин испитивања троосне чврстоће на притисак

Испитивања троосне чврстоће на притисак или триаксијални опит [19], [48] су изведена у складу са важећим препорукама ISRM за ову врсту испитивања [49]. Испитивање троосне чврстоће на притисак вршено је за пет различитих вредности бочних притисака ( $\sigma_3$ ) и то 5, 10, 15, 20 и 30 MPa, а у складу са препорукама које дају Ноек и Brown [42] где се вредности за бочни притисак крећу  $0 < \sigma_3 < 0.5\sigma_{ci}$ . Приликом испитивања пробно тело се прво доводи у хидростатичко стање напрезања, односно са повећањем бочног притиска се упоредо повећава аксијално оптерећење узорка до постизања хидростатичког стања за задату вредност бочног притиска. Током испитивања аксијално оптерећење узорка за постизање хидростатичког стања је редом износило 11,5; 22,9; 34,4; 45,8; 68,7 kN. Након постизања хидростатичког стања се приступа даљем повећању аксијалног оптерећења све до лома уз одржавање константног бочног притиска. Сваки опит је трајао 5 - 15 минута са прираштајем оптерећења од 0,1 до 0,3 kN/s. Опрема за испитивање троосне чврстоће на притисак се састоји од стандардне Ноек-ове троосне ћелије пречника 54 mm (NX). Саставни део чине клипови са сферичним лежиштима за пренос оптерећења и гумена

флексибилна кошуљица, слика 29. Након постављања узорка у ћелију, као и постављања ћелије у хидрауличну пресу приступа се повезивању ручне пумпе са компензационом посудом, слика 30, и врши се испитивање стенског материјала у условима троосне компресије.



Слика 29. Основни делови опреме за испитивање троосне чврстоће на притисак



Слика 30. Опрема за испитивање троосне чврстоће на притисак: а) хидрауличка преса, б) Ноек-ова триаксијална ћелија и ц) пумпа за одржавање константног бочног притиска

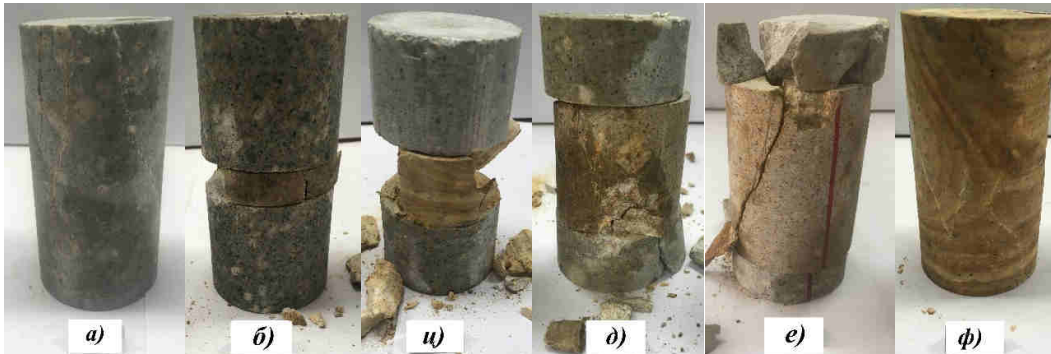
Лабораторијским одређивањем вредности вертикалног оптерећења (силе) које је довело узорак до лома уз познату површину узорка при задатој вредности бочног притиска, одређују се вредности хоризонталног  $\sigma_3$  и вертикалног  $\sigma_1$  напона. Анализа и прорачун параметара чврстоће стенског материјала су извршени у складу са опште прихваћеним Ноек-Вроун-овим и Mohr-Coulomb-овим критеријумом лома.

На основу претходно наведених услова одређене су вредности чврстоће на притисак при дефинисаним вредностима бочног оптерећења који свеукупно представљају резултат испитивања троосне чврстоће на притисак стенског материјала и приказане су у прилогу 7.

Изглед пробних тела након испитивања са карактеристичним обликом лома композитних пробних тела за различити процентуални удео алтерисаног дацита при троосном испитивању приказан је на слици 31. Збирни приказ свих карактеристичних облика лома пре и након испитивања дат је у Прилогу 7. На слици 31аф се може видети да приликом лома долази до формирања вертикалних и благо нагнутих пукотина. Код композитних пробних тела до лома долази у слабијем стенском материјалу, слика 31бцде. Код пробних тела са 10% и 30% удела алтерисаног дацита,



дискови свежег дацита остају нетакнути, док се код пробних тела са 50% и 70% алтерисаног дацита и на дисковима свежег дацита уочавају пукотине.



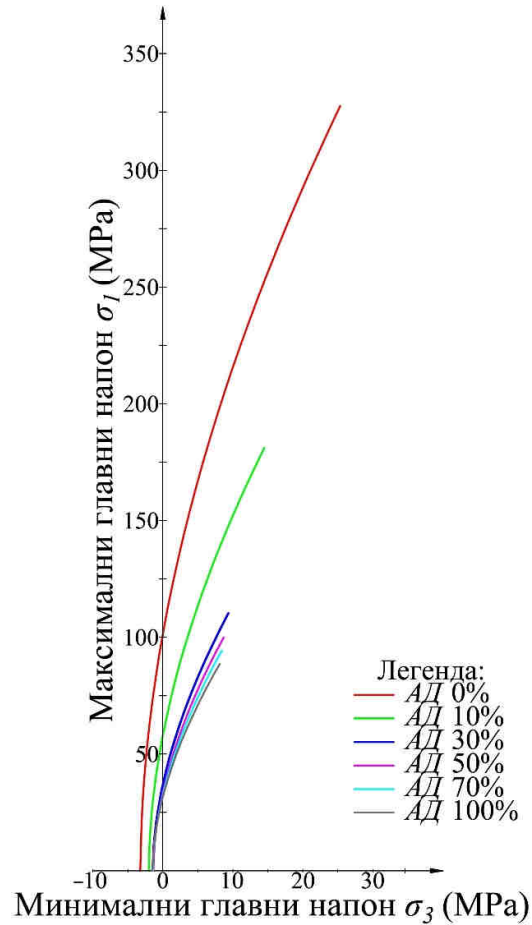
Слика 31. Изглед пробних тела након лома – троосна чврстоћа на притисак: а) 0% АД, б) 10% АД, ц) 30% АД, д) 50% АД, е) 70% АД, ф) 100 % АД [12]

Параметри непоремећеног стенског материјала за Ноек-Brown-ов критеријум лома [19][17] су одређени на основу резултата испитивања троосне чврстоће на притисак и средње вредности троосне чврстоће на притисак. Параметри Ноек-Brown-овог критеријума лома су одређени за вредности геолошког индекса чврстоће  $GSI=100$  и фактора оштећења  $D = 0$  [50] помоћу програмског пакета RocData, верзија: 5.013, фирме Rocscience Inc. из Торонта, табела 7. Потребно је нагласити да вредности чврстоће на истезање  $\sigma_t$  и горње границе бочног притиска  $\sigma_{3max}$  нису лабораторијски мерене, већ су одређене помоћу поменутог програмског пакета и представљају границе на апсциси за сваки материјал посебно. Вредност  $GSI = 100$  коришћена је за упоређивање резултата испитивања једноосне и троосне чврстоће на притисак изведених у овом раду и упоређивање резултата претходних истраживања хетерогених стенских материјала [1,4,6].

Табела 7. Параметри чврстоће Ноек-Brown-овог критеријума лома

Врста материјала	Једноосна чврстоћа на притисак непоремећеног стенског материјала $\sigma_{ci}^{TX}$ (МПа)	Материјална константа $m_i$	Чврстоћа на истезање $\sigma_t$ (МПа)	Горња граница бочног притиска $\sigma_{3max}$ (МПа)
АД 0	101,350	31,581	3,21	25,34
АД 10	58,000	29,014	2,00	14,50
АД 30	37,329	25,267	1,47	9,33
АД 50	34,397	24,166	1,42	8,60
АД 70	33,408	22,467	1,48	8,35
АД 100	32,306	20,871	1,54	8,08

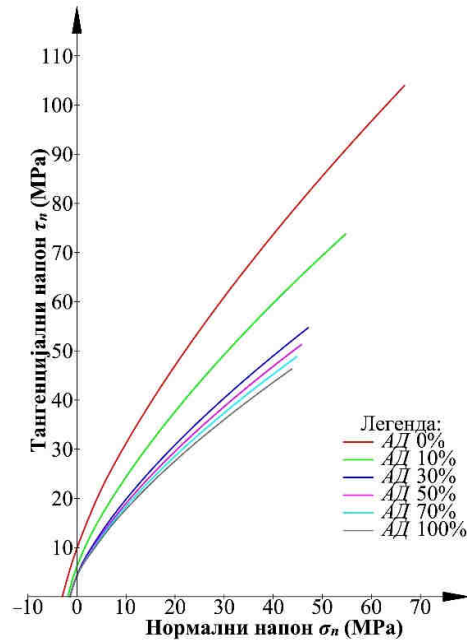
Анализом резултата лабораторијских испитивања (прилог 7) одређен је упоредни приказ зависности максималног и минималног напона, (слика 32), где је дат упоредни приказ свих дијаграма максималног и минималног напона за различите процентуалне уделе алтерисаног дацита. Јасно се може уочити да се на дијаграму издвајају две обвојнице и то за 0 и 10% вредности удела алтерисаног дацита, док су обвојнице за 30, 50, 70 и 100% вредности удела алтерисаног дацита врло блиске.



Слика 32. Упоредни приказ зависности максималног и минималног напона

Такође, анализом су обухваћени и дијаграми зависности нормалног и тангенцијалног напона који су конструисани на основу Mohr-ових кругова напона, прилог 7 за различите процентуалне уделе алтерисаног дацита. Овом анализом су одређене обвојнице за све анализирание процентуалне уделе алтерисаног дацита (АД), а који су сматрани као посебни стенски материјали, слика 33.





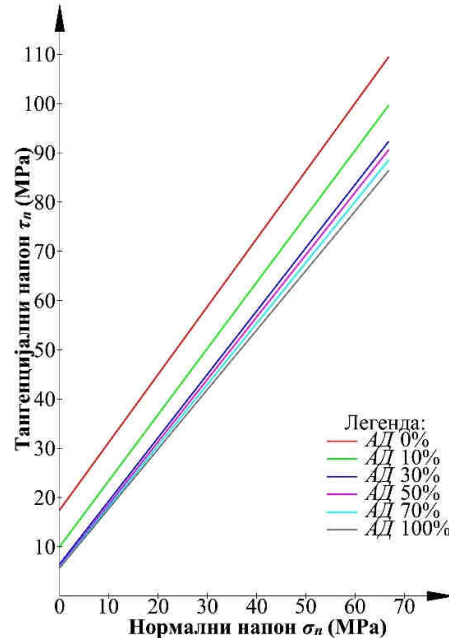
Слика 33. Упоредни приказ дијаграма нормалних и тангенцијалних напона

Увидом у упоредни приказ дијаграма нормалних и тангенцијалних напона за различите процентуалне уделе алтерисаног дацита (слика 33) јасно се може видети да се и у овом случају, као и на упоредном приказу дијаграма максималних и минималних напона (слика 32), издвајају обвојнице за 0 и 10% удела алтерисаног дацита, док су обвојнице за 30, 50, 70 и 100% удела алтерисаног дацита у испитиваном узорку врло блиске.

На основу измерених лабораторијских података, уз коришћење вредности геолошког индекса чврстоће  $GSI=100$ , израчунати су параметри чврстоће на смицање Mohr-Coulomb-овог критеријума лома који су приказани у табели 8, док је упоредни графички приказ представљен на дијаграму, слика 34. Свакако је потребно нагласити да је вредност  $GSI=100$  разматрана да би се упоредили стенски материјали различитих процентуалних садржаја алтерисаног дацита у испитиваном узорку, а да је исте неопходно превести на масив у зависности од висине косине и запреминске тежине стенског материјала, као и стања датог материјала у стенском масиву.

Табела 8. Параметри чврстоће на смицање Mohr-Coulomb-овог критеријума лома

Врста материјала	Угао унутрашњег трења $\phi$ ( $^{\circ}$ )	Кохезија $c$ (MPa)
АД 0	53,99	17,51
АД 10	53,28	10,05
АД 30	52,08	6,52
АД 50	51,68	6,03
АД 70	51,03	5,89
АД 100	50,35	5,74



Слика 34. Упоредни приказ нормалних и тангенцијалних напона за различите уделе АД

Увидом у упоредни приказ параметара чврстоће на смицање Mohr-Coulomb-овог критеријума лома (слика 34) јасно се уочава да се и у овом случају издвајају две праве и то за 0 и 10% удела алтерисаног дацита, док су линије за 30, 50, 70 и 100% удела алтерисаног дацита врло блиске.

Да би се применили параметри на смицање стенског материјала одређени у лабораторији на сам стенски масив, неопходно је дефинисати вредности запреминске тежине  $\gamma$ , висине завршне косине  $H$ . На тај начин се одређује максимални напон на притисак као  $\gamma \cdot H$ . Свакако, битно је напоменути да је потребно користити и податке за класификациона испитивањима и фактор оштећења стенских материјала.

Вредности троосне чврстоће на притисак  $\sigma_{ci}^{TX}$  и материјалне константе  $m_i$  непоремећеног стенског материјала су одређене на основу резултата испитивања троосне чврстоће на притисак за различите вредности бочног оптерећења ( $\sigma_3 = 5, 10, 15, 20$  и  $30$  МПа) и средње вредности једноосне чврстоће на притисак ( $\sigma_3 = 0$ ). Анализом резултата лабораторијских испитивања израђен је дијаграм зависности чврстоће на притисак непоремећеног стенског материјала  $\sigma_{ci}^{TX}$  од процентуалног удела алтерисаног дацита (АД%), слика 35. Резултати анализе који су приказани на дијаграму (слика 35) апроксимирани су експоненцијалном и линеарном функцијом, а зависност промене  $\sigma_{ci}^{TX}$  – АД% је подељена у две зоне:

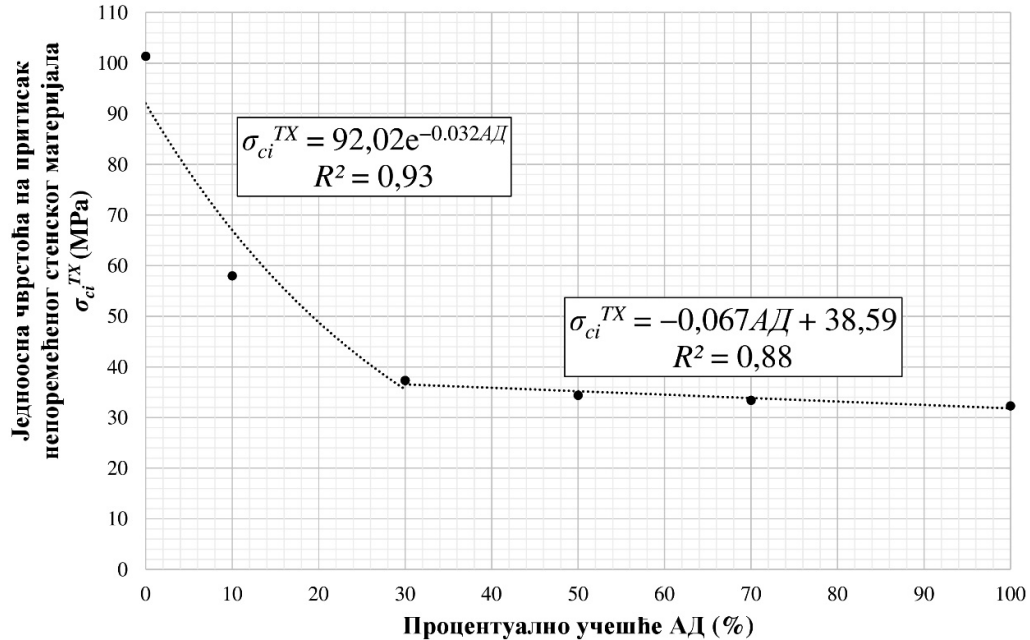
- прва зона представља вредности процентуалног удела алтерисаног дацита од 0 до 30% где вредност  $\sigma_{ci}^{TX}$  експоненцијално опада са повећањем процентуалног удела алтерисаног дацита у испитиваном узорку и дефинисана је једначином:

$$\sigma_{ci}^{TX} = 92,02 \cdot e^{0,032 \cdot АД} \quad (25)$$

- друга зона представља вредности процентуалног удела алтерисаног дацита од 30 до 100% где се вредности за  $\sigma_{ci}^{TX}$  крећу у распону од 32 до 37 МПа, а где

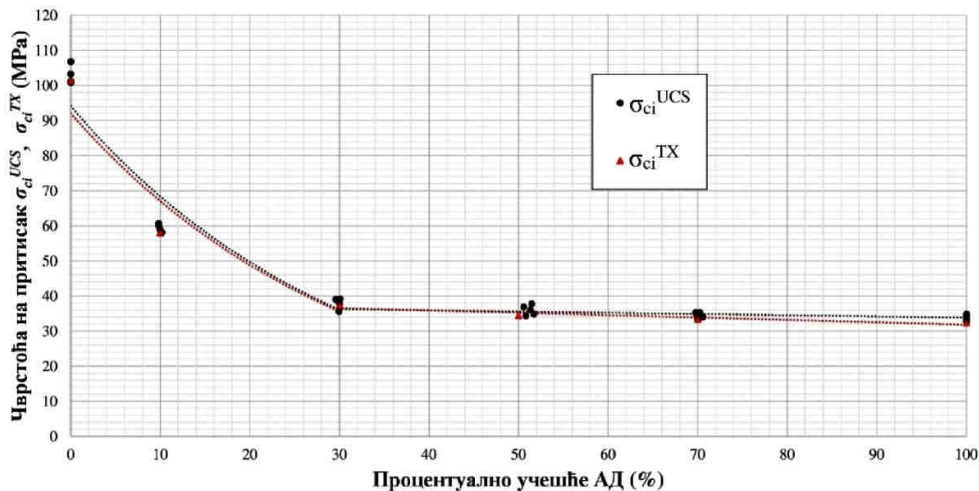
вредност  $\sigma_{ci}^{TX}$  линеарно опада са повећањем процентуалног удела алтерисаног дацита у испитиваном узорку и дефинисана је једначином:

$$\sigma_{ci}^{TX} = -0,067 \cdot АД + 38,59 \quad (26)$$



Слика 35. Вредности  $\sigma_{ci}^{TX}$  стенског материјала са различитим уделом АД

На основу резултата вредности једноосне чврстоће на притисак  $\sigma_{ci}^{UCS}$  и троосне чврстоће на притисак непоремећеног  $\sigma_{ci}^{TX}$  стенског материјала извршен је упоредни приказ који је графички приказан на слици 36.

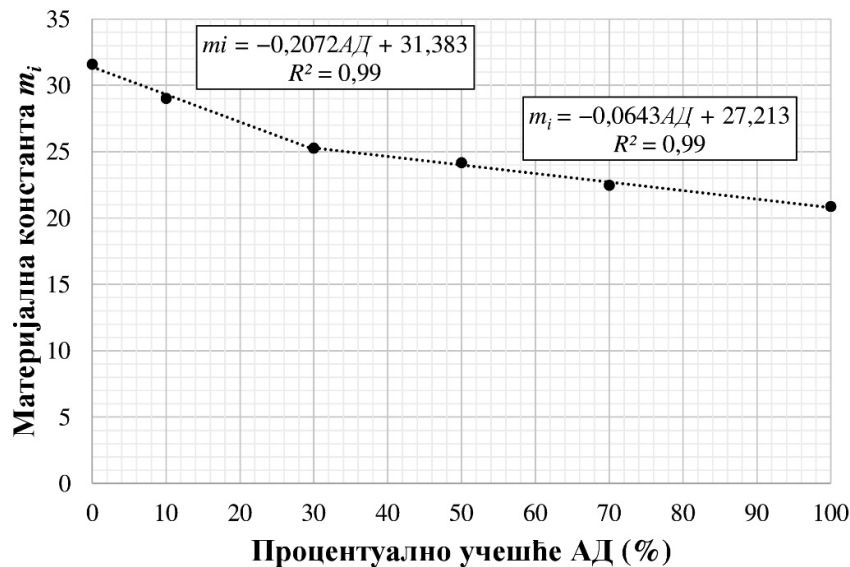


Слика 36. Упоредни приказ вредности  $\sigma_{ci}^{UCS}$  и  $\sigma_{ci}^{TX}$  са различитим уделом АД

Према резултатима испитивања једноосне чврстоће на притисак -  $\sigma_{ci}^{UCS}$  и троосне чврстоће на притисак непоремећеног стенског материјала -  $\sigma_{ci}^{TX}$  у зависности од процентуалног учешћа алтерисаног дацита (АД%) у испитиваном узорку такође се може поделити у две зоне. Прва зона укључује резултате испитивања узорка дацита (0% АД) и композитних узорка са 10% и 30% процентуалног учешћа алтерисаног

дацита. У овој зони, једноосна чврстоћа на притисак -  $\sigma_{ci}^{UCS}$  и једноосна чврстоћа на притисак непоремећеног стенског материјала -  $\sigma_{ci}^{TX}$  опадају експоненцијално са почетне вредности (100%) на око 37%. У другој зони, композитни узорци са 30% и више запреминског учешћа алтерисаног дацита показују благо смањење једноосне чврстоће на притисак -  $\sigma_{ci}^{UCS}$  и троосне чврстоће на притисак непоремећеног стенског материјала -  $\sigma_{ci}^{TX}$  и приближно су једнаки вредностима алтерисаног дацита  $\sigma_{ci}^{UCS}$  и  $\sigma_{ci}^{TX}$  (слика 36).

Анализом и интерпретацијом резултата лабораторијских испитивања израђен је дијаграм зависности вредности материјалне константе  $m_i$  од процентуалног удела алтерисаног дацита (АД%), слика 37.



Слика 37. Вредности материјалне константе  $m_i$  за различите процентуалне уделе АД

Увидом у утврђене вредности материјалне константе  $m_i$  (слика 37) јасно су издвојене две зоне. У обе ове зоне вредност материјалне константе линеарно опада са повећањем процентуалног удела алтерисаног дацита у испитиваном узорку и то:

- прва зона представља процентуални удео алтерисаног дацита од 0 до 30% где вредност  $m_i$  линеарно опада са повећањем процентуалног удела алтерисаног дацита у испитиваном узорку према једначини:

$$m_i = -0,2072 \cdot АД + 31,383 \quad (27)$$

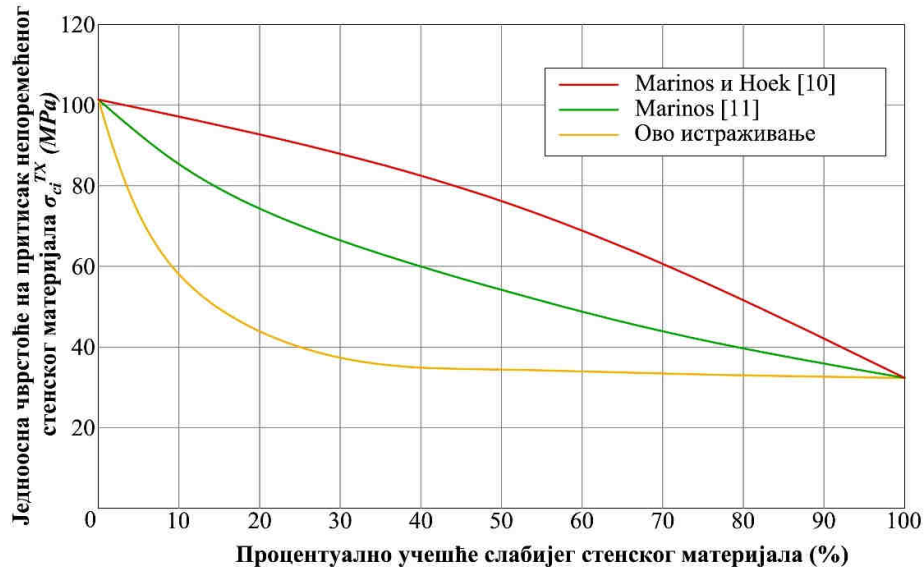
- друга зона представља процентуални удео алтерисаног дацита од 30 до 100% у којој вредности за  $m_i$ , такође, линеарно опадају са повећањем процентуалног удела алтерисаног дацита у испитиваном узорку према једначини:

$$m_i = -0,0643 \cdot АД + 27,213 \quad (28)$$

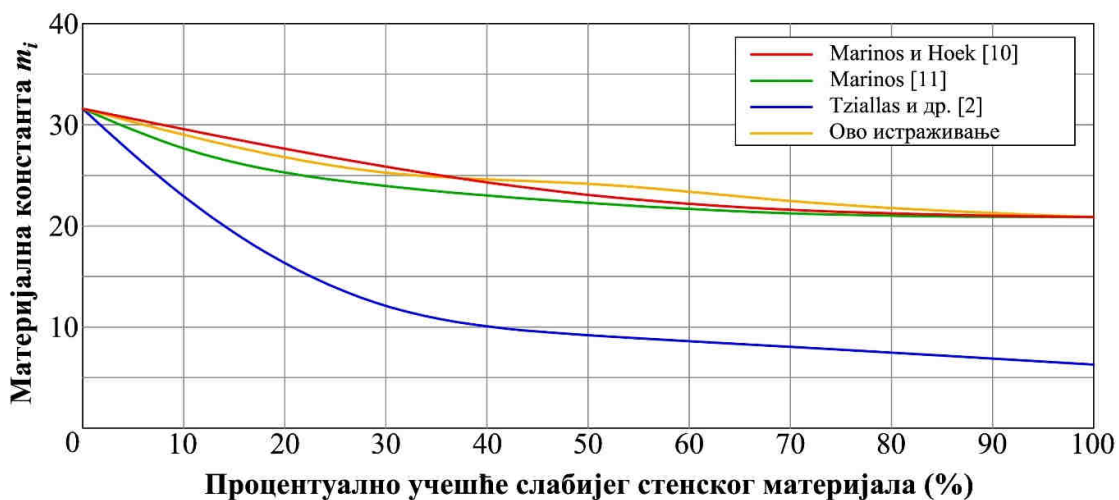
Апроксимацијом вредности материјалне константе  $m_i$  за обе зоне линеарном функцијом утврђен је коефицијент корелације који износи  $R^2=0.99$ . На основу приказаних зависности промене троосне чврстоће на притисак  $\sigma_{ci}^{TX}$  и материјалне константе  $m_i$  непоремећеног стенског материјала од процентуалног удела

алтерисаног дацита могуће је проценити параметре чврстоће за сваки процентуални удео алтерисаног дацита у испитиваном узорку, што је приказано у табели 11.

Marinos и Hoek [10] су предложили емпиријску методу за одређивање параметара хетерогеног стенског масива. Сходно овим препорукама редуковани параметри хетерогеног стенског масива  $\sigma_{ci}^{TX}$  и  $m_i$  се одређују као пондерисане вредности  $\sigma_{ci}^{TX}$  и  $m_i$  непоремећеног чвршћег и слабијег стенског материјала у зависности од њиховог процентуалног удела у стенском масиву. У оквиру ове методе је предложено да се приликом процене параметара стенског масива користе вредности чвршћег стенског материјала које су умањене за 20 до 60% у зависности од његовог процентуалног удела и стања хетерогеног стенског масива. На основу ових препорука одређене су вредности чврстоће на притисак  $\sigma_{ci}^{TX}$  непоремећеног стенског материјала и материјалне константе  $m_i$  за 0, 50 и 100 % удела слабијег стенског материјала - алтерисаног дацита. Зависност промене вредности  $\sigma_{ci}^{TX}$  и  $m_i$  од процентуалног удела алтерисаног дацита је дата на сликама 38 и 39.



Слика 38. Упоредни приказ вредности  $\sigma_{ci}^{TX}$



Слика 39. Упоредни приказ вредности материјалне константе  $m_i$



Marinos [11] је допунио и модификовао изворну емпиријску методу за одређивање параметара хетерогеног стенског масива. И код ове методе редуковани параметри хетерогеног стенског масива  $\sigma_{ci}^{TX}$  и  $m_i$  се одређују као пондерисане вредности  $\sigma_{ci}$  и  $m_i$  непоремећеног чвршћег и слабијег стенског материјала у зависности од њиховог процентуалног удела у стенском масиву, при чему се приликом процене параметара стенског масива користе вредности чвршћег стенског материјала које су редуковане за 10 до 40% у зависности од његовог процентуалног удела и стања хетерогеног стенског масива. Вредности троосне чврстоће на притисак  $\sigma_{ci}^{TX}$  непоремећеног стенског материјала и материјалне константе  $m_i$  за 0, 10, 30, 50, 70 и 100 % удела слабијег стенског материјала - алтерисаног дацита које су одређене на основу наведених препорука су приказане на сликама 38 и 39.

Tziallas и други [2] су у оквиру својих истраживања извршили и лабораторијска испитивања троосне чврстоће на притисак једне групе композитних пробних тела код којих је процентуални удео слабије компоненте износио око 16%. На основу изведених испитивања су одређене вредности троосне чврстоће  $\sigma_{ci}^{TX}$  непоремећеног стенског материјала и материјалне константе  $m_i$  по Ноек-Brown-овом критеријуму лома. Такође, аутори су предложили и једначину којом се могу проценити вредности материјалне константе  $m_i$  у зависности од процентуалног удела слабије компоненте која је описана једначином 29. Сходно поменутом поступку у случају овог истраживања промена вредности материјалне константе  $m_i$  у зависности од процентуалног удела слабије компоненте која је описана једначином 30. Вредности материјалне константе  $m_i$  за 0, 10, 30, 50, 70 и 100 % удела слабијег стенског материјала - алтерисаног дацита које су одређене на основу претходно поменуте једначине су приказане на слици 39.

$$m_i = 17 \cdot e^{0,022 \cdot SL} \quad (29)$$

$$m_i = 31,581 \cdot e^{0,032 \cdot AD} \quad (30)$$

Увидом у упоредни приказ резултата овог истраживања и препорука које су дате у приказаној литератури [2], [10], [11] може се уочити да вредности троосне чврстоће на притисак  $\sigma_{ci}^{TX}$  непоремећеног стенског материјала које су одређене овим истраживањима су значајно мање у односу на вредности које су одређене у складу са препорукама Marinos и Ноек-а [10] и Marinos [11], слика 38. Претходно указује да примена ових препорука за процену вредности  $\sigma_{ci}$  има одређена ограничења и да се на овај начин добијају прецењене вредности троосне чврстоће на притисак  $\sigma_{ci}^{TX}$  непоремећеног стенског материјала. Вредности материјалне константе  $m_i$  одређене овим истраживањима у значајној мери кореспондирају са вредностима које су одређене према препорукама које су дате од стране Marinos и Ноек-а [10] и Marinos [11], слика 39. Примена ових препорука за процену вредности материјалне константе  $m_i$  је оправдана, па се на овај начин добијају реалне процене вредности материјалне константе  $m_i$  хетерогеног стенског материјала. Применом поступка који су предложили Tziallas и други [2] одређене су вредности материјалне константе  $m_i$  које су значајно мање од вредности које су одређене овим истраживањима.

Marinos и др. [10] у свом раду наводе препоручене интервале вредности материјалне константе  $m_i$  за поједине стенске материјале и за дацит је препоручена вредност  $m_i = 25 \pm 3$ , табела 2. Овим истраживањем су утврђене вредности материјалне константе у распону  $m_i = 20,871 - 31,581$  и у овом случају би интервал свих вредности  $m_i$  било могуће уопштено приказати као  $m_i = 26 \pm 6$ . Имајући у виду да су овим





истраживањем анализирane вредности материјалне константе  $m_i$ , како за свеж дацит и алтерисани дацит, тако и за прелазну зону између ова два стенска материјала. На основу дијаграма промене материјалне константе  $m_i$  у зависности од процентуалног удела алтерисаног дацита (АД%), слика 37, издвојена су два интервала вредности материјалне константе  $m_i$ . Први интервал обухвата вредности за процентуални удео алтерисаног дацита (АД%) од 0 до 30 %, при чему вредност материјалне константе  $m_i$  се креће у распону  $m_i = 20,871 - 25,267$  и други за процентуални удео алтерисаног дацита (АД%) од 30 до 100 %, при чему вредност материјалне константе  $m_i$  се креће у распону  $m_i = 25,267 - 31,581$ . Сходно претходном, могуће је дефинисати препоручене вредности материјалне константе  $m_i$  за свеж дацит  $m_i = 28 \pm 3$  и за алтерисани дацит  $m_i = 23 \pm 3$ . Приликом дефинисања вредности материјалне константе је од суштинске важности извршити добру процену степена алтерације самог стенског материјала.





## 5 Рачунски параметри стенског масива

Према резултатима испитивања физичко-механичких својстава стенског материјала, геолошким условима његовог формирања и настанка, анализа је извршена за расположиве податаке. У разматрање су узети следећи физичко-механички параметри стенског материјала:

- запреминска тежина  $\gamma$ ,
- чврстоћа на притисак непоремећеног стенског материјала  $\sigma_{ci}$ ,
- материјална константа  $m_i$ .

Вредности параметара чврстоће на смицање су утврђене на основу испитивања троосне чврстоће на притисак (на монолитним и композитним пробним телима), након чега је исте неопходно превести на стенски масив. Анализом стања стенског материјала који изграђује косину (стенског масива), потребно је применити одговарајућу класификацију за утврђивања физичко-механичких својстава стенског масива сходно расположивим подацима.

### 5.1 Статистичка обрада података лабораторијских испитивања

Статистичка обрада података лабораторијских испитивања физичко-механичких својстава стенског материјала врши се због дефинисања рачунских вредности које су неопходне за анализу и пројектовање косина, тунела, подземних објеката и др.

У оквиру овог рада, за већину испитиваних физичко-механичких својстава материјала (специфична тежина, запреминска тежина, садржина воде, једноосна чврстоћа на притисак) ће се извршити статистичка обрада података.

Свако мерење се понавља одређен број пута, сходно стандарду или препоруци и представља скуп података. Да би се оценио квалитет тог скупа података, користиће се основни појмови статистике и то

- средња вредност или аритметичка средина  $\bar{x}$ ,
- стандардна девијација или средње квадратно одступање  $\sigma$ ,
- коефицијент варијације  $v$ .

Средња вредност представља центар груписања података који су утврђени одређеним мерењима и анализама прорачуна и одређује се помоћу једначине:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} \quad (31)$$

где су:

- $n$  – број одређивања вредности карактеристика
- $x_i$  – појединачне вредности карактеристика

Стандардна девијација представља којом се брзином концентришу подаци око аритметичке средине, што заправо значи да што је стандардна девијација мања брзина концентracије је већа односно растурање података око средње вредности је мање и то показује да су мерења поузданија и обратно и одређује се помоћу једначине:



$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2} = \sqrt{\frac{(\bar{x} - x_1)^2 + (\bar{x} - x_2)^2 + (\bar{x} - x_3)^2 + \dots + (\bar{x} - x_n)^2}{n-1}} \quad (32)$$

Коефицијент варијације нам говори колики је проценат растурања података око средње вредности, што је коефицијент варијације већи то показује да је растурање података око средње вредности веће и обратно и одређује се помоћу формуле:

$$v = \frac{\sigma}{\bar{x}} \cdot 100\% \quad (33)$$

У табели 9 су дате дозвољене вредности коефицијента варијације за све величине које су испитиване у оквиру овог рада.

Табела 9. Средње вредности коефицијента варијације [57]

<b>Карактеристика стенског материјала</b>	<b>Коефицијент варијације</b>
Специфична тежина	0,01 (1%)
Запреминска тежина	0,05 (5%)
Природна влажност	0,15 (15%)
Чврстоћа на смицање, притисак	0,20-0,30 (20-30%)

## 5.2 GSI (Geological strength index) класификација

Анализом стања стенског масива који израђује косине примењена је опште прихваћена GSI (Geological strength index) класификација. У овом случају за стенски масив лежишта дацита на површинском копа "Терамиде" усвојене су вредности GSI фактора у интервалу од 15 до 55 и исте су приказане на слици 40.

ГЕОЛОШКИ ИНДЕКС ЧВРСТОЋЕ ЗА ИСПУЦАЛЕ БЛОКОВИТЕ СТЕНСКЕ МАТЕРИЈАЛЕ		СТАЊЕ ПОВРШИНА				
<p>На основу описа стања структуре и стања површина стенског материјала, изаберите категорију из овог дијаграма. Процените просечну вредност GSI на основу граничних вредности. Не покушавајте да budete превише прецизни. Реалније је утврдити интервал вредности од 36 до 42 него тврдити да је GSI=38. Треба имати на уму да Hoek-Brown-ов критеријум треба примењивати у случајевима када се за величину елементарног блока или комада стенског материјала може рећи да је мала у односу на величину ископа који се разматра. Уколико је елементарни блок већи од једне четвртине величине ископа онда је лом структурно контролисан и у том случају не треба примењивати Hoek-Brown-ов критеријум</p>		ВРЛО ДОБРО Врло храпаве, свеже, нераспаднуте површине	ДОБРО Храпаве, делимично распаднуте површине са мрљама од рђе	ЗАДОВОЉАВАЈУЋЕ Глатке, умерено распаднуте или алтерисане површине	ЛОШЕ Глатке, изразито распаднуте површине прекривене збијеним материјалом или са испуном од шиљатих комада	ВРЛО ЛОШЕ Глатке, изразито распаднуте површине прекривене или са испуном од меке глине
СТРУКТУРА		УМАЊЕЊЕ КВАЛИТЕТА ПОВРШИНА →				
<p>НЕПОРЕМЕЂЕНА ИЛИ МАСИВНА непоремеђени или масивни узорци стенског материјала "in situ" имају неколико дисконтинуитета на великом растојању</p>	90		N/A	N/A	N/A	
<p>БЛОКОВИТА Врло добро укљештен непоремеђен стенски масив који се састоји од коцкастих блокова дефинисаних са три ортогонална система дисконтинуитета</p>	80					
<p>ВРЛО БЛОКОВИТА Укљештен, делимично поремеђен стенски масив са вишестраним блоковима дефинисаних са четири или више система дисконтинуитета</p>	70					
<p>БЛОКОВИТА/ПОРЕМЕЂЕНА Наборан и испуцао стенски масив са више дисконтинуитета који се пресецају формирајући шиљате блокове</p>	60					
<p>ЗДРОБЉЕНА Слабо укљештен, изразито испуцао стенски масив са измешаним шиљатим и заобљеним блоковима</p>	50					
<p>УСЛОЈЕНА/ЛАМИНИРАНА Наборана и текстонски смакнута. Изостанак блокова услед шкриљавости која доминира над дисконтинуитетима</p>	40					
	30					
	20					
	10	N/A	N/A			

Слика 40. Вредности GSI фактора

### 5.3 Процена вредности фактора оштећења стенског масива

При пројектовању косина на великим површинским коповима показало се да Hoek-Brown-ов критеријум лома за стенски масив који није оштећен, неком од примењених метода за експлоатацију ( $D = 0$ ), даје прецењене вредности својствима стенског масива [58]. Ефекти оштећења услед минирања, као и релаксације напона услед формирања косина или израде подземних просторија доводи до прерасподеле напона у стенском масиву. Стога је, у зависности од стања стенског масива, а према препорукама које дају Hoek и Brown [27] потребно усвојити вредност фактора  $D$  према табели 10.





## 5.4 Усвојене вредности рачунских параметара

Претходно приказани резултати лабораторијских испитивања параметара чврстоће стенског материјала садрже улазне податке за коришћење оба критеријума лома (Mohr-Coulomb-овог и Хоек-Brown-овог). Међутим, Mohr-Coulomb-ов критеријум лома треба примењивати за полуvezане и неvezане стенске материјале, док је Хоек-Brown-ов критеријум лома предодређен за vezане стенске материјале помоћу кога ће се и дефинисати рачунски параметри потребни за даљу анализу.

Рачунски параметри који су неопходни за примену Хоек-Brown-овог критеријума лома су следећи:

- троосна чврстоћа на притисак  $\sigma_{ci}^{TX}$ ,
- коефицијент стенског масива  $m_i$  и
- GSI фактор,
- фактор оштећења стенског масива  $D$ .

Параметри троосне чврстоће на притисак непоремећеног стенског масива  $\sigma_{ci}^{TX}$  и вредност материјалне константе  $m_i$  су одређени на основу лабораторијских испитивања, за сваки материјал посебно, применом уопштеног Хоек-Brown-овог критеријума лома, прилог 7. Обзиром да су триаксијална испитивања извршена за 0, 10, 30, 50, 70, 100 % АД у испитиваном узорку, за вредности 20% АД је утврђена вредност троосне чврстоће на притисак непоремећеног стенског материјала  $\sigma_{ci}^{TX}$  према једначини 25, а вредност материјалне константе  $m_i$  према једначини 27. За вредности 40, 60, 80, 90 % АД је утврђена вредност троосне чврстоће на притисак непоремећеног стенског материјала  $\sigma_{ci}^{TX}$  према једначини 26, а вредност материјалне константе  $m_i$  према једначини 28.

Рачунски параметри запреминске тежине ( $\gamma$ ) су усвојене на основу резултата извршених лабораторијских испитивања, док су вредности запреминске тежине композитних узорака утврђене као пондерисане вредности процентуалног учешћа појединих компоненти (дацита и алтерисаног дацита). Вредности за GSI фактор и фактор оштећења стенског масива  $D$  су усвојене сходно стању стенског масива. Усвојене вредности рачунских параметара за све коришћене стенске материјале су приказани у табели 11.

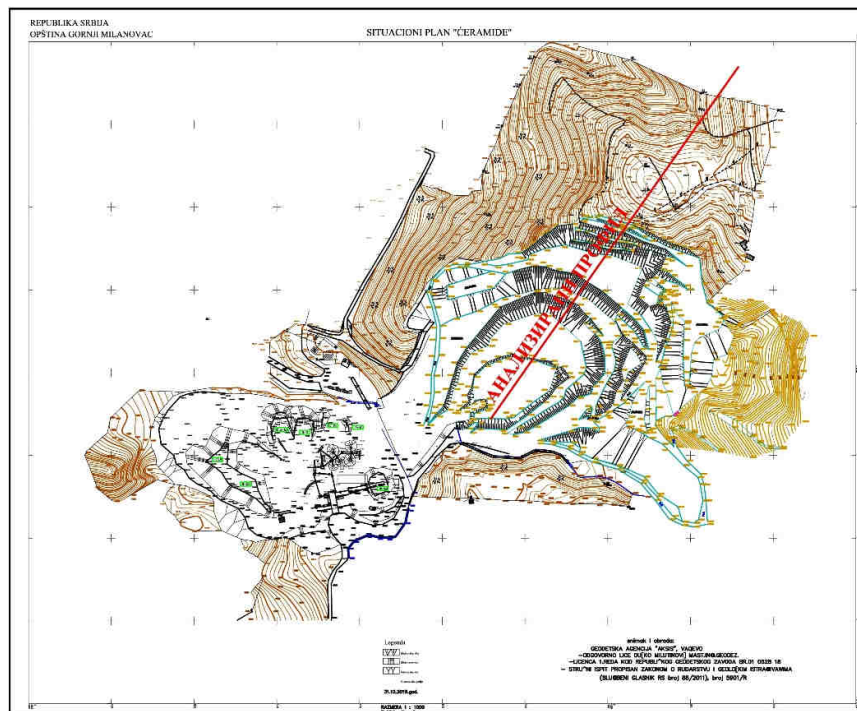
Табела 11. Рачунски параметри стенског материјала за Хоек-Brown-ов критеријум лома

Узорак	Запреминска тежина $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Чврстоћа на притисак непоремећеног материјала $\sigma_{ci}^{TX}$ (MPa)	Геолошки индекс чврстоће GSI	Материјална константа $m_i$	Фактор оштећења стенског масива $D$
Дацит (АД 0%)	24,47	101,35	45-55 (50)	31,581	1
Композит 1 (АД 10%)	24,46	58,00	30-40 (35)	29,014	1
Композит 2 (АД 20%)	24,45	48,52	25-35 (30)	27,141	1
Композит 3 (АД 30%)	24,44	37,33	15-25 (20)	25,267	1
Композит 4 (АД 40%)	24,43	35,86	15-25 (20)	24,717	1
Композит 5 (АД 50%)	24,42	34,40	15-25 (20)	24,166	1
Композит 6 (АД 60%)	24,41	33,90	15-25 (20)	23,317	1
Композит 7 (АД 70%)	24,40	33,41	15-25 (20)	22,467	1
Композит 8 (АД 80%)	24,39	33,04	15-25 (20)	21,935	1
Композит 9 (АД 90%)	24,38	32,67	15-25 (20)	21,403	1
Алт. дацит (АД 100%)	24,37	32,31	15-25 (20)	20,871	1



## 6 Анализа утицаја физичко-механичких својстава стенског материјала на стабилност косине

Утицај физичко – механичких својстава материјала дацита (Д) и алтерисаног дацита (АД) на стабилност косина разматран је на основу геолошке грађе и геоморфологије анализираниог подручја. На заступљеност и положај граница појединих литолошких чланова у косини утичу положај и геометрија површинског копа. Заступљеност алтерисаног дацита (АД) у укупној висини косине са напредовањем рударских радова ће се повећавати, односно дубина прелаза између алтерисаног дацита (АД) и дацита (Д) ће се повећавати. У циљу сагледавања утицаја промене геолошке грађе на стабилност завршне косине површинског копа потребно је анализирати стање косине за различите позиције (дубине) прелаза између алтерисаног дацита (АД) и дацита (Д) од горње равни косине. Промена положаја прелаза поменуита два литолошка члана и његов утицај на стабилност косине су анализирани на карактеристичном профилу у правцу напредовања површинског копа "Ћерамиде" чији је положај приказан је на слици 41.

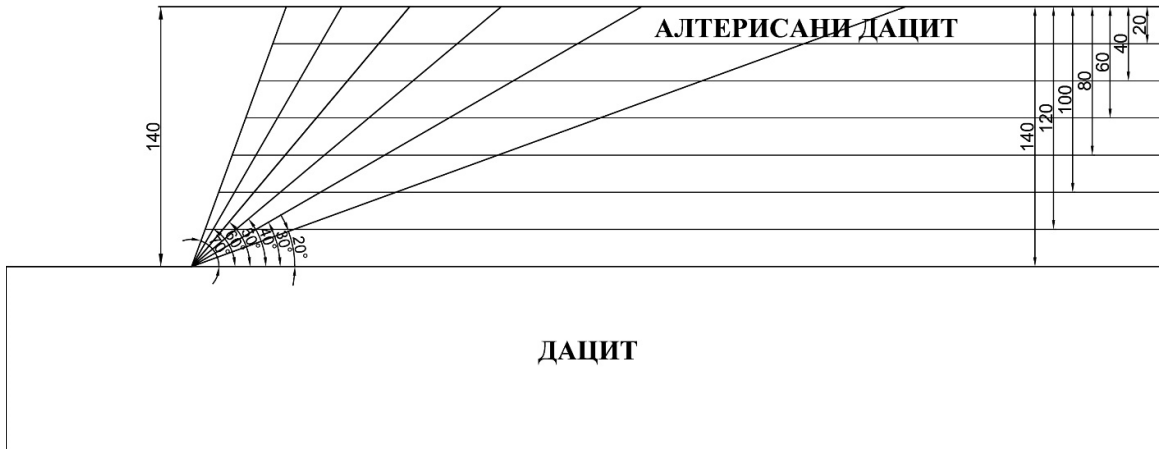


Слика 41. Положај анализираниог профила на површинском копу "Ћерамиде"

Анализа стабилности косина извршена је на карактеристичном профилу за неколико различитих случајева положаја границе литолошких чланова. Геомеханички модел који анализиран је изграђен од компактног дацита и алтерисаног дацита, а разматрани су прелази између алтерисаног дацита и компактног дацита на растојању од 0, 20, 40, 60, 80, 100, 120 и 140 m од горње равни косине, а што је приказано на слици 42. Ова растојања су разматрана на основу геолошке грађе лежишта, геоморфологије и будућег положаја фронта откопавања. Са напредовањем рударских радова ка североистоку удео алтерисаног дацита у целокупној висини косине ће се повећавати. Геометријски елементи модела косине су одређени на основу очекиване максималне висине завршне косине површинског копа "Ћерамиде", која износи  $H = 133\text{m}$ , и за

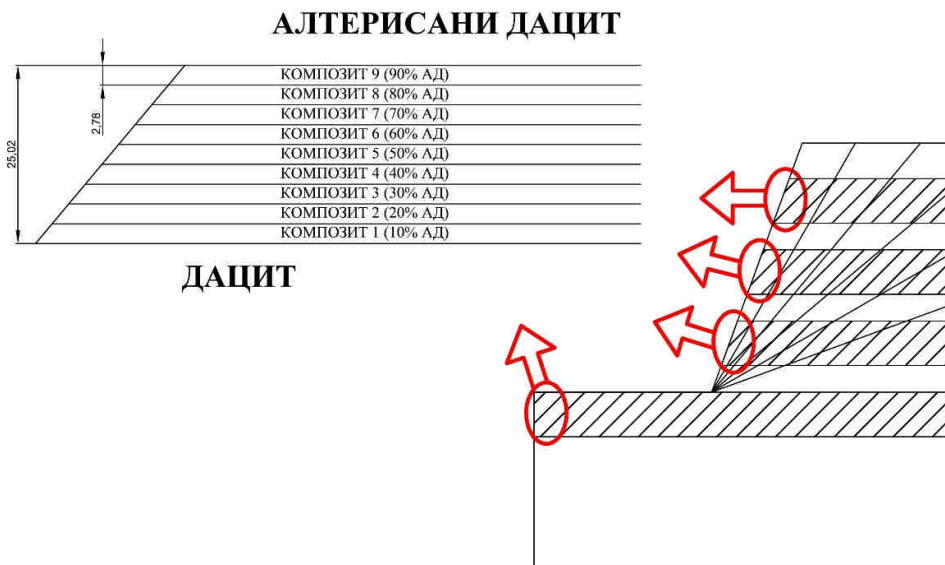


даље анализе и прорачуне усвојена висина косине која износи  $H = 140\text{m}$ , док су анализама разматрани углови нагиба косине од  $\alpha_z = 20, 30, 40, 50, 60$  и  $70^\circ$ .



Слика 42. Приказ анализираних случајева са различитим угловима  $\alpha_z$  и растојањима прелаза

Такође, анализа стабилности косине је извршена са увођењем транзиционе зоне која је дефинисана од линије прелаза Д и АД на доле са истим растојањима која су поменута, стим што сада у литолошком смислу поред материјала Д и АД постоје и параметри чврстоће стенског материјала транзиционе зоне описани као Композит 1-9, чији су параметри приказани у табели 11, а што је приказано на слици 43. Транзициона зона је укупне висине  $25,02\text{ m}$ , сваки део чини засебан материјал и висине је  $2,78\text{ m}$ .



Слика 43. Приказ величине транзиционе зоне

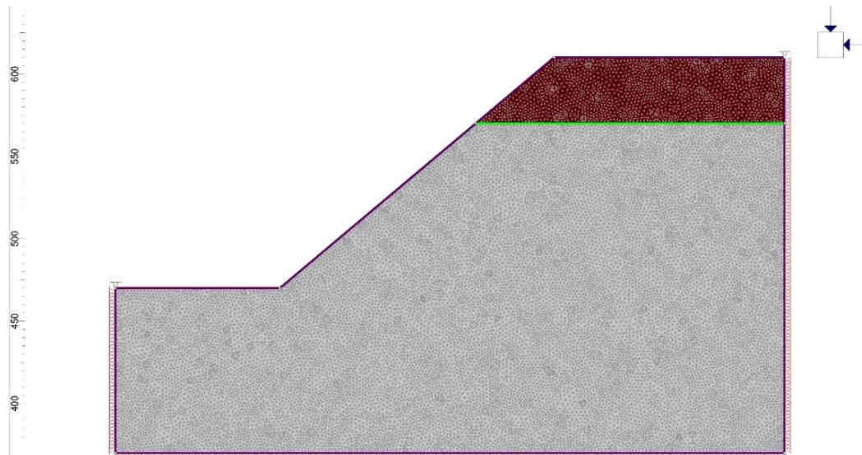
За потребе анализе стабилности косина коришћен је програмски пакет RS 2 верзије 11.008, фирме Rocscience Inc. из Торонта, Канада, који је власништво Катедре за механику стена Рударског одсека, Рударско-геолошког факултета.

## 6.1 Метода коначних елемената

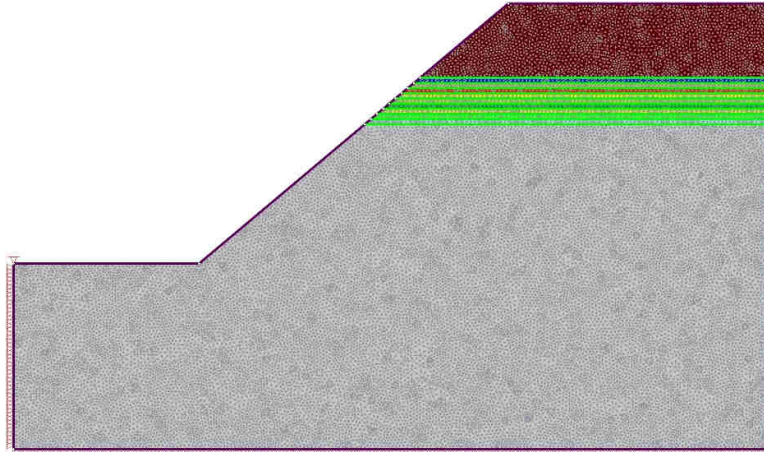
Анализа стабилности косина је извршена коришћењем Методе коначних елемената. Ова метода је примењена јер представља квалитетан приступ анализи стабилности косина везаних стенских материјала. Такође, ова метода је прецизна, свестрана и захтева много мање предходних претпоставки, нарочито по питању механизма лома. Погодна је за анализу хетерогених стенских материјала, јер сваки елемент конкретно моделира реакцију материјала који садржи.

Метода коначних елемената (МКЕ) је нумеричка метода која се обично примењује за решавање проблема у инжењерству, као и у решавању проблема математичке физике [59]. Циљ анализе методе коначних елемената, за потребе испитивања у оквиру овог рада, је да се верификује емпиријски предходно израђени модел косине уз коришћење одговарајућих критеријума лома. Сам модел у МКЕ често се примењује за процену напрезања, максималних вредности смицања и максималних деформација за вештачки израђену косину.

Прорачуни фактора сигурности су изведени на моделима косине код којих је генерисана мрежа коначних елемената са 10.000 троугаоних елемената са 6 чворних тачака, слика 44 и 45. Својства стенских материјала од којих су изграђени модели косине су одређена еласто-пластичним конститутивним моделом код кога је чврстоћа стенског материјала представљена Ноек-Brown-овим критеријумом лома. Улазни параметри Ноек-Brown-овог критеријума лома представљају вредности  $\sigma_{ci}$ ,  $m_i$ ,  $D$  и  $GSI$  (табела 11). Параметри деформабилности стенског материјала (Young-ов модул еластичности  $E$  и Poisson-ов коефицијент  $\nu$ ) нису лабораторијски испитивани, тако да су за даље прорачуне усвојене вредности које износе  $E=20000$  kPa и  $\nu=0,3$ .



Слика 44. Изглед модела са дискретизацијом мреже коначних елемената без ТЗ



Слика 45. Изглед модела са дискретизацијом мреже коначних елемената са ТЗ

За потребе пројектовања косина неопходно је прорачуном одредити вредности фактора сигурности. Фактор сигурности је веома користан податак за одређивање колико је косина блиска или удаљена лому, и његова тачност је у директној вези са тачношћу улазних параметара чврстоће сваког материјала [60]. Метода коначних елемената (МКЕ) се, због свога квалитета и флексибилности, често користи за анализу стабилности косина изграђених од чврстих стенских материјала.

Фактор сигурности  $F_s$ , код анализе стабилности косина МКЕ [61] је одређен обрасцем:

$$F = \frac{\text{Чврстоћа на смицање материјала (стена или тло)}}{\text{Чврстоћа на смицање потребна за постизање равнотеже}} = \frac{\tau}{\tau^*} \quad (33)$$

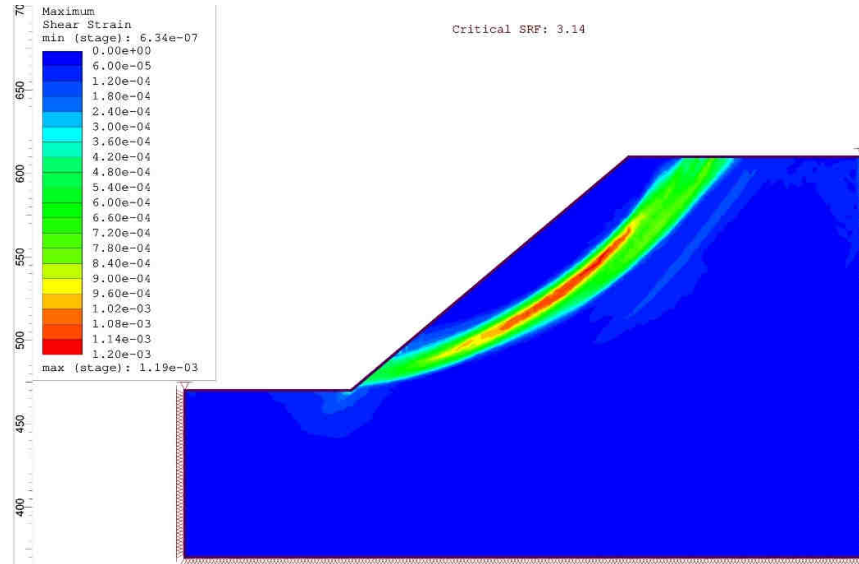
Griffiths и Lane [62] су утврдили предности примене методе коначних елемената у анализи стабилности косина које се могу се приказати у следећем:

- Нису потребне претпоставке по питању облика и положаја површине лома, као и правца и интензитета бочних сила.
- Могућност примене нелинеарних критеријума лома код свих заступљених стенских материјала у моделу.
- Уколико су доступни подаци о модулу еластичности, могуће је извршити прорачун деформација за постигнуте вредности напона.
- Могуће је пратити развој лома услед смицања.

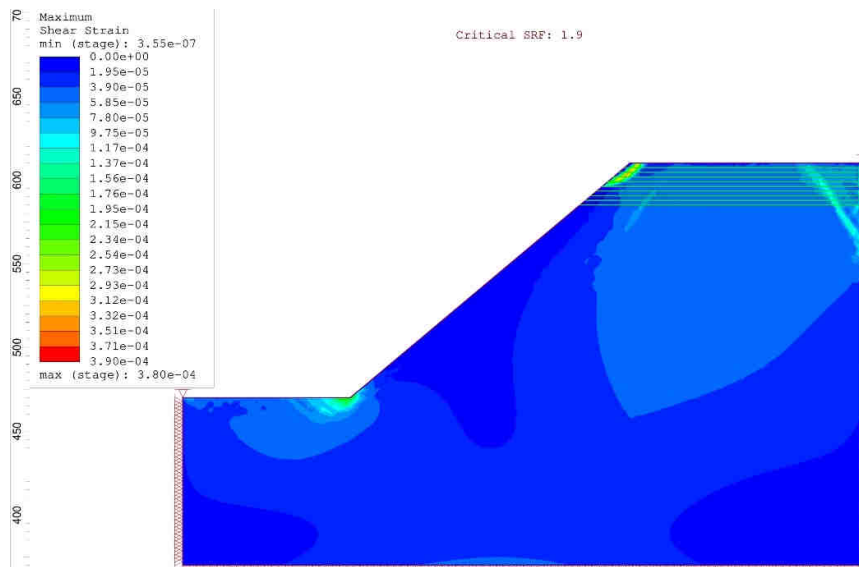
## 6.2 Анализа стабилности косина на растојању границе од 0 m

Анализа стабилности косина је извршена на припремљеним геомеханичким моделима за два случаја и то: са и без транзиционе зоне (ТЗ). Анализа је извршена са променом угла нагиба завршне косине тако да се на растојању границе Д и АД од горње равни косине од 0 m утврде вредности фактора сигурности ( $F_s$ ), помоћу којих ће се одредити максимални угао нагиба косине, слике 46-57.

Резултати анализе прорачуна стабилности косине нагиба  $\alpha_z = 40^\circ$  са и без ТЗ, као и положај лома на карактеристичном профилу при растојању границе Д и АД од горње равни косине од 0 m су приказани на сликама 46 и 47.

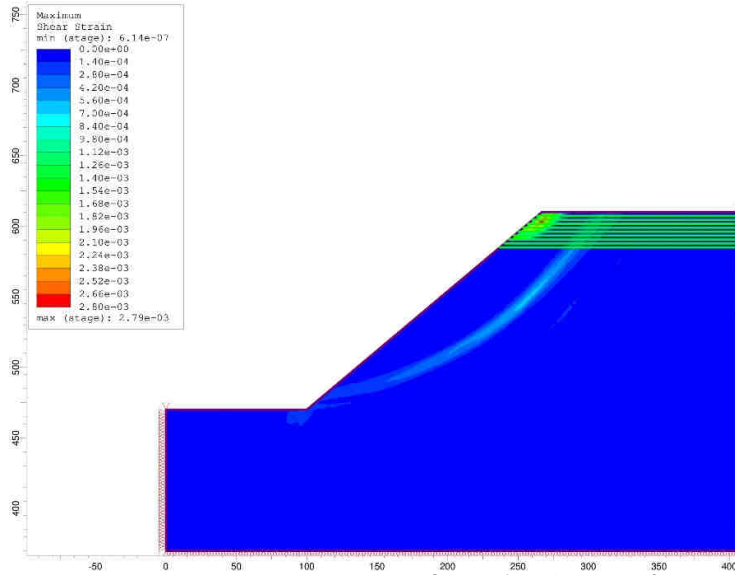


Слика 46. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 0 m ( $\alpha_z=40^\circ$  - без T3)



Слика 47. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 0 m ( $\alpha_z=40^\circ$  - са T3)

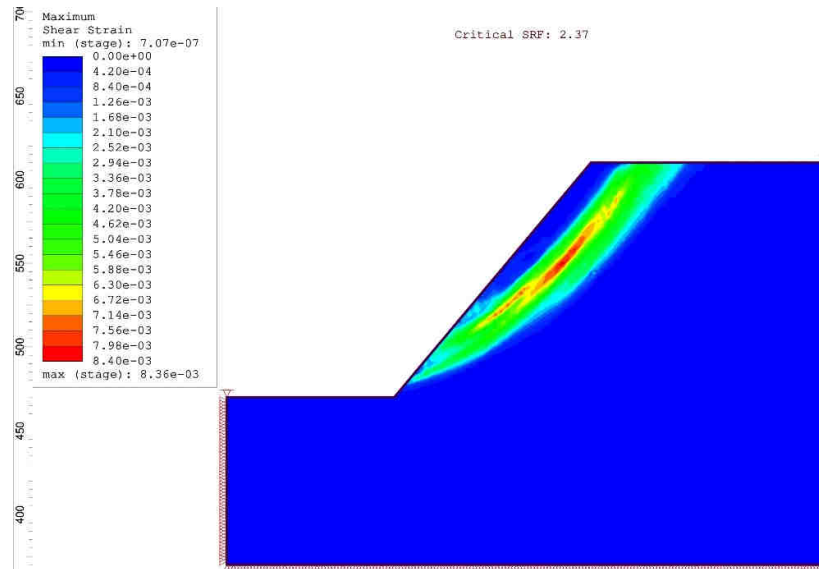
Анализом резултата прорачуна стабилности косине без T3, слика 46, се може уочити да до лома долази у ножици косине, као и да лом захвата тело целокупне косине, при чему вредност фактора сигурности износи  $F_s=3,14$ . На слици 47, где су приказани резултати прорачуна стабилности косине са T3, се може уочити да до концентрације напона и појаве лома косине долази у врху саме косине у оквиру T3, тачније обухвата материјале од 50 до 90% АД и завршава у материјалу који је описан као Композит 5 (50% АД), при чему вредност фактора сигурности износи  $F_s=1,9$ . Јасно се може уочити да је разлика у вредности фактора сигурности, са и без транзиционе зоне, велика, а да је лом, слика 47, локалног карактера. Стога је урађена анализа стабилности целокупне косине са T3, слика 48, како би се упоредиле вредности фактора сигурности, односно увидело да ли и колико постоји утицај T3 на стабилност косине.



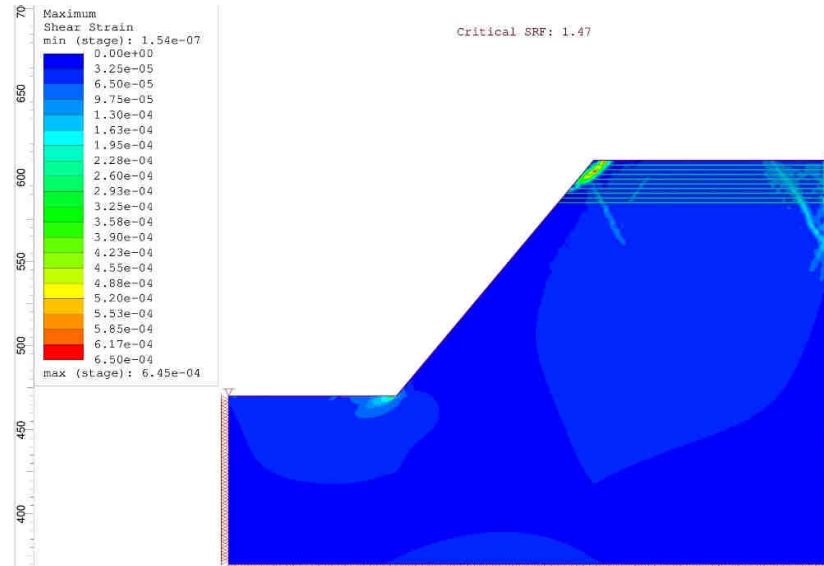
Слика 48. Положај лома на растојању границе од 0 m ( $\alpha_z=40^\circ$ - са ТЗ – целокупна косина)

Анализом резултата прорачуна стабилности целокупне косине са ТЗ, слика 48, се може уочити да постоје 2 одвојене клизне површине и вредност фактора сигурности износи  $F_s=3,12$ , што приближно одговара вредности фактора сигурности без ТЗ који износи  $F_s=3,14$ .

Резултати анализе прорачуна стабилности косине нагиба  $\alpha_z = 50^\circ$  са и без ТЗ, као и положај лома на карактеристичном профилу при растојању границе Д и АД од горње равни косине од 0 m су приказани на сликама 49 и 50.

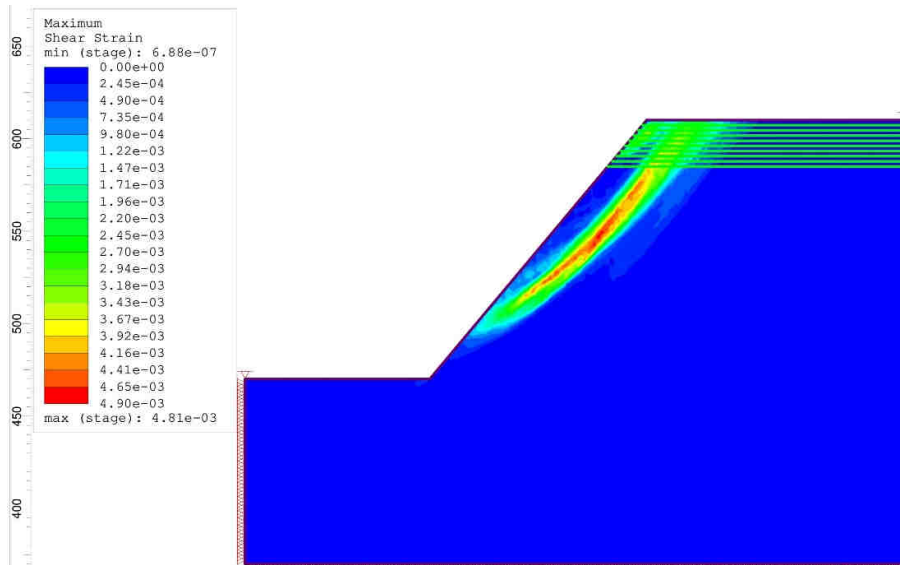


Слика 49. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 0 m ( $\alpha_z=50^\circ$ - без ТЗ)



Слика 50. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 0 m ( $\alpha_z=50^\circ$ - са ТЗ)

Анализом резултата прорачуна стабилности косине без ТЗ, слика 49, се може уочити да до лома долази непосредно изнад ножице целокупне косине, као и да лом захвата тело целокупне косине и вредност фактора сигурности износи  $F_s = 2,37$ . На слици 50, где су приказани резултати прорачуна стабилности косине без ТЗ, се може уочити да до лома долази у материјалу који је описан као Композит 3 (30% АД), односно до концентрације напона и појаве лома долази у врху саме косине у овиру ТЗ, тачније обухвата материјале од 30-90% АД и завршава у материјалу који је описан као Композит 3 (30% АД), при чему вредност фактора сигурности износи  $F_s=1,47$ . Стога је урађена анализа стабилности целокупне косине са ТЗ, слика 51, како би се упоредиле вредности фактора сигурности, односно увидело да ли и колико постоји утицај ТЗ на стабилност целокупне косине.



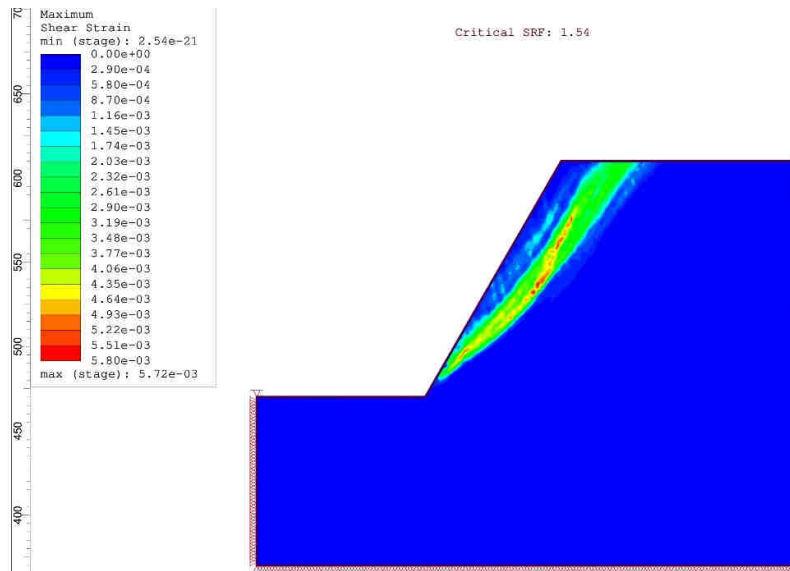
Слика 51. Положај лома на растојању границе од 0 m ( $\alpha_z=50^\circ$ - са ТЗ – целокупна косина)

Анализом резултата прорачуна стабилности целокупне косине са ТЗ, слика 51, се може уочи да постоје 2 одвојене клизне површине и вредност фактора сигурности

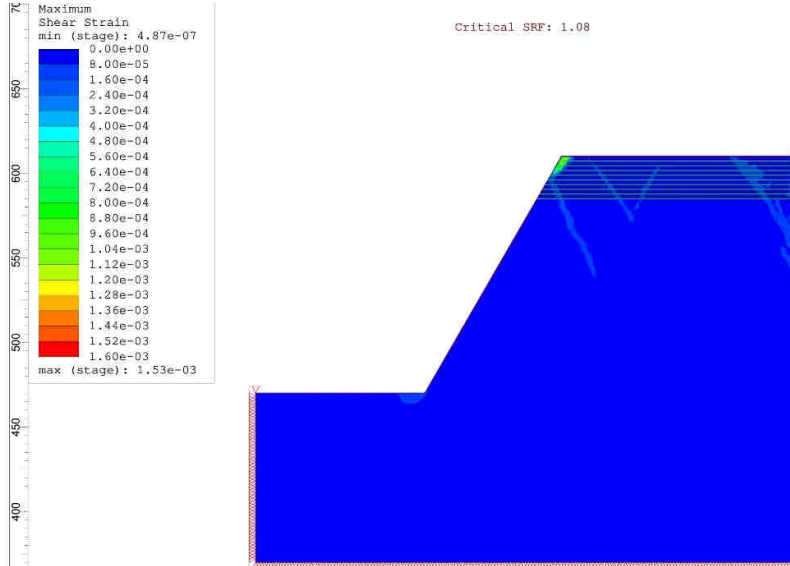


износи  $F_s=2,35$ , што приближно одговара вредности фактора сигурности без ТЗ који износи  $F_s=2,37$ .

Резултати анализе прорачуна стабилности косине нагиба  $\alpha_z = 60^\circ$  са и без ТЗ, као и положај лома на карактеристичном профилу при растојању границе Д и АД од горње равни косине од 0 m су приказани на сликама 52 и 53.



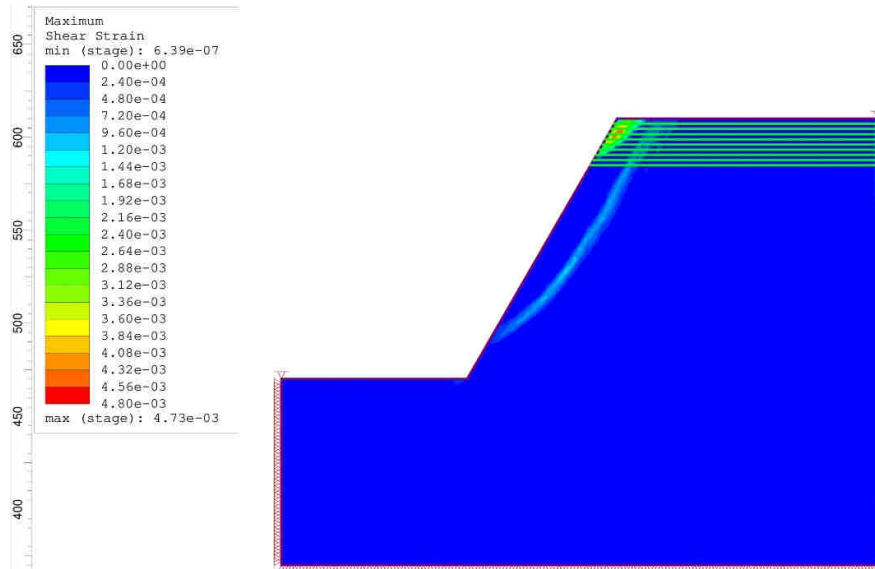
Слика 52. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 0 m ( $\alpha_z=60^\circ$ - без ТЗ)



Слика 53. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 0 m ( $\alpha_z=60^\circ$ - са ТЗ)

Анализом резултата прорачуна стабилности косине без ТЗ, слика 52, се може уочити да до лома долази непосредно изнад ножице целокупне косине, као и да лом захвата тело целокупне косине, при чему вредност фактора сигурности износи  $F_s = 1,54$ . На слици 53, где су приказани резултати прорачуна стабилности косине са ТЗ, се може уочити да до концентрације напона и појаве лома долази у врху саме косине у оквиру ТЗ, тачније обухвата материјале од 50-90% АД и завршава у материјалу који је описан као Композит 5 (50% АД), при чему вредност фактора сигурности износи  $F_s=1,08$ . Стога

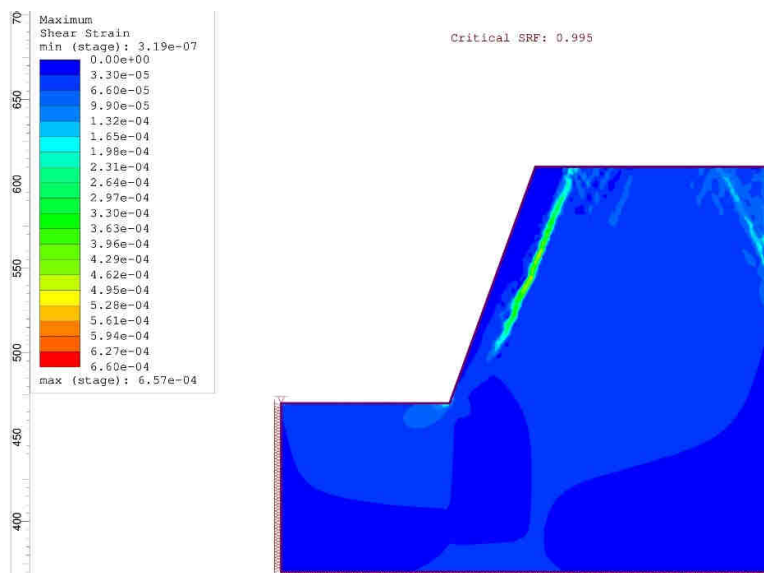
је урађена анализа стабилности целокупне косине са ТЗ, слика 54, како би се упоредиле вредности фактора сигурности, односно увидело да ли и колико постоји утицај ТЗ на стабилност косине.



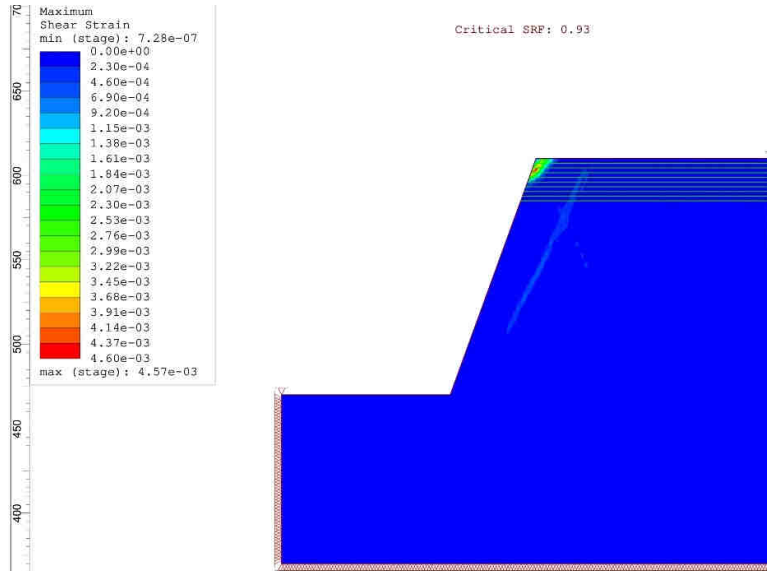
Слика 54. Положај лома на растојању границе од 0 m ( $\alpha_z=60^\circ$ - са ТЗ – целокупна косина)

Анализом резултата прорачуна стабилности целокупне косине са ТЗ, слика 54, се може уочити да постоје 2 одвојене клизне површине и вредност фактора сигурности износи  $F_s=1,54$ , што приближно одговара вредности фактора сигурности без ТЗ који износи  $F_s=1,53$ . Овакав случај указује да је потребно ублажити нагиб дела косине у горњој зони.

Резултати анализе прорачуна стабилности косине нагиба  $\alpha_z = 70^\circ$  са и без ТЗ, као и положај лома на карактеристичном профилу при растојању границе Д и АД од горње равни косине од 0 m су приказани на сликама 55 и 56.

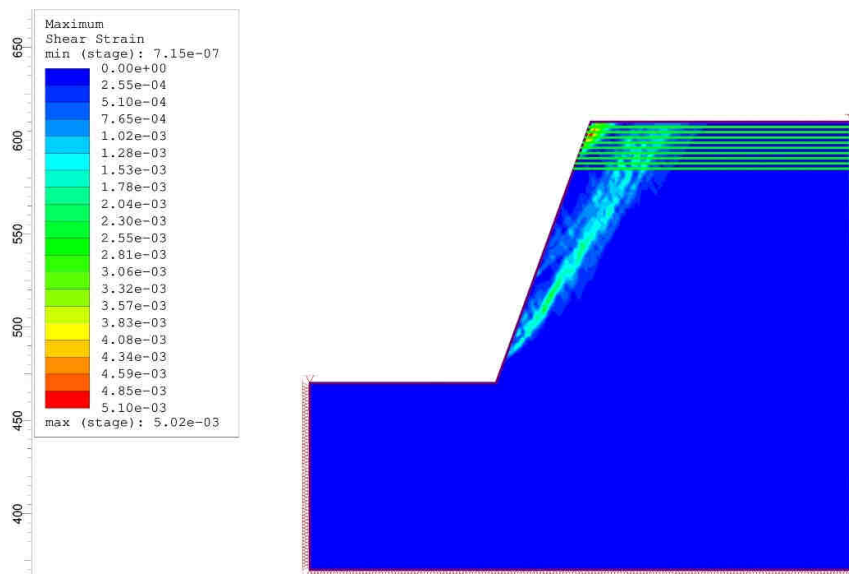


Слика 55. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 0 m ( $\alpha_z=70^\circ$ - без ТЗ)



Слика 56. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 0 m ( $\alpha_z=70^\circ$ - са ТЗ)

Анализом резултата прорачуна стабилности косине без ТЗ, слика 55, се може уочити да до концентрације напона и појаве лома долази непосредно изнад ножице целокупне косине, као и да лом захвата тело целокупне косине, при чему вредност фактора сигурности износи  $F_s=0,995$ . На слици 56, где су приказани резултати прорачуна стабилности косине са ТЗ, се може уочити да до концентрације напона и појаве лома долази у врху саме косине у квиру ТЗ, тачније обухвата материјале од 50-90% АД и завршава у материјалу који је описан као Композит 4 (40% АД), при чему вредност фактора сигурности износи  $F_s=0,93$ . Јасно се може уочити да разлике (са и без транзиционе зоне) у вредности фактора сигурности готово да нема, тако да се може закључити да утицај ТЗ у овом случају не постоји. Стога је урађена анализа стабилности целокупне косине са ТЗ, слика 57, како би се упоредили вредности фактора сигурности, односно увидело да ли и колико постоји утицај ТЗ на стабилност косине.



Слика 57. Положај лома на растојању границе од 0 m ( $\alpha_z=70^\circ$ - са ТЗ – целокупна косина)

Анализом резултата прорачуна стабилности целокупне косине са ТЗ, слика 57, се може уочити да постоје 2 одвојене клизне површине и вредност фактора сигурности износи  $F_s=0,98$ , што приближно одговара вредности фактора сигурности без ТЗ који износи  $F_s=0,995$ . Овакав случај такође указује да је је потребно ублажити нагиб дела косине у горњој зони.

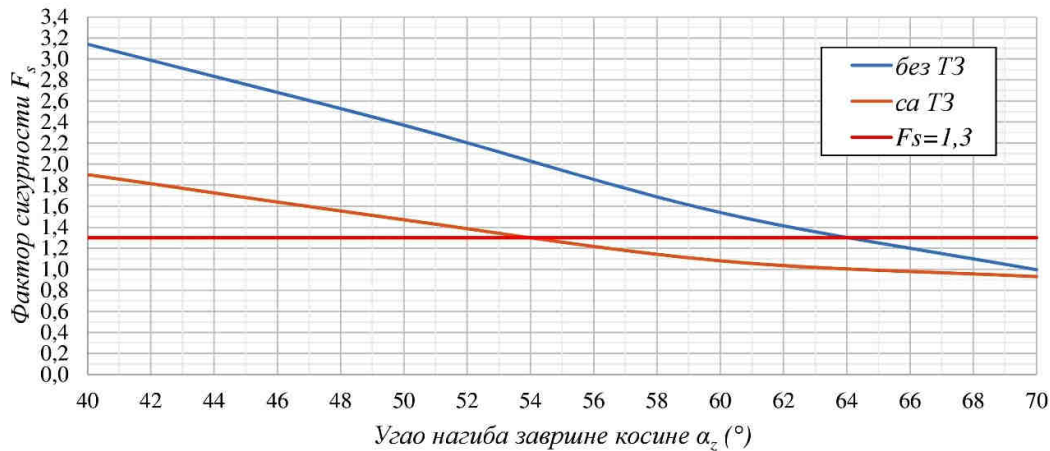
На основу утврђених вредности фактора сигурности (табела 12) при различитим вредностима углова нагиба завршне косине конструисан је дијаграм зависности приказан на слици 58. За граничну вредност фактора сигурности  $F_s=1,3$  одређен је максимални угао нагиба анализираних косине.

Табела 12. Вредности фактора сигурности на растојању границе од 0 m

Угао нагиба завршне косине $\alpha_z$ (°)	Фактор сигурности - $F_s$		
	без ТЗ	са ТЗ (целокупна косина)	са ТЗ (парцијална косина)
40	3,14	3,12	1,90
50	2,37	2,35	1,47
60	1,54	1,53	1,08
70	0,995	0,98	0,93

Напомена: ТЗ- транзициона зона

$$h = 0m$$



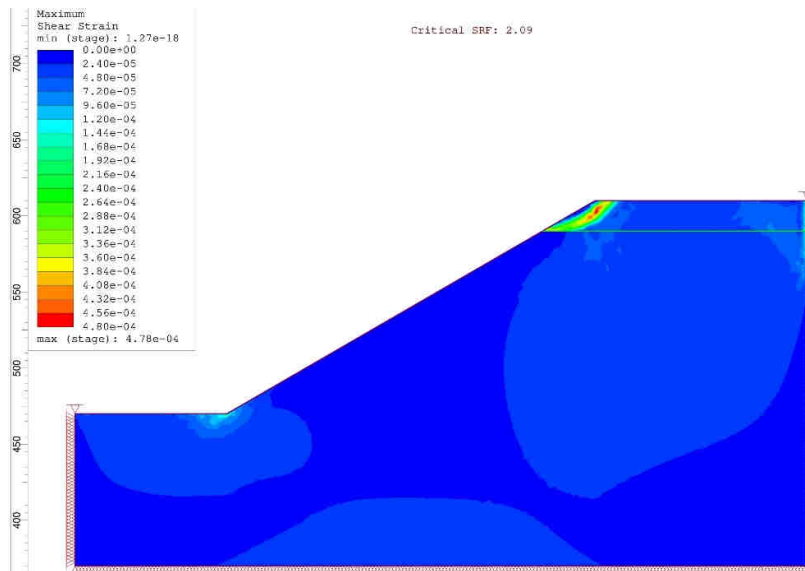
Слика 58. Упоредни приказ зависности  $F_s$  и  $\alpha_z$  на растојању прелаза од 0 m

Увидом у упоредни приказ зависности фактора сигурности  $F_s$  од угла нагиба завршне косине  $\alpha_z$ , слика 58, може се уочити да максимална вредност угла нагиба завршне косине износи  $\alpha_z=64,0^\circ$  на геомеханичким моделима без коришћења материјала транзиционе зоне, док је  $\alpha_z=54,0^\circ$  на моделима са коришћењем материјала транзиционе зоне. Стога се може закључити да, на растојању границе Д и АД од 0 m од горње равни косине, постоји разлика између модела са и без транзиционе зоне која утиче на геометријске елементе косине, односно максимални угао нагиба завршне косине и при граничној вредности фактора сигурности од  $F_s=1,3$  она износи  $10^\circ$ . Свакако битно је напоменути да је у циљу поређења вредности упоредни приказ извршен за целокупну косину без и парцијалну косину са ТЗ, што у пракси никако не би требао да буде случај, обзиром да је за радну косину  $F_{smin} \geq 1,05$ , односно систем радних косина  $F_{smin} \geq 1,10$ .

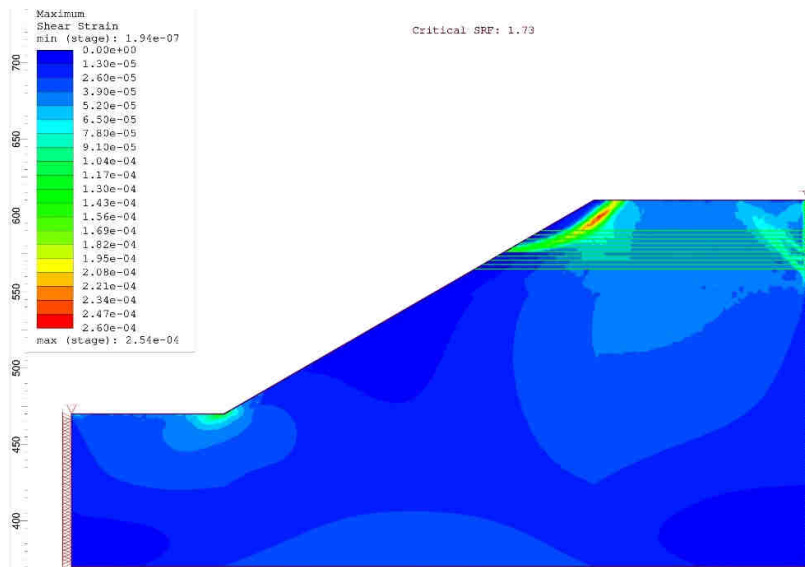
### 6.3 Анализа стабилности косина на растојању границе од 20 m

Анализа стабилности косина је извршена на припремљеним геомеханичким моделима за два случаја и то: са и без транзиционе зоне (ТЗ). Анализа је извршена са променом угла нагиба завршне косине тако да се на растојању границе Д и АД од горње равни косине од 20 m утврде вредности фактора сигурности ( $F_s$ ), помоћу којих ће се одредити максимални угао нагиба завршне косине, слике 59-66.

Резултати анализе прорачуна стабилности косине нагиба  $\alpha_z = 30^\circ$  са и без ТЗ, као и положај лома на карактеристичном профилу при растојању границе Д и АД од горње равни косине од 20 m су приказани на сликама 59 и 60.



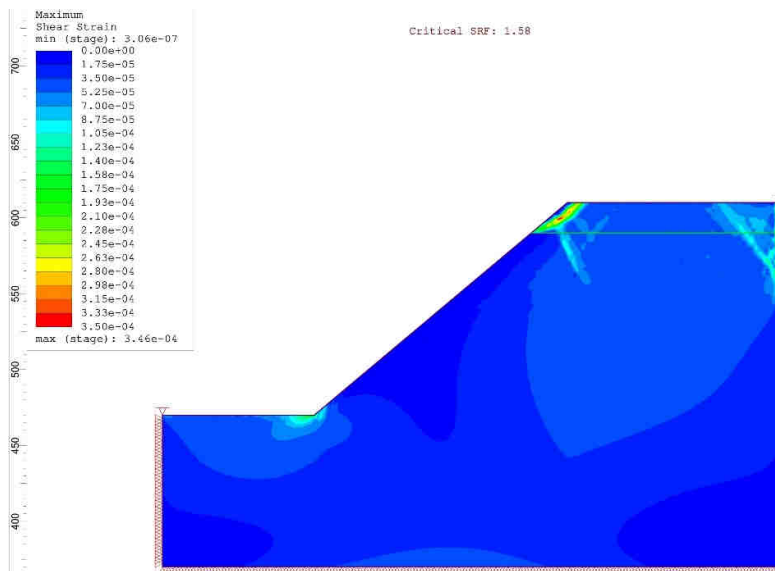
Слика 59. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 20 m ( $\alpha_z=30^\circ$ - без ТЗ)



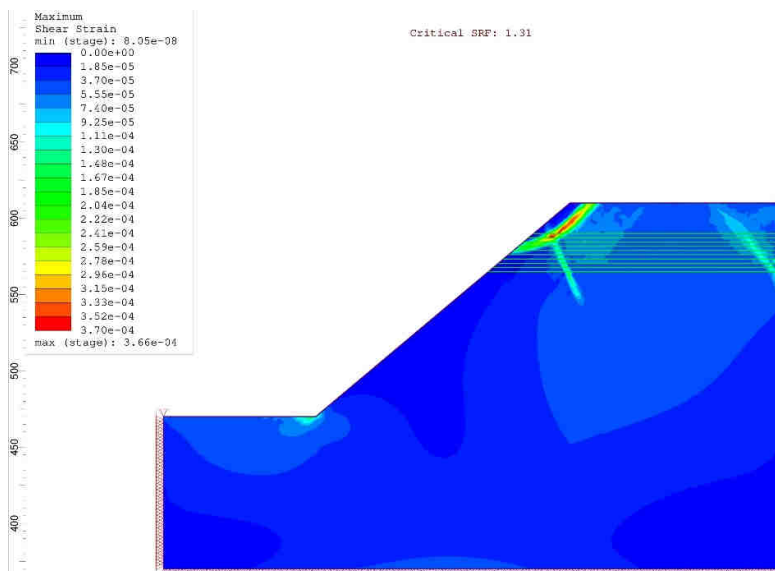
Слика 60. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 20 m ( $\alpha_z=30^\circ$ - са ТЗ)

Анализом резултата прорачуна стабилности косине без ТЗ, слика 59, се може уочити да до концентрације напона и појаве лома долази само у материјалу АД и вредност фактора сигурности износи  $F_s=2,09$ . На слици 60, где су приказани резултати прорачуна стабилности косине са ТЗ, се може уочити да до концентрације напона и појаве лома долази у материјалима од 50-100% АД и завршава се у материјалу који је описан као Композит 5 (50% АД), при чему вредност фактора сигурности износи  $F_s=1,73$ . Јасно се може уочити да разлика (са и без транзиционе зоне) у вредности фактора сигурности постоји, односно да постоји утицај ТЗ.

Резултати анализе прорачуна стабилности косине нагиба  $\alpha_z = 40^\circ$  са и без ТЗ, као и положај лома на карактеристичном профилу при растојању границе Д и АД од горње равни косине од 20 m су приказани на сликама 61 и 62.



Слика 61. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 20 m ( $\alpha_z=40^\circ$ - без ТЗ)

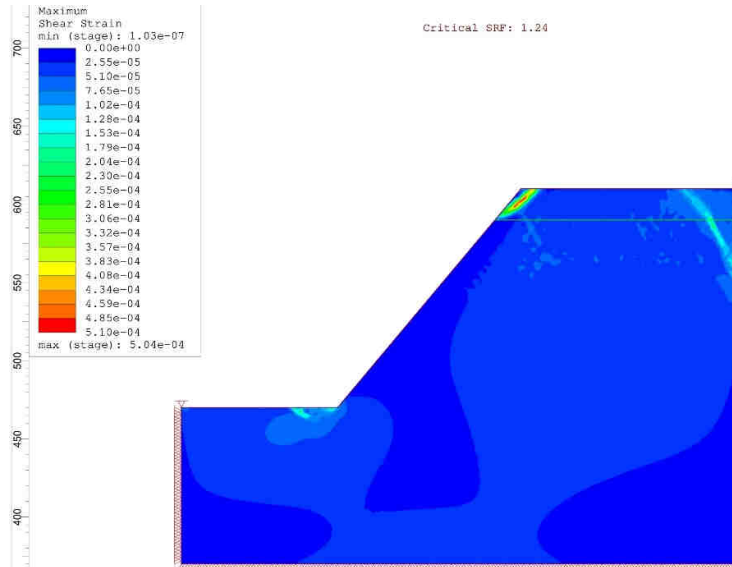


Слика 62. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 20 m ( $\alpha_z=40^\circ$ - са ТЗ)

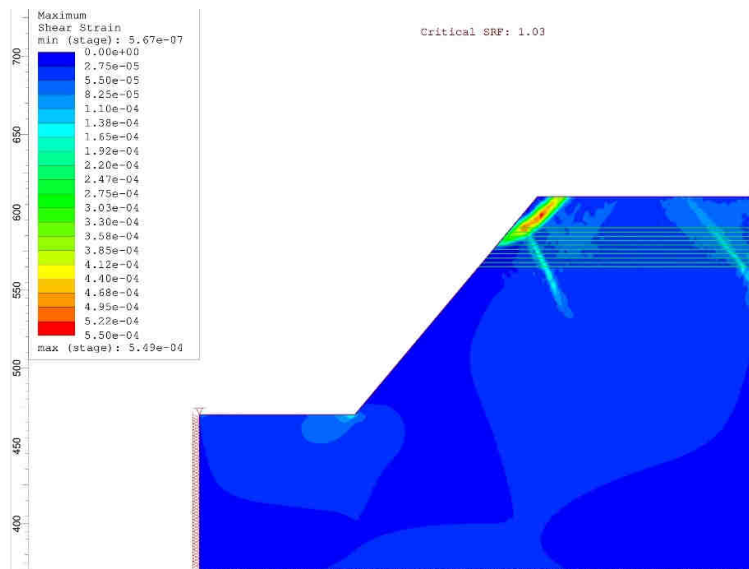


Анализом резултата прорачуна стабилности косине без ТЗ, слика 61, се може уочити да до концентрације напона и појаве лома долази само у материјалу АД и вредност фактора сигурности износи  $F_s=1,58$ . На слици 62, где су приказани резултати прорачуна стабилности косине са ТЗ, се може уочити да до концентрације напона и појаве лома долази у материјалима од 50-100% АД и завршава се у материјалу који је описан као Композит 5 (50% АД), при чему вредност фактора сигурности износи  $F_s=1,31$ .

Резултати анализе прорачуна стабилности косине нагиба  $\alpha_z = 50^\circ$  са и без ТЗ, као и положај лома на карактеристичном профилу при растојању границе Д и АД од горње равни косине од 20 m су приказани на сликама 63 и 64.



Слика 63. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 20 m ( $\alpha_z=50^\circ$  - без ТЗ)

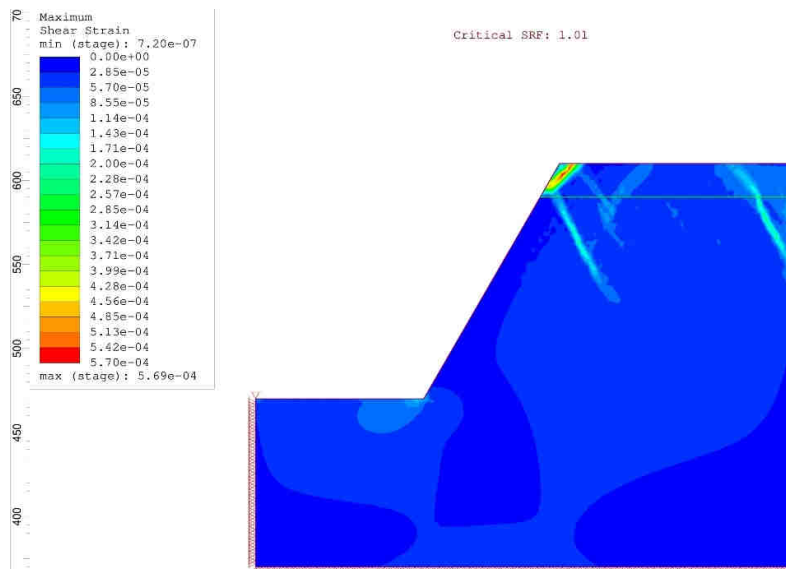


Слика 64. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 20 m ( $\alpha_z=50^\circ$  - са ТЗ)

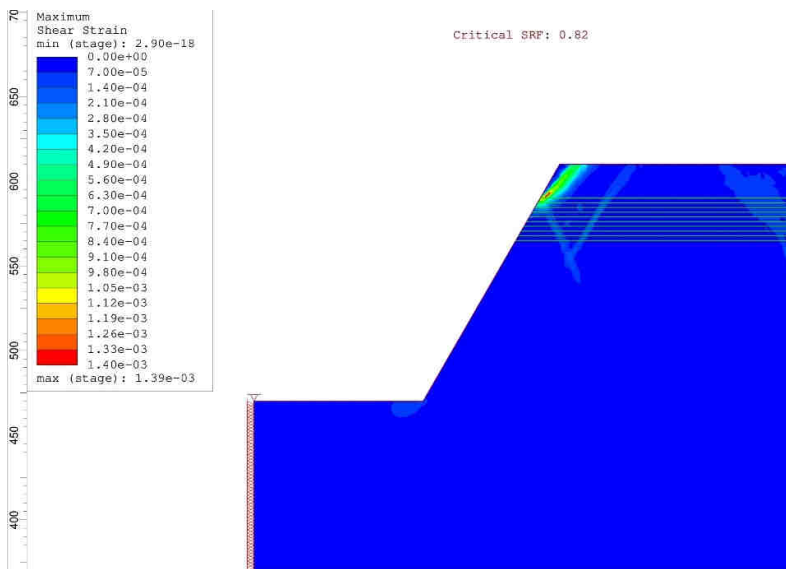
Анализом резултата прорачуна стабилности косине без ТЗ, слика 63, се може уочити да до концентрације напона и појаве лома долази само у материјалу АД и вредност фактора сигурности износи  $F_s=1,24$ . У оваквом случају, да би се повећала вредност

фактора сигурности, потребно је ублажити косину од контакта материјала Д и АД до горње косине равни са кораком од по  $2^\circ$ . На слици 64, где су приказани резултати прорачуна стабилности косине са ТЗ, се може уочити да до концентрације напона и појаве лома долази у материјалима од 60-100% АД и завршава у материјалу који је описан као Композит 6 (60% АД), при чему вредност фактора сигурности износи  $F_s=1,03$ . У оваквом случају, да би се повећала вредност фактора сигурности, потребно је ублажити косину од контакта материјала Композит 5 и Композит 6 до горње равни косине са кораком од по  $2^\circ$ .

Резултати анализе прорачуна стабилности косине нагиба  $\alpha_z = 60^\circ$  са и без ТЗ, као и положај лома на карактеристичном профилу при растојању границе Д и АД од горње равни косине од 20 m су приказани на сликама 65 и 66.



Слика 65. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 20 m ( $\alpha_z=60^\circ$ - без ТЗ)



Слика 66. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 20 m ( $\alpha_z=60^\circ$ - са ТЗ)



Анализом резултата прорачуна стабилности косине без ТЗ, слика 65, се може уочити да до концентрације напона и појаве лома долази само у материјалу АД и вредност фактора сигурности износи  $F_s=1,01$ . На слици 66, где су приказани резултати прорачуна стабилности косине са ТЗ, се може уочити да до концентрације напона и појаве лома долази у материјалима од 70-100% АД и завршава се у материјалу који је описан као Композит 7 (70% АД), при чему вредност фактора сигурности износи  $F_s=0,82$ .

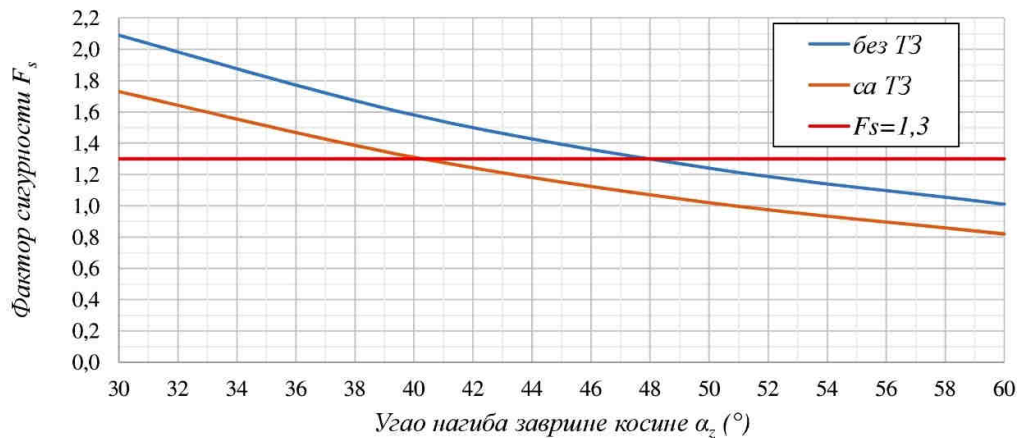
На основу утврђених вредности фактора сигурности (табела 13) при различитим вредностима углова нагиба завршне косине конструисан је дијаграм зависности приказан на слици 67. За вредност фактора сигурности  $F_s=1,3$  одређен је максимални угао нагиба анализираних косине.

Табела 13. Вредности фактора сигурности на растојању границе од 20 m

Угао нагиба завршне косине $\alpha_z$ (°)	Фактор сигурности - $F_s$	
	без ТЗ	са ТЗ
30	2,09	1,73
40	1,58	1,31
50	1,24	1,02
60	1,01	0,82

Напомена: ТЗ- транзициона зона

$$h = 20m$$



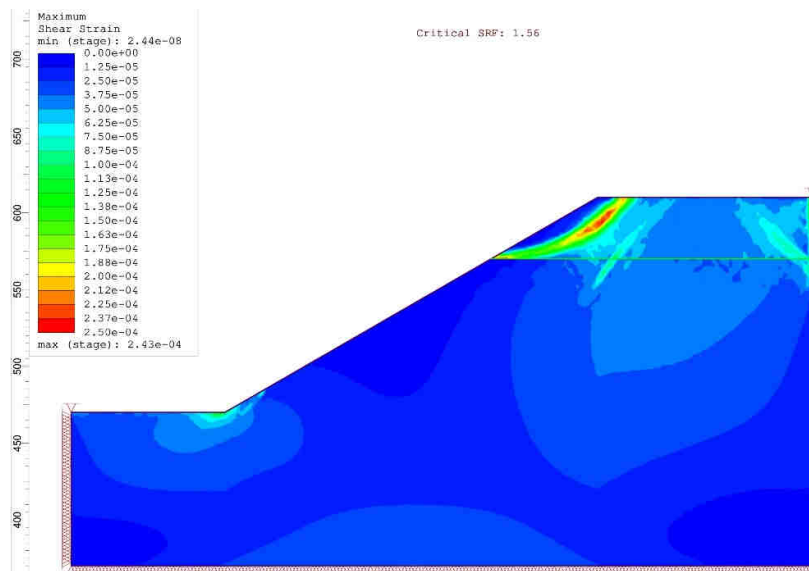
Слика 67. Упоредни приказ зависности  $F_s$  и  $\alpha_z$  на растојању прелаза од 20 m

Увидом у упоредни приказ зависности фактора сигурности  $F_s$  од угла нагиба завршне косине  $\alpha_z$ , слика 67, може се уочити да максимална вредност угла нагиба завршне косине износи  $\alpha_z=47,9^\circ$  на геомеханичким моделима без коришћења материјала транзиционе зоне, док је  $\alpha_z=40,2^\circ$  на моделима са коришћењем материјала транзиционе зоне. Стога се може закључити да, на растојању границе Д и АД од 20 m од горње равни косине, постоји разлика између модела са и без транзиционе зоне која утиче на геометријске елементе косине, односно максимални угао нагиба завршне косине и при  $F_s=1,3$  она износи  $7,7^\circ$ .

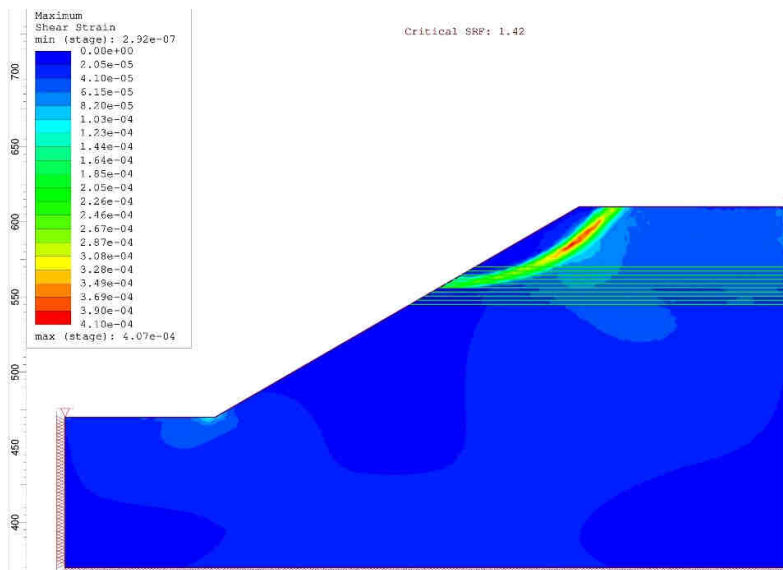
## 6.4 Анализа стабилности косина на растојању границе од 40 m

Анализа стабилности косина је извршена на припремљеним геомеханичким моделима за два случаја и то: са и без транзиционе зоне (ТЗ). Анализа је извршена са променом угла нагиба завршне косине тако да се на растојању границе Д и АД од горње равни косине од 40 m утврде вредности фактора сигурности ( $F_s$ ), помоћу којих ће се одредити максимални угао нагиба косине, слике 68-75.

Резултати анализе прорачуна стабилности косине нагиба  $\alpha_z = 30^\circ$  са и без ТЗ, као и положај лома на карактеристичном профилу при растојању границе Д и АД од горње равни косине од 40 m су приказани на сликама 68 и 69.



Слика 68. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 40 m ( $\alpha_z=30^\circ$ - без ТЗ)

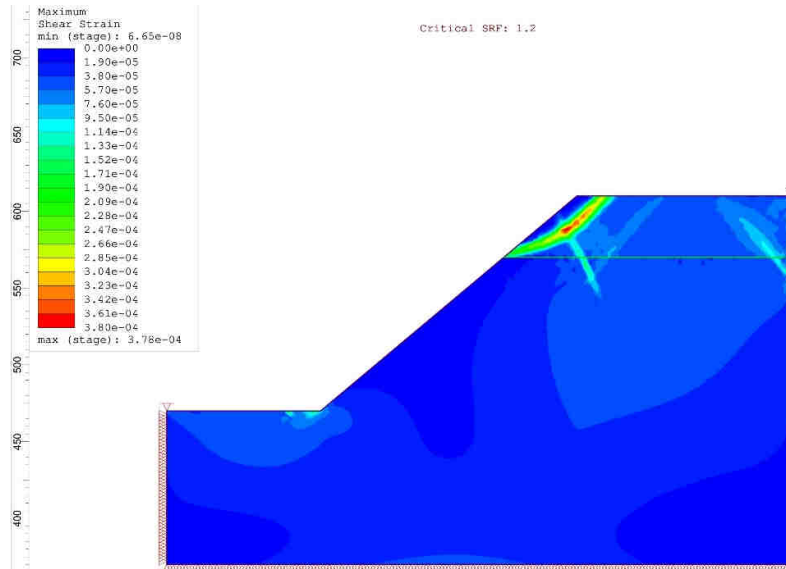


Слика 69. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 40 m ( $\alpha_z=30^\circ$ - са ТЗ)

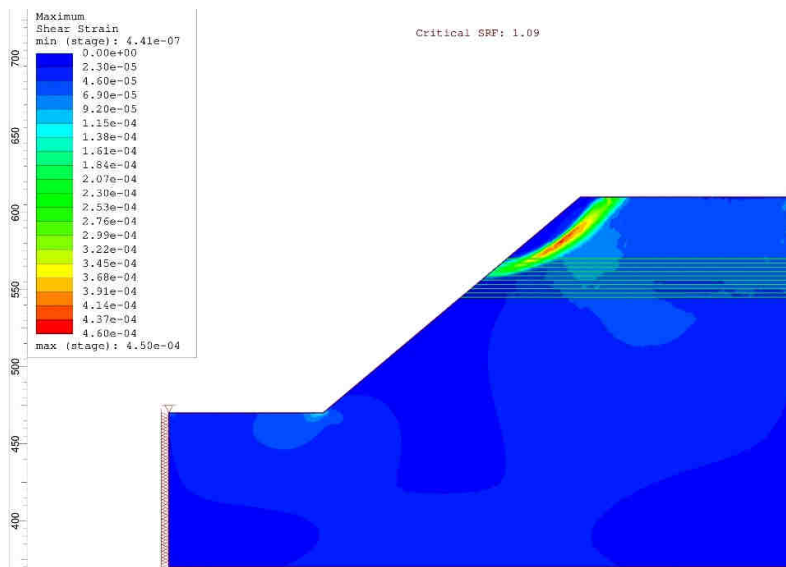
Анализом резултата прорачуна стабилности косине без ТЗ, слика 68, се може уочити да до концентрације напона и појаве лома долази само у материјалу АД и вредност фактора сигурности износи  $F_s=1,56$ . На слици 69, где су приказани резултати

прорачуна стабилности косине са ТЗ, се може уочити да до концентрације напона и појаве лома долази у материјалима од 50-100% АД и завршава се у материјалу који је описан као Композит 5 (50% АД), при чему вредност фактора сигурности износи  $F_s=1,42$ . Јасно се може уочити да разлика (са и без транзиционе зоне) у вредности фактора сигурности постоји, односно да постоји утицај ТЗ.

Резултати анализе проарчуна стабилности косине нагиба  $\alpha_z = 40^\circ$  са и без ТЗ, као и положај лома на карактеристичном профилу при растојању границе Д и АД од горње равни косине од 40 m су приказани на сликама 70 и 71.



Слика 70. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 40 m ( $\alpha_z=40^\circ$ - без ТЗ)

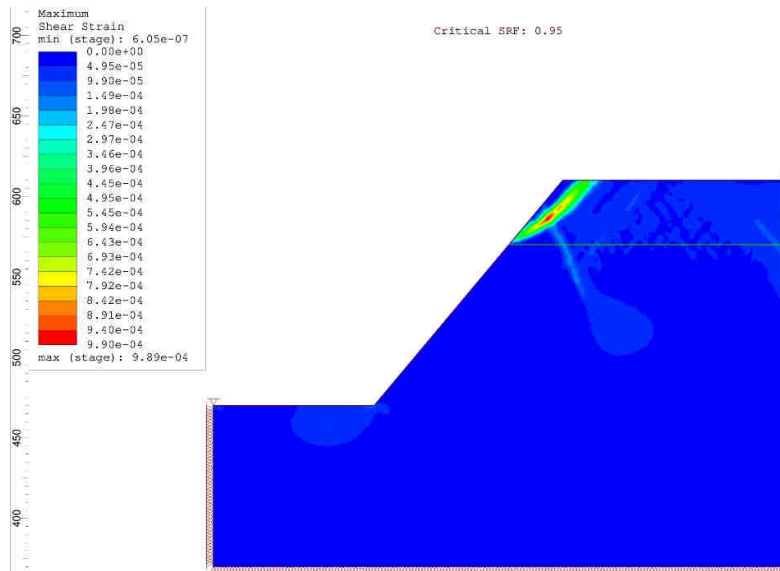


Слика 71. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 40 m ( $\alpha_z=40^\circ$ - са ТЗ)

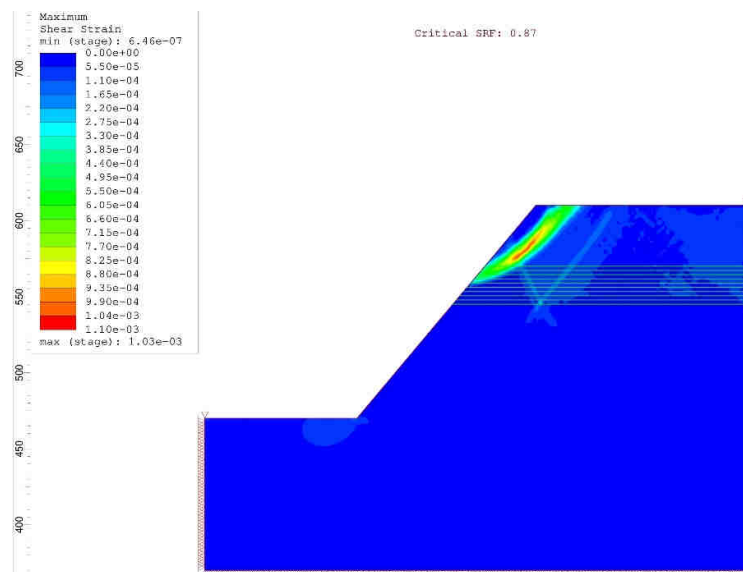
Анализом резултата прорачуна стабилности косине без ТЗ, слика 70, се може уочити да до концентрације напона и појаве лома долази само у материјалу АД и вредност фактора сигурности износи  $F_s=1,2$ . У оваквом случају, да би се повећала вредност фактора сигурности, потребно је ублажити косину од контакта материјала Д и АД до

горње равни косине са кораком од по  $2^\circ$ . На слици 71, где су приказани резултати прорачуна стабилности косине са ТЗ, се може уочити да до концентрације напона и појаве лома долази у материјалима од 60-100% АД и завршава се у материјалу који је описан као Композит 6 (60% АД), при чему вредност фактора сигурности износи  $F_s=1,09$ . У оваквом случају, да би се повећала вредност фактора сигурности, потребно је ублажити косину од контакта материјала Композит 5 и Композит 6 до горње равни косине са кораком од по  $2^\circ$ .

Резултати анализе прорачуна стабилности косине нагиба  $\alpha_z = 50^\circ$  са и без ТЗ, као и положај лома на карактеристичном профилу при растојању границе Д и АД од горње равни косине од 40 m су приказани на сликама 72 и 73.



Слика 72. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 40 m ( $\alpha_z=50^\circ$ - без ТЗ)



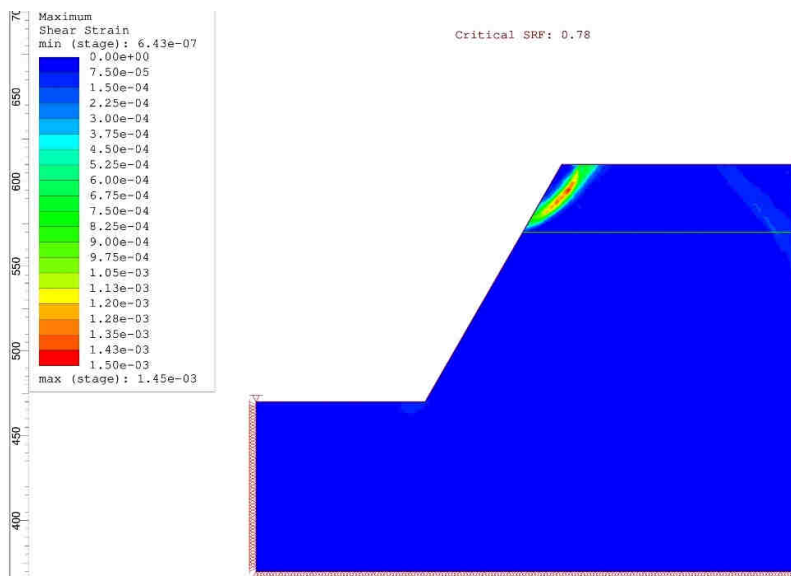
Слика 73. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 40 m ( $\alpha_z=50^\circ$ - са ТЗ)

Анализом резултата прорачуна стабилности косине без ТЗ, слика 72, се може уочити да до концентрације напона и појаве лома долази само у материјалу АД и вредност

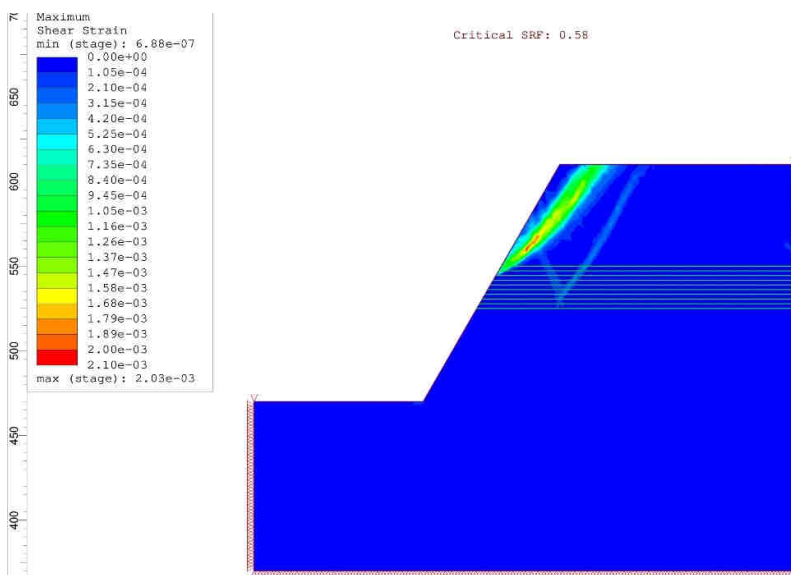


фактора сигурности износи  $F_s=0,95$ . У оваквом случају, да би се повећала вредност фактора сигурности, потребно је ублажити косину од контакта материјала Д и АД до горње равни косине са кораком од по  $2^\circ$ . На слици 73, где су приказани резултати прорачуна стабилности косине са ТЗ, се може уочити да до концентрације напоне и појаве лома долази у материјалима од 60-100% АД и завршава се у материјалу који је описан као Композит 6 (60% АД), при чему вредност фактора сигурности износи  $F_s=1,09$ . У оваквом случају, да би се повећала вредност фактора сигурности, потребно је ублажити косину од контакта материјала Композит 5 и Композит 6 до горње равни косине са кораком од по  $2^\circ$ .

Резултати анализе прорачуна стабилности косине нагиба  $\alpha_z = 60^\circ$  са и без ТЗ, као и положај лома на карактеристичном профилу при растојању границе Д и АД од горње равни косине од 40 m су приказани на сликама 74 и 75.



Слика 74. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 40 m ( $\alpha_z=60^\circ$  без ТЗ)



Слика 75. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 40 m ( $\alpha_z=60^\circ$  са ТЗ)

Анализом резултата прорачуна стабилности косине без ТЗ, слика 74, се може уочити да до концентрације напона и појаве лома долази само у материјалу АД и вредност фактора сигурности износи  $F_s=0,78$ . У оваквом случају, да би се повећала вредност фактора сигурности, потребно је ублажити косину од контакта материјала Д и АД до горње равни косине са кораком од по  $2^\circ$ . На слици 75, где су приказани резултати прорачуна стабилности косине са ТЗ, се може уочити да до концентрације напона и појаве лома долази у материјалима од 80-100% АД и завршава се у материјалу који је описан као Композит 8 (80% АД), при чему вредност фактора сигурности износи  $F_s=0,58$ . У оваквом случају, да би се повећала вредност фактора сигурности, потребно је ублажити косину од контакта материјала Композит 7 и Композит 8 до горње равни косине са кораком од по  $2^\circ$ .

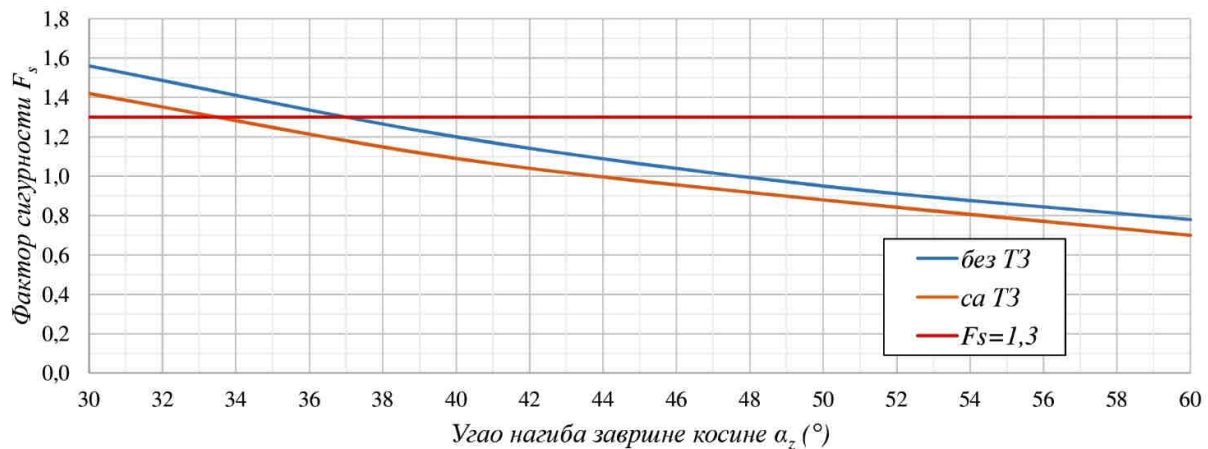
На основу утврђених вредности фактора сигурности (табела 14) при различитим вредностима углова нагиба завршне косине конструисан је дијаграм зависности приказан на слици 76. За вредност фактора сигурности  $F_s=1,3$  одређен је максимални угао нагиба анализираних косине.

Табела 14. Вредности фактора сигурности на растојању границе од 40 m

Угао нагиба завршне косине $\alpha_z$ ( $^\circ$ )	Фактор сигурности - $F_s$	
	без ТЗ*	са ТЗ
30	1,56	1,42
40	1,20	1,09
50	0,95	0,88
60	0,78	0,70

\*Напомена: ТЗ- транзициона зона

$$h = 40m$$



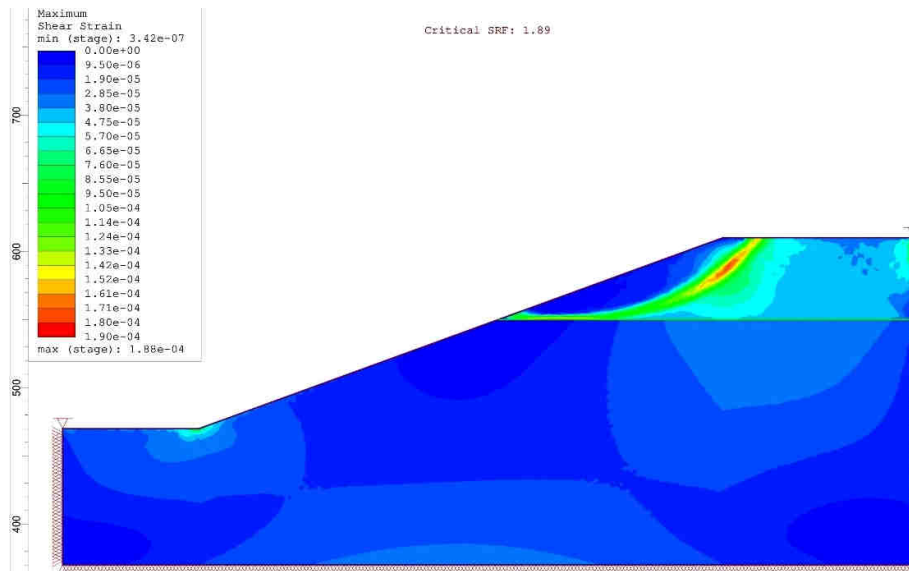
Слика 76. Упоредни приказ зависности  $F_s$  и  $\alpha_z$  на растојању прелаза од 40 m

Увидом у упоредни приказ зависности фактора сигурности  $F_s$  од угла нагиба завршне косине  $\alpha_z$ , слика 76, може се уочити да максимална вредност угла нагиба завршне косине износи  $\alpha_z=37,0^\circ$  на геомеханичким моделима без коришћења материјала транзиционе зоне, док је  $\alpha_z=33,5^\circ$  на моделима са коришћењем материјала транзиционе зоне. Стога се може закључити да, на растојању границе Д и АД од 40 m од горње равни косине, постоји разлика између модела са и без транзиционе зоне која утиче на геометријске елементе косине, односно максимални угао нагиба завршне косине и при граничној вредности фактора сигурности од  $F_s=1,3$  она износи  $3,5^\circ$ .

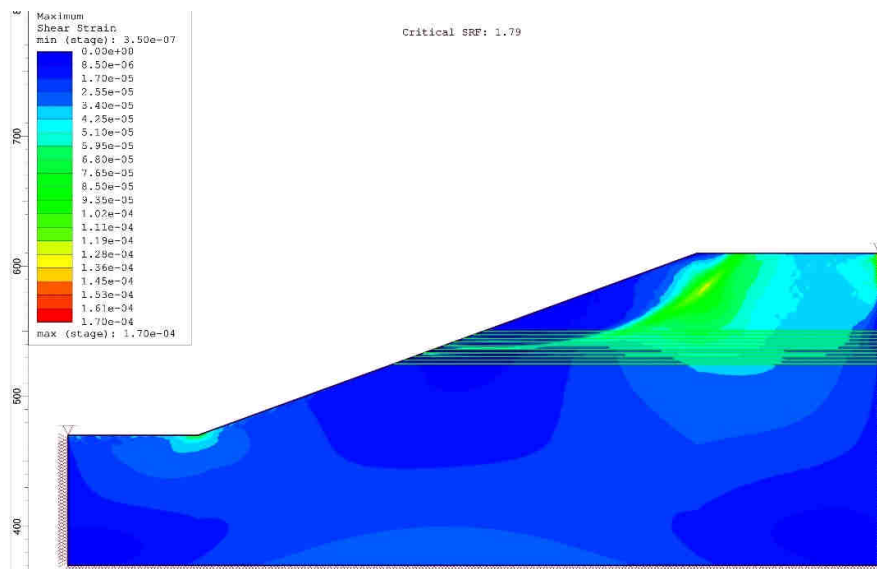
## 6.5 Анализа стабилности косина на растојању границе од 60 m

Анализа стабилности косина је извршена на припремљеним геомеханичким моделима за два случаја и то: са и без транзиционе зоне (ТЗ). Анализа је извршена са променом угла нагиба завршне косине тако да се на растојању границе Д и АД од горње равни косине од 60 m утврде вредности фактора сигурности ( $F_s$ ), помоћу којих ће се одредити максимални угао нагиба косине, слике 77-86.

Резултати анализе прорачуна стабилности косине нагиба  $\alpha_z = 20^\circ$  са и без ТЗ, као и положај лома на карактеристичном профилу при растојању границе Д и АД од горње равни косине од 60 m су приказани на сликама 77 и 78.



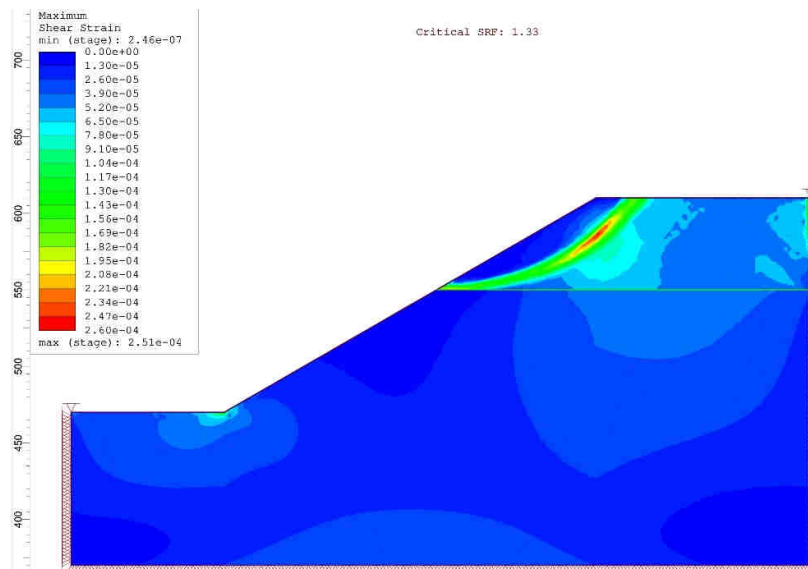
Слика 77. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 60 m ( $\alpha_z=20^\circ$ - без ТЗ)



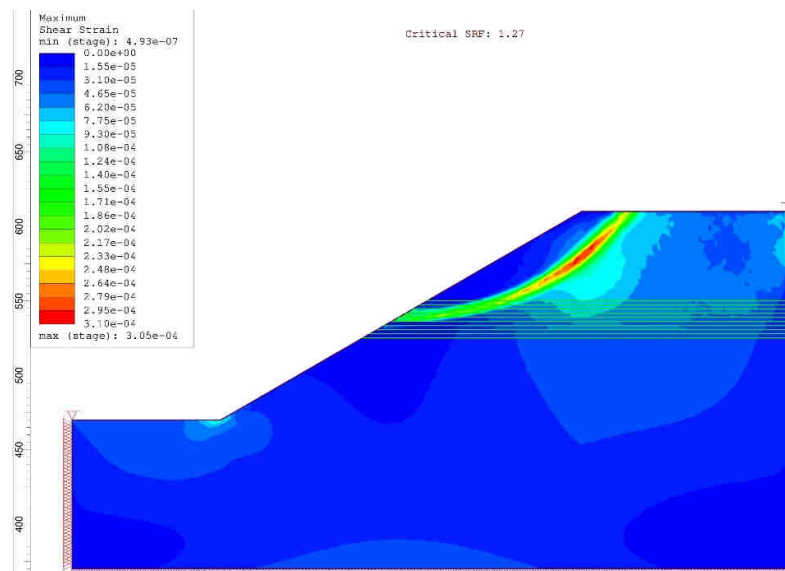
Слика 78. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 60 m ( $\alpha_z=20^\circ$ - са ТЗ)

Анализом резултата прорачуна стабилности косине без ТЗ, слика 77, се може уочити да до концентрације напона и појаве лома долази само у материјалу АД и вредност фактора сигурности износи  $F_s=1,89$ . На слици 78, где су приказани резултати прорачуна стабилности косине са ТЗ, се може уочити да до концентрације напона и појаве лома долази у материјалима од 30-100% АД и завршава се у материјалу који је описан као Композит 3 (30% АД), при чему вредност фактора сигурности износи  $F_s=1,79$ . Јасно се може уочити да разлика (са и без транзиционе зоне) у вредности фактора сигурности постоји, али да се постепено смањује.

Резултати анализе прорачуна стабилности косине нагиба  $\alpha_z = 30^\circ$  са и без ТЗ, као и положај лома на карактеристичном профилу при растојању границе Д и АД од горње равни косине од 60 m су приказани на сликама 79 и 80.



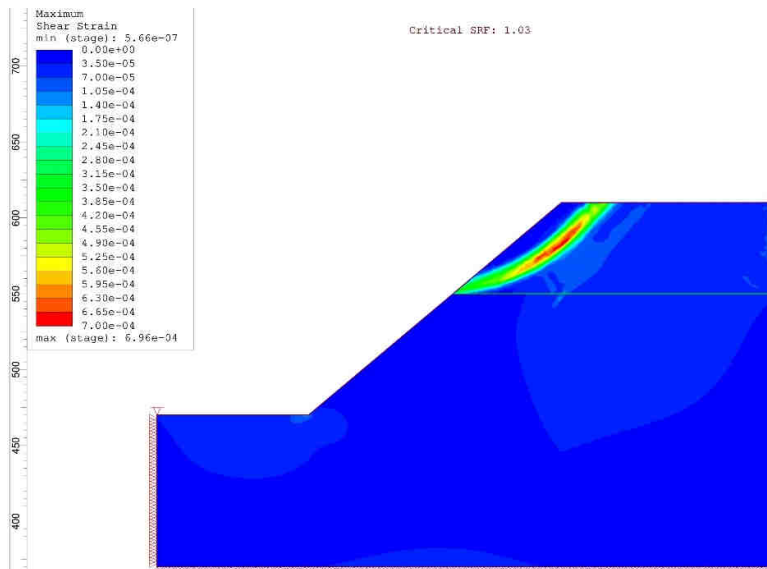
Слика 79. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 60 m ( $\alpha_z=30^\circ$ - без ТЗ)



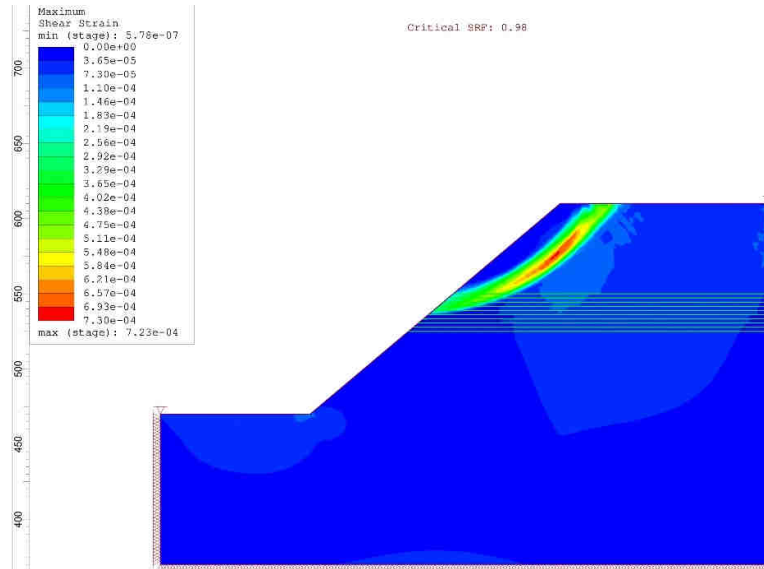
Слика 80. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 60 m ( $\alpha_z=30^\circ$ - са ТЗ)

Анализом резултата прорачуна стабилности косине без ТЗ, слика 79, се може уочити да до концентрације напона и појаве лома долази само у материјалу АД и вредност фактора сигурности износи  $F_s=1,33$ . На слици 80, где су приказани резултати прорачуна стабилности косине са ТЗ, се може уочити да до концентрације напона и појаве лома долази у материјалима од 50-100% АД и завршава се материјалу који је описан као Композит 5 (50% АД), при чему вредност фактора сигурности износи  $F_s=1,27$ . У оваквом случају, да би се повећала вредност фактора сигурности, потребно је ублажити косину од контакта материјала Композит 4 и Композит 5 до горње равни косине са кораком од по  $2^\circ$ . Јасно се може уочити да разлика (са и без транзиционе зоне) у вредности фактора сигурности постоји и да ово представља идеалан пример, јер ако би се разматрало да је гранична вредност минималног фактора сигурности  $F_s=1,3$ , геомеханички модел са слике 79 би био нестабилан, док би се модел са слике 80 могао окарактерисати као стабилан.

Резултати анализе прорачуна стабилности косине нагиба  $\alpha_z = 40^\circ$  са и без ТЗ, као и положај лома на карактеристичном профилу при растојању границе Д и АД од горње равни косине од 60 m су приказани на сликама 81 и 82.



Слика 81. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 60 m ( $\alpha_z=40^\circ$ - без ТЗ)

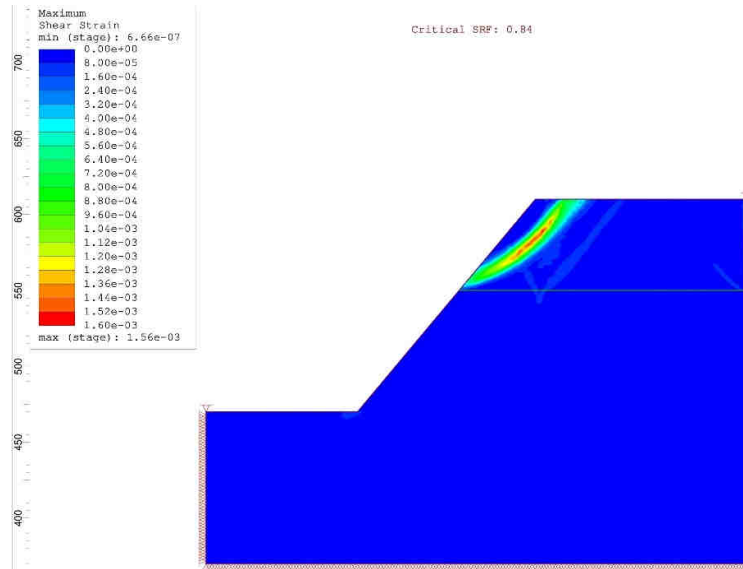


Слика 82. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 60 m ( $\alpha_z=40^\circ$ - са ТЗ)

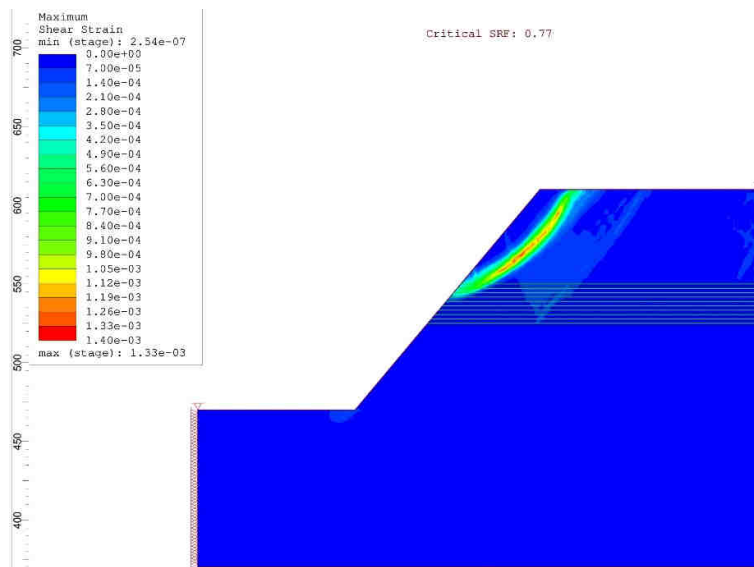
Анализом резултата прорачуна стабилности косине без ТЗ, слика 82, се може уочити да до концентрације напона и појаве лома долази само у материјалу АД и вредност фактора сигурности износи  $F_s=1,03$ . У оваквом случају, да би се повећала вредност фактора сигурности, потребно је ублажити косину од контакта материјала Д и АД до горње равни косине са кораком од по  $2^\circ$ . На слици 83, где су приказани резултати прорачуна стабилности косине са ТЗ, се може уочити да до концентрације напона и појаве лома долази у материјалима од 60-100% АД и завршава се у материјалу који је описан као Композит 5 (50% АД), при чему вредност фактора сигурности износи  $F_s=0,98$ . У оваквом случају, да би се повећала вредност фактора сигурности, потребно је ублажити косину од контакта материјала Композит 5 и Композит 6 до горње равни косине са кораком од по  $2^\circ$ . Јасно се може уочити да разлика (са и без транзиционе зоне) у вредности фактора сигурности постоји, али је незнатна.

Резултати анализе прорачуна стабилности косине нагиба  $\alpha_z = 50^\circ$  са и без ТЗ, као и положај лома на карактеристичном профилу при растојању границе Д и АД од горње равни косине од 60 m су приказани на сликама 83 и 84.





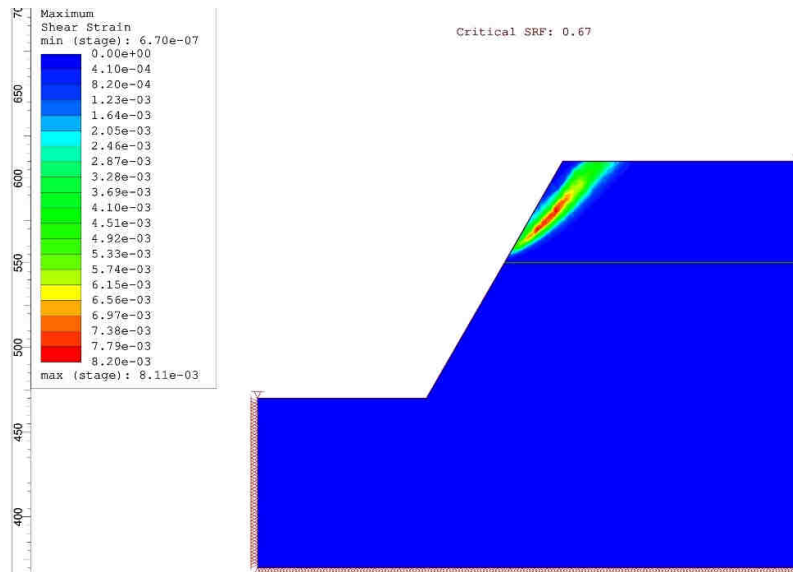
Слика 83. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 60 m ( $\alpha_z=50^\circ$ - без T3)



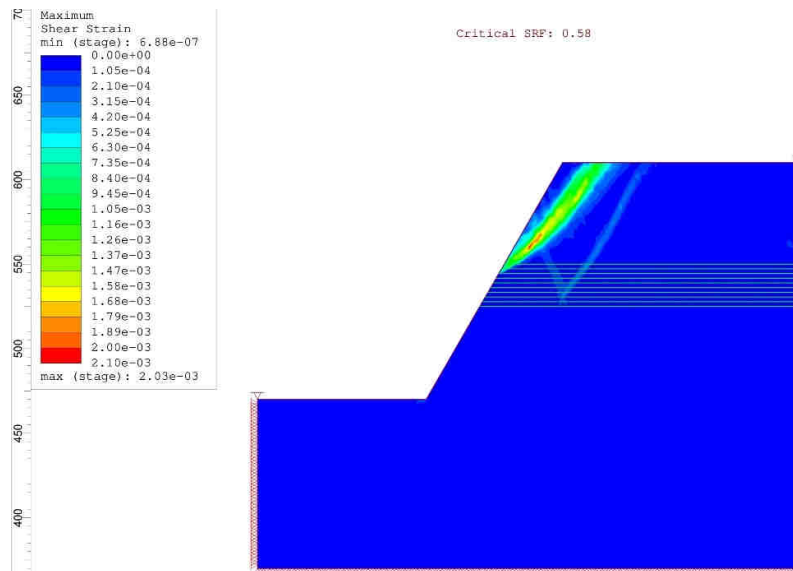
Слика 84. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 60 m ( $\alpha_z=50^\circ$ - са T3)

Анализом резултата прорачуна стабилности косине без T3, слика 83, се може уочити да до концентрације напона и појаве лома долази само у материјалу АД и вредност фактора сигурности износи  $F_s=0,84$ . У оваквом случају, да би се повећала вредност фактора сигурности, потребно је ублажити косину од контакта материјала Д и АД до горње равни косине са кораком од по  $2^\circ$ . На слици 84, где су приказани резултати прорачуна стабилности косине са T3, се може уочити да до концентрације напона и појаве лома долази у материјалима од 70-100% АД и завршава се у материјалу који је описан као Композит 7 (70% АД), при чему вредност фактора сигурности износи  $F_s=0,77$ . У оваквом случају, да би се повећала вредност фактора сигурности, потребно је ублажити косину од контакта материјала Композит 6 и Композит 7 до горње равни косине са кораком од по  $2^\circ$ . Јасно се може уочити да разлика (са и без транзиционе зоне) у вредности фактора сигурности постоји, али је незнатна.

Резултати анализе прорачуна стабилности косине нагиба  $\alpha_z = 60^\circ$  са и без ТЗ, као и положај лома на карактеристичном профилу при растојању границе Д и АД од горње равни косине од 60 m су приказани на сликама 85 и 86.



Слика 85. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 60 m ( $\alpha_z=60^\circ$ - без ТЗ)



Слика 86. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 60 m ( $\alpha_z=60^\circ$ - са ТЗ)

Анализом резултата прорачуна стабилности косине без ТЗ, слика 85, се може уочити да до концентрације напона и појаве лома долази само у материјалу АД и вредност фактора сигурности износи  $F_s=0,67$ . У оваквом случају, да би се повећала вредност фактора сигурности, потребно је ублажити косину од контакта материјала Д и АД до горње равни косине са кораком од по  $2^\circ$ . На слици 86, где су приказани резултати прорачуна стабилности косине са ТЗ, се може уочити да до концентрације напона и појаве лома долази у материјалима од 80-100% АД и завршава се у материјалу који је описан као Композит 8 (80% АД), при чему вредност фактора сигурности износи  $F_s=0,58$ . У оваквом случају, да би се повећала вредност фактора сигурности, потребно је ублажити косину од контакта материјала Композит 7 и Композит 8 до горње равни

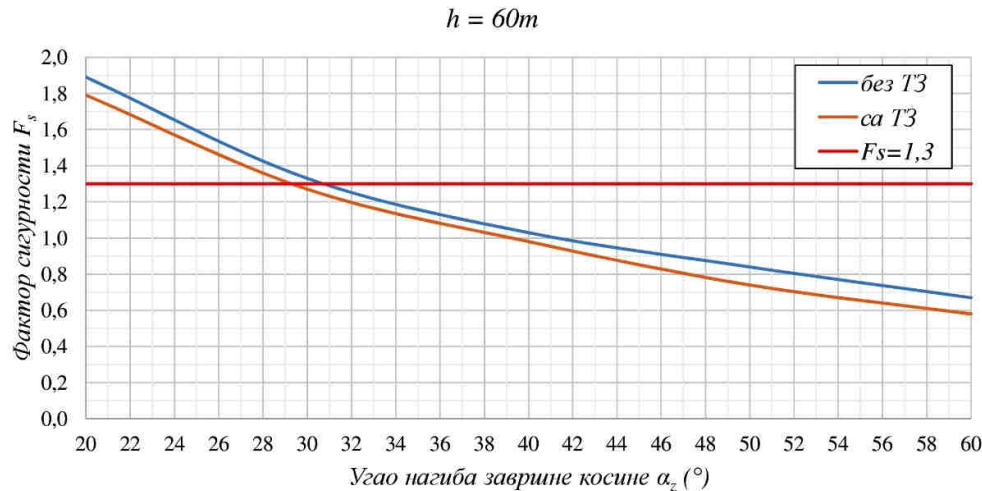
косине са кораком од по  $2^\circ$ . Јасно се може уочити да разлика (са и без транзиционе зоне) у вредности фактора сигурности постоји, али је незнатна.

На основу утврђених вредности фактора сигурности (табела 15) при различитим вредностима углова нагиба завршне косине конструисан је дијаграм зависности на слици 87. За вредност фактора сигурности  $F_s=1,3$  одређен је максимални угао нагиба анализираних косине.

Табела 15. Вредности фактора сигурности на растојању границе од 60 m

Угао нагиба завршне косине $\alpha_z$ ( $^\circ$ )	Фактор сигурности - $F_s$	
	без ТЗ*	са ТЗ
20	1,89	1,79
30	1,33	1,27
40	1,03	0,98
50	0,84	0,74
60	0,67	0,58

\*Напомена: ТЗ- транзициона зона



Слика 87. Упоредни приказ зависности  $F_s$  и  $\alpha_z$  на растојању прелаза од 60 m

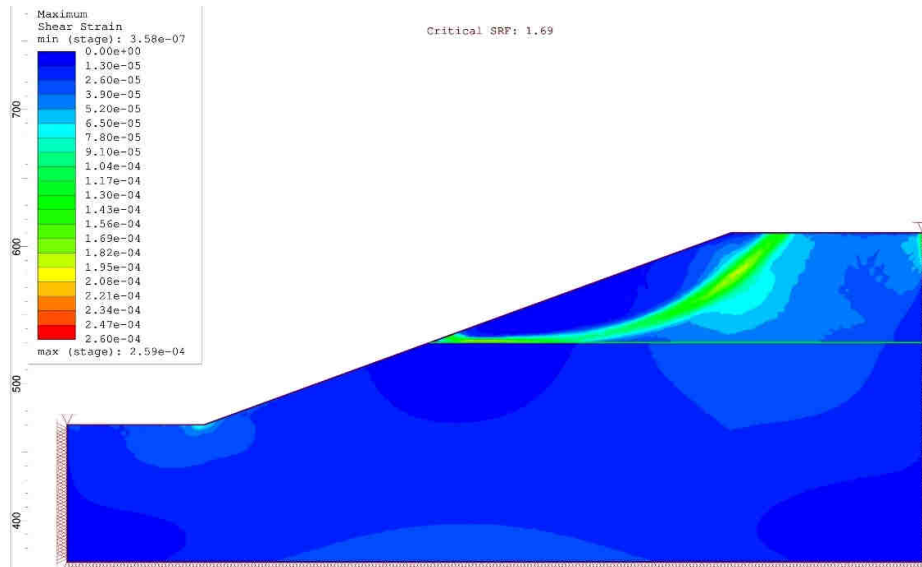
Увидом у упоредни приказ зависности фактора сигурности  $F_s$  од угла нагиба завршне косине  $\alpha_z$ , слика 87, може се уочити да максимална вредност угла нагиба завршне косине износи  $\alpha_z=30,7^\circ$  на геомеханичким моделима без коришћења материјала транзиционе зоне, док је  $\alpha_z=29,2^\circ$  на моделима са коришћењем материјала транзиционе зоне. Стога се може закључити да, на растојању границе Д и АД од 60 m од горње равни косине, постоји разлика између модела са и без транзиционе зоне која утиче на геометријске елементе косине, односно максимални угао нагиба завршне косине и при  $F_s=1,3$  она износи  $1,5^\circ$ .

## 6.6 Анализа стабилности косина на растојању границе од 80 m

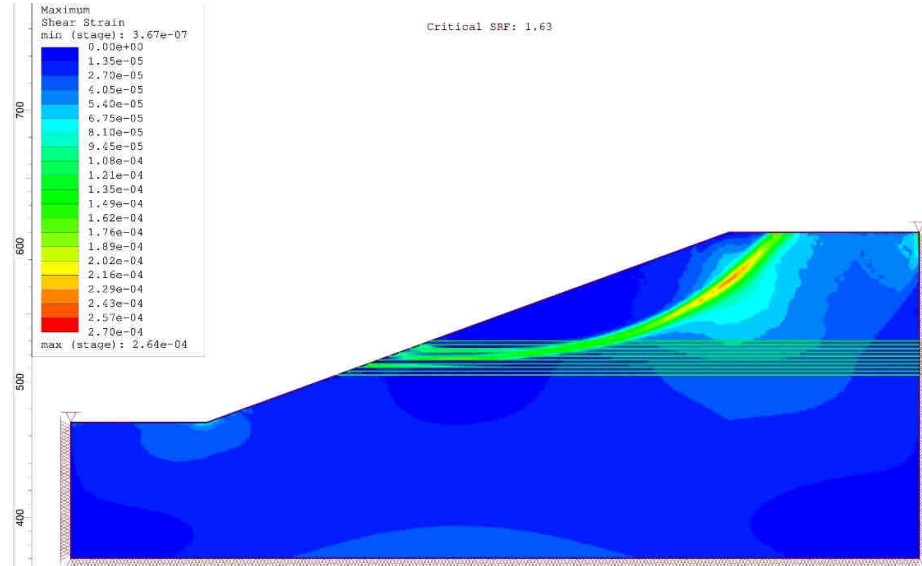
Анализа стабилности косина је извршена на припремљеним геомеханичким моделима за два случаја и то: са и без транзиционе зоне (ТЗ). Анализа је извршена са променом угла нагиба завршне косине тако да се на растојању границе Д и АД од

горње равни косине од 80 m утврде вредности фактора сигурности ( $F_s$ ), помоћу којих ће се одредити максимални угао нагиба косине, слике 88-97.

Резултати анализе прорачуна стабилности косине нагиба  $\alpha_z = 20^\circ$  са и без ТЗ, као и положај лома на карактеристичном профилу при растојању границе Д и АД од горње равни косине од 80 m су приказани на сликама 88 и 89.



Слика 88. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 80 m ( $\alpha_z=20^\circ$ - без ТЗ)

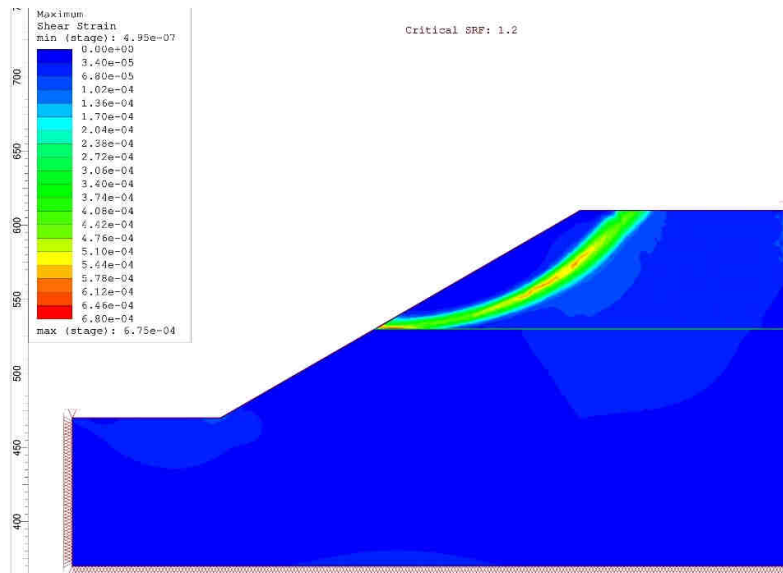


Слика 89. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 80 m ( $\alpha_z=20^\circ$ - са ТЗ)

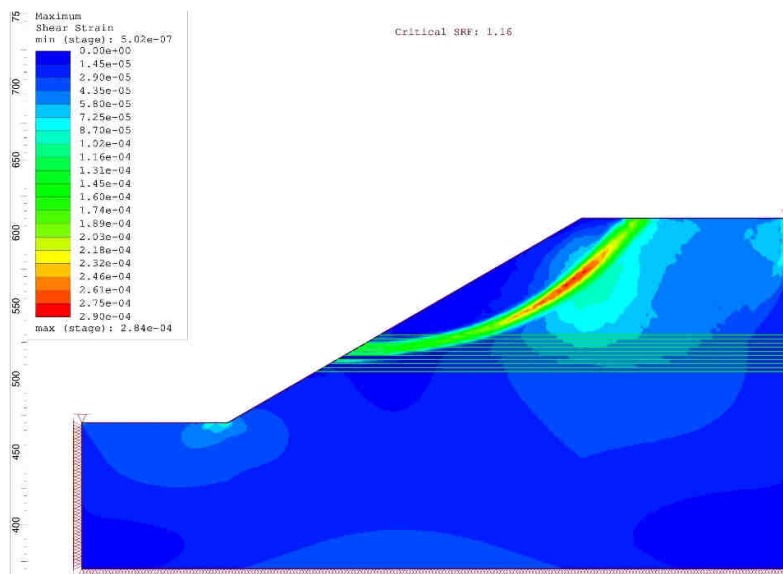
Анализом резултата прорачуна стабилности косине без ТЗ, слика 88, се може уочити да до концентрације напона и појаве лома долази само у материјалу АД и вредност фактора сигурности износи  $F_s=1,69$ . На слици 89, где су приказани резултати прорачуна стабилности косине са ТЗ, се може уочити да до концентрације напона и појаве лома долази у материјалима од 30-100% АД и завршава се у материјалу који је описан као Композит 3 (30% АД), при чему вредност фактора сигурности износи  $F_s=1,63$ . Јасно се

може уочити да разлика (са и без транзиционе зоне) у вредности фактора сигурности постоји, али да је скоро занемарљива.

Резултати анализе прорачуна стабилности косине нагиба  $\alpha_z = 30^\circ$  са и без ТЗ, као и положај лома на карактеристичном профилу при растојању границе Д и АД од горње равни косине од 80 m су приказани на сликама 90 и 91.



Слика 90. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 80 m ( $\alpha_z=30^\circ$ - без ТЗ)

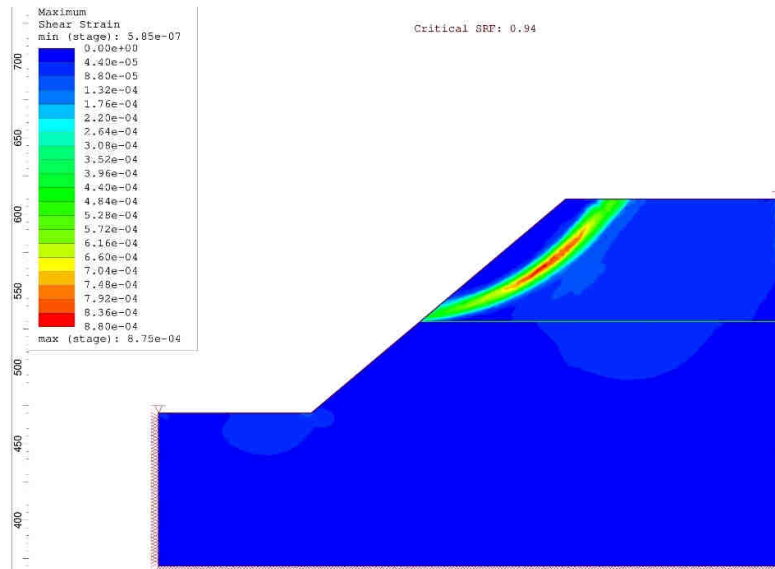


Слика 91. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 80 m ( $\alpha_z=30^\circ$ - са ТЗ)

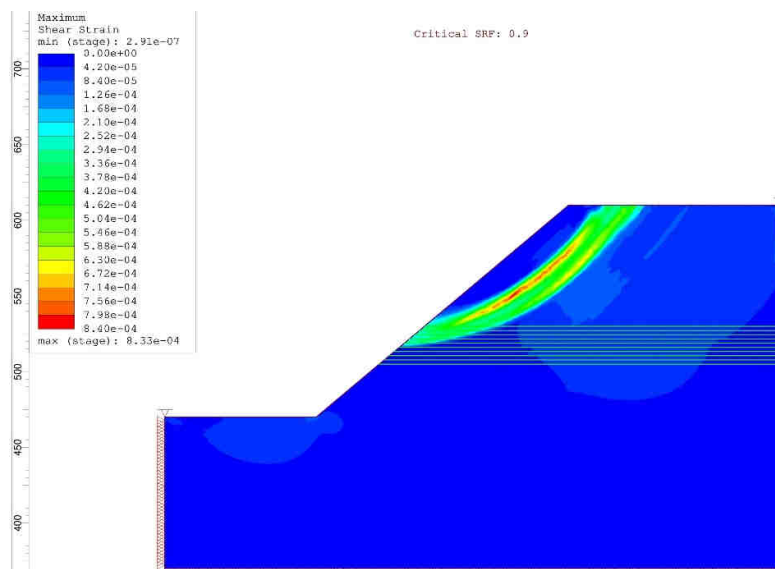
Анализом резултата прорачуна стабилности косине без ТЗ, слика 90, се може уочити да до концентрације напона и појаве лома долази само у материјалу АД и вредност фактора сигурности износи  $F_s=1,2$ . У оваквом случају, да би се повећала вредност фактора сигурности, потребно је ублажити косину од контакта материјала Д и АД до горње равни косине са кораком од по  $2^\circ$ . На слици 91, где су приказани резултати прорачуна стабилности косине са ТЗ, се може уочити да до концентрације напона и појаве лома долази у материјалима од 30-100% АД и завршава се у материјалу који је

описан као Композит 3 (30% АД), при чему вредност фактора сигурности износи  $F_s=1,16$ . У оваквом случају, да би се повећала вредност фактора сигурности, потребно је ублажити косину од контакта материјала Композит 4 и Композит 5 до горње равни косине са кораком од по  $2^\circ$ . Јасно се може уочити да разлика (са и без транзиционе зоне) у вредности фактора сигурности постоји, али да је скоро занемарљива.

Резултати анализе прорачуна стабилности косине нагиба  $\alpha_z = 40^\circ$  са и без ТЗ, као и положај лоба на карактеристичном профилу при растојању границе Д и АД од горње равни косине од 80 m су приказани на сликама 92 и 93.



Слика 92. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 80 m ( $\alpha_z=40^\circ$ - без ТЗ)



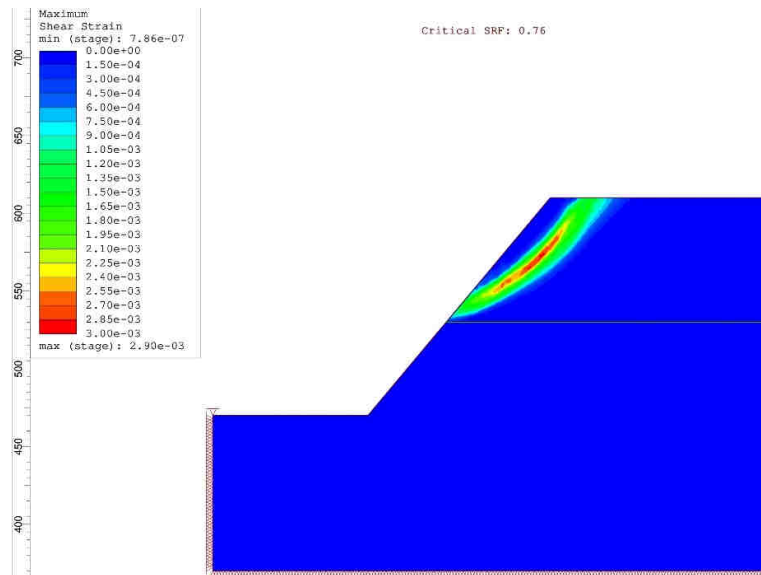
Слика 93. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 80 m ( $\alpha_z=40^\circ$ - са ТЗ)

Анализом резултата прорачуна стабилности косине без ТЗ, слика 92, се може уочити да до концентрације напона и појаве лоба долази само у материјалу АД и вредност фактора сигурности износи  $F_s=0,94$ . У оваквом случају, да би се повећала вредност фактора сигурности, потребно је ублажити косину од контакта материјала Д и АД до

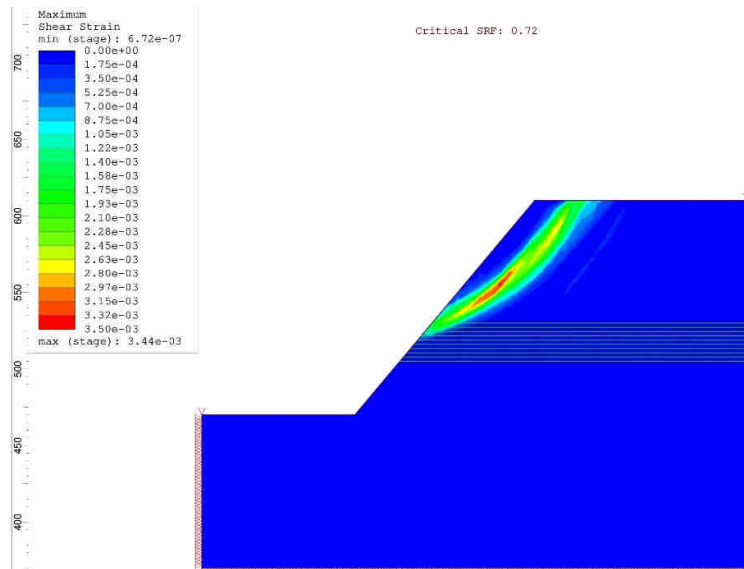


горње равни косине са кораком од по  $2^\circ$ . На слици 93, где су приказани резултати прорачуна стабилности косине са ТЗ, се може уочити да до концентрације напона и појаве лома долази у материјалима од 50-100% АД и завршава се у материјалу који је описан као Композит 5 (50% АД), при чему вредност фактора сигурности износи  $F_s=0,9$ . У оваквом случају, да би се повећала вредност фактора сигурности, потребно је ублажити косину од контакта материјала Композит 4 и Композит 5 до горње равни косине са кораком од по  $2^\circ$ . Јасно се може уочити да разлика (са и без транзиционе зоне) у вредности фактора сигурности постоји, али да је скоро занемарљива.

Резултати анализе прорачуна стабилности косине нагиба  $\alpha_z = 50^\circ$  са и без ТЗ, као и положај лома на карактеристичном профилу при растојању границе Д и АД од горње равни косине од 80 m су приказани на сликама 94 и 95.



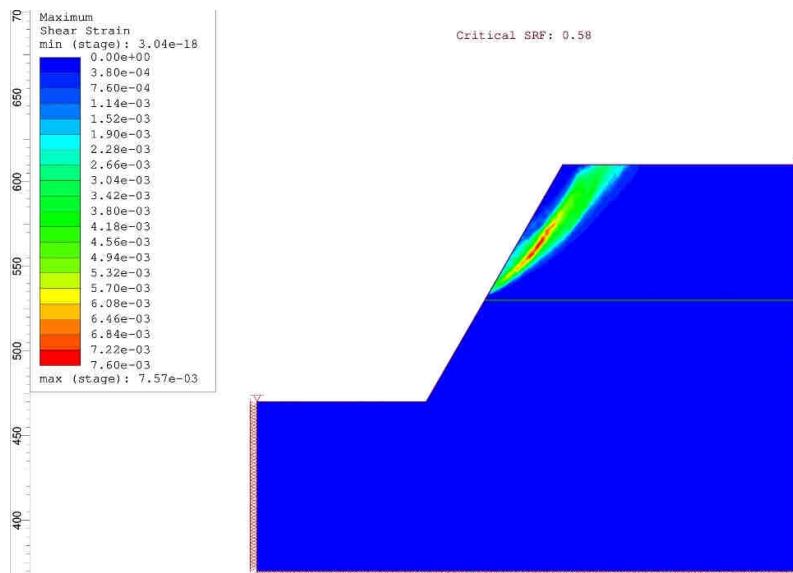
Слика 94. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 80 m ( $\alpha_z=50^\circ$ - без ТЗ)



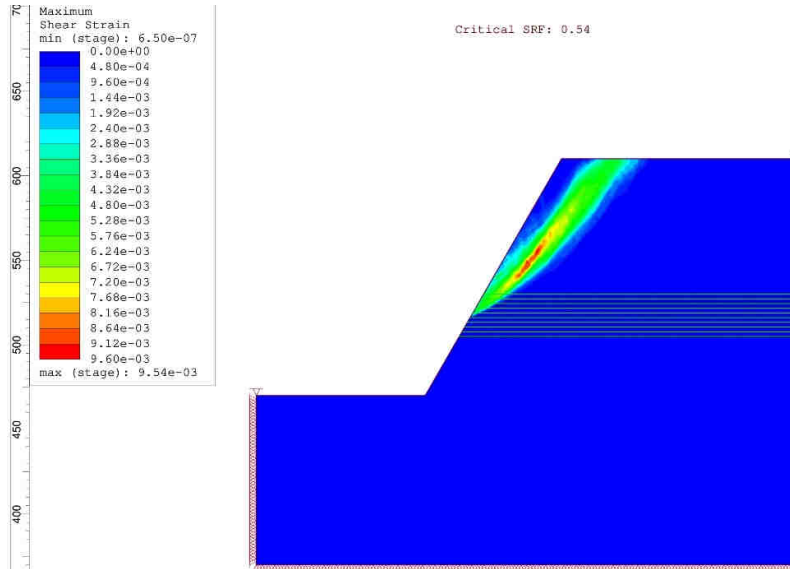
Слика 95. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 80 m ( $\alpha_z=50^\circ$ - са ТЗ)

Анализом резултата прорачуна стабилности косине без ТЗ, слика 94, се може уочити да до концентрације напона и појаве лома долази само у материјалу АД и вредност фактора сигурности износи  $F_s=0,76$ . У оваквом случају, да би се повећала вредност фактора сигурности, потребно је ублажити косину од контакта материјала Д и АД до горње равни косине са кораком од по  $2^\circ$ . На слици 95, где су приказани резултати прорачуна стабилности косине са ТЗ, се може уочити да до концентрације напона и појаве лома долази у материјалима од 70-100% АД и завршава се у материјалу који је описан као Композит 7 (70% АД), при чему вредност фактора сигурности износи  $F_s=0,72$ . У оваквом случају, да би се повећала вредност фактора сигурности, потребно је ублажити косину од контакта материјала Композит 4 и Композит 5 до горње равни косине са кораком од по  $2^\circ$ . Јасно се може уочити да разлика (са и без транзиционе зоне) у вредности фактора сигурности постоји, али да је скоро занемарљива.

Резултати анализе прорачуна стабилности косине нагиба  $\alpha_z = 60^\circ$  са и без ТЗ, као и положај лома на карактеристичном профилу при растојању границе Д и АД од горње равни косине од 80 m су приказани на сликама 96 и 97.



Слика 96. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 80 m ( $\alpha_z=60^\circ$ - без ТЗ)



Слика 97. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 80 m ( $\alpha_z=60^\circ$ - са T3)

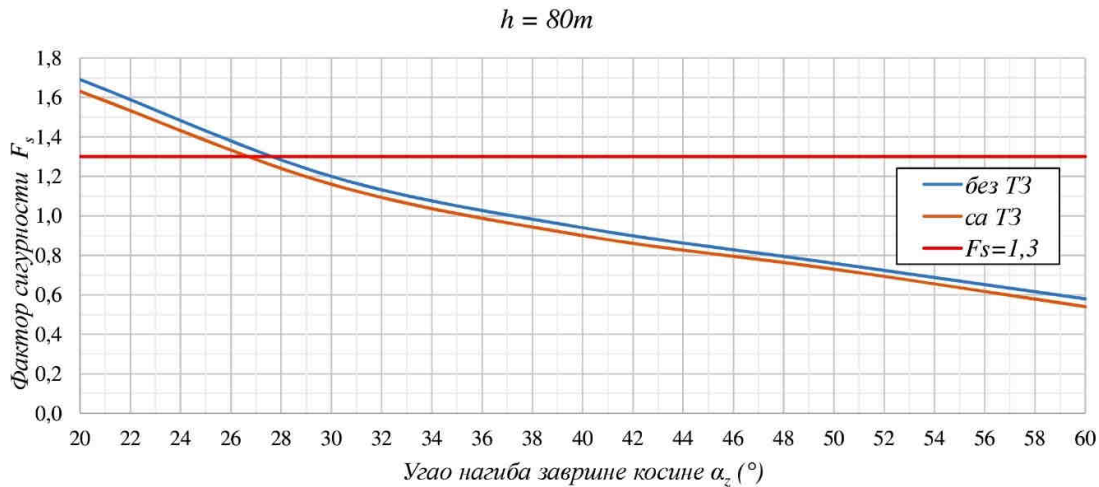
Анализом резултата прорачуна стабилности косине без T3, слика 96, се може уочити да до концентрације напона и појаве лома долази само у материјалу АД и вредност фактора сигурности износи  $F_s=0,58$ . У оваквом случају, да би се повећала вредност фактора сигурности, потребно је ублажити косину од контакта материјала Д и АД до горње равни косине са кораком од по  $2^\circ$ . На слици 97, где су приказани резултати прорачуна стабилности косине са T3, се може уочити да до концентрације напона и појаве лома долази у материјалима од 50-100% АД и завршава се у материјалу који је описан као Композит 5 (50% АД), при чему вредност фактора сигурности износи  $F_s=0,54$ . У оваквом случају, да би се повећала вредност фактора сигурности, потребно је ублажити косину од контакта материјала Композит 4 и Композит 5 до горње равни косине са кораком од по  $2^\circ$ . Јасно се може уочити да разлика (са и без транзиционе зоне) у вредности фактора сигурности постоји, али да је скоро занемарљива.

На основу утврђених вредности фактора сигурности (табела 16) при различитим вредностима углова нагиба завршне косине конструисан је дијаграм зависности приказан на слици 98. За вредност фактора сигурности  $F_s=1,3$  одређен је максимални угао нагиба анализираних косине.

Табела 16. Вредности фактора сигурности на растојању границе од 80 m

Угао нагиба завршне косине $\alpha_z$ ( $^\circ$ )	Фактор сигурности - $F_s$	
	без T3*	са T3
20	1,69	1,63
30	1,20	1,16
40	0,94	0,90
50	0,76	0,73
60	0,58	0,54

\*Напомена: T3- транзициона зона



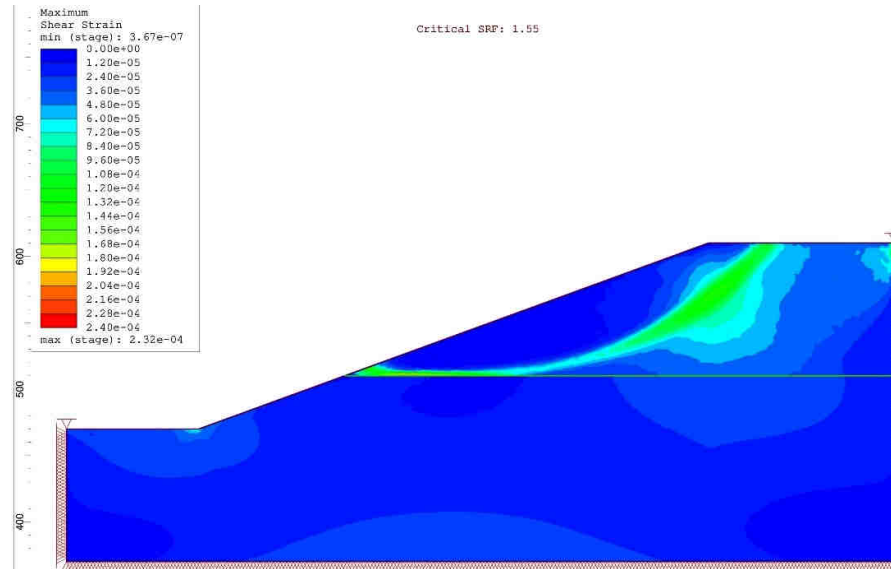
Слика 98. Упоредни приказ зависности  $F_s$  и  $\alpha_z$  на растојању прелаза од 80 m

Увидом у упоредни приказ зависности фактора сигурности  $F_s$  од угла нагиба завршне косине  $\alpha_z$ , слика 98, може се уочити да максимална вредност угла нагиба завршне косине износи  $\alpha_z=27,6^\circ$  на геомеханичким моделима без коришћења материјала транзиционе зоне, док је  $\alpha_z=26,7^\circ$  на моделима са коришћењем материјала транзиционе зоне. Стога се може закључити да, на растојању границе Д и АД од 80 m од горње равни косине, постоји разлика између модела са и без транзиционе зоне која утиче на геометријске елементе косине, односно максимални угао нагиба завршне косине и при  $F_s=1,3$  она износи  $0,9^\circ$ .

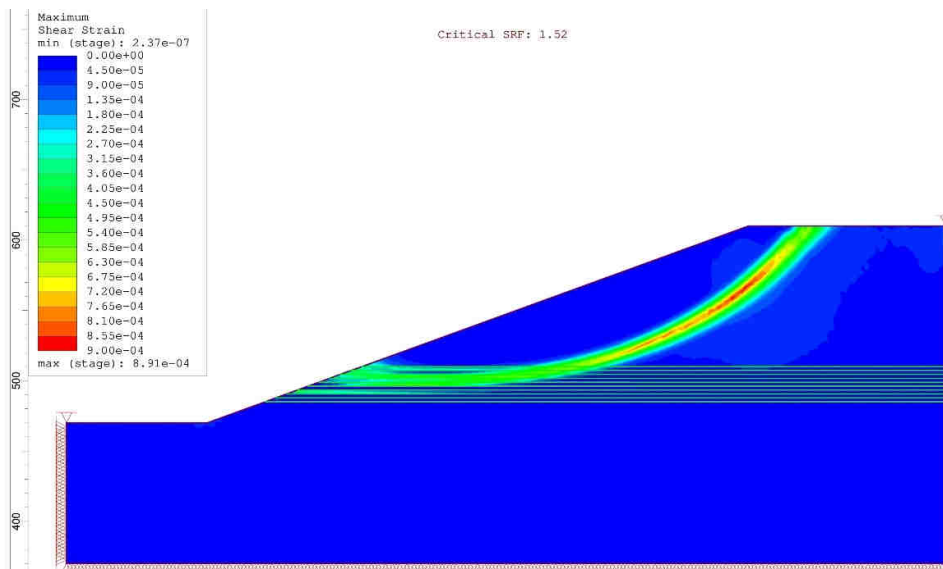
## 6.7 Анализа стабилности косина на растојању границе од 100 m

Анализа стабилности косина је извршена на припремљеним геомеханичким моделима за два случаја и то: са и без транзиционе зоне (ТЗ). Анализа је извршена са променом угла нагиба завршне косине тако да се на растојању границе Д и АД од горње равни косине од 100 m утврде вредности фактора сигурности ( $F_s$ ), помоћу којих ће се одредити максимални угао нагиба косине, слике 99-108.

Резултати анализе прорачуна стабилности косине нагиба  $\alpha_z = 20^\circ$  са и без ТЗ, као и положај лома на карактеристичном профилу при растојању границе Д и АД од горње равни косине од 100 m су приказани на сликама 99 и 100.



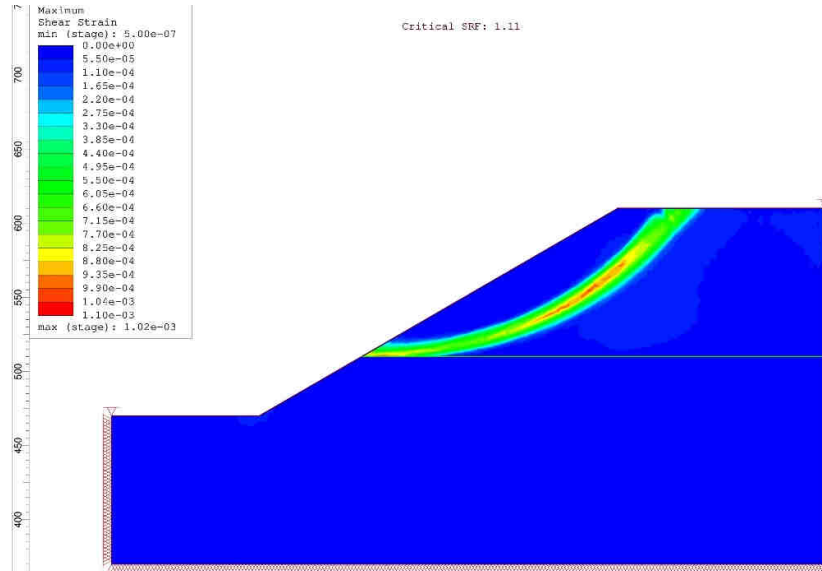
Слика 99. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 100 m ( $\alpha_z=20^\circ$ - без ТЗ)



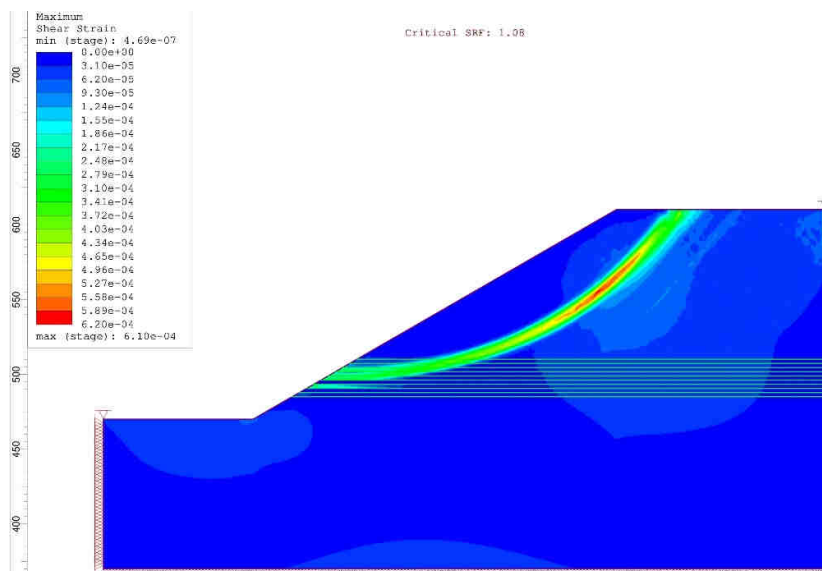
Слика 100. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 100 m ( $\alpha_z=20^\circ$ - са ТЗ)

Анализом резултата прорачуна стабилности косине без ТЗ, слика 99, се може уочити да до концентрације напона и појаве лома долази само у материјалу АД и вредност фактора сигурности износи  $F_s=1,55$ . На слици 100, где су приказани резултати прорачуна стабилности косине са ТЗ, се може уочити да до концентрације напона и појаве лома долази у материјалима од 30-100% АД и завршава се у материјалу који је описан као Композит 3 (30% АД), при чему вредност фактора сигурности износи  $F_s=1,52$ . Јасно се може уочити да разлика (са и без транзиционе зоне) у вредности фактора сигурности постоји, али да је скоро занемарљива.

Резултати анализе прорачуна стабилности косине нагиба  $\alpha_z = 30^\circ$  са и без ТЗ, као и положај лома на карактеристичном профилу при растојању границе Д и АД од горње равни косине од 100 m су приказани на сликама 101 и 102.



Слика 101. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 100 m ( $\alpha_z=30^\circ$ - без T3)

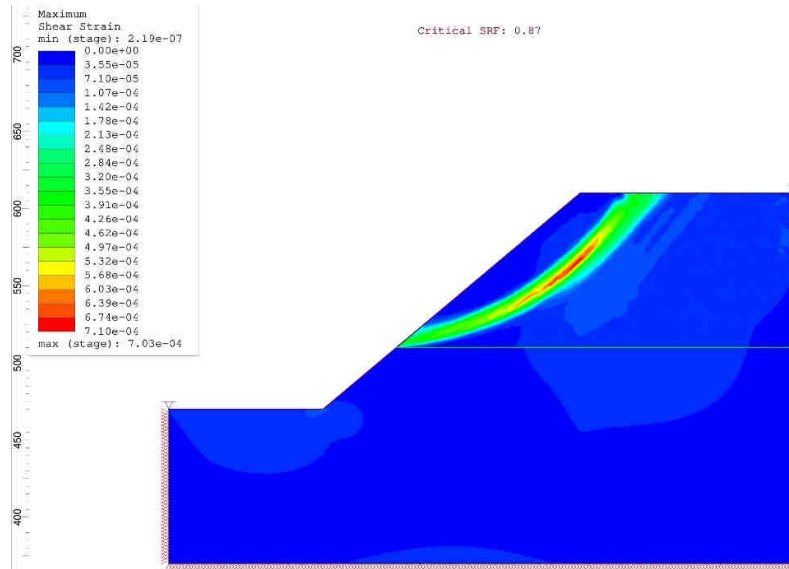


Слика 102. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 100 m ( $\alpha_z=30^\circ$ - са T3)

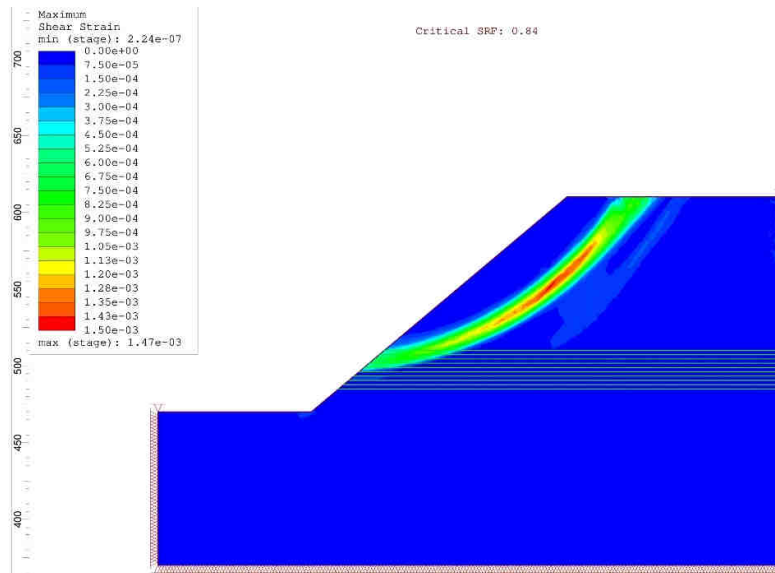
Анализом резултата прорачуна стабилности косине без T3, слика 101, се може уочити да до концентрације напона и појаве лома долази само у материјалу АД и вредност фактора сигурности износи  $F_s=1,11$ . У оваквом случају, да би се повећала вредност фактора сигурности, потребно је ублажити косину од контакта материјала Д и АД до горње равни косине са кораком од по  $2^\circ$ . На слици 102, где су приказани резултати прорачуна стабилности косине са T3, се може уочити да до концентрације напона и појаве лома долази у материјалима од 30-100% АД и завршава се у материјалу који је описан као Композит 3 (30% АД), при чему вредност фактора сигурности износи  $F_s=1,08$ . У оваквом случају, да би се повећала вредност фактора сигурности, потребно је ублажити косину од контакта материјала Композит 2 и Композит 3 до горње равни косине са кораком од по  $2^\circ$ . Јасно се може уочити да разлика (са и без транзиционе зоне) у вредности фактора сигурности постоји, али да је скоро занемарљива.



Резултати анализе прорачуна стабилности косине нагиба  $\alpha_z = 40^\circ$  са и без ТЗ, као и положај лома на карактеристичном профилу при растојању границе Д и АД од горње равни косине од 100 m су приказани на сликама 103 и 104.



Слика 103. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 100 m ( $\alpha_z=40^\circ$ - без ТЗ)

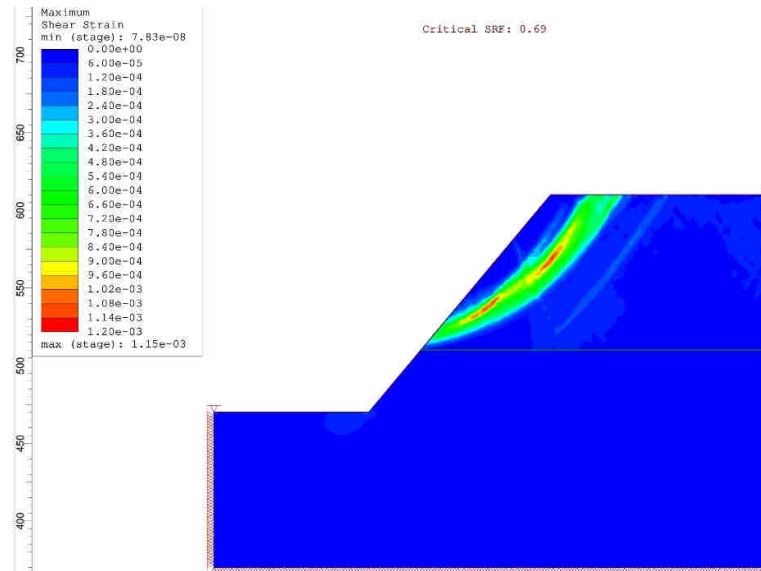


Слика 104. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 100 m ( $\alpha_z=40^\circ$ - са ТЗ)

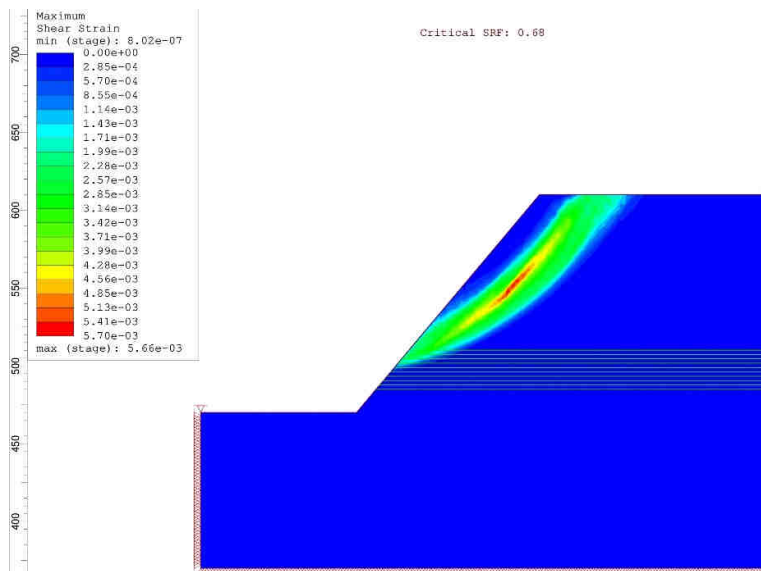
Анализом резултата прорачуна стабилности косине без ТЗ, слике 103, се може уочити да до лома долази само у материјалу АД и вредност фактора сигурности износи  $F_s=0,87$ . У оваквом случају, да би се повећала вредност фактора сигурности, потребно је ублажити косину од контакта материјала Д и АД до горње равни косине са кораком од по  $2^\circ$ . На слици 104, где су приказани резултати прорачуна стабилности косине са ТЗ, се може уочити да до концентрације напона и појаве лома долази у материјалима од 50-100% АД и завршава се у материјалу који је описан као Композит 5 (50% АД), при чему вредност фактора сигурности износи  $F_s=0,84$ . У оваквом случају, да би се повећала вредност фактора сигурности, потребно је ублажити косину од контакта

материјала Композит 4 и Композит 5 до горње равни косине са кораком од по  $2^\circ$ . Јасно се може уочити да разлика (са и без транзиционе зоне) у вредности фактора сигурности постоји, али да је скоро занемарљива.

Резултати анализе прорачуна стабилности косине нагиба  $\alpha_z = 50^\circ$  са и без ТЗ, као и положај лома на карактеристичном профилу при растојању границе Д и АД од горње равни косине од 100 m су приказане на сликама 105 и 106.



Слика 105. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 100 m ( $\alpha_z=50^\circ$ - без ТЗ)

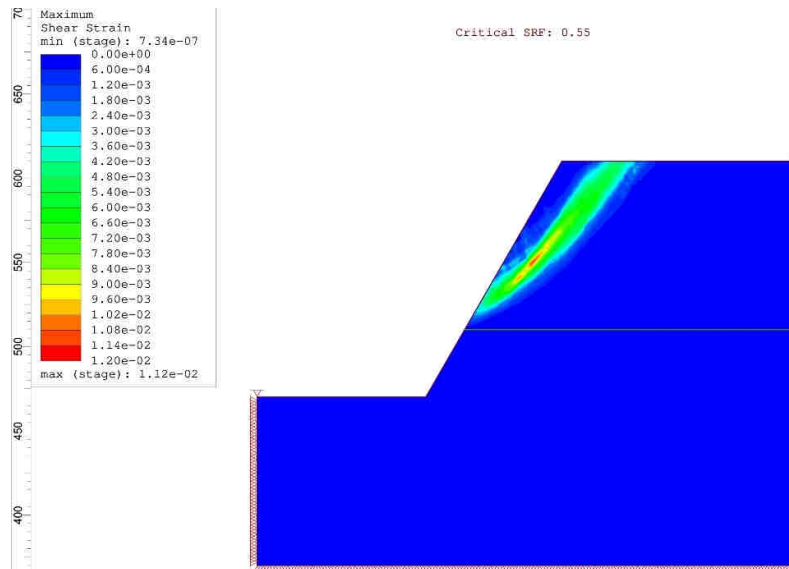


Слика 106. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 100 m ( $\alpha_z=50^\circ$ - са ТЗ)

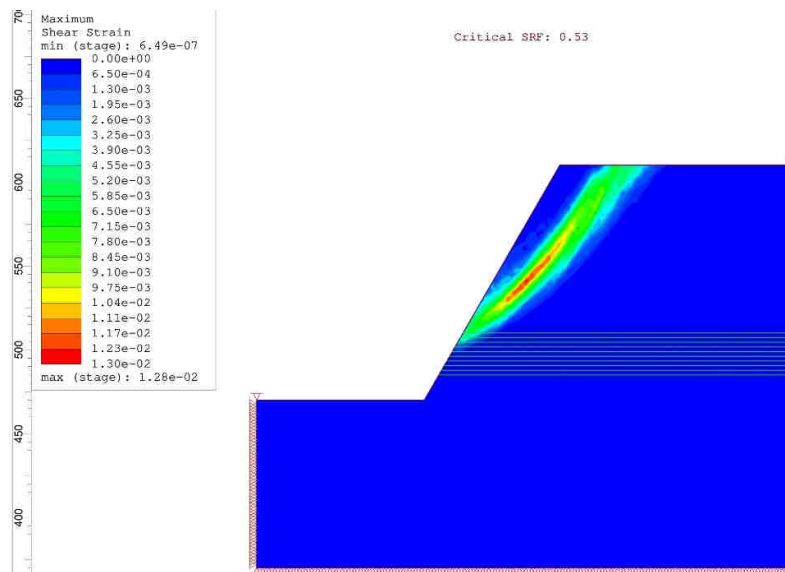
Анализом резултата прорачуна стабилности косине без ТЗ, слика 105, се може уочити да до концентрације напона и појаве лома долази само у материјалу АД и вредност фактора сигурности износи  $F_s=0,69$ . У оваквом случају, да би се повећала вредност фактора сигурности, потребно је ублажити косину од контакта материјала Д и АД до горње равни косине са кораком од по  $2^\circ$ . На слици 106, где су приказани резултати прорачуна стабилности косине са ТЗ, се може уочити да до концентрације напона и

појаве лома долази у материјалима од 60-100% АД и завршава се у материјалу који је описан као Композит 6 (60% АД), при чему вредност фактора сигурности износи  $F_s=0,68$ . У оваквом случају, да би се повећала вредност фактора сигурности, потребно је ублажити косину од контакта материјала Композит 5 и Композит 6 до горње равни косине са кораком од по  $2^\circ$ . Јасно се може уочити да разлика (са и без транзиционе зоне) у вредности фактора сигурности постоји, али да је скоро занемарљива.

Резултати анализе прорачуна стабилности косине нагиба  $\alpha_z = 60^\circ$  са и без ТЗ, као и положај лома на карактеристичном профилу при растојању границе Д и АД од горње равни косине од 100 m су приказани на сликама 107 и 108.



Слика 107. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 100 m ( $\alpha_z=60^\circ$ - без ТЗ)



Слика 108. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 100 m ( $\alpha_z=60^\circ$ - са ТЗ)

Анализом резултата прорачуна стабилности косине без ТЗ, слика 107, се може уочити да до концентрације напона и појаве лома долази само у материјалу АД и вредност

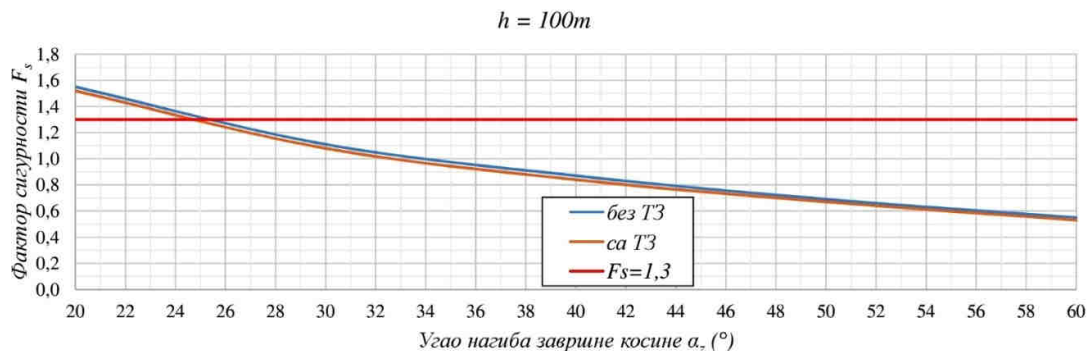
фактора сигурности износи  $F_s=0,55$ . У оваквом случају, да би се повећала вредност фактора сигурности, потребно је ублажити косину од контакта материјала Д и АД до горње равни косине са кораком од по  $2^\circ$ . На слици 108, где су приказани резултати прорачуна стабилности косине а ТЗ, се може уочити да до концентрације напона и појаве лома долази у материјалима од 70-100% АД и завршава се у материјалу који је описан као Композит 7 (70% АД), при чему вредност фактора сигурности износи  $F_s=0,53$ . У оваквом случају, да би се повећала вредност фактора сигурности, потребно је ублажити косину од контакта материјала Композит 6 и Композит 7 до горње равни косине са кораком од по  $2^\circ$ . Јасно се може уочити да разлика (са и без транзиционе зоне) у вредности фактора сигурности постоји, али да је скоро занемарљива.

На основу утврђених вредности фактора сигурности (табела 17) при различитим вредностима углова нагиба завршне косине конструисан је дијаграм зависности приказан на слици 109. За вредност фактора сигурности  $F_s=1,3$  одређен је максимални угао нагиба анализираних косине.

Табела 17. Вредности фактора сигурности на растојању границе од 100 m

Угао нагиба завршне косине $\alpha_z$ ( $^\circ$ )	Фактор сигурности - $F_s$	
	без ТЗ	са ТЗ
20	1,55	1,52
30	1,11	1,08
40	0,87	0,84
50	0,69	0,67
60	0,55	0,53

Напомена: ТЗ- транзициона зона



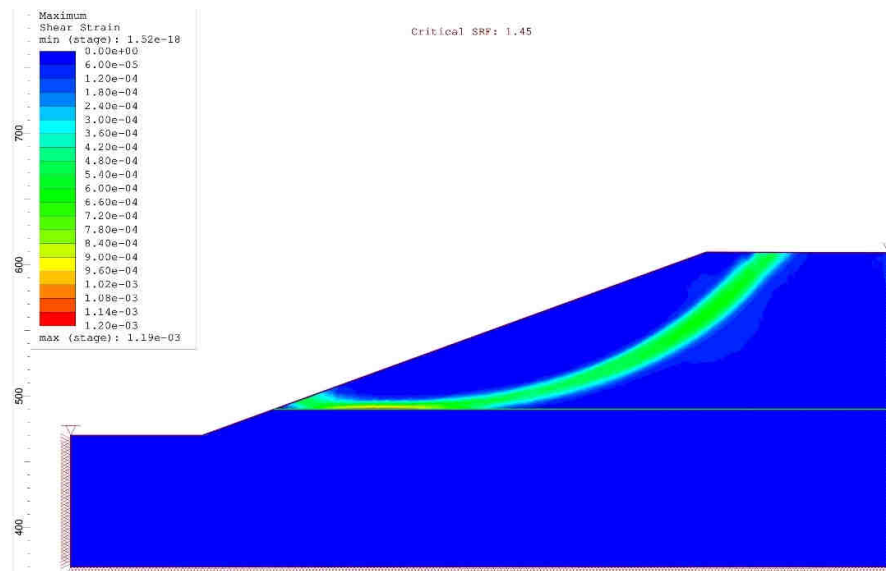
Слика 109. Упоредни приказ зависности  $F_s$  и  $\alpha_z$  на растојању прелаза од 100 m

Увидом у упоредни приказ зависности фактора сигурности  $F_s$  од угла нагиба завршне косине  $\alpha_z$ , слика 109, може се уочити да максимална вредност угла нагиба завршне косине износи  $\alpha_z=25,4^\circ$  на геомеханичким моделима без коришћења материјала транзиционе зоне, док је  $\alpha_z=24,7^\circ$  на моделима са коришћењем материјала транзиционе зоне. Стога се може закључити да, на растојању границе Д и АД од 100 m од горње равни косине, постоји разлика између модела са и без транзиционе зоне која утиче на геометријске елементе косине, односно максимални угао нагиба завршне косине и при  $F_s=1,3$  она износи  $0,7^\circ$ .

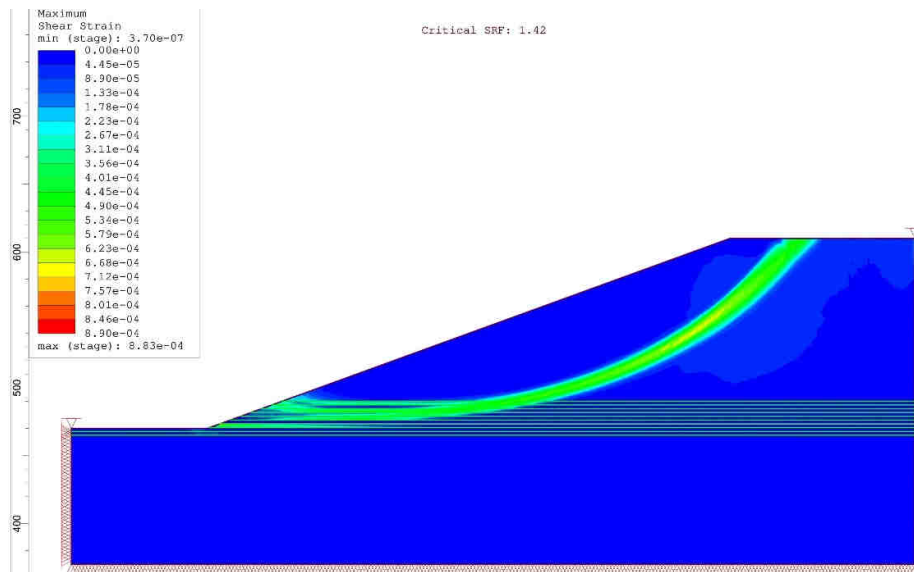
## 6.8 Анализа стабилности косина на растојању границе од 120 m

Анализа стабилности косина је извршена на припремљеним геомеханичким моделима за два случаја и то: са и без транзиционе зоне (ТЗ). Анализа је извршена са променом угла нагиба завршне косине тако да се на растојању границе Д и АД од горње равни косине од 120 m утврде вредности фактора сигурности ( $F_s$ ), помоћу којих ће се одредити максимални угао нагина косине, слике 110-119.

Резултати анализе прорачуна стабилности косине нагиба  $\alpha_z = 20^\circ$  са и без ТЗ, као и положај лома на карактеристичном профилу при растојању границе Д и АД од горње равни косине од 120 m су приказани на сликама 110 и 111.



Слика 110. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 120 m ( $\alpha_z=20^\circ$ - без ТЗ)

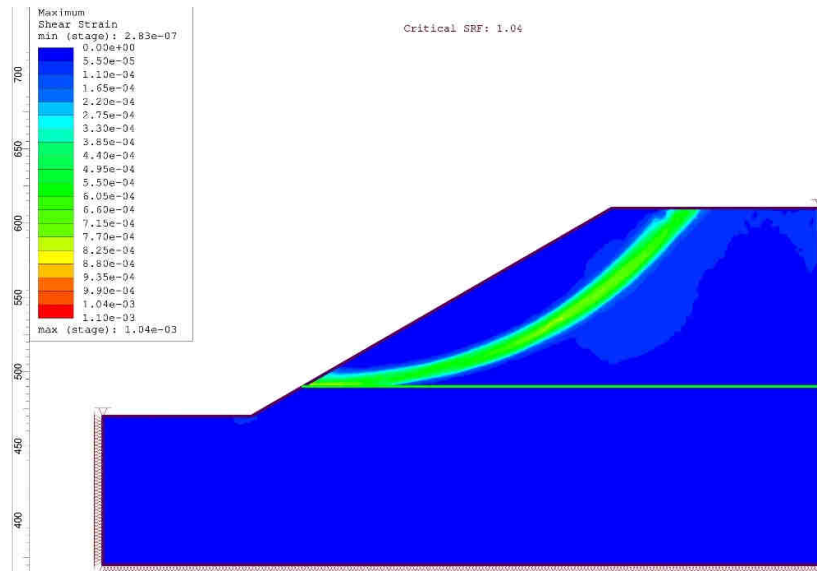


Слика 111. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 120 m ( $\alpha_z=20^\circ$ - са ТЗ)

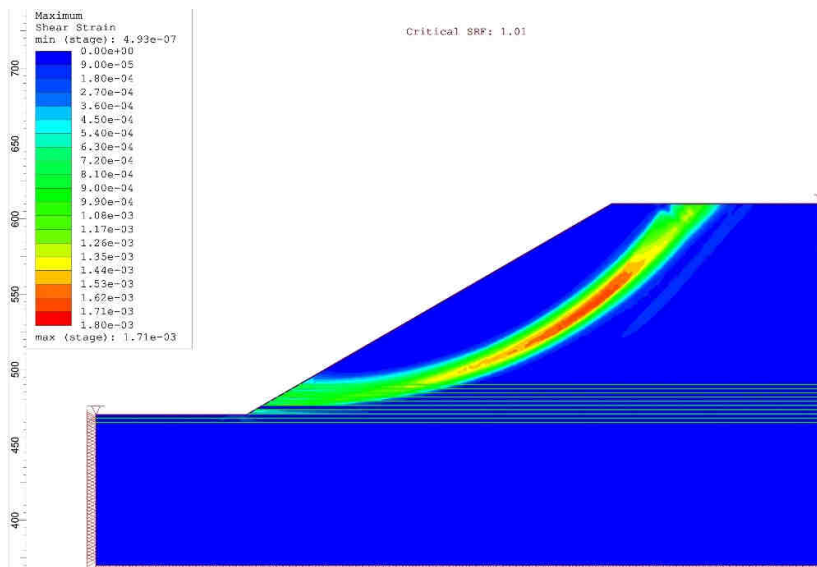
Анализом резултата прорачуна стабилности косине без ТЗ, слика 110, се може уочити да до концентрације напона и појаве лома долази само у материјалу АД и вредност фактора сигурности износи  $F_s=1,45$ . На слици 111, где су приказани резултати

прорачуна стабилности косине са ТЗ, се може уочити да до концентрације напона и појаве лома долази у материјалима од 30-100% АД и завршава се у материјалу који је описан као Композит 3 (30% АД), при чему вредност фактора сигурности износи  $F_s=1,42$ . Јасно се може уочити да разлика (са и без транзиционе зоне) у вредности фактора сигурности постоји, али да је скоро занемарљива.

Резултати анализе прорачуна стабилности косине нагиба  $\alpha_z = 30^\circ$  са и без ТЗ, као и положај лома на карактеристичном профилу при растојању границе Д и АД од горње равни косине од 120 m су приказани на сликама 112 и 113.



Слика 112. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 120 m ( $\alpha_z=30^\circ$ - без ТЗ)



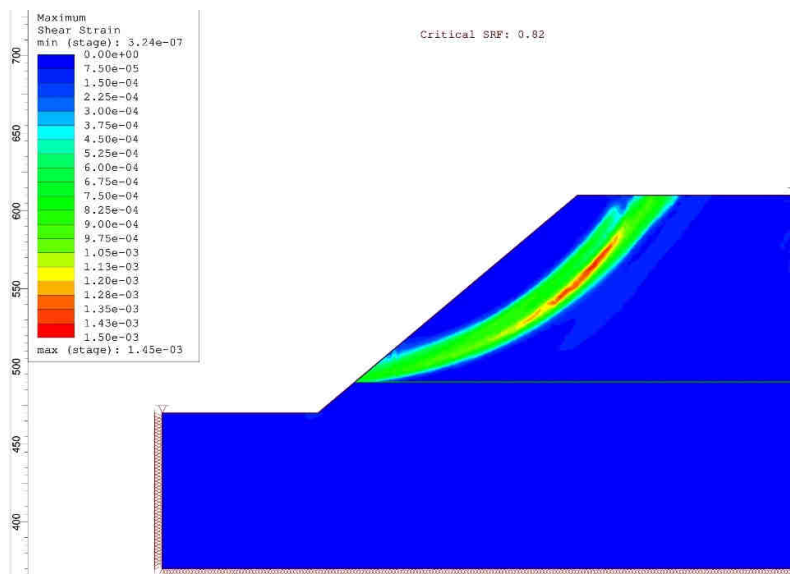
Слика 113. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 120 m ( $\alpha_z=30^\circ$ - са ТЗ)

Анализом резултата прорачуна стабилности косине без ТЗ, слика 112, се може уочити да до концентрације напона и појаве лома долази само у материјалу АД и вредност фактора сигурности износи  $F_s=1,04$ . У оваквом случају, да би се повећала вредност фактора сигурности, потребно је ублажити косину од контакта материјала Д и АД до

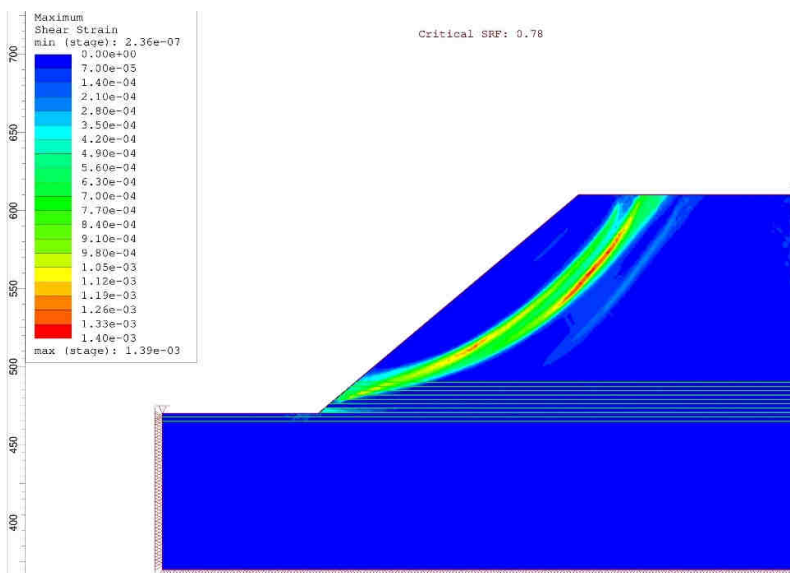


горње равни косине са кораком од по  $2^\circ$ . На слици 113, где су приказани резултати прорачуна стабилности косине са ТЗ, се може уочити да до концентрације напона и појаве лома долази у ножици косине у материјалима од 30-100% АД и завршава се у материјалу који је описан као Композит 3 (30% АД), при чему вредност фактора сигурности износи  $F_s=1,01$ . У оваквом случају, да би се повећала вредност фактора сигурности, потребно је ублажити косину од контакта материјала Композит 2 и Композит 3 до горње равни косине са кораком од по  $2^\circ$ . Јасно се може уочити да разлика (са и без транзиционе зоне) у вредности фактора сигурности постоји, али да је скоро занемарљива.

Резултати анализе прорачуна стабилности косине нагиба  $\alpha_z = 40^\circ$  са и без ТЗ, као и положај лома на карактеристичном профилу при растојању границе Д и АД од горње равни косине од 120 m су приказани на сликама 114 и 115.



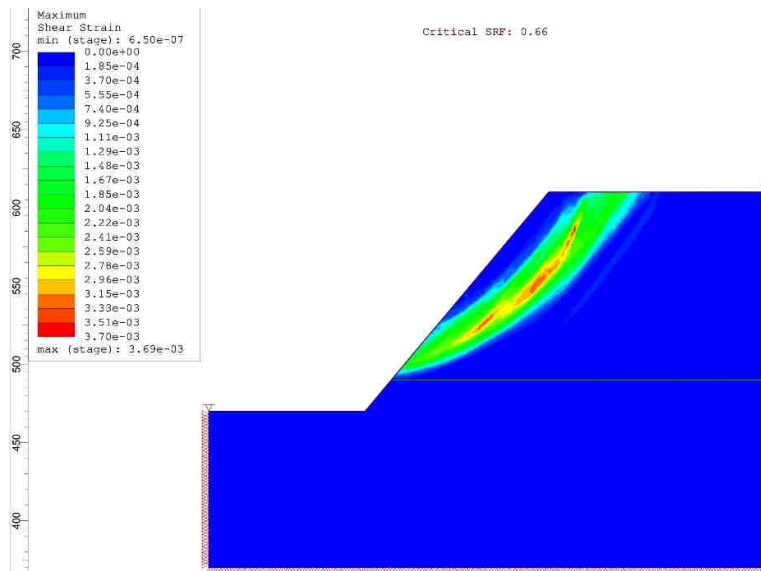
Слика 114. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 120 m ( $\alpha_z=40^\circ$ - без ТЗ)



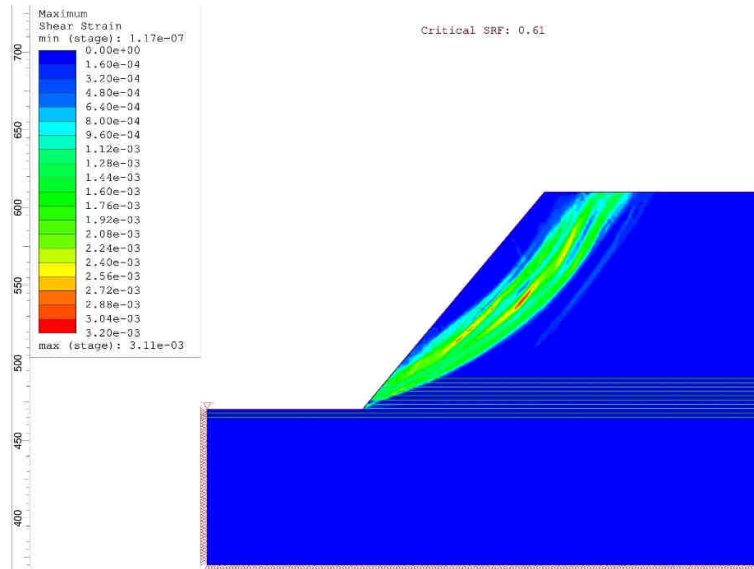
Слика 115. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 120 m ( $\alpha_z=40^\circ$ - са ТЗ)

Анализом резултата прорачуна стабилности косине без ТЗ, слика 114, се може уочити да до концентрације напона и појаве лома долази само у материјалу АД и вредност фактора сигурности износи  $F_s=0,82$ . У оваквом случају, да би се повећала вредност фактора сигурности, потребно је ублажити косину од контакта материјала Д и АД до горње равни косине са кораком од по  $2^\circ$ . На слици 115, где су приказани резултати прорачуна стабилности косине са ТЗ, се може уочити да до концентрације напона и појаве лома долази у ножици косине у материјалима од 30-100% АД и завршава се у материјалу који је описан као Композит 3 (30% АД), при чему вредност фактора сигурности износи  $F_s=0,78$ . У оваквом случају, да би се повећала вредност фактора сигурности, потребно је ублажити косину од контакта материјала Композит 2 и Композит 3 до горње равни косине са кораком од по  $2^\circ$ . Јасно се може уочити да разлика (са и без транзиционе зоне) у вредности фактора сигурности постоји, али да је скоро занемарљива.

Резултати анализе прорачуна стабилности косине нагиба  $\alpha_z = 50^\circ$  са и без ТЗ, као и положај лома на карактеристичном профилу при растојању границе Д и АД од горње равни косине од 120 m су приказани на сликама 116 и 117.



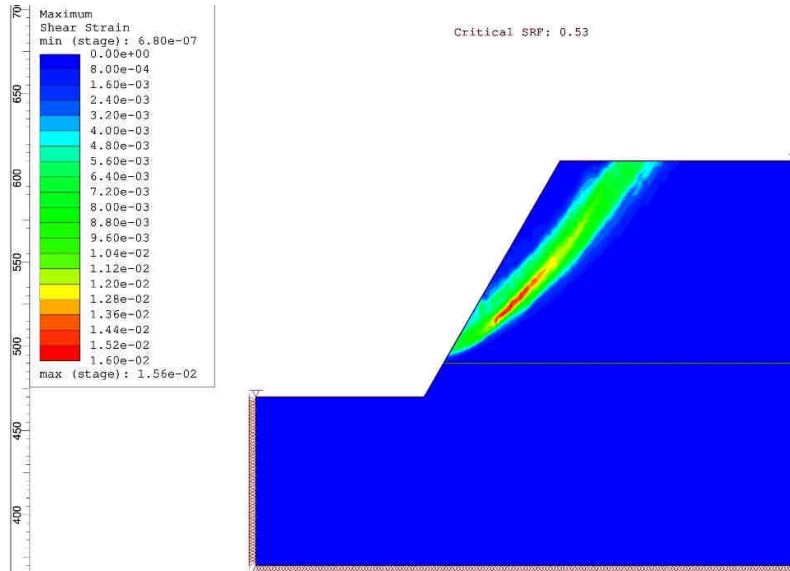
Слика 116. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 120 m ( $\alpha_z=50^\circ$ - без ТЗ)



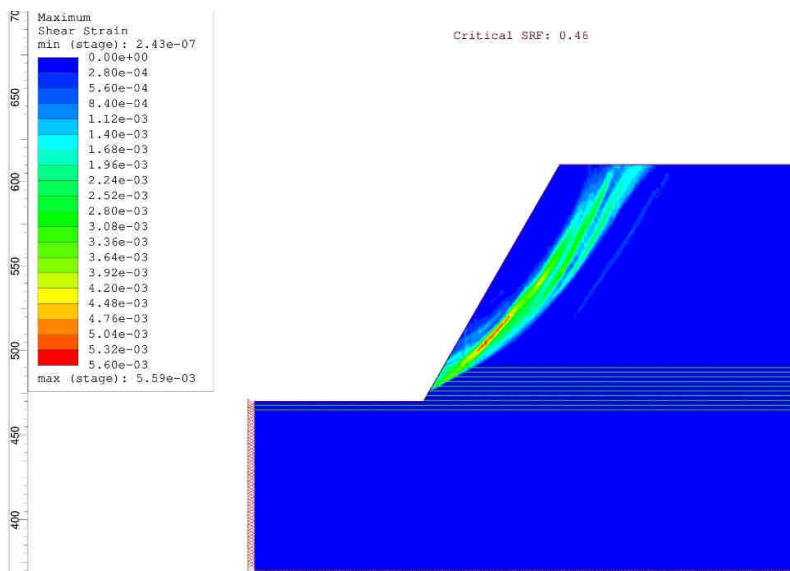
Слика 117. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 120 m ( $\alpha_z=50^\circ$ - са ТЗ)

Анализом резултата прорачуна стабилности косине без ТЗ, слика 117, се може уочити да до концентрације напона и појаве лома долази само у материјалу АД и вредност фактора сигурности износи  $F_s=0,66$ . У оваквом случају, да би се повећала вредност фактора сигурности, потребно је ублажити косину од контакта материјала Д и АД до горње равни косине са кораком од по  $2^\circ$ . На слици 118, где су приказани резултати прорачуна стабилности косине са ТЗ, се може уочити да до концентрације напона и појаве лома долази у ножици косине у материјалима од 30-100% АД и завршава се у материјалу који је описан као Композит 3 (30% АД), при чему вредност фактора сигурности износи  $F_s=0,61$ . У оваквом случају, да би се повећала вредност фактора сигурности, потребно је ублажити косину од контакта материјала Композит 2 и Композит 3 до горње равни косине са кораком од по  $2^\circ$ . Јасно се може уочити да разлика (са и без транзиционе зоне) у вредности фактора сигурности постоји, али да је скоро занемарљива.

Резултати анализе прорачуна стабилности косине нагиба  $\alpha_z = 60^\circ$  са и без ТЗ, као и положај лома на карактеристичном профилу при растојању границе Д и АД од горње равни косине од 120 m су приказани на сликама 118 и 119.



Слика 118. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 120 m ( $\alpha_z=60^\circ$ - без T3)



Слика 119. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 120 m ( $\alpha_z=60^\circ$ - са T3)

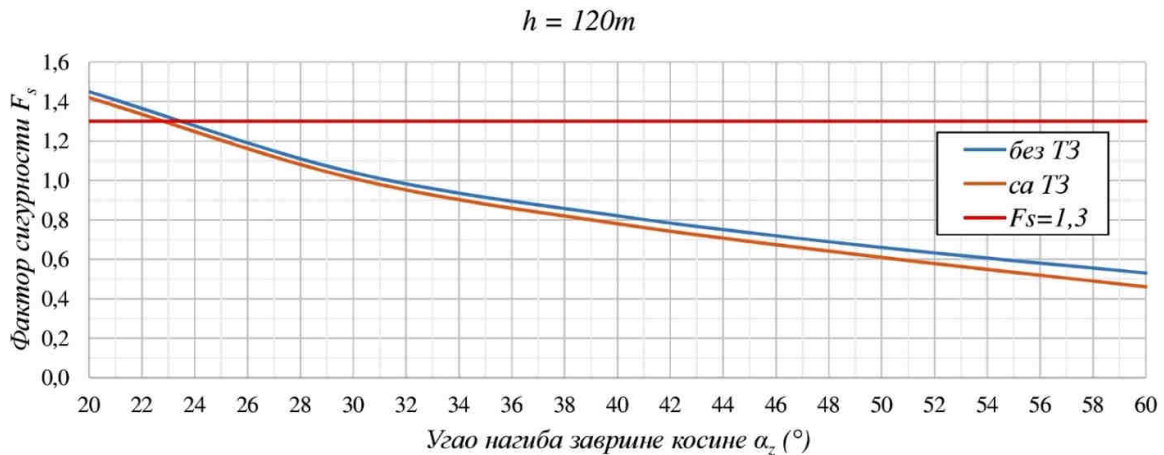
Анализом резултата прорачуна стабилности косине без T3, слика 118, се може уочити да до концентрације напона и појаве лома долази само у материјалу АД и вредност фактора сигурности износи  $F_s=0,53$ . У оваквом случају, да би се повећала вредност фактора сигурности, потребно је ублажити косину од контакта материјала Д и АД до горње равни косине са кораком од по  $2^\circ$ . На слици 119, где су приказани резултати прорачуна стабилности косине са T3, се може уочити да до концентрације напона и појаве лома долази у ножици косине у материјалима од 50-100% АД и завршава у материјалу који је описан као Композит 5 (50% АД), при чему вредност фактора сигурности износи  $F_s=0,46$ . У оваквом случају, да би се повећала вредност фактора сигурности, потребно је ублажити косину од контакта материјала Композит 2 и Композит 3 до горње равни косине са кораком од по  $2^\circ$ . Јасно се може уочити да разлика (са и без транзиционе зоне) у вредности фактора сигурности постоји, али да је скоро занемарљива.

На основу утврђених вредности фактора сигурности (табела 18) при различитим вредностима углова нагиба завршне косине конструисан је дијаграм зависности приказан на слици 120. За вредност фактора сигурности  $F_s=1,3$  одређен је максимални угао нагиба анализиране косине.

Табела 18. Вредности фактора сигурности на растојању границе од 120 m

Угао нагиба завршне косине $\alpha_z$ (°)	Фактор сигурности - $F_s$	
	без ТЗ*	са ТЗ
20	1,45	1,42
30	1,04	1,01
40	0,82	0,78
50	0,66	0,61
60	0,53	0,46

Напомена: ТЗ- транзициона зона



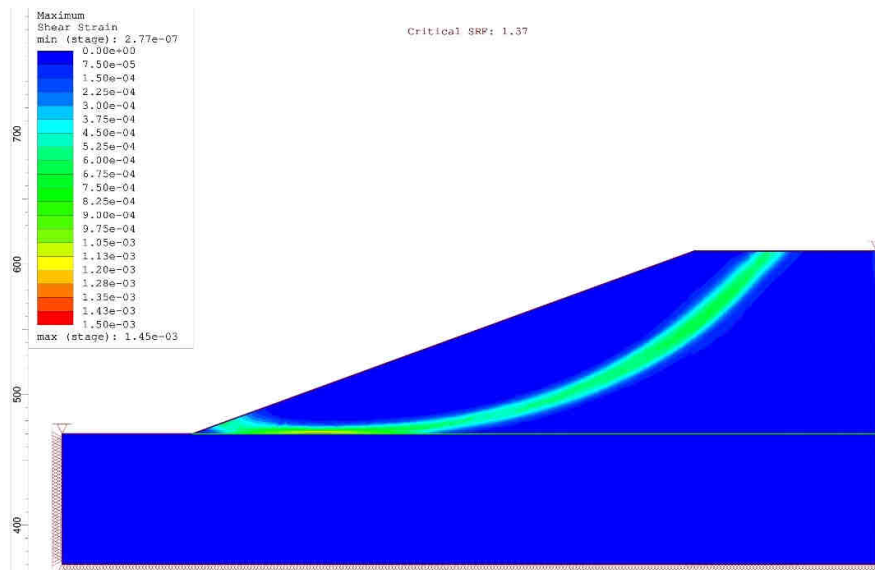
Слика 120. Упоредни приказ зависности  $F_s$  и  $\alpha_z$  на растојању прелаза од 120 m

Увидом у упоредни приказ зависности фактора сигурности  $F_s$  од угла нагиба завршне косине  $\alpha_z$ , слика 120, може се уочити да максимална вредност угла нагиба завршне косине износи  $\alpha_z=23,4^\circ$  на геомеханичким моделима без коришћења материјала транзиционе зоне, док је  $\alpha_z=22,8^\circ$  на моделима са коришћењем материјала транзиционе зоне. Стога се може закључити да, на растојању границе Д и АД од 120 m од горње равни косине, постоји разлика између модела са и без транзиционе зоне која утиче на геометријске елементе косине, односно максимални угао нагиба завршне косине и при  $F_s=1,3$  она износи  $0,4^\circ$ .

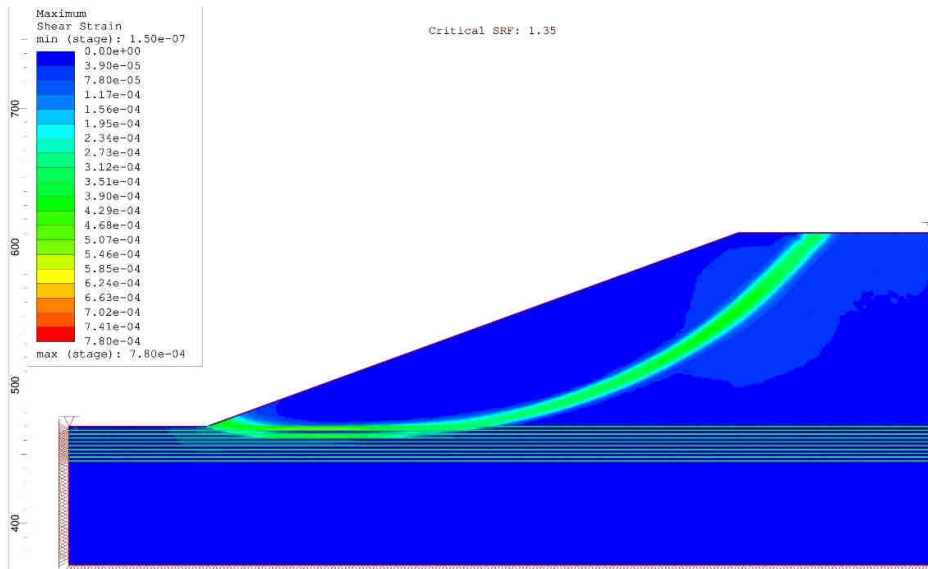
## 6.9 Анализа стабилности косина на растојању границе од 140 m

Анализа стабилности косина је извршена на припремљеним геомеханичким моделима за два случаја и то: са и без транзиционе зоне (ТЗ). Анализа је извршена са променом угла нагиба завршне косине тако да се на растојању границе Д и АД од горње равни косине од 140 m утврде вредности фактора сигурности ( $F_s$ ), помоћу којих ће се одредити максимални угао нагиба косине, слике 121-130.

Резултати анализе прорачуна стабилности косине нагиба  $\alpha_z = 20^\circ$  са и без ТЗ, као и положај лома на карактеристичном профилу при растојању границе Д и АД од горње равни косине од 140 m су приказани на сликама 121 и 122.



Слика 121. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 140 m ( $\alpha_z=20^\circ$ - без ТЗ)

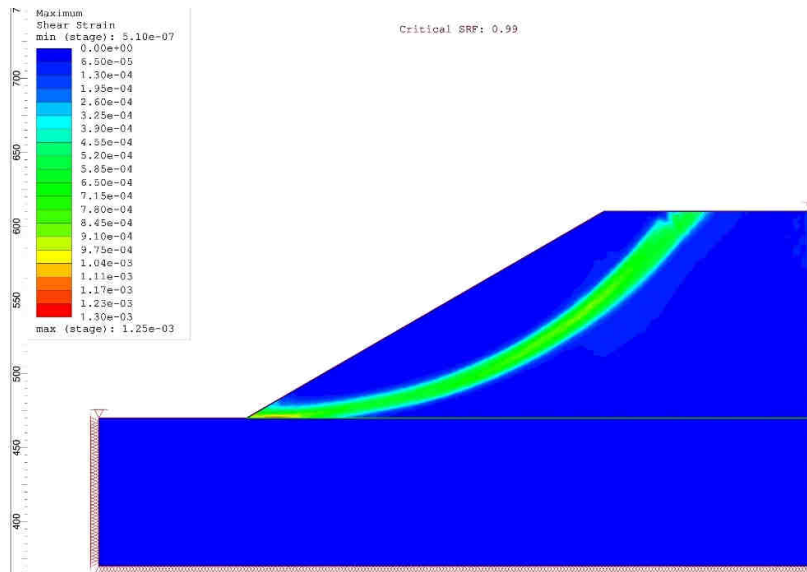


Слика 122. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 140 m ( $\alpha_z=20^\circ$ - са ТЗ)

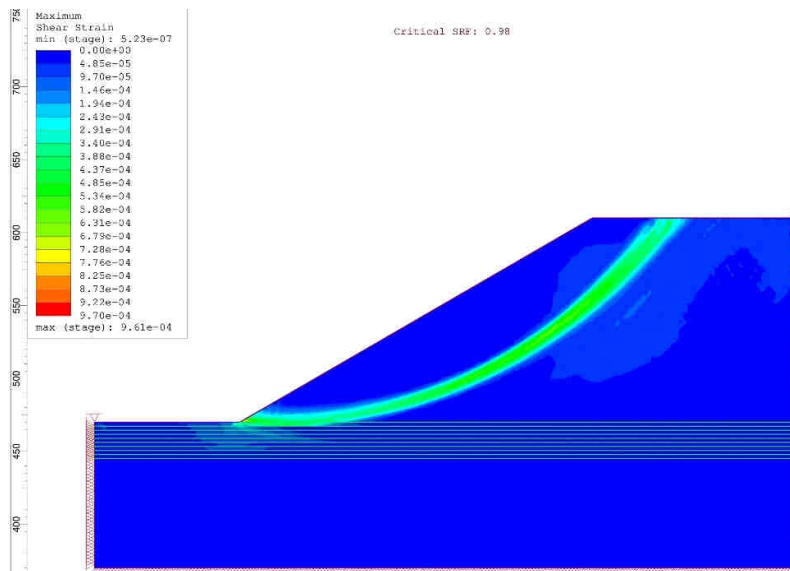
Анализом резултата прорачуна стабилности косине без ТЗ, слика 121, се може уочити да до концентрације напона и појаве лома долази у ножици косине у материјалу АД и вредност фактора сигурности износи  $F_s=1,37$ . На слици 122, где су приказани резултати прорачуна стабилности косине са ТЗ, се може уочити да до концентрације напона и појаве лома долази у материјалима од 70-100% АД, при чему вредност фактора сигурности износи  $F_s=1,35$ . Јасно се може уочити да разлика (са и без транзиционе зоне) у вредности фактора сигурности постоји, али да је скоро занемарљива.



Резултати анализе прорачуна стабилности косине нагиба  $\alpha_z = 30^\circ$  са и без ТЗ, као и положај лома на карактеристичном профилу при растојању границе Д и АД од горње равни косине од 140 m су приказани на сликама 123 и 124.



Слика 123. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 140 m ( $\alpha_z=30^\circ$ - без ТЗ)

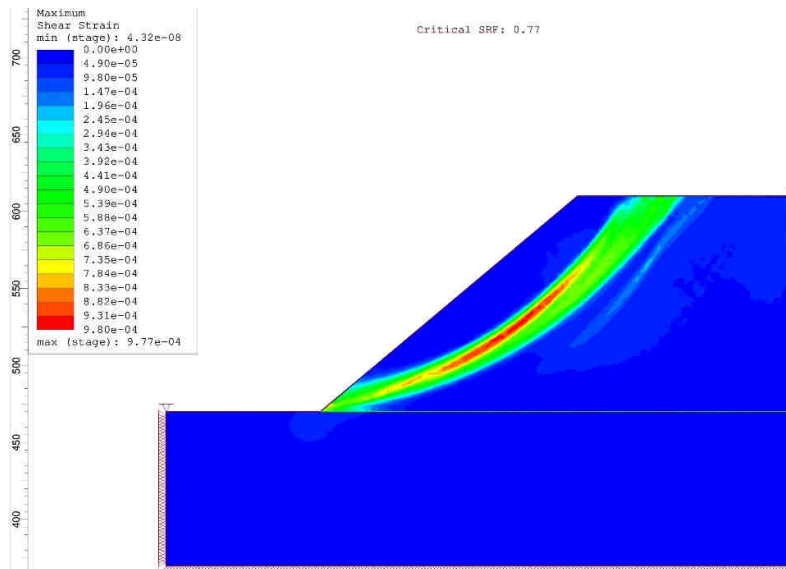


Слика 124. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 140 m ( $\alpha_z=30^\circ$ - са ТЗ)

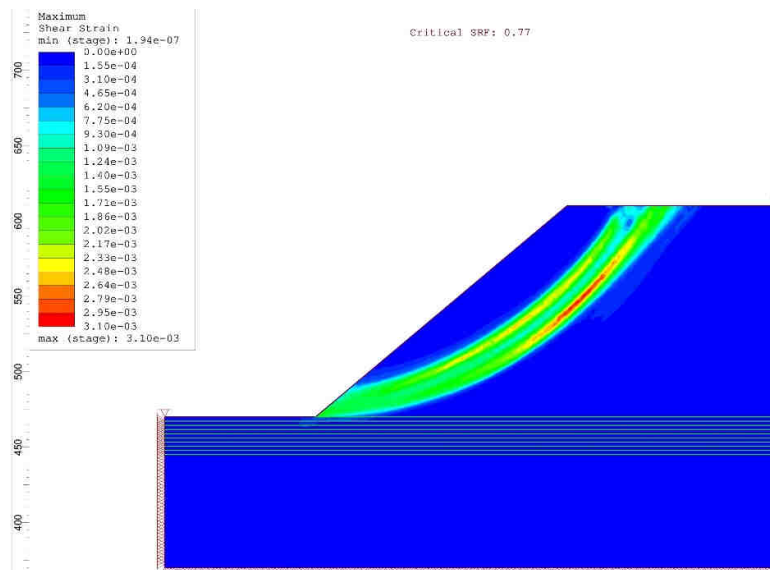
Анализом резултата прорачуна стабилности косине без ТЗ, слика 123, се може уочити да до концентрације напона лома долази у ножици косине у материјалу АД и вредност фактора сигурности износи  $F_s=0,99$ . У оваквом случају, да би се повећала вредност фактора сигурности, потребно је ублажити косину од ножице косине до горње равни косине са кораком од по  $2^\circ$ . На слици 124 се може уочити да до концентрације напона и појаве лома долази у ножици косине у материјалима од 90-100% АД, при чему вредност фактора сигурности износи  $F_s=0,98$ . У оваквом случају, да би се повећала вредност фактора сигурности, потребно је ублажити косину од ножице косине до горње равни косине са кораком од по  $2^\circ$ . Јасно се може уочити да разлика (са и без

транзиционе зоне) у вредности фактора сигурности постоји, али да је скоро занемарљива.

Резултати анализе прорачуна стабилности косине нагиба  $\alpha_z = 40^\circ$  са и без ТЗ, као и положај лома на карактеристичном профилу при растојању границе Д и АД од горње равни косине од 140 m су приказани на сликама 125 и 126.



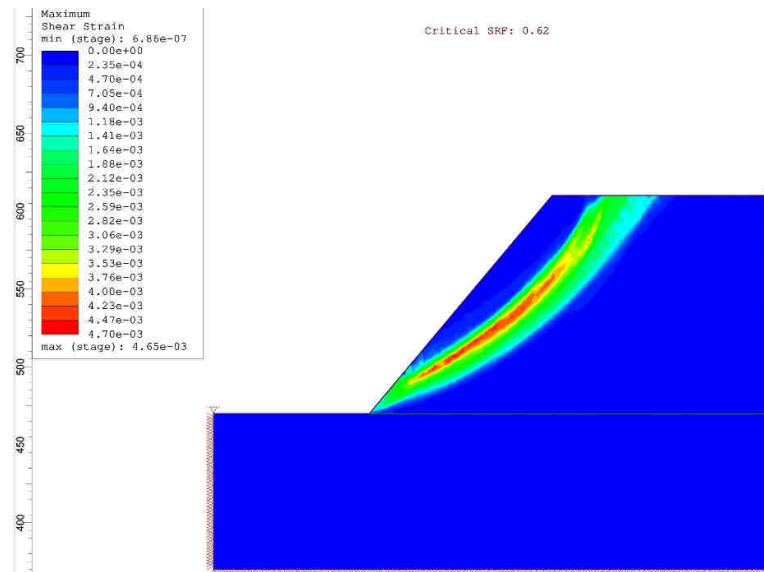
Слика 125. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 140 m ( $\alpha_z=40^\circ$ - без ТЗ)



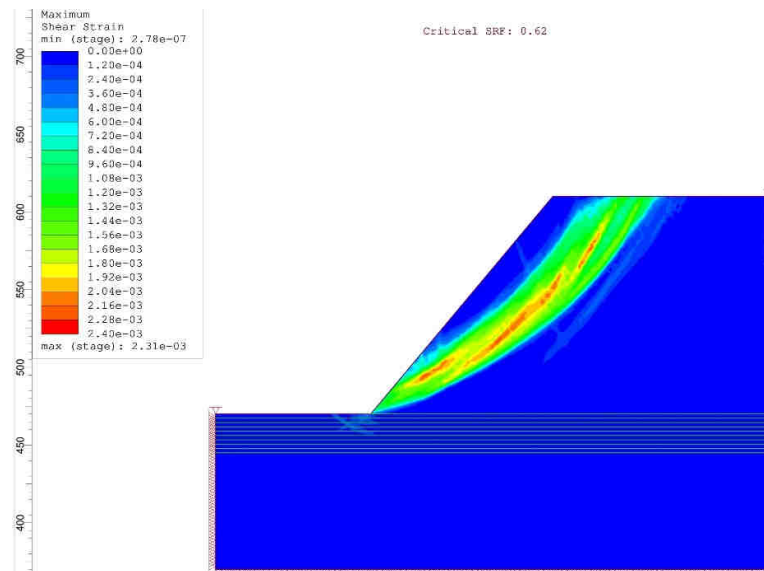
Слика 126. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 140 m ( $\alpha_z=40^\circ$ - са ТЗ)

Анализом резултата прорачуна стабилности косине са и без ТЗ, слике 125 и 126, се може уочити да до концентрације напона и појаве лома долази у ножици косине у материјалу АД и вредност фактора сигурности за оба случаја износи  $F_s=0,77$ . У оваквом случају, да би се повећала вредност фактора сигурности, потребно је ублажити косину од ножице косине до горње равни косине са кораком од по  $2^\circ$ . Јасно се може уочити да разлика (са и без транзиционе зоне) не постоји, у овом случају утицај ТЗ не постоји.

Резултати анализе прорачуна стабилности косине нагиба  $\alpha_z = 50^\circ$  са и без ТЗ, као и положај лома на карактеристичном профилу при растојању границе Д и АД од горње равни косине од 140 m су приказани на сликама 127 и 128.



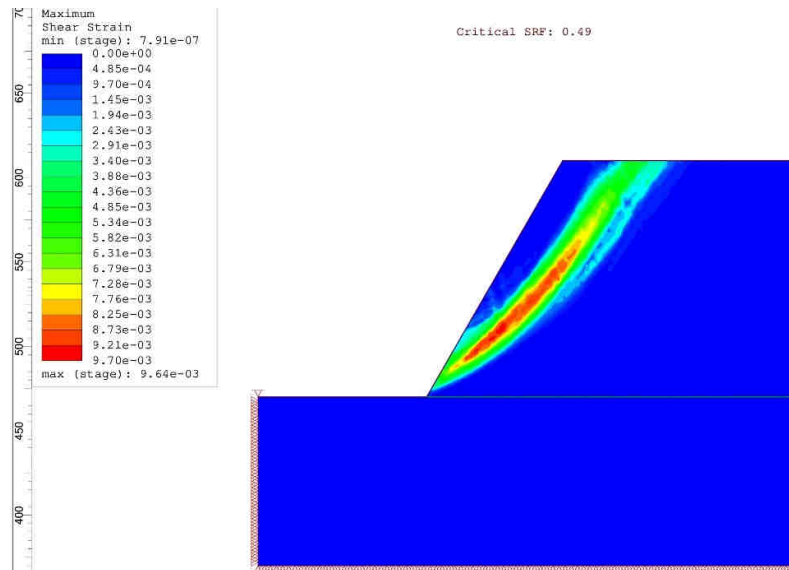
Слика 127. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 140 m ( $\alpha_z=50^\circ$ - без ТЗ)



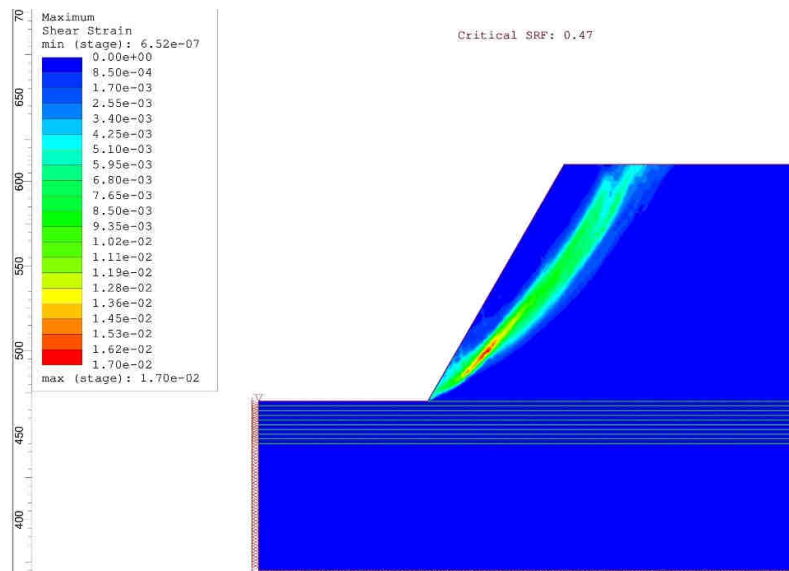
Слика 128. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 140 m ( $\alpha_z=50^\circ$ - са ТЗ)

Анализом резултата прорачуна стабилности косине са и без ТЗ, слике 127 и 128, се може уочити да до концентрације напона и појаве лома долази у ножици косине у материјалу АД и вредност фактора сигурности за оба случаја износи  $F_s=0,62$ . У оваквом случају, да би се повећала вредност фактора сигурности, потребно је ублажити косину од ножице косине до горње равни косине са кораком од по  $2^\circ$ . Јасно се може уочити да разлика (са и без транзиционе зоне) не постоји, у овом случају утицај ТЗ не постоји.

Резултати анализе прорачуна стабилности косине нагиба  $\alpha_z = 60^\circ$  са и без ТЗ, као и положај лома на карактеристичном профилу при растојању границе Д и АД од горње равни косине од 140 m су приказани на сликама 129 и 130.



Слика 129. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 140 m ( $\alpha_z=60^\circ$ - без ТЗ)



Слика 130. Резултати анализе стабилности на растојању границе од 140 m ( $\alpha_z=60^\circ$ - са ТЗ)

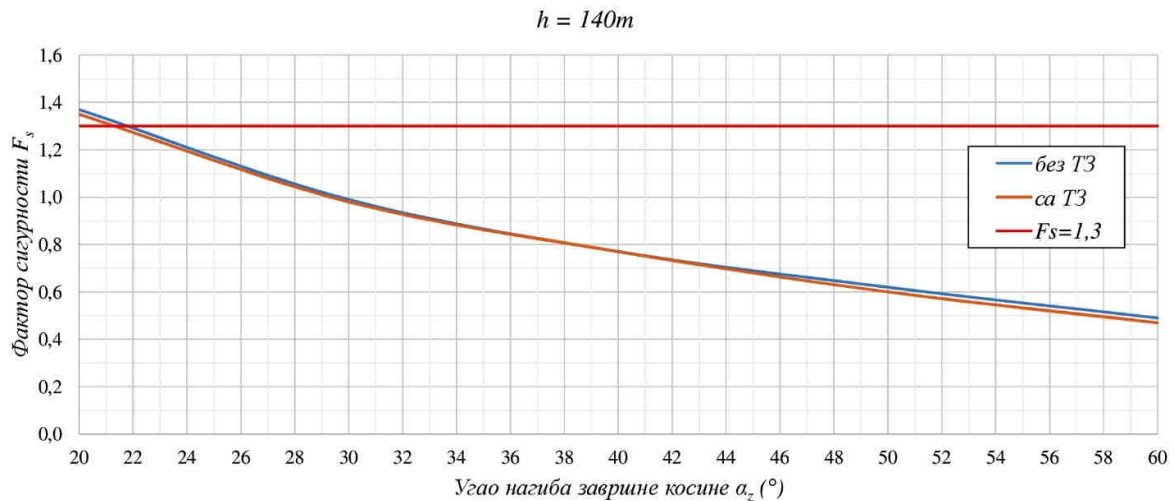
Анализом резултата прорачуна стабилности косине са и без ТЗ, слике 129 и 130, се може уочити да до концентрације напона и појаве лома долази у ножици косине у материјалу АД. Вредност фактора сигурности без транзиционе зоне износи  $F_s=0,49$ , док са транзиционом зоном износи  $F_s=0,47$ . У оваквом случају, да би се повећала вредност фактора сигурности, потребно је ублажити косину од ножице косине до горње равни косине са кораком од по  $2^\circ$ . Јасно се може уочити да разлика (са и без транзиционе зоне) у вредности фактора сигурности постоји, али да је скоро занемарљива.

На основу утврђених вредности фактора сигурности (табела 19) при различитим вредностима углова нагиба завршне косине конструисан је дијаграм зависности приказан на слици 131. За вредност фактора сигурности  $F_s=1,3$  одређен је максимални угао нагиба анализираних косине.

Табела 19. Вредности фактора сигурности на растојању границе од 140 m

Угао нагиба завршне косине $\alpha_z$ (°)	Фактор сигурности - $F_s$	
	без ТЗ*	са ТЗ
20	1,45	1,42
30	1,04	1,01
40	0,82	0,78
50	0,66	0,61
60	0,53	0,46

Напомена: ТЗ- транзициона зона



Слика 131. Упоредни приказ зависности  $F_s$  и  $\alpha_z$  на растојању прелаза од 140 m

Увидом у упоредни приказ зависности фактора сигурности  $F_s$  од угла нагиба завршне косине  $\alpha_z$ , слика 131, може се уочити да максимална вредност угла нагиба завршне косине износи  $\alpha_z=21,7^\circ$  на геомеханичким моделима без коришћења материјала транзиционе зоне, док је  $\alpha_z=21,3^\circ$  на геомеханичким моделима са коришћењем материјала транзиционе зоне. Стога се може закључити да, на растојању границе Д и АД од 140 m од горње равни косине, постоји разлика између модела са и без транзиционе зоне која утиче на геометријске елементе косине, односно максимални угао нагиба завршне косине и при  $F_s=1,3$  она износи  $0,4^\circ$ .

## 6.10 Анализа резултата прорачуна стабилности косине

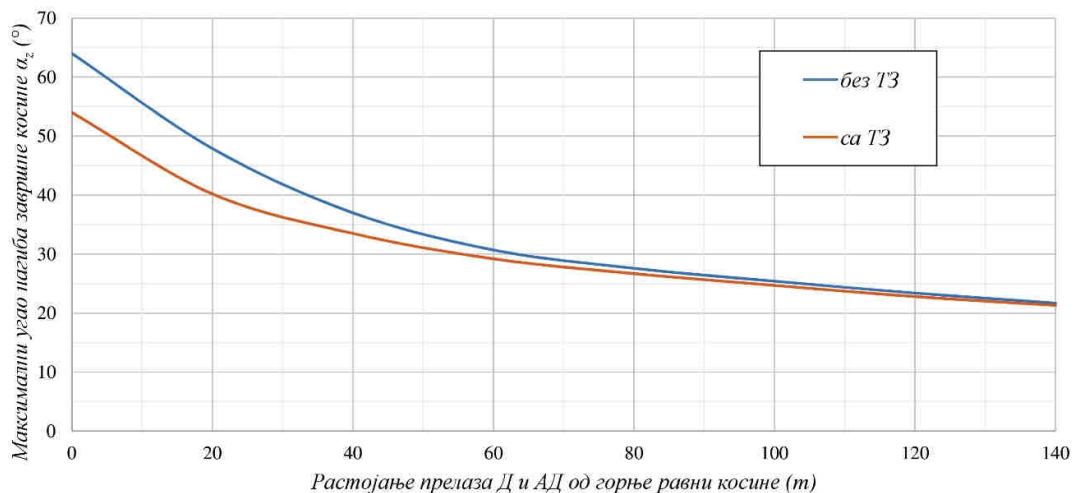
Анализа утицаја геолошке грађе и физичко механичких својстава на максимални нагиб завршне косине израђене у дациту и алтерисаном дациту, као и дефинисаној транзиционој зони одређен је на основу детаљне анализе стабилности косине висине  $H = 140 m$  и за углове нагиба од  $\alpha_z = 20, 30, 40, 50, 60$  и  $70^\circ$ . Анализа утицаја геолошке грађе на стабилност косине је разматрана за два случаја, код модела косине са и без транзиционе зоне (ТЗ). Максимални углови нагиба завршне косине израђених у дациту и алтерисаном дациту, са и без транзиционе зоне, су утврђени на основу дијаграма

приказаних на сликама 58, 67, 76, 87, 98, 109, 120, 131, тако да задовољавају критеријум стабилности за завршне косине према *Правилнику о техничким нормативима за површинску експлоатацију лежишта минералних сировина* [63],  $F_s \geq 1.30$ . У табели 20 су приказани резултати анализе стабилности завршне косине - вредности фактора сигурности  $F_s$ , док је зависности фактора сигурности  $F_s$  од угла нагиба завршне косине  $\alpha_z$  графички представљена на дијаграму, слика 132. На тај начин је могуће за одговарајући положај границе Д и АД (0-140 m) у односу на горњу раван косине утврдити максимални угао нагиба завршне косине  $\alpha_z$ .

Табела 20. Збирни резултати анализе прорачуна стабилности са и без ТЗ

Угао нагиба завршне косине $\alpha_z$ (°)	Фактор сигурности - $F_s$															
	Растојање границе Д и АД од горње равни косине (m)															
	0		20		40		60		80		100		120		140	
	без ТЗ	са ТЗ	без ТЗ	са ТЗ	без ТЗ	са ТЗ	без ТЗ	са ТЗ	без ТЗ	са ТЗ	без ТЗ	са ТЗ	без ТЗ	са ТЗ	без ТЗ	са ТЗ
20	-	-	-	-	-	-	1,89	1,79	1,69	1,63	1,55	1,52	1,45	1,42	1,37	1,35
30	-	-	2,09	1,73	1,56	1,42	1,33	1,27	1,20	1,16	1,11	1,08	1,04	1,01	0,99	0,98
40	3,14	1,90	1,58	1,31	1,20	1,09	1,03	0,98	0,94	0,90	0,87	0,84	0,82	0,78	0,77	0,77
50	2,37	1,47	1,24	1,02	0,95	0,88	0,84	0,74	0,76	0,73	0,69	0,67	0,66	0,61	0,62	0,60
60	1,54	1,08	1,01	0,82	0,78	0,70	0,67	0,58	0,58	0,54	0,55	0,53	0,53	0,46	0,49	0,47
70	1,00	0,93	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Напомена: ТЗ- транзициона зона



Слика 132. Дијаграм зависности  $\alpha_z$  са различитим растојањем прелаза Д и АД

Увидом у дијаграм на слици 132 се јасно може видети да са променом положаја границе Д и АД у односу на горњу раван косине, угао нагиба завршне косине  $\alpha_z$  опада самим тим и фактор сигурности  $F_s$  опада. Такође, утицај положаја транзиционе зоне на стабилност целокупне косине се смањује са повећањем растојања границе Д и АД од горње равни косине, па тако на растојању границе Д и АД од 0 m од горње равни косине разлика је  $10^\circ$ , док је на растојању границе Д и АД од 140 m разлика испод  $1^\circ$  за граничну вредност фактора сигурности  $F_s = 1.30$ .

Максималне вредности углова нагиба завршне косине за два анализирана случаја (са и без транзиционе зоне) су наведени у табели 21, док је графички приказ зависности угла нагиба завршне косине  $\alpha_z$  од растојања прелаза Д и АД од горње равни косине са и без транзиционе зоне представљена на дијаграму, слика 132.





Табела 21. Максималне вредности углова нагиба завршне косине  $\alpha_z$

Растојање прелаза Д и АД од горње равни косине (m)	Максимални угао нагиба завршне косине $\alpha_z$ (°)	
	без ТЗ	са ТЗ
0	64,0	54,0
20	47,9	40,2
40	37,0	33,5
60	30,7	29,2
80	27,6	26,7
100	25,4	24,7
120	23,4	22,8
140	21,7	21,3

Напомена: ТЗ- транзициона зона

Анализом дијаграма приказаног на слици 132 и података у табели 21 може се закључити да положај транзиционе зоне на растојању нема утицај на вредност максималног угла нагиба завршне косине на растојању границе Д и АД веће од 80 m од горње равни косине јер је разлика у максималним угловима мања од 1°. Међутим, уколико би било потребно дати пројектно решење угла нагиба завршне косине по принципу заокруживања вредности угла на први мањи цео број, тада би се вредности разликовале за 1°. Користећи се претходних принципима за заокруживање вредности угла нагиба завршне косине, може се закључити да тек на растојању границе Д и АД од 140 m од горње равни косине би се могао усвојити исти угао нагиба завршне косине са и без коришћења транзиционе зоне.

На основу резултата испитивања стабилности косина могуће је уочити да су на појединим геомеханичким моделима резултати прорачуна вредности фактора сигурности  $F_s < 1,3$ , где је до концентрације напона и појаве лома дошло у горњој зони косине. Да би се постигло стање стабилности модела косине могуће је спровести анализу са ублажавањем нагиба косине од одређене коте, у зависности од растојања границе Д и АД од горње равни косине, са кораком од по 2° за  $F_s \geq 1,3$ . Такође, могуће је анализирати промену вредности максималног угла завршне косине за систем радних етажа при вредности фактора сигурности  $F_s \geq 1,1$ , обзиром да се на појединим геомеханичким моделима може уочити да до концентрације напона и појаве лома долази у горњој зони косине, односно не захвата целокупну косину.



## 7 Закључак

У дисертацији је приказана методологија одређивања параметара чврстоће на смицање хетерогених стенских материјала за дефинисање улазних параметара Ноек-Вроун-овог критеријум лома. На основу геолошке грађе и геоморфологије анализирани локације, као и пројектованог положаја и геометрије површинског копа разматране су различите промене заступљености материјала у телу завршне косине. Формирани су геомеханички модели са и без транзиционе зоне на којима је извршена анализа стабилности косине, помоћу којих је дефинисан максимални угао нагиба завршне косине на растојању границе АД и Д од 0, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140 m.

Геомеханичка својстава дацита (Д) и алтерисаног дацита (АД) анализирана су на основу комплетне геолошке документације, а допуњена су узимањем блокова стенског материјала са отворених косина површинског копа, са циљем да се изведу одговарајућа лабораторијска испитивања на основу којих ће бити могуће извршити избор рачунских параметара појединих физичко-механичких својстава материјала. Применом одређених класификационих система стенског масива и резултата анализе расположивих података и резултата лабораторијских испитивања узорака могуће је дефинисати рачунске параметре чврстоће свих заступљених литолошких чланова. Испитивањима је обухваћено укупно 82 узорака дацита и алтерисаног дацита, који су узети из истражних бушотина и добијени језгровањем из блокова стенског материјала.

Утицај литолошке хетерогености на параметре Ноек-Вроун-овог критеријума лома дефинисан је на основу извршених испитивања једноосне и троосне чврстоће на притисак монолитних узорака дацита (Д) и алтерисаног дацита (АД), као и посебно припремљених композитних узорака стенског материјала. Композитни узорци су представљали прелазну зону и састојали су се од дискова дацита (Д) и алтерисаног дацита (АД) са различитим односом (уделом) у испитиваном пробном телу. Испитивања једноосне и троосне чврстоће на притисак су изведена на групама пробних тела са вредношћу процентуалног удела алтерисаног дацита од 0%, 10%, 30%, 50%, 70% и 100%.

Резултати испитивања једноосне чврстоће на притисак -  $\sigma_{ci}^{UCS}$ , као и троосне чврстоће на притисак непоремећеног стенског материјала -  $\sigma_{ci}^{TX}$  су омогућили да се утврди зависност ових параметара од процентуалног учешћа алтерисаног дацита (АД%), а која се може поделити у две зоне. Прва зона укључује резултате испитивања узорака дацита (0% АД) и композитних узорака са 10% и 30% запреминског учешћа алтерисаног дацита, где вредности  $\sigma_{ci}^{UCS}$  и  $\sigma_{ci}^{TX}$  опадају експоненцијално са почетне вредности (100%) на око 37%. У другој зони композитни узорци са 30% и више процентуалног учешћа алтерисаног дацита показују благо смањење  $\sigma_{ci}^{UCS}$  и  $\sigma_{ci}^{TX}$  и приближно су једнаки вредностима једноосне чврстоће на притисак -  $\sigma_{ci}^{UCS}$  и троосне чврстоћа на притисак непоремећеног стенског материјала -  $\sigma_{ci}^{TX}$  алтерисаног дацита. Имајући у виду наведене зависности, могуће је за свако процентуално учешће (0-100%) алтерисаног дацита у испитиваном узорку, одредити једноосну чврстоћу на притисак непоремећеног  $\sigma_{ci}^{TX}$  стенског материјала.

Вредности материјалне константе  $m_i$  се израчунавају на основу резултата троосних испитивања стенског материјала, а укупни интервал вредности материјалне константе  $m_i$  може се генерално изразити као  $m_i = 26 \pm 6$ . Свеукупни интервал вредности материјалне константе  $m_i$  односи се на дацит, алтерисани дацит и транзициону зону између ова два стенска материјала и може се поделити у два интервала. Наиме, за



први интервал (0% - 30% АД) могуће је дефинисати вредност константе  $m_i = 28 \pm 3$ , која се односи на дацит. Међутим, за други интервал (30% - 100% АД), вредност материјалне константне је  $m_i = 23 \pm 3$ , што се односи на алтерисани дацит. Приказане вредности материјалне константе  $m_i$  показују да је детаљна процена степена алтерације стенског материјала неопходна при процени вредности константне  $m_i$ .

Класификација стенског масива дацита (Д), алтерисаног дацита (АД) и транзиционе зоне (Композит 1-9) је извршена на основу картирања језгра из истражних бушотина, као и стања стенског масива отворених косина површинског копа. Анализом структурних карактеристика дацита (Д), алтерисаног дацита (АД) и транзиционе зоне (Композит 1-9) примењена је опште прихваћена GSI класификација. За наведено стање масива усвојене су вредности које износе: дацит (АД 0%) – GSI = 45-55 (50), композит 1 (АД 10%) – GSI = 30-40 (35), композит 2 (АД 20%) – GSI = 25-35 (30) и композит 3 – алтерисани дацит (АД 30% - 100%) – GSI = 15-25 (20)

Прорачун стабилности косина на карактеристичном профилу спроведен је помоћу методе коначних елемената коришћењем Нок-Броун-овог критеријума лома. Анализа је извршена, сходно геолошкој грађи и геоморфологији лежишта, на карактеристичном профилу за висину косине  $H=140\text{ m}$  са променом угла нагиба завршне косине  $\alpha_z$  у распону  $20-70^\circ$  са кораком од по  $10^\circ$ , као и променом растојања границе Д и АД од горње равни косине у распону  $0-140\text{ m}$  са кораком од по  $20\text{ m}$ , са циљем да би се утврдила промена вредности фактора сигурности. На основу приказаних резултата утврђен утицај транзиционе зоне на максимални угао нагиба завршне косине. Свакако је важно нагласити да су код модела косине са прелазом Д и АД на растојању од  $0\text{ m}$  без ТЗ издвајају две независне површине лома што указује да је потребно ублажити део косине у горњој зони, где се јавља парцијална нестабилност косине.

Препоруке за даља истраживања укључују:

Програмом испитивања троосне чврстоће на притисак потребно је обухватити већи број пробних тела композитних узорака за сваку заступљеност АД са истим вредностима бочног оптерећења ( $\sigma_3$ ) и на тај начин проверила зависност  $\sigma_{ci}^{TX}$ - АД%. Такође, обухватити и испитивања параметара деформабилности, мерењем вертикалних и хоризонталних деформација при троосном испитивању чеми се створила комплетна слика зависности напона и деформација при различитим вредностима бочног оптерећења ( $\sigma_3$ ).

Подаци прикупљени испитивањем чврстоће при једноосним и троосним условима ( $\sigma_{ci}^{UCS}$  и  $\sigma_{ci}^{TX}$ ) показали су да се за вредности од 0 до 30% удела алтерисаног дацита у испитиваном узорку линија којом се апроксимирају утврђене вредности ( $\sigma_{ci}^{UCS}$  и  $\sigma_{ci}^{TX}$ ) не пролази кроз скуп тачака за 0 и 10% алтерисаног дацита. Сходно томе, потребно је израдити већи број пробних тела са 5% и 20% удела алтерисаног дацита у испитиваном узорку и на тај начин проверити зависност  $\sigma_{ci}^{TX}$ - АД% и  $\sigma_{ci}^{UCS}$ - АД%.

Резултати испитивања једноосне чврстоће на притисак пробних тела из истражне бушотине на узорку Б-14 указују да се чврстоћа знатно смањује. Свакако, неопходно би било накнадно утврдити литолошки картиране средине доње зоне и на тај начин утврдити да ли између дацита (Д) и доње зоне постоји прелазна зона, која би на основу ове методологије могла да буде одређена. Такође, методологија испитивања параметара чврстоће коришћена у овом раду може се применити на другим хетерогеним стенским материјалима који имају већу разлику у параметрима чврстоће.



## 8 Литература

- [1] Marachi, N.D., C. K. Chan, and H. B. Seed, "Evaluation of properties of rockfill materials," *J. Soil Mech. Found. Div.*, vol. 98, pp. 65–114, 1972.
- [2] G. Tziailas, H. Saroglou, and G. Tsiambaos, "Determination of mechanical properties of flysch using laboratory methods," *Eng. Geol.*, vol. 166, 2013, doi: 10.1016/j.enggeo.2013.09.002.
- [3] P. Duffault, "Structural weaknesses in rocks and rock masses. Tentative classification and behaviour," *Proc. Symp. Tokyo, Japan*, vol. 1, pp. 93–97, 1981.
- [4] R. E. Goodman, "Engineering geology," *JOHN WILEY SONS, INC., Canada, USA*, 1993.
- [5] Z. Mohamed, K. Mohamed, and G. Chun, "Uniaxial Compressive Strength of Composite Rock Material with respect to Shale Thickness Ratio and Moisture Content," *Electron. J. Geotech. Eng.*, vol. 13, no. January, pp. 1–10, 2008.
- [6] J. Liu, E. Wang, D. Song, S. Wang, and Y. Niu, "Effect of rock strength on failure mode and mechanical behavior of composite samples," *Arab. J. Geosci.*, vol. 8, no. 7, pp. 4527–4539, 2014, doi: 10.1007/s12517-014-1574-9.
- [7] Z. Berisavljević, D. Berisavljević, and V. Čebašek, "Shear strength properties of Dimitrovgrad flysch, Southeastern Serbia," *Bull. Eng. Geol. Environ.*, vol. 74, no. 3, pp. 759–773, 2015, doi: 10.1007/s10064-014-0678-5.
- [8] W. Liang, C. Yang, Y. Zhao, M. B. Dusseault, and J. Liu, "Experimental investigation of mechanical properties of bedded salt rock," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 44, no. 3, pp. 400–411, 2007, doi: 10.1016/j.ijrmms.2006.09.007.
- [9] D. Greco, O.D., Ferrero, A., Peila, "Behaviour of laboratory specimens composed of different rocks.," *Proc ISRM Int. Congr. Rock Mech. Aachen*, pp. 245–251, 1992.
- [10] P. Marinos and E. Hoek, "Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch," *Bull. Eng. Geol. Environ.*, vol. 60, no. 2, pp. 85–92, 2001, doi: 10.1007/s100640000090.
- [11] P. Marinos, "NEW PROPOSED GSI CLASSIFICATION CHARTS FOR WEAK OR COMPLEX ROCK MASSES," *Bull. Geol. Soc. Greece, Proc. 12th Int. Congr. Patras.*, vol. 43, pp. 1248–1258, 2010, doi: 10.12681/bgsg.11301.
- [12] V. Rupar, V. Čebašek, V. Milisavljević, D. Stevanović, and N. Živanović, "Determination of Mechanical Properties of Altered Dacite by Laboratory Methods," *Minerals*, vol. 11, no. 8, p. 813, 2021, doi: 10.3390/min11080813.
- [13] E. Hoek, "Geotechnical Considerations in Tunnel Design and Contract Preparation.," *J. Mines, Met. Fuels*, vol. 30, no. 11, pp. 573–584, 1982, doi: 10.1016/0148-9062(83)90145-6.
- [14] Z. T. Bieniawski, "Engineering Rock Mass Classifications- A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering," *JOHN WILEY SONS, INC., Canada, USA*, 1989.
- [15] J. C. Jaeger, N. G. W. Cook, and R. W. Zimmerman, "Fundamentals of Rock Mechanics 4th Edition," *Blackwell Publ. Malden, MA*, p. 475, 2006, doi: 10.1007/3-540-32345-7\_3.



- [16] E. Hoek and E. T. Brown, "Empirical strength criterion for rock masses.," *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, vol. 106, no. GT9, Proc. Paper, 15715. pp. 1013–1035, 1980, doi: 10.1061/ajgeb6.0001029.
- [17] E. Hoek and E. Brown, "The Hoek–Brown failure criterion and GSI – 2018 edition," *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, vol. 11, no. 3, 2019, doi: 10.1016/j.jrmge.2018.08.001.
- [18] E. Hoek, P. K. Kaiser, and W. F. Bawden, *Support of underground excavations in hard rock*, vol. 53, no. 9. 1995.
- [19] E. Hoek and E.T. Brown, "Practical estimates of rock mass strength," *Inst. Min. Metall. London, UK*, vol. 34, no. 8, pp. 1165–1186, 1997.
- [20] E. Hoek, "Practical rock engineering," *RocScience*. (Available from Publ. [http://www.rocscience.com/hoek/ Pract.](http://www.rocscience.com/hoek/Pract.), 2007.
- [21] Balmer G., "A general analytical solution for Mohr's envelope," *Am. Soc. Test. Mater.*, vol. 52, pp. 1260–1271, 1952.
- [22] J. Ramsey and F. Chester, "Hybrid fracture and the transition from extension fracture to shear fracture," *Nature*, vol. 428, pp. 63–66, 2004, doi: 10.1029/2001GL014320.
- [23] J. K. Bobich, "Experimental analysis of the extension to shear fracture transition in Berea sandstone," *Texas A&M Univ.*, no. August, p. 52, 2005.
- [24] E. Hoek and M. S. Diederichs, "Empirical estimation of rock mass modulus," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 43, no. 2, pp. 203–215, 2006, doi: 10.1016/j.ijrmms.2005.06.005.
- [25] P. Doruk, "Analysis of the laboratory strength data using the original and modified Hoek-Brown failure criteria," *MASc thesis, Dept. Civ. Eng. Univ. Toronto.*, 1991.
- [26] E. Hoek and A. Karzulovic, "Rock mass properties for surface mines," *Slope Stab. Surf. Min.*, pp. 59–70, 2000, [Online]. Available: <https://www.rocscience.com/hoek/references/H2000c.pdf>.
- [27] E. Hoek, C. Carranza, and B. Corkum, "Hoek-brown failure criterion – 2002 edition," *Narms-Tac*, pp. 267–273, 2002, doi: 10.1016/0148-9062(74)91782-3.
- [28] E. Hoek, "Strength of jointed rock masses," *Geotechnique*, vol. 33, no. 3, pp. 187–223, 1983, doi: 10.1680/geot.1983.33.3.187.
- [29] N. Barton, "Review of a new shear-strength criterion for rock joints," *Eng. Geol.*, vol. 7, no. 4, pp. 287–332, 1973, doi: 10.1016/0013-7952(73)90013-6.
- [30] N. Barton and V. Choubey, "The shear strength of rock joints in theory and practice," *Rock Mech. Felsmechanik Mécanique des Roches*, vol. 10, no. 1–2, pp. 1–54, 1977, doi: 10.1007/BF01261801.
- [31] D. Deere and R. Miller, "Engineering classification and index properties of rock. Technical Report No. AFNL-TR-65-116.," *Albuquerque, NM Air Force Weapons Lab.*, 1966.
- [32] R. Parry, *Mohr Circles, Stress Paths and Geotechnics*. 1995.
- [33] S. Lazarev and J. Ječmenica, "ZAVRŠNI IZVEŠTAJ O REZULTATIMA GEOLOŠKIH ISTRAŽIVANJA PO PROJEKTU PRIMENJENIH GEOLOŠKIH ISTRAŽIVANJA DACITA KAO TEHNIČKO-GRAĐEVINSKOG KAMENA U LEŽIŠTU 'ĆERAMIDE' KOD RUDNIKA U EKSPLOATACIONOM POLJU," *Jantar Grup. d.o.o., Beogr.*, no.





april, 2019.

- [34] T. Subaranovic, "Glavni rudarski projekat eksploatacije dacita kao tehnicko - gradjevinskog kamena na PK 'Ceramide' kod Rudnika - opstina Gornji Milanovac," 2016.
- [35] V. Čebašek, "I Z V E Š T A J o laboratorijskim ispitivanjima geomehaničkih svojstava stenskog materijala i proveri stabilnosti kosina sa lokaliteta površinskog kopa i odlagališta 'Ceramide' kod Rudnika," *Rud. Fak.*, 2020.
- [36] R. Ulusay and J. A. Hudson, "The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterisation, Testing and Monitoring," *Bull. Eng. Geol. Environ. (ISRM Turkish Natl. Group)*, vol. 68, no. 2, pp. 287–288, 2009, doi: 10.1007/s10064-009-0213-2.
- [37] ASTM, "Standard test methods for compressive strength and elastic modul of intact rock core specimens under varying states of stress and temperatures," *ASTM Des. D-7012, West Conshohocken, PA*, 2014, doi: 10.1520/D7012-14E01.
- [38] ISRM, "Suggested Methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials," *Int. Soc. Rock Mech. Rock Eng. Lisbon, Port.*, no. December, pp. 0–3, 1979.
- [39] ISRM, "SM for Determining Water Content, Porosity, Density, Absorption and Related Properties and Swelling and Slake-Durability Index Properties," *Int. Soc. Rock Mech.*, vol. 10, no. 2, pp. 143–151, 1977, [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmms.2016.03.018%0A>.
- [40] J. Radojevic, "Mehanika stena," *Rud. Fak.*, 1992.
- [41] A. Jamshidi, M. R. Nikudel, M. Khomehchian, and R. Z. Sahamieh, "The effect of specimen diameter size on uniaxial compressive strength, P-wave velocity and the correlation between them," *Geomech. Geoengin.*, vol. 11, no. 1, pp. 13–19, 2016, doi: 10.1080/17486025.2015.1006264.
- [42] E. T. Brown and E. Hoek, *Underground Excavations in Rock*. CRC Press: Boca Raton, London, UK, 1980.
- [43] Y. Y. Tan, K. Zhang, X. Yu, W. D. Song, J. Wang, and C. L. Hai, "The mechanical and microstructural properties of composite structures made of a cement-tailing backfill and rock core," *Minerals*, vol. 10, no. 2, 2020, doi: 10.3390/min10020159.
- [44] M. Mavrinac and L. Bilić, *Correlation and linear regression*, vol. 17, no. 8. Medicinska naklada, Zagreb, Croatia, 2010.
- [45] B. Vásárhelyi, "Tribute to the first triaxial test performed in 1910," *Acta Geod. Geophys. Hungarica*, vol. 45, no. 2, pp. 227–230, 2010, doi: 10.1556/AGeod.45.2010.2.7.
- [46] F. Deák, P. Ván, and B. Vásárhelyi, "Hundred years after the first triaxial test," *Period. Polytech. Civ. Eng.*, vol. 56, no. 1, pp. 115–122, 2012, doi: 10.3311/pp.ci.2012-1.13.
- [47] E. Hoek and J. A. Franklin, "A simple triaxial cell for field and laboratory testing of rock.," *Trans. Instn Min. Met.*, no. 77, pp. A22-26, 1968, doi: 10.1016/j.ijrmms.2004.09.015.
- [48] J. A. Franklin, "Triaxial strength of rock materials," *Springer - Verlag*, vol. 3, no. 2, pp. 86–98, 1971, doi: 10.1007/BF01239628.
- [49] ISRM, "Suggested methods for determining the strength of rock materials in triaxial





- compression," *Int. Soc. Rock Mech. Rock Eng. Lisbon, Port.*, vol. 15, no. 2, pp. 47–51, 1978, doi: 10.1016/0148-9062(78)91677-7.
- [50] P. Marinos and E. Hoek, "GSI: A geologically friendly tool for rock mass strength estimation," *ISRM Int. Symp. Melbourne, Aust.*, 2000.
- [51] A. Tuğrul and I. H. Zarif, "Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from Turkey," *Eng. Geol.*, vol. 51, no. 4, pp. 303–317, 1999, doi: 10.1016/S0013-7952(98)00071-4.
- [52] N. Güneş Yılmaz, R. Mete Goktan, and Y. Kibici, "Relations between some quantitative petrographic characteristics and mechanical strength properties of granitic building stones," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 48, no. 3, pp. 506–513, 2011, doi: 10.1016/j.ijrmms.2010.09.003.
- [53] U. Åkesson, J. Stigh, J. E. Lindqvist, and M. Göransson, "The influence of foliation on the fragility of granitic rocks, image analysis and quantitative microscopy," *Eng. Geol.*, vol. 68, no. 3–4, pp. 275–288, 2003, doi: 10.1016/S0013-7952(02)00233-8.
- [54] M. Räisänen, "Relationships between texture and mechanical properties of hybrid rocks from the Jaala-litti complex, southeastern Finland," *Eng. Geol.*, vol. 74, no. 3–4, pp. 197–211, 2004, doi: 10.1016/j.enggeo.2004.03.009.
- [55] A. Tuğrul, "The effect of weathering on pore geometry and compressive strength of selected rock types from Turkey," *Eng. Geol.*, vol. 75, no. 3–4, pp. 215–227, 2004, doi: 10.1016/j.enggeo.2004.05.008.
- [56] V. Matović, D. Srećković-Batočanin, N. Matović, and B. Munjas, "PETROGRAFSKE KARAKTERISTIKE DACITA I UTICAJ NA ČVRSTOĆU NA PRITISAK," *Konf. Savrem. Mater. I Konstr. SA Regul. Zb. Rad.*, 2016.
- [57] N. Najdanović and R. Obradović, "Mehanika tla u inženjerskoj praksi," *Rud. institut, Beogr.*, 1997.
- [58] M. Pierce, T. Brandshaug, and M. Ward, "Slope stability assessment at the Main Cresson Mine. In Slope stability in surface mining," *Soc. Mining, Metall. Explor. Inc.*, 239-250, 2001.
- [59] "Application of the Finite Element Method to Slope Stability," *Inc., Rocscience*, 2001.
- [60] E. H. Reginald, H. J. Curran, T. Yacoub, and B. Corkum, "Analysis of rock slopes, using the finite element method," *Dep Energy, Can, Mines Resour, Mines Br*, no. September 2015, 1970.
- [61] J. M. Duncan, "State of the Art: Limit Equilibrium and Finite-Element Analysis of Slopes," *J. Geotech. Eng. vol. 122, no. 7, pp. 577-596.*, 1996.
- [62] D. V. GRIFFITHS and P.A.LANE, "Slope stability analysis by finite elements," *Getotechnique*, vol. 49, no. 3, pp. 387–403, 1999.
- [63] "Zbirka propisa iz rudarstva," *Savez inženjera i Teh. Srb. (SITS), Knez. Miloša, Beograd, Srb.*, pp. 483–534, 2015.



## Списак прилога

<b>Бр. прилога</b>	<b>Назив</b>
1	Литолошки стуб истражних бушотина
2	Специфична запреминска тежина
3	Запреминска тежина
4	Садржина воде
5	Једноосна чврстоћа на притисак (из истражних бушотина)
6	Једноосна чврстоћа на притисак (из блокова стенског материјала)
7	Троосна чврстоћа на притисак (Триаксијални опит)



B13-19

Kota (m)	Dubina (m)	Debljina (m)	Litologija	Litološki opis
582,1	4,0	4,0	XXXXXX XXXXXX XXXXXX XXXXXX XXXXXX	Glina, pesak, grus dacita
576,8	9,3	5,3	▽▽▽▽▽	Dacit, alterisan, ispucao-tektoniziran
570,8	15,3	6,0	▽▽▽▽▽	Dacit, alterisan, ispucao-srednje tektoniziran
568,1	18,0	2,7	▽▽▽	Dacit, slabo alterisan, srednje tektoniziran
553,6 552,9	32,5 33,2	0,7	▽▽▽	Dacit, sive boje, dacit, sive boje, slabo tektoniziran
547,9	38,2	5,3	▽▽▽	Drobna dacita, mehanički usitnjen dacit
542,6	43,5	9,2	▽▽▽	Drobna dacita, mehanički usitnjen dacit
533,4	52,7	4,0	▽▽▽	Dacit, sive boje, kompaktn
529,4	56,7	10,0	▽▽▽	Drobna dacita, mehanički usitnjen dacit
519,4	66,7	18,9	▽▽▽	Dacit, sive boje, kompaktn
500,5	85,6	9,9	▽▽▽	Drobna dacita, mehanički usitnjen dacit
490,6	95,5	40,5	▽▽▽	Dacit, sive boje, kompaktn, uočljive kvartne žice
450,1	138,0			

ТРАНСИЦИОНА ЗОНА

B14-19

Kota (m)	Dubina (m)	Debljina (m)	Litologija	Litološki opis
584,5	3,2	3,2	XXXXXX XXXXXX XXXXXX XXXXXX XXXXXX	Glina, pesak, grus dacita
577,6 577,3	10,1 10,4	0,3	▽▽▽	Mehanički usitnjen dacit, drobna
571,2	16,5	6,1	▽▽▽	Dacit, sive boje, slabo tektoniziran,
566,9	20,8	4,3	▽▽▽	Mehanički usitnjen dacit, drobna
565,7	22,0	1,2	▽▽	Dacit, sive boje, slabo tektoniziran
560,8	26,9	4,9	▽▽▽	Mehanički usitnjen dacit, drobna
554,7	33,0	6,1	▽▽▽	Mehanički usitnjen dacit, drobna, uočljiv mineralni glina
549,7	38,0	5,0	▽▽▽	Mehanički usitnjen dacit, drobna
546,9	41,8	3,8	▽▽	Mehanički usitnjen dacit, primese glina, mesinčno žice kvarca
544,0	43,7	1,9	▽	Dacit, sive boje, kompaktn
540,3	47,4	3,7	▽	Dacit, tektoniziran, mesinčno udrobljen, prisutni mineralni glina
537,7	50,0	2,6	▽	Dacit, blago tektoniziran
535,0	52,7	2,7	▽	Dacit, sive boje, tektoniziran, prisutni mineralni glina
533,7	54,0	1,3	▽	Dacit, sive boje, slabo tektoniziran
528,0	61,7	7,7	▽	Dacit, tektoniziran, mesinčno udrobljen, prisutni mineralni glina
522,7	65,0	3,3	▽	Dacit, slabo tektoniziran, uočljive žice kvarca i limonit
518,6	69,1	4,1	▽	Dacit, tektoniziran, mehanički usitnjen, drobna
502,2	85,5	16,4	▽	Dacit, sive boje, mesinčno slabo tektoniziran, prisutne žice kvarca i limonit
497,4	90,3	4,8	▽	Mehanički usitnjen dacit, drobna
483,0	104,7	14,4	▽	Dacit, sive boje, slabo tektoniziran, u intervalima udrobljen, prisutne kvartne žice i limonit
480,9	106,8	2,1	▽	Dacit, tektoniziran, prisutne žice kvarca, slabo limonitisan
469,7	118,0	11,2	▽	Dacit, sive boje, slabo tektoniziran
467,2	120,5	2,5	▽	Dacit, tektoniziran, prisutne žice kvarca, slabo limonitisan, uočljiv mineralni glina
462,8	124,9	4,4	▽	Dacit, sive boje, slabo tektoniziran
461,9	126,8	0,9	▽	Dacit, intenzivno tektoniziran, alterisan
450,7	137,0	11,2	▽	Dacit, sive boje, slabo tektoniziran, prisutne žice kvarca

**СПЕЦИФИЧНА ЗАПРЕМИНСКА ТЕЖИНА**

Ознака узорка	Пикнометар број	Маса пикнометра (g)	Маса пикнометра и материјала (g)	Маса суве пробе $W_s$ (g)	Маса пикнометра пуног воде $W_w$ (g)	$W_s + W_w$	Маса пикнометра, воде и материјала $W_{pw}$ (g)	Запремина черстих састојака $V_s$ (cm <sup>3</sup> )	Специфична тежина $\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	Средња вредност $\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	Квадратно одступање (kN/m <sup>3</sup> )	Коефицијент варијације (%)
АД	11	98,53	178,29	79,76	347,65	427,41	396,48	30,93	25,30	25,08	0,215	0,856
	4	98,31	180,24	81,93	347,45	429,38	397,35	32,03	25,09			
	7	95,77	182,82	87,05	345,06	432,11	398,16	33,95	25,15			
	3	95,45	179,17	83,72	344,27	427,99	394,77	33,22	24,72			
	6	99,90	181,99	82,09	348,99	431,08	399,05	32,03	25,14			
Д	19	101,42	185,19	83,77	350,38	434,15	401,73	32,42	25,35	25,33	0,167	0,658
	13	98,87	179,63	80,76	348,17	428,93	397,96	30,97	25,58			
	18	99,21	180,27	81,06	348,28	429,34	397,90	31,44	25,29			
	17	99,66	184,15	84,49	349,05	433,54	400,54	33,00	25,12			
Б-14 (134,1-134,8)	16	98,76	180,63	81,87	347,65	429,52	397,78	31,74	25,30	24,95	0,125	0,499
	1	99,00	180,04	81,04	348,10	429,14	397,04	32,10	24,77			
	10	102,79	183,27	80,48	351,80	432,28	400,74	31,54	25,03			
	5	97,17	178,32	81,15	346,47	427,62	395,72	31,90	24,96			
	15	95,08	181,42	86,34	344,41	430,75	396,72	34,03	24,89			
8	100,93	181,63	80,70	349,87	430,57	399,01	31,56	25,08				



**ЗАПРЕМИНСКА ТЕЖИНА**

Ознака узорка	Маса узорка (g)	Маса узорка са парафином (g)	Маса суда са водом (g)	Маса суда са потопљеним узорком (g)	Запремина узорка са парафином $V_{ур}$ (cm <sup>3</sup> )	Маса парафина $m_p$ (g)	Запремина парафина $V_p$ (cm <sup>3</sup> )	Запремина узорка $V_u$ (cm <sup>3</sup> )	Запремина тежина $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Средња вредност $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Квадратно одступање $\sigma$ (%)	Коефицијент варијације $v$ (%)
АД	38,30	38,98	931,42	947,74	16,32	0,68	0,76	15,56	24,15	24,37	0,227	0,932
	43,91	44,70	931,39	950,08	18,69	0,79	0,89	17,80	24,19			
	71,57	72,67	931,34	961,63	30,29	1,10	1,23	29,06	24,16			
	36,05	36,76	931,13	946,58	15,45	0,71	0,80	14,65	24,13			
	36,20	36,78	931,08	946,37	15,29	0,58	0,65	14,64	24,26			
	46,25	46,88	931,02	950,45	19,43	0,63	0,71	18,72	24,23			
	55,86	56,77	931,01	954,85	23,84	0,91	1,02	22,82	24,01			
	33,17	33,80	930,97	945,13	14,16	0,63	0,71	13,45	24,19			
	47,05	47,89	930,97	951,01	20,04	0,84	0,94	19,10	24,17			
	50,82	51,60	925,78	947,17	21,39	0,78	0,87	20,52	24,30			
	51,92	52,77	925,74	947,66	21,92	0,85	0,95	20,97	24,29			
	49,52	50,35	925,72	946,36	20,64	0,83	0,93	19,71	24,65			
	78,36	79,53	925,69	958,30	32,61	1,17	1,31	31,30	24,56			
	47,77	48,54	925,68	946,01	20,33	0,77	0,86	19,47	24,07			
	57,68	58,46	925,63	949,48	23,85	0,78	0,87	22,98	24,63			
	66,55	67,55	925,61	953,22	27,61	1,00	1,12	26,49	24,65			
	40,12	40,77	925,59	942,31	16,72	0,65	0,73	15,99	24,61			
	70,96	71,85	925,56	954,78	29,22	0,89	1,00	28,22	24,67			
	38,12	38,77	925,55	941,76	16,21	0,65	0,73	15,48	24,16			
	68,00	69,07	925,52	953,60	28,08	1,07	1,20	26,88	24,82			
	81,67	82,86	925,51	959,23	33,72	1,19	1,33	32,39	24,74			
	48,86	49,68	925,47	945,93	20,46	0,82	0,92	19,54	24,53			
	80,67	81,82	925,45	958,77	33,32	1,15	1,29	32,03	24,71			
	42,16	42,84	925,44	943,00	17,56	0,68	0,76	16,80	24,62			
	33,87	34,55	925,42	939,92	14,50	0,68	0,76	13,74	24,19			
	59,25	60,15	925,38	950,09	24,71	0,90	1,01	23,70	24,52			
	38,78	39,40	925,36	941,58	16,22	0,62	0,70	15,52	24,50			
	87,70	89,17	925,36	961,95	36,59	1,47	1,65	34,94	24,62			
	79,52	80,98	925,34	959,32	33,98	1,46	1,64	32,34	24,12			
	63,75	64,79	925,27	952,02	26,75	1,04	1,17	25,58	24,44			
	59,63	60,59	925,24	950,41	25,17	0,96	1,08	24,09	24,28			
	36,83	37,66	925,20	940,83	15,63	0,83	0,93	14,70	24,58			
	36,93	37,59	925,17	940,77	15,60	0,66	0,74	14,86	24,38			
	53,63	54,98	925,16	948,15	22,99	1,35	1,51	21,48	24,50			
	33,67	34,72	925,05	939,62	14,57	1,05	1,18	13,39	24,66			
	36,31	37,38	925,02	940,94	15,92	1,07	1,20	14,72	24,20			
	26,80	27,67	924,93	936,86	11,93	0,87	0,98	10,95	24,00			
	33,20	34,07	924,90	939,32	14,42	0,87	0,98	13,44	24,22			
	45,75	46,86	924,84	944,73	19,89	1,11	1,24	18,65	24,07			
	65,12	66,69	924,78	952,59	27,81	1,57	1,76	26,05	24,52			
57,31	58,56	924,70	949,13	24,43	1,25	1,40	23,03	24,41				
50,80	52,35	924,65	946,74	22,09	1,55	1,74	20,35	24,49				
61,82	63,47	924,53	951,12	26,59	1,65	1,85	24,74	24,51				
36,15	37,27	924,42	940,16	15,74	1,12	1,26	14,48	24,48				
53,38	54,68	924,37	947,65	23,28	1,30	1,46	21,82	24,00				
73,35	75,10	924,31	955,57	31,26	1,75	1,96	29,30	24,56				
42,25	43,55	924,25	942,93	18,68	1,30	1,46	17,22	24,07				
45,30	46,69	924,21	944,15	19,94	1,39	1,56	18,38	24,18				
44,39	45,46	923,96	943,01	19,05	1,07	1,20	17,85	24,40				
87,16	89,22	923,90	961,48	37,58	2,06	2,31	35,27	24,24				





Ознака узорка	Маса узорка (g)	Маса узорка са парафином (g)	Маса суда са водом (g)	Маса суда са потопљеним узорком (g)	Запремина узорка са парафином $V_{up}$ (cm <sup>3</sup> )	Маса парафина $m_p$ (g)	Запремина парафина $V_p$ (cm <sup>3</sup> )	Запремина узорка $V_u$ (cm <sup>3</sup> )	Запреminsка тежина $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Средња вредност $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Квадратно одступање $\sigma$ (%)	Коефицијент варијације $v$ (%)
Б - 12 (18,5-19,0)	45,54	46,44	931,33	950,49	19,16	0,90	1,01	18,15	24,61	24,83	0,129	0,518
	41,25	42,24	931,30	948,72	17,42	0,99	1,11	16,31	24,81			
	69,14	70,47	931,27	960,03	28,76	1,33	1,49	27,27	24,87			
	45,15	46,09	921,64	940,46	18,82	0,94	1,05	17,77	24,93			
	63,66	64,89	921,57	947,96	26,39	1,23	1,38	25,01	24,97			
	52,32	53,46	921,50	943,50	22,00	1,14	1,28	20,72	24,77			
Б - 12 (93,0-94,0)	49,48	50,55	931,24	952,32	21,08	1,07	1,20	19,88	24,42	24,33	0,213	0,875
	76,97	78,33	931,23	963,52	32,29	1,36	1,52	30,77	24,54			
	68,54	69,73	931,21	959,93	28,72	1,19	1,33	27,39	24,55			
	45,67	46,65	921,45	941,00	19,55	0,98	1,10	18,45	24,28			
	41,36	42,26	921,42	939,20	17,78	0,90	1,01	16,77	24,19			
	63,59	64,88	921,39	948,82	27,43	1,29	1,45	25,98	24,01			
Б - 12 (127,0-128,0)	36,46	37,30	931,21	946,78	15,57	0,84	0,94	14,63	24,45	24,62	0,153	0,621
	58,57	59,78	931,19	956,03	24,84	1,21	1,36	23,48	24,47			
	66,13	67,47	931,15	959,05	27,90	1,34	1,50	26,40	24,58			
	94,78	96,46	921,36	960,75	39,39	1,68	1,88	37,51	24,79			
	46,78	47,86	921,32	941,18	19,86	1,08	1,21	18,65	24,61			
	73,18	74,48	921,30	951,70	30,40	1,30	1,46	28,94	24,80			
Б - 14 (10,5-11,0)	78,50	80,23	930,94	964,20	33,26	1,73	1,94	31,32	24,59	24,39	0,187	0,766
	43,89	45,24	930,92	950,02	19,10	1,35	1,51	17,59	24,48			
	48,56	49,75	930,88	951,59	20,71	1,19	1,33	19,38	24,59			
	46,86	48,17	928,26	948,68	20,42	1,31	1,47	18,95	24,26			
	72,24	73,79	928,22	959,10	30,88	1,55	1,74	29,14	24,32			
	127,80	130,20	921,81	976,45	54,64	2,40	2,69	51,95	24,13			
Б - 14 (11,5-12,0)	94,59	96,50	930,86	971,26	40,40	1,91	2,14	38,26	24,25	24,27	0,063	0,260
	53,78	55,10	930,79	954,03	23,24	1,32	1,48	21,76	24,25			
	80,10	81,78	930,77	965,03	34,26	1,68	1,88	32,38	24,27			
	48,35	49,45	928,13	948,81	20,68	1,10	1,23	19,45	24,39			
	108,53	110,77	921,67	968,16	46,49	2,24	2,51	43,98	24,21			
	52,24	53,47	928,09	950,61	22,52	1,23	1,38	21,14	24,24			
Б - 14 (82,2-82,5)	72,92	74,38	930,74	961,78	31,04	1,46	1,64	29,40	24,33	24,26	0,121	0,500
	97,41	99,21	930,71	971,94	41,23	1,80	2,02	39,21	24,37			
	91,48	93,35	930,70	969,65	38,95	1,87	2,10	36,85	24,35			
	59,84	60,97	928,04	953,51	25,47	1,13	1,27	24,20	24,25			
	90,54	92,27	928,00	966,88	38,88	1,73	1,94	36,94	24,04			
	86,96	88,63	927,95	965,05	37,10	1,67	1,87	35,23	24,22			
Б - 14 (98,5-99,0)	52,79	54,03	930,67	953,01	22,34	1,24	1,39	20,95	24,72	24,68	0,120	0,486
	40,45	41,48	930,65	947,83	17,18	1,03	1,15	16,03	24,76			
	42,73	43,92	930,63	949,02	18,39	1,19	1,33	17,06	24,58			
	87,17	88,75	927,92	964,25	36,33	1,58	1,77	34,56	24,74			
	75,37	76,56	927,84	958,98	31,14	1,19	1,33	29,81	24,81			
	53,30	54,51	927,82	950,52	22,70	1,21	1,36	21,34	24,50			
Б - 14 (123,0-123,3)	62,82	64,09	930,60	956,72	26,12	1,27	1,42	24,70	24,95	24,78	0,153	0,618
	42,94	43,90	930,58	948,57	17,99	0,96	1,08	16,91	24,91			
	60,84	62,25	930,56	956,24	25,68	1,41	1,58	24,10	24,77			
	80,63	82,38	927,79	961,74	33,95	1,75	1,96	31,99	24,73			
	78,32	79,85	927,76	960,81	33,05	1,53	1,72	31,33	24,52			
	98,13	99,74	927,74	968,35	40,61	1,61	1,80	38,81	24,81			
Б - 14 (134,1-134,8)	53,17	54,45	930,53	953,77	23,24	1,28	1,43	21,81	23,92	24,06	0,239	0,995
	70,64	72,26	930,45	960,67	30,22	1,62	1,82	28,40	24,40			
	75,32	76,74	930,37	962,34	31,97	1,42	1,59	30,38	24,32			
	68,11	69,38	927,72	957,01	29,29	1,27	1,42	27,87	23,98			
	53,15	54,39	927,65	950,85	23,20	1,24	1,39	21,81	23,91			
	65,14	66,48	927,62	955,94	28,32	1,34	1,50	26,82	23,83			
									$\Sigma$	24,47	0,294	1,202

**САДРЖИНА ВОДЕ**

Ознака узорка	Бруто маса влажног узорка (g)	Бруто маса сувог узорка (g)	Маса таре (g)	Маса воде (g)	Маса сувог узорка (g)	Садржина воде w (%)	Средња вредност w (%)	Квадратно одступање $\sigma$ (%)	Коефицијент варијације v (%)
АД	112,78	106,95	35,6	5,83	71,35	8,17	8,21	0,404	4,917
	101,13	96,66	37,2	4,47	59,46	7,52			
	99,66	94,52	36,6	5,14	57,92	8,87			
	103,18	98,03	35,9	5,15	62,13	8,29			
	101,44	96,22	32,5	5,22	63,72	8,19			
	97,13	92,25	34,2	4,88	58,08	8,40			
	98,45	93,73	34,0	4,72	59,74	7,90			
	99,11	94,48	35,2	4,63	59,32	7,81			
	100,55	95,33	35,3	5,22	60,03	8,70			
	99,16	94,33	36,1	4,83	58,23	8,29			
Д	104,11	99,63	37,8	4,48	61,83	7,25	7,36	0,291	3,946
	99,98	95,37	35,3	4,61	60,07	7,67			
	95,13	90,97	33,1	4,16	57,87	7,19			
	101,33	96,89	34,6	4,44	62,29	7,13			
	100,7	96,23	32,2	4,47	64,03	6,98			
	105,35	100,05	31,5	5,3	68,55	7,73			
	104,11	99,15	29,1	4,96	70,05	7,08			
	99,87	95,16	34,8	4,71	60,36	7,80			
	95,88	91,57	33,7	4,31	57,87	7,45			
	97,13	92,72	32,6	4,41	60,12	7,34			
Б-14 (134,1-134,8)	100,9	95,88	31,9	5,02	63,98	7,85	7,40	0,251	3,397
	103,16	98,52	36,5	4,64	62,02	7,48			
	99,34	95,11	34,9	4,23	60,21	7,03			
	102,58	97,77	33,3	4,81	64,47	7,46			
	102,66	97,99	32,9	4,67	65,09	7,17			
	95,17	90,95	32,1	4,22	58,85	7,17			
	98,22	93,75	34,3	4,47	59,45	7,52			
	99,78	94,99	32,6	4,79	62,39	7,68			
	96,13	91,65	29,8	4,48	61,85	7,24			
97,88	93,21	30,2	4,67	63,01	7,41				







**ЈЕДНООСНА ЧВРСТОЋА НА ПРИТИСАК**  
**(из истражних бушотина)**

Ознака узорка	Димензије узорка		Сила која доводи до лома $P$ (kN)	Површина узорка $A$ (m <sup>2</sup> )	Чврстоћа на притисак $\sigma_{ci}^{UCS}$ (MN/m <sup>2</sup> )	Средња вредност $\sigma_{ci}^{UCS}$ (MN/m <sup>2</sup> )	Квадратно одступање $\sigma$ (%)	Коефицијент варијације $v$ (%)			
	$d$ (mm)	$h$ (mm)									
Б -12 (9,0-9,5)	82,7	152,2	141	0,0053716	26,25	27,44	1,68	6,11			
	82,5	131,1	153	0,0053456	28,62						
Б -12 (18,5-19,0)	82,4	168,3	450	0,0053327	84,39	86,57	4,96	5,73			
Б -12 (93,0-94,0)	82,5	163,6	430	0,0053456	80,44						
	82,5	165,9	474	0,0053456	88,67						
	82,6	167,2	485	0,0053586	90,51						
	82,5	166,9	432	0,0053456	80,81						
Б -12 (127,0-128,0)	82,6	163,8	508	0,0053586	94,80						
	82,5	162,5	495	0,0053456	92,60						
	82,5	168,3	475	0,0053456	88,86						
	82,5	163,0	512	0,0053456	95,78						
	82,5	169,9	484	0,0053456	90,54						
Б -14 (10,5-11,0)	82,3	127,0	448	0,0053197	84,21				31,22	0,61	1,94
Б -14 (11,5-12,0)	82,3	167,4	458	0,0053197	86,09						
	81,9	167,7	435	0,0052681	82,57						
Б -14 (82,2-82,5)	82,6	164,2	460	0,0053586	85,84						
	82,6	126,7	472	0,0053586	88,08						
Б -14 (98,5-99,0)	82,5	165,7	446	0,0053456	83,43						
	82,5	166,6	426	0,0053456	79,69						
Б -14 (123,0-123,3)	82,6	164,7	434	0,0053586	80,99						
Б -14 (134,1-134,8)	82,7	166,1	170	0,0053716	31,65						
	82,6	168,5	165	0,0053586	30,79						











## ЈЕДНООСНА ЧВРСТОЋА НА ПРИТИСАК









Ознака узорка	Пре испитивања	После испитивања
Б-12 (9,0-9,5m)		
Б-12 (9,0-9,5m)		



## ЈЕДНООСНА ЧВРСТОЋА НА ПРИТИСАК









Ознака узорка	Пре испитивања	После испитивања
Б - 12 (18,5-19,0m)	 <p data-bbox="586 646 727 678">Б - 12 (18,5 - 19,0 m) 1</p>	 <p data-bbox="1065 646 1206 678">Б - 12 (18,5 - 19,0 m) 1</p>
Б - 12 (93,0-94,0m)	 <p data-bbox="586 993 727 1024">Б - 12 (93,0 - 94,0 m) 1</p>	 <p data-bbox="1065 993 1206 1024">Б - 12 (93,0 - 94,0 m) 1</p>
Б - 12 (93,0-94,0m)	 <p data-bbox="586 1350 727 1381">Б - 12 (93,0 - 94,0 m) 1</p>	 <p data-bbox="1065 1350 1206 1381">Б - 12 (93,0 - 94,0 m) 2</p>
Б - 12 (93,0-94,0m)	 <p data-bbox="586 1686 727 1717">Б - 12 (93,0 - 94,0 m) 3</p>	 <p data-bbox="1065 1686 1206 1717">Б - 12 (93,0 - 94,0 m) 3</p>











Ознака узорка	Пре испитивања	После испитивања
Б - 12 (93,0-94,0m)		
Б - 12 (93,0-94,0m)		
Б - 12 (127,0-128,0m)		
Б - 12 (127,0-128,0m)		










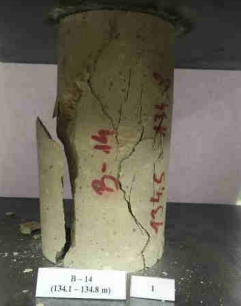
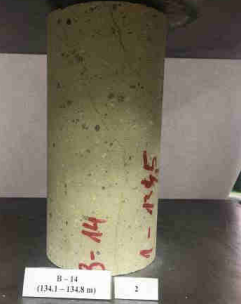



Ознака узорка	Пре испитивања	После испитивања
Б - 12 (127,0-128,0m)	 <p data-bbox="597 541 748 575">B - 12 (127,0 - 128,0 m) 3</p>	 <p data-bbox="1076 541 1227 575">B - 12 (127,0 - 128,0 m) 3</p>
Б - 12 (127,0-128,0m)	 <p data-bbox="597 892 748 926">B - 12 (127,0 - 128,0 m) 4</p>	 <p data-bbox="1076 892 1227 926">B - 12 (127,0 - 128,0 m) 4</p>
Б - 12 (127,0-128,0m)	 <p data-bbox="597 1243 748 1276">B - 12 (127,0 - 128,0 m) 5</p>	 <p data-bbox="1076 1243 1227 1276">B - 12 (127,0 - 128,0 m) 5</p>
Б - 14 (10,5-11,0m)	 <p data-bbox="597 1602 748 1635">B - 14 (10,5 - 11,0 m) 1</p>	 <p data-bbox="1076 1602 1227 1635">B - 14 (10,5 - 11,0 m) 1</p>



Ознака узорка	Пре испитивања	После испитивања
Б - 14 (11,5-12,0m)	 <p data-bbox="578 562 716 590">Б-14 (11,5 - 12,0 m) 1</p>	 <p data-bbox="1019 562 1157 590">Б-14 (11,5 - 12,0 m) 1</p>
Б - 14 (11,5-12,0m)	 <p data-bbox="578 919 716 947">Б-14 (11,5 - 12,0 m) 2</p>	 <p data-bbox="1019 919 1157 947">Б-14 (11,5 - 12,0 m) 2</p>
Б - 14 (82,2-82,5m)	 <p data-bbox="578 1255 716 1283">Б-14 (82,2 - 82,5 m) 1</p>	 <p data-bbox="1019 1276 1157 1304">Б-14 (82,2 - 82,5 m) 1</p>
Б - 14 (82,2-82,5m)	 <p data-bbox="578 1585 716 1612">Б-14 (82,2 - 82,5 m) 2</p>	 <p data-bbox="1019 1585 1157 1612">Б-14 (82,2 - 82,5 m) 2</p>



Ознака узорка	Пре испитивања		После испитивања	
Б - 14 (98,5-99,0m)				
Б - 14 (98,5-99,0m)				
Б - 14 (123,0-123,3m)				
Б - 14 (134,1-134,8m)				
Б - 14 (134,1-134,8m)				



## ЈЕДНООСНА ЧВРСТОЋА НА ПРИТИСАК (из блокова стенског материјала)











Ознака: У – 1 (Дацит 100% - Алтерисани дацит 0%), У – 2 (Дацит 90% - Алтерисани дацит 10%), У – 3 (Дацит 70% - Алтерисани дацит 30%), У – 4 (Дацит 50% - Алтерисани дацит 50%), У – 5 (Дацит 70% - Алтерисани дацит 30%), У – 6 (Дацит 0% - Алтерисани дацит 100%)

Порекло: ПК "Ћерамиде"











Број узорка	Димензије узорка		АД (%)	Сила која доводи до лома Р (кН)	Површина узорка А (m <sup>2</sup> )	Чврстоћа на притисак $\sigma_{ci}^{UCS}$ (MN/m <sup>2</sup> )	Средња вредност $\sigma_{ci}^{UCS}$ (MN/m <sup>2</sup> )	Квадратно одступање $\sigma$ (%)	Коефицијент варијације $v$ (%)
	d (mm)	h (mm)							
У – 1	54,0	108,4	0,0	235	0,0023328	100,74	103,72	2,92	2,82
	54,1	108,3	0,0	249	0,0023328	106,74			
	54,1	108,8	0,0	239	0,0023157	103,21			
	54,1	108,6	0,0	236	0,0023328	101,16			
	54,1	108,4	0,0	250	0,0023414	106,77			
У – 2	54,1	113,0	10,1	138	0,0023328	59,16	59,12	1,17	1,98
	54,1	113,4	10,2	139	0,0023243	59,80			
	54,1	113,4	9,8	135	0,0023328	57,87			
	54,1	113,2	9,9	141	0,0023243	60,66			
	54,1	113,5	10,0	136	0,0023414	58,08			
У – 3	54,1	109,6	29,8	91	0,0023328	39,01	38,01	1,47	3,86
	54,1	109,6	30,1	90	0,0023328	38,58			
	54,1	111,4	30,2	87	0,0023072	37,71			
	54,0	109,3	29,9	83	0,0023328	35,58			
	54,1	109,3	30,0	91	0,0023243	39,15			
У – 4	54,1	108,0	50,3	79	0,0022987	34,37	35,96	1,39	3,86
	54,0	108,9	50,2	81	0,0023243	34,85			
	54,1	108,8	50,4	84	0,0023328	36,01			
	54,1	108,3	50,3	88	0,0023328	37,72			
	54,1	108,8	50,1	86	0,0023328	36,87			
У – 5	54,2	109,1	70,1	78	0,0023414	33,31	34,46	0,85	2,46
	54,2	108,4	70,0	79	0,0023243	33,99			
	54,2	109,5	69,9	82	0,0023243	35,28			
	54,2	109,9	70,1	82	0,0023243	35,28			
	54,2	109,6	70,2	80	0,0023243	34,42			
У – 6	54,5	108,3	100,0	79	0,0023072	34,24	33,90	0,84	2,48
	54,4	108,6	100,0	81	0,0023243	34,85			
	54,5	108,5	100,0	80	0,0023328	34,29			
	54,5	108,6	100,0	78	0,0023328	33,44			
	54,5	108,5	100,0	76	0,0023243	32,70			



## ЈЕДНООСНА ЧВРСТОЋА НА ПРИТИСАК











Ознака узорка	Пре испитивања	После испитивања
У-1		
У-1		
У-1		
У-1		
У-1		













Ознака узорка	Пре испитивања	После испитивања
у-2	 A cylindrical concrete specimen, labeled '1' at the bottom, with two horizontal metal bands around its middle. It is intact and stands upright on a dark surface.	 The same cylindrical concrete specimen, labeled '1' at the bottom, after being crushed. It is broken into several large, angular fragments, with some smaller pieces scattered around it.
у-2	 A cylindrical concrete specimen, labeled '2' at the bottom, with two horizontal metal bands around its middle. It is intact and stands upright on a dark surface.	 The same cylindrical concrete specimen, labeled '2' at the bottom, after being crushed. It is broken into several large, angular fragments, with some smaller pieces scattered around it.
у-2	 A cylindrical concrete specimen, labeled '3' at the bottom, with two horizontal metal bands around its middle. It is intact and stands upright on a dark surface.	 The same cylindrical concrete specimen, labeled '3' at the bottom, after being crushed. It is broken into several large, angular fragments, with some smaller pieces scattered around it.
у-2	 A cylindrical concrete specimen, labeled '4' at the bottom, with two horizontal metal bands around its middle. It is intact and stands upright on a dark surface.	 The same cylindrical concrete specimen, labeled '4' at the bottom, after being crushed. It is broken into several large, angular fragments, with some smaller pieces scattered around it.
у-2	 A cylindrical concrete specimen, labeled '5' at the bottom, with two horizontal metal bands around its middle. It is intact and stands upright on a dark surface.	 The same cylindrical concrete specimen, labeled '5' at the bottom, after being crushed. It is broken into several large, angular fragments, with some smaller pieces scattered around it.















Ознака узорка	Пре испитивања		После испитивања	
у-3				
у-3				
у-3				
у-3				
у-3				













Ознака узорка	Пре испитивања	После испитивања
у - 4	 A cylindrical concrete sample with a central green band and a bottom grey band, labeled '1' at the bottom.	 The same cylindrical concrete sample after testing, showing significant vertical cracking and surface spalling, labeled '1' at the bottom.
у - 4	 A cylindrical concrete sample with a central green band and a bottom grey band, labeled '2' at the bottom.	 The same cylindrical concrete sample after testing, showing vertical cracking and surface damage, labeled '2' at the bottom.
у - 4	 A cylindrical concrete sample with a central green band and a bottom grey band, labeled '3' at the bottom.	 The same cylindrical concrete sample after testing, showing vertical cracking and surface damage, labeled '3' at the bottom.
у - 4	 A cylindrical concrete sample with a central green band and a bottom grey band, labeled '4' at the bottom.	 The same cylindrical concrete sample after testing, showing vertical cracking and surface damage, labeled '4' at the bottom.
у - 4	 A cylindrical concrete sample with a central green band and a bottom grey band, labeled '5' at the bottom.	 The same cylindrical concrete sample after testing, showing vertical cracking and surface damage, labeled '5' at the bottom.



Ознака узорка	Пре испитивања	После испитивања
у-5	 A cylindrical concrete sample, labeled '1' at the bottom, showing a smooth surface and uniform texture.	 The same cylindrical concrete sample, labeled '1' at the bottom, after testing. It shows significant vertical cracking and surface spalling, particularly at the bottom.
у-5	 A cylindrical concrete sample, labeled '2' at the bottom, showing a smooth surface and uniform texture.	 The same cylindrical concrete sample, labeled '2' at the bottom, after testing. It shows severe vertical cracking and extensive surface spalling, with a large portion of the top and sides missing.
у-5	 A cylindrical concrete sample, labeled '3' at the bottom, showing a smooth surface and uniform texture.	 The same cylindrical concrete sample, labeled '3' at the bottom, after testing. It shows vertical cracking and surface spalling, similar to sample 1.
у-5	 A cylindrical concrete sample, labeled '4' at the bottom, showing a smooth surface and uniform texture.	 The same cylindrical concrete sample, labeled '4' at the bottom, after testing. It shows severe vertical cracking and extensive surface spalling, with a large portion of the top and sides missing.
у-5	 A cylindrical concrete sample, labeled '5' at the bottom, showing a smooth surface and uniform texture.	 The same cylindrical concrete sample, labeled '5' at the bottom, after testing. It shows vertical cracking and surface spalling, similar to sample 1.



Ознака узорка	Пре испитивања	После испитивања
У – 6		
У – 6		
У – 6		
У – 6		
У – 6		

**ТРООСНА ЧВРСТОЋА НА ПРИТИСАК**  
**(ТРИАКСИЈАЛНИ ОПИТ)**

Ознака: У – 1 (Дацит 100% - Алтерисани дацит 0%), У – 2 (Дацит 90% - Алтерисани дацит 10%), У – 3 (Дацит 70% - Алтерисани дацит 30%), У – 4 (Дацит 50% - Алтерисани дацит 50%), У – 5 (Дацит 70% - Алтерисани дацит 30%), У – 6 (Дацит 0% - Алтерисани дацит 100%)

Порекло: ПК "Ћерамиде"

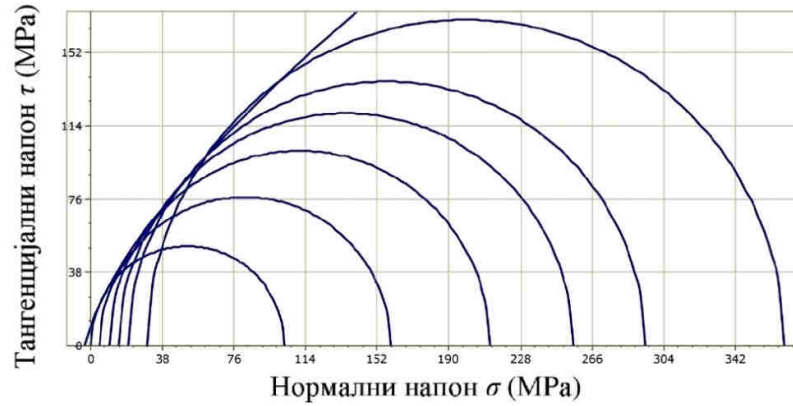
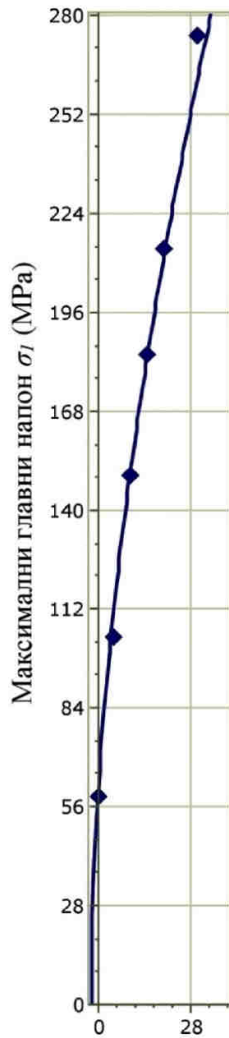
Ознака узорка	Број узорка	Бочно оптерећење $\sigma_3$ (MN/m <sup>2</sup> )	Димензије узорка		АД (%)	Повершина узорка А (m <sup>2</sup> )	Вертикално оптерећење	
			d (mm)	h (mm)			Сила која доводи до лома Р (N)	Чврстоћа на притисак $\sigma_1$ (MN/m <sup>2</sup> )
У - 1	1	5	54,0	108,4	0,0	0,0022902	365	159,37
	2	10	54,1	108,3	0,0	0,0022987	488	212,29
	3	15	54,1	108,8	0,0	0,0022987	589	256,23
	4	20	54,1	108,6	0,0	0,0022987	677	294,51
	5	30	54,1	108,4	0,0	0,0022987	846	368,03
У - 2	1	5	54,1	113,0	9,9	0,0022987	241	104,84
	2	10	54,1	113,4	9,9	0,0022987	345	150,08
	3	15	54,1	113,4	10,1	0,0022987	425	184,89
	4	20	54,1	113,2	9,8	0,0022987	494	214,90
	5	30	54,1	113,5	10,2	0,0022987	632	274,94
У - 3	1	5	54,1	109,6	29,6	0,0022987	172	74,82
	2	10	54,1	109,6	30,0	0,0022987	253	110,06
	3	15	54,1	111,4	30,0	0,0022987	322	140,08
	4	20	54,0	109,3	29,9	0,0022902	378	165,05
	5	30	54,1	109,3	30,1	0,0022987	494	214,90
У - 4	1	5	54,1	108,0	50,8	0,0022987	163	70,91
	2	10	54,0	108,9	51,7	0,0022902	236	103,05
	3	15	54,1	108,8	51,3	0,0022987	303	131,81
	4	20	54,1	108,3	51,5	0,0022987	361	157,04
	5	30	54,1	108,8	50,6	0,0022987	467	203,16
У - 5	1	5	54,2	109,1	70,0	0,0023072	157	68,05
	2	10	54,2	108,4	70,6	0,0023072	224	97,09
	3	15	54,2	109,5	70,2	0,0023072	291	126,13
	4	20	54,2	109,9	69,8	0,0023072	348	150,83
	5	30	54,2	109,6	69,9	0,0023072	452	195,91
У - 6	1	5	54,5	108,3	100,0	0,0023328	149	63,87
	2	10	54,4	108,6	100,0	0,0023243	214	92,07
	3	15	54,5	108,5	100,0	0,0023328	280	120,03
	4	20	54,5	108,6	100,0	0,0023328	338	144,89
	5	30	54,5	108,5	100,0	0,0023328	439	188,18





## ТРООСНА ЧВРСТОЋА НА ПРИТИСАК (ТРИАКСИЈАЛНИ ОПИТ)

Ознака узорка	Бочно оптерећење $\sigma_3$ (MN/m <sup>2</sup> )	Чврстоћа на притисак $\sigma_1$ (MN/m <sup>2</sup> )	Чврстоћа на притисак непоремећеног стенског материјала $\sigma_{ci}^{TX}$ (MN/m <sup>2</sup> )	Материјална константа $m_i$
У - 1	0	103,72	101,350	31,581
	5	159,37		
	10	212,29		
	15	256,23		
	20	294,51		
	30	368,03		










Материјал	
Д 100%, АД 0%	
Резултати триаксијалних испитивања	
Једноосна чврстоћа на притисак непоремећеног стенског материјала $\sigma_{ci}$	101,350
$m_i$	31,581
Резидуали	0,018
Интервал предвиђања	
интервал	нема
Параметри дефинисања криве	
Коришћени алгоритам	линеарна регресија
Укупна грешка	вертикална
Тип грешака	релативна
Гранично затезање	
Гранична вредност	нема

Минимални главни напон  $\sigma_3$  (МПа)





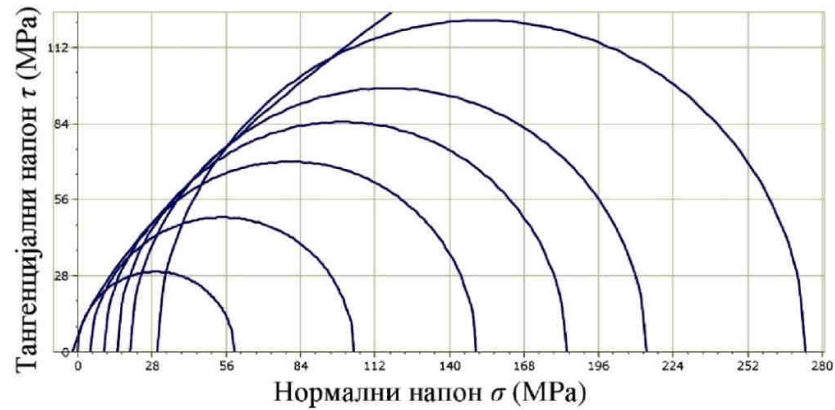
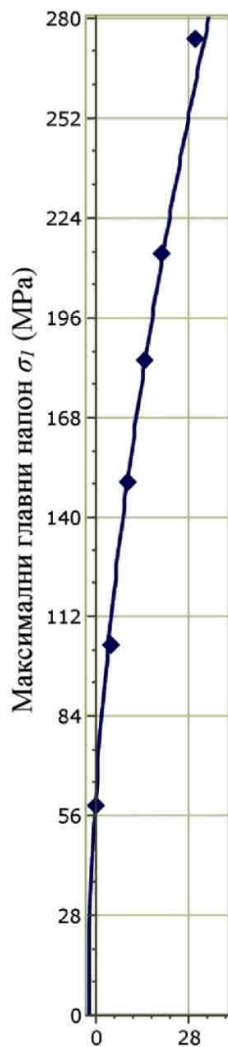
Ознака узорка	У – 1
Пре испитивања	
После испитивања	

Ознака узорка	Изглед узорка након лома		
У – 1			
			



## ТРООСНА ЧВРСТОЋА НА ПРИТИСАК (ТРИАКСИЈАЛНИ ОПИТ)

Ознака узорка	Бочно оптерећење $\sigma_3$ (MN/m <sup>2</sup> )	Чврстоћа на притисак $\sigma_1$ (MN/m <sup>2</sup> )	Чврстоћа на притисак непоремећеног стенског материјала $\sigma_{ci}^{TX}$ (MN/m <sup>2</sup> )	Материјална константа $m_i$
У - 2	0	59,12	58,000	29,014
	5	104,84		
	10	150,08		
	15	184,89		
	20	214,90		
	30	274,94		








Материјал	
Д 90%, АД 10%	
Резултати триаксијалних испитивања	
Једноосна чврстоћа на притисак непоремећеног стенског материјала $\sigma_{ci}$	58,000
$m_i$	29,014
Резидуали	0,042
Интервал предвиђања	
интервал	нема
Параметри дефинисања криве	
Коришћени алгоритам	линеарна регресија
Укупна грешка	вертикална
Тип грешака	релативна
Гранично затезање	
Гранична вредност	нема

Минимални главни напон  $\sigma_3$  (МПа)



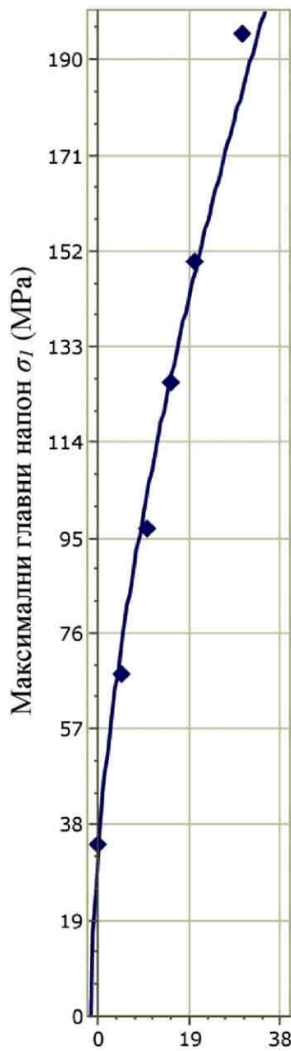
Ознака узорка	У – 2
Пре испитивања	
После испитивања	

Ознака узорка	Изглед узорка након лома		
У – 2			
			

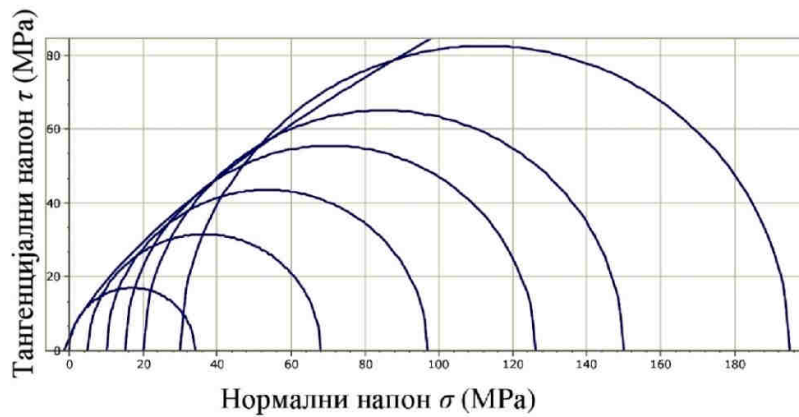


## ТРООСНА ЧВРСТОЋА НА ПРИТИСАК (ТРИАКСИЈАЛНИ ОПИТ)

Ознака узорка	Бочно оптерећење $\sigma_3$ (MN/m <sup>2</sup> )	Чврстоћа на притисак $\sigma_1$ (MN/m <sup>2</sup> )	Чврстоћа на притисак непоремећеног стенског материјала $\sigma_{ci}^{TX}$ (MN/m <sup>2</sup> )	Материјална константа $m_i$
У - 3	0	38,01	37,329	25,267
	5	74,82		
	10	110,06		
	15	140,08		
	20	165,05		
	30	214,90		










Минимални главни напон  $\sigma_3$  (МПа)



Материјал	
Д 70%, АД 30%	
Резултати триаксијалних испитивања	
Једноосна чврстоћа на притисак непоремећеног стенског материјала $\sigma_{ci}$	37,329
$m_i$	26,267
Резидуали	0,077
Интервал предвиђања	
интервал	нема
Параметри дефинисања криве	
Коришћени алгоритам	линеарна регресија
Укупна грешка	вертикална
Тип грешака	релативна
Гранично затезање	
Гранична вредност	нема



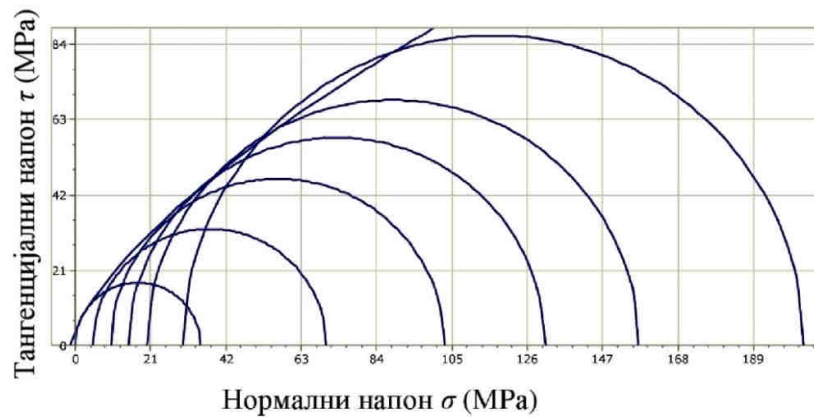
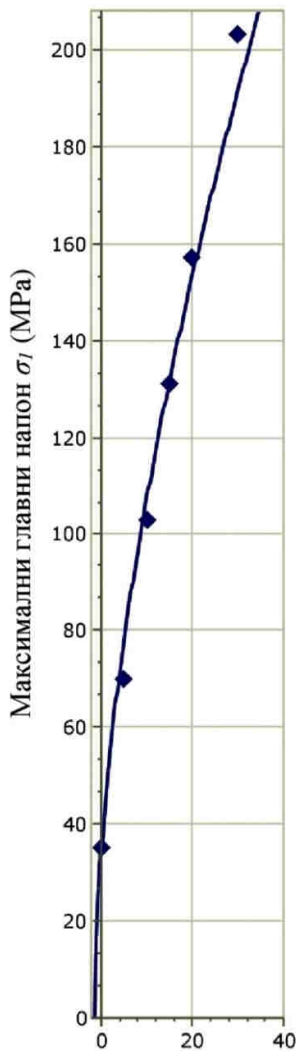
Ознака узорка	У – 3
Пре испитивања	
После испитивања	

Ознака узорка	Изглед узорка након лома		
У – 3			
			



## ТРООСНА ЧВРСТОЋА НА ПРИТИСАК (ТРИАКСИЈАЛНИ ОПИТ)

Ознака узорка	Бочно оптерећење $\sigma_3$ (MN/m <sup>2</sup> )	Чврстоћа на притисак $\sigma_1$ (MN/m <sup>2</sup> )	Чврстоћа на притисак непоремећеног стенског материјала $\sigma_{ci}^{TX}$ (MN/m <sup>2</sup> )	Материјална константа $m_i$
У - 4	0	35,96	34,397	24,166
	5	70,91		
	10	103,05		
	15	131,81		
	20	157,04		
	30	203,16		










Материјал	
Д 50%, АД 50%	
Резултати триаксијалних испитивања	
Једноосна чврстоћа на притисак непоремећеног стенског материјала $\sigma_{ci}$	34,397
$m_i$	24,166
Резидуали	0,077
Интервал предвиђања	
интервал	нема
Параметри дефинисања криве	
Коришћени алгоритам	линеарна регресија
Укупна грешка	вертикална
Тип грешака	релативна
Гранично затезање	
Гранична вредност	нема

Минимални главни напон  $\sigma_3$  (МПа)





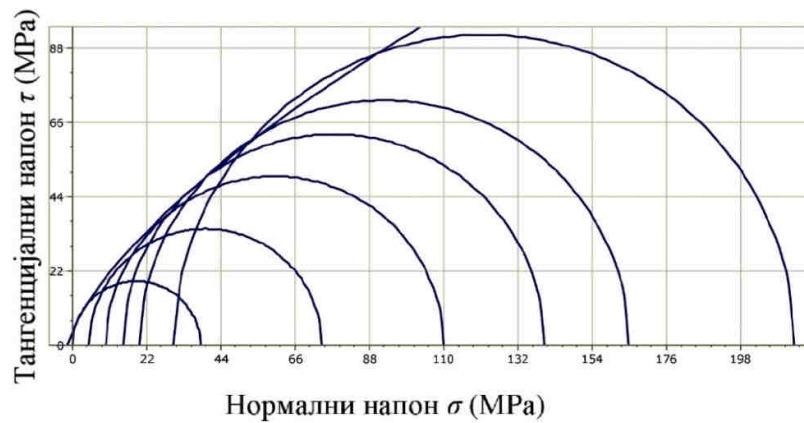
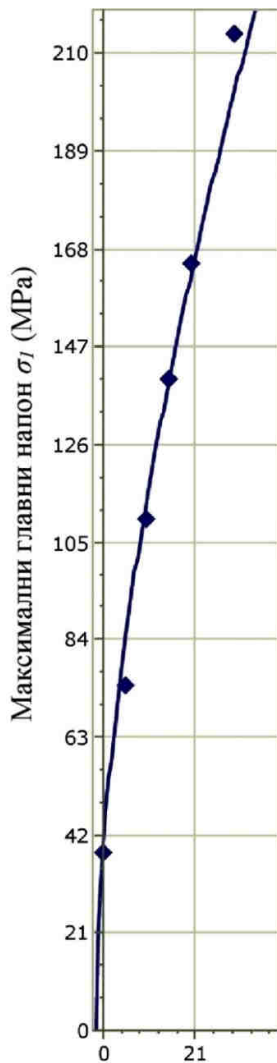
Ознака узорка	У – 4
Пре испитивања	
После испитивања	

Ознака узорка	Изглед узорка након лома				
У – 4					
					



## ТРООСНА ЧВРСТОЋА НА ПРИТИСАК (ТРИАКСИЈАЛНИ ОПИТ)

Ознака узорка	Бочно оптерећење $\sigma_3$ (MN/m <sup>2</sup> )	Чврстоћа на притисак $\sigma_1$ (MN/m <sup>2</sup> )	Чврстоћа на притисак непоремећеног стенског материјала $\sigma_{ci}^{TX}$ (MN/m <sup>2</sup> )	Материјална константа $m_i$
У - 5	0	34,46	33,408	22,467
	5	68,05		
	10	97,09		
	15	126,13		
	20	150,83		
	30	195,91		








Материјал	
Д 30%, АД 70%	
Резултати триаксијалних испитивања	
Једноосна чврстоћа на притисак непоремећеног стенског материјала $\sigma_{ci}$	33,408
$m_i$	22,467
Резидуали	0,076
Интервал предвиђања	
интервал	нема
Параметри дефинисања криве	
Коришћени алгоритам	линсарна регресија
Укупна грешка	вертикална
Тип грешака	релативна
Гранично затезање	
Гранична вредност	нема

Минимални главни напон  $\sigma_3$  (МПа)



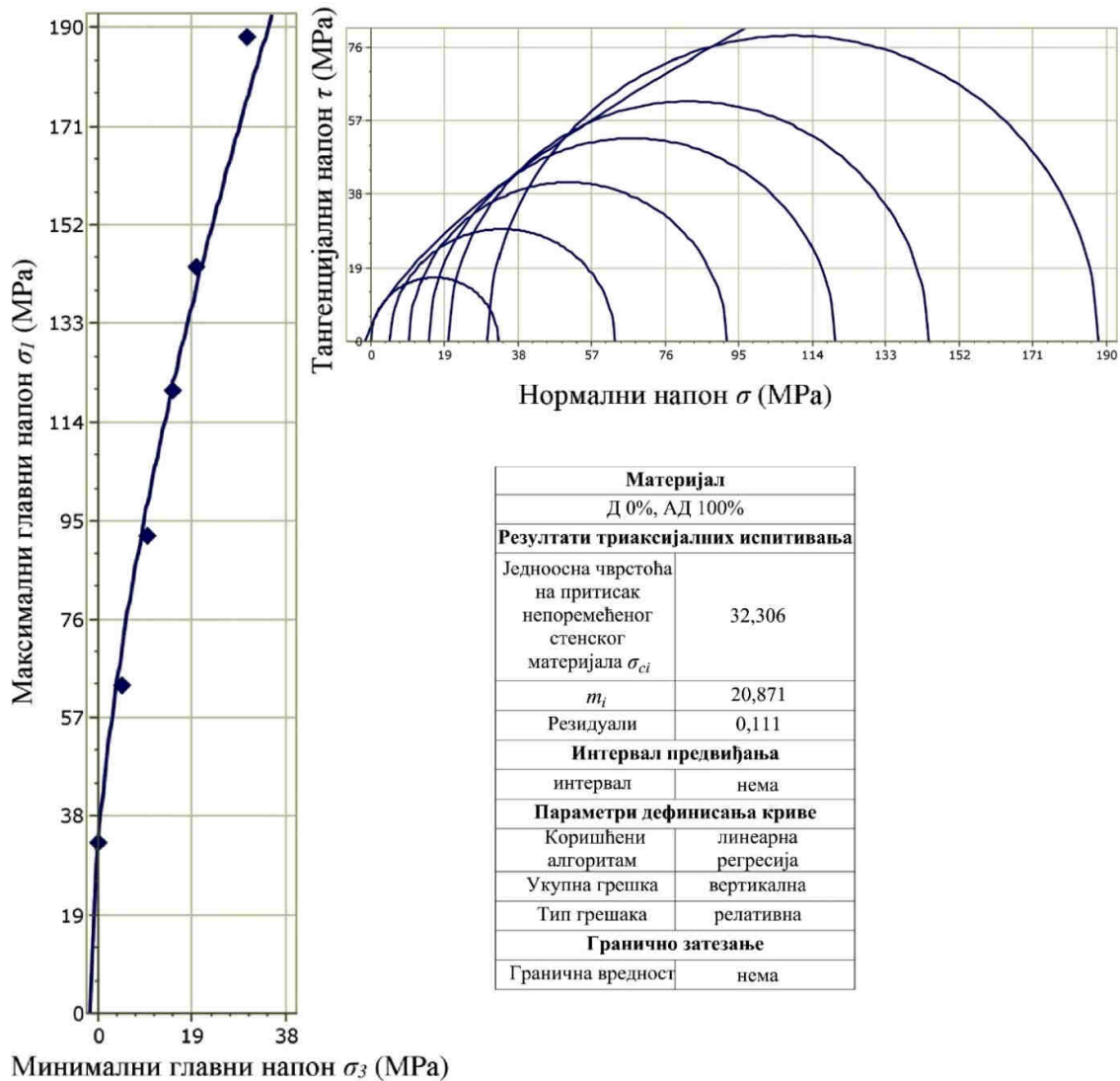
Ознака узорка	У – 5
Пре испитивања	
После испитивања	

Ознака узорка	Изглед узорака након лома		
У – 5			
			










## ТРООСНА ЧВРСТОЋА НА ПРИТИСАК (ТРИАКСИЈАЛНИ ОПИТ)

Ознака узорка	Бочно оптерећење $\sigma_3$ (MN/m <sup>2</sup> )	Чврстоћа на притисак $\sigma_1$ (MN/m <sup>2</sup> )	Чврстоћа на притисак непоремећеног стенског материјала $\sigma_{ci}^{TX}$ (MN/m <sup>2</sup> )	Материјална константа $m_i$
У - 6	0	33,90	32,306	20,871
	5	63,87		
	10	92,07		
	15	120,03		
	20	144,89		
	30	188,18		





Ознака узорка	У – 6
Пре испитивања	
После испитивања	

Ознака узорка	Изглед узорка након лома		
У – 6			
			



## БИОГРАФСКИ ПОДАЦИ

Вељко Рупар, мастер инжењер рударства је рођен 1991. године у Пожаревцу. Основну и средњу школу завршио је у Костолцу, након чега је 2009. године уписао Рударско – геолошки факултет Универзитета у Београду, где је 2013. године дипломирао са просечном оценом 9.25 на завршном раду под називом: "Геомеханички услови формирања завршне косине и одлагалишта површинског копа кречњака 'Мутаљ' - ЛБФЦ Беочин". У периоду 2013 – 2014. године је похађао Мастер студије на Рударско – геолошком факултету у Београду и завршио са просечном оценом 9.30 на Мастер раду под називом: "Утицај избора критеријума лома стенског материјала на анализу стабилности косина". Од 2015. године је запослен на Рударско – геолошком факултету Универзитета у Београду у звању асистента, а од 2017. године је ангажован на пројекту Министарства просвете, науке и технолошког развоја број ТР 33029 под називом "Изучавање могућности валоризације преосталих резерви угља у циљу обезбеђења стабилности енергетског сектора Републике Србије".

Докторске студије на Рударско – геолошком факултету Универзитета у Београду, студијски програм Рударско инжењерство, уписао је 2014. године. Положио је све законом прописане испите са просечном оценом 10,00.

Члан је међународног Друштва за механику стена ISRM (*International Society for Rock Mechanics*). Аутор је или коаутор више десетина научних и стручних радова из области механике стена и геомеханике.



## Изјава о ауторству

Име и презиме аутора Вељко Рупар

Број индекса P706/14

### Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Дефинисање механичких својстава алтерисаног стенског материјала лабораториским методама

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

**Потпис аутора**

У Београду, \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Вељко Рупар

Број индекса P706/14

Студијски програм Рударско инжењерство

Наслов рада Дефинисање механичких својстава алтерисаног стенског материјала лабораториским методама

Ментор проф. др Владимир Чебашек

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањена у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

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

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

**Потпис аутора**

У Београду, \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Дефинисање механичких својстава алтерисаног стенског материјала лабораториским методама

која је моје ауторско дело.

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

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се 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)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци.  
Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

**Потпис аутора**

У Београду, \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_