



**УНИВЕРЗИТЕТ „КИРИЛ И МЕТОДИЈ“  
ВО СКОПЈЕ**

**ГРАДЕЖЕН ФАКУЛТЕТ – СКОПЈЕ  
КАТЕДРА ПО ГЕОТЕХНИКА**



**Бојан, Михо Јаневски**

**ИНТЕГРАЛНА МЕТОДОЛОГИЈА ЗА ПРОЦЕНКА  
НА РИЗИК ОД ПОЈАВА НА НЕСТАБИЛНОСТ  
КАЈ КАРПЕСТИ МАСИ СО СЛАБ КВАЛИТЕТ**

**докторски труд**

**Скопје, јуни 2024**



**УНИВЕРЗИТЕТ „КИРИЛ И МЕТОДИЈ”  
ВО СКОПЈЕ**

**ГРАДЕЖЕН ФАКУЛТЕТ – СКОПЈЕ  
КАТЕДРА ПО ГЕОТЕХНИКА**



**Бојан, Михо Јаневски**

**ИНТЕГРАЛНА МЕТОДОЛОГИЈА ЗА ПРОЦЕНКА  
НА РИЗИК ОД ПОЈАВА НА НЕСТАБИЛНОСТ  
КАЈ КАРПЕСТИ МАСИ СО СЛАБ КВАЛИТЕТ**

**докторски труд**

**Скопје, јуни 2024**

Податоци и информации за кандидатот и докторскиот труд

Докторанд:

БОЈАН, МИХО ЈАНЕВСКИ

Тема:

ИНТЕГРАЛНА МЕТОДОЛОГИЈА ЗА ПРОЦЕНКА НА РИЗИК ОД ПОЈАВА НА НЕСТАБИЛНОСТ КАЈ КАРПЕСТИ МАСИ СО СЛАБ КВАЛИТЕТ

Ментор:

проф. д-р МИЛОРАД ЈОВАНОВСКИ

Градежен факултет – Скопје, Универзитет “Св. Кирил и Методиј” во Скопје

Комисија за одбрана:

Вонр. Проф. д-р ИГОР ПЕШЕВСКИ

Градежен факултет – Скопје

Проф. д-р РЕШАТ УЛУСАЈ

Хаџетепе Универзитет, Анкара, Турција

Проф. д-р ЈОСИФ ЈОСИФОВСКИ

Градежен факултет – Скопје

Проф. д-р ЈОВАН ПАПИЌ

Градежен факултет – Скопје

Научна област:

МЕХАНИКА НА КАРПИ

Датум на одбрана:

**Бојан, Михо Јаневски**

## **ИНТЕГРАЛНА МЕТОДОЛОГИЈА ЗА ПРОЦЕНКА НА РИЗИК ОД ПОЈАВА НА НЕСТАБИЛНОСТ КАЈ КАРПЕСТИ МАСИ СО СЛАБ КВАЛИТЕТ**

### **Апстракт**

Проценката на ризиците при изведба на косини кај карпестите маси со слаб квалитет претставува практичен предизвик на дневна основа, поради непредвидливите геолошки услови, како што се степенот на распаднаост, просторниот распоред на пукнатински системи, анизотропијата и сл. Имено, многу е тешко да се проценат реалните параметри на одредена карпеста средина, особено кај карпи со слаб квалитет, со кои би ја моделирале целата зона од интерес. Многу често, дури и во случај на екстензивни истражни работи, сеуште постојат одредени неизвесности во однос на параметрите и однесувањето на карпестите маси и многу е тешко да се направи компромис помеѓу економичноста и доверливоста на решението. Намалувањето на ризикот води кон неекономично решение, додека повисокото ниво на ризик може да ја загрози стабилноста.

Сознанијата во дисертацијата се главно поврзани со сопствени лабораториски и теренски истражувања и анализи, каде базата на податоци е составена од вкупно 58 усеци, каде најголем дел се со висини поголеми од 30 m, додека неколку од усеците надминуваат 100 m. Малиот број истражувања во комбинација со комплексните услови на теренот придонесоа за големи проблеми поврзани со стабилноста на косините, како развој на многу свлечишта, одрони, тензиони пукнатини и потенцијално нестабилни зони. Оттука, целта на истражувањето, е да се подобрат актуелните методологии и да се редефинираат аспектите поврзани со обезбедување на доверливи параметри. Согласно наодите од истражувањето, може да се заклучи дека најдобар начин за проценка на стабилноста е со примена на мулти-дисциплинарен пристап, односно со комбинација на различни методологии, особено кога се соочуваме со косини во непредвидливи теренски услови.

Методологијата претставува алатка која е наменета за инженерите од областа на геологијата и геотехниката и лицата кои се одговорни за управување со проектите, при решавање на проблеми со стабилноста на дневна основа. Предложената методологија нуди сукцесивен пристап на решавање на овие проблеми, каде е опфатен целокупниот процес, од самиот почеток каде се планира изработка на проектна програма, преку потребните истражувања и испитувања, потоа фазата на проектирање и носење на некои клучни одлуки, до изведба и експлоатација на финалното решение со адекватен систем од мерки за заштита и мониторинг. Во склоп на методологијата, даден е придонес и кон дефинирањето на степенот на hazard од обрушување кај карпести маси со слаб квалитет, преку автентичен систем за класификација. Дополнително, изработени се иновативни графикони за проценка на степенот на ризик за одредена косина во карпеста средина со слаб квалитет. Овие графички дијаграми се засновани на корелации помеѓу неколку клучни параметри кои можат да се дефинираат на релативно лесен начин. Основната цел е да се олесни работата на инженерите од областа на геологијата и геотехниката и да се зголеми нивната самоверба во фаза на планирање, проектирање и изведба на објектите.

Во истражувањето, отворени се солиден број на прашања кои можат да бидат разработени во понатамошни истражувања, со цел што пореално да се толкува и интерпретира вистинското механичко однесување на слабите карпести маси. Научниот придонес на истражувањето се очекува да биде во формулирањето на поголем број зависимости меѓу различни анализирани параметри и нивното влијание на доверливоста при проценка на ризикот од појава на нестабилност.

**Клучни зборови:** веројатност, доверливост, лом, методологија, ризик, стабилност, hazard.

**Bojan, Miho Janevski**

## **INTEGRAL METHODOLOGY FOR INSTABILITY RISK ASSESSMENT IN WEAK ROCK MASSES**

### **Abstract**

The assessment of the risks during the construction of slopes in weak rock masses is a practical challenge daily, due to the unpredictable geological conditions, such as the degree of weathering, the spatial distribution of the discontinuities, anisotropy, etc. Namely, it is very difficult to estimate the parameters of a specific rock environment, especially for rocks with poor quality, with which to model the entire zone of interest. Very often, even in the case of extensive investigative works, there are still certain uncertainties regarding the parameters and the behaviour of the rock masses and it is very difficult to make a compromise between the economy and the reliability of the solution. Reducing the risk leads to an uneconomical solution, while a higher level of risk can jeopardize the stability.

The findings in the dissertation are mainly related to own laboratory and field research and analysis, where the database is composed of a total of 58 cut sections, most of them with heights greater than 30 m, while several of the cuts exceed 100 m. The small number of investigative works combined with complex field conditions have contributed to major problems related to slope stability, such as the development of many landslides, rockfalls, tension cracks and potentially unstable zones. Hence, the research aims to improve the current methodologies and to redefine the aspects related to providing reliable parameters. According to the findings of the research, it can be concluded that the best way to assess stability is by applying a multi-disciplinary approach, that is, with a combination of different methodologies, especially when we are faced with slopes in unpredictable field conditions.

The methodology represents a tool that is intended for engineers in the field of geology and geotechnics and people who are responsible for project management when solving problems with stability daily. The proposed methodology offers a successive approach to solving these problems, where the entire process is covered, from the very beginning where the development of a project program is planned, through the necessary research and tests, then the design phase and making some key decisions, to the performance and exploitation of the final solution with an adequate system of protection and monitoring measures. In accordance with the methodology, a contribution was also made to the definition of the degree of hazard of weak rock masses, through an authentic classification system. In addition, innovative charts have been developed to assess the degree of risk for a specific slope in a rock environment of poor quality. These graphical diagrams are based on correlations between several key parameters that can be defined relatively easily. The main goal is to facilitate the work of engineers in the field of geology and geotechnics and to increase their self-confidence in the phases of planning, design and construction.

In the research, a solid number of questions are highlighted that can be investigated in further research, to analyse and interpret the actual mechanical behaviour of weak rock masses more realistically. The scientific contribution of the research is expected to be in the formulation of many dependencies between different analysed parameters and their impact on reliability when assessing the level of risk of instability.

**Key words:** failure, hazard, methodology, probability, reliability, risk, stability.

## БЛАГОДАРНОСТ

Изјавувам дека докторскиот труд е изработен самостојно, дека уредно ги цитирам сите користени извори и литература и дека трудот не е користен во рамките на други универзитетски студии или за стекнување на друго звање.

Своерачен потпис на докторандот

## ЛИСТА НА ТАБЕЛИ

<b>Табела 1.</b> Проценета просечна годишна економска загуба, како последица на свлечишта за различни држави (модифицирано според Sim et al., 2022) .....	14
<b>Табела 2.</b> Класификација за дефинирање на анизотриопија според неколку различни параметри, Saroglou & Tsiambaos, 2007 .....	31
<b>Табела 3.</b> Класификација на материјалите, согласно ISRM (Marinos & Hoek, 2001) .....	32
<b>Табела 4.</b> Преглед на препорачана зависност помеѓу едноакцијалната јакост на притисок (UCS) и индексот на точката јакост (PLI) .....	36
<b>Табела 5.</b> SMR класификација на карпести маси за косини (Romana, 1985, 1995) .....	42
<b>Табела 6.</b> Карактеристики на најкористените методи на гранична рамнотежа .....	50
<b>Табела 7.</b> Начин на дефинирање на геотехничка категорија (GC) по Еврокод 7, преку комбинации на геотехничка комплексност (GCC) и класите на влијанија (CC), согласно Walter, 2017 .....	58
<b>Табела 8.</b> Карактеристики на најчесто застапените пукнатински системи .....	67
<b>Табела 9.</b> Рејтинг за состојба на пукнатини ( $J_{Cond89}$ ), согласно Bieniawski, 1989 .....	69
<b>Табела 10.</b> Генерални арактеристики на косините со значајно свлекување .....	74
<b>Табела 11.</b> Генерални карактеристики на косините со локална нестабилност .....	75
<b>Табела 12.</b> Генерални карактеристики на анализираните косини кои се стабилни .....	76
<b>Табела 13.</b> Усвоени влезни параметри за карпите, согласно генерализираниот модел Hoek-Brown (Hoek et al., 2002), при анализата на стабилност со МГР и МКЕ .....	77
<b>Табела 14.</b> SMR (Romana, 1985, 1995) класификација за предметните косини од истражувањето, каде е проценета класата за услови на планарен лом .....	78
<b>Табела 15.</b> SMR (Romana, 1985, 1995) класификација за предметните косини од истражувањето, каде е проценета класата за услови на клиновиден лом .....	79
<b>Табела 16.</b> Дијапазон на варијација на параметрите во Q-slope методот, зависно од квалитетот на карпеста маса .....	81
<b>Табела 17.</b> Усвоени параметри за застапените пукнатински системи .....	82
<b>Табела 18.</b> Резултати од проценката на стабилност кај косините со регистрирано значајно свлекување .....	89
<b>Табела 19.</b> Резултати од проценката на стабилност кај косините со минорни (локални) деформации .....	90
<b>Табела 20.</b> Резултати од проценката на стабилност кај стабилните косини .....	92
<b>Табела 21.</b> Систем за рејтинг на hazard за косини кај карпи со слаб квалитет .....	94
<b>Табела 22.</b> Резултати од рангирањето на hazardот за анализираните косини .....	96
<b>Табела 23.</b> Граници на варијација на добиените параметри од теренските и лабораториските испитувања, за застапените материјали .....	114
<b>Табела 24.</b> Усвоени влезни параметри за анализите на стабилност во софтверските пакети Slide (МГР) и Plaxis (МКЕ) .....	116
<b>Табела 25.</b> Усвоени параметри на јакост на смолкнување на пукнатини при кинематските анализи на стабилност, во софтверските пакети Rocplane и Swedge .....	116
<b>Табела 26.</b> Добиеени параметри од евалуацијата на стабилноста за предметните косини, согласно Q-slope методот .....	119
<b>Табела 27.</b> Усвоени параметри на јакост на смолкнување на пукнатини при кинематските анализи на стабилност, во софтверските пакети Rocplane и Swedge .....	119

<b>Табела 28.</b> Резултати од анализите на стабилност за предметниот усек, согласно методите на гранична рамнотежа .....	122
<b>Табела 29.</b> Резултати од рангирањето на хазардот за анализираните косини .....	123
<b>Табела 30.</b> Сублимиран приказ на една анализа на стабилност за т.н. “едноставен” случај на планарен лом по различни методолошки пристапи .....	130
<b>Табела 31.</b> Предлог вредности за индексот на доверливост и веројатноста од лом за косини кај карпести маси со слаб квалитет, зависно од утврдената класа на влијание, согласно Еврокод 7 ..	130
<b>Табела 32.</b> Приказ на основните карактеристики за анализираните косини, во однос на свлекувањето настанато како резултат на површинската распадатост, поради изложеност на атмосферски услови подолг временски период .....	135



## ЛИСТА НА СЛИКИ

<b>Слика 1.</b> Дистрибуција на факторите кои придонесуваат за појава на свлечишта на светско ниво (Ng, 2012). .....	15
<b>Слика 2.</b> Дистрибуција на изворите кои придонесуваат за појава на свлечишта на светско ниво (Ng, 2012). .....	16
<b>Слика 3.</b> Приказ на појави на нестабилност во Република Македонија, а) Свлечиште на автопат А2, делница Кичево – Охрид, усек на стационача km 3+040, 03.2023; б) Одрон на регионален пат Велес – Градско, 03.2018; с) Свлечиште во зона на цевковод за МХЕЗ од хидросистем Ваташа, 12.2022; д) Свлечиште на автопат А2, делница Кичево – Охрид, усек на стационача km 3+700, 12.2023; е) Свлечиште на железницата од Коридор VIII, делница Куманово – Бељаковце, на стационача km 26+540; ф) Голем одрон и свлекување на магистралниот пат А3, делница Исти Бања – Акумулација Калиманци, 04.2022. ....	17
<b>Слика 4.</b> Шематски приказ на средини и соодветни модели за карактеризација на теренот, зависно од степенот на испуканост (Barton, 1998). .....	24
<b>Слика 5.</b> Анизотропија на деформабилност (E), јакост на смолкнување на масив ( $\tau$ ) и јакост на притисок на монолит ( $\sigma_p$ ) во правци 1 и 2. ....	29
<b>Слика 6.</b> Влијание на правецот на оптоварување на примерок во однос на рамнини на фолијација, за едноаксијална состојба на напрегање (Saroglou, 2013). ....	30
<b>Слика 7.</b> Приказ на влијание на насоката на оптоварување на примерок во однос на рамнини на фолијација, за триаксијална состојба на напрегање, за гнајс (Saroglou, 2013). ....	30
<b>Слика 8.</b> Класификација на карпи според јакост на притисок (Galvan, 1999): S-почва, HS-тврда почва, ES-екстремно мека карпа, VS-многу мека карпа, SR-мека карпа, LS-карпа со ниска јакост, MS-карпа со средна јакост, HS-карпа со висока јакост, VHS-карпа со многу висока јакост. ....	31
<b>Слика 9.</b> Компарација на анвелопи на лом за анизотропни карпи – глинци, добиени за различна ориентација на анизотропијата, користејќи модели на Hoek-Brown, модифициран Hoek-Brown согласно ARMR и смолкнување по слоевитост согласно Barton-Bandis, (Saroglou & Bar, 2019). ....	34
<b>Слика 10.</b> Анвелопи на лом согласно различни модели (лево) и дирекциски модел за одредување на анвелоп на јакост (десно), за ниво на нормален напон од 0.2 и 0.4 МПа, за рамнини на слоевитост од $30^{\circ} \pm 5^{\circ}$ , (Bar et al., 2018). ....	35
<b>Слика 11.</b> Шематски приказ на методологијата на работа, за реализација на целите на истражувањето во докторскиот труд. ....	38
<b>Слика 12.</b> Дијаграм за проценка на веројатност на лом ( $P_f$ ) за косини со примена на методолошкиот пристап Q-slope (Bar & Barton, 2017). ....	45
<b>Слика 13.</b> Шематски приказ на стереографска проекција за пресметка на стабилност на клин оформен од две пукнатини (Јовановски и др., 2020). ....	46
<b>Слика 14.</b> Поделба на основни видови на лом кај карпи и геометриски услови, со приказ на главните елементи на пад преку стереографска проекција, според E. Hoek и J. W. Bray, 1981: а) лом по должина на кружно-цилиндрични рамнини на лизгање, б) рамнински лом по должина на една пукнатина, с) клиновиден лом со пресек на две пукнатини, д) лом со превртување. ....	47
<b>Слика 15.</b> Шематски приказ за проценка на коефициентот на рапавост (JRC), согласно препораките на Barton и Choubey, 1977. ....	48
<b>Слика 16.</b> Хистограмски приказ со фреквенција на нормалната дистрибуција на индексот на точката јакост, од сопствени истражувања на вкупно 1610 карпести примероци. ....	52
<b>Слика 17.</b> Препораки за вредностите на индексот на доверливост и веројатноста од лом (US Army Corps of Engineers, 1997). ....	53
<b>Слика 18.</b> Шематски концептуален приказ на моделот Jointed Rock. ....	55
<b>Слика 19.</b> Видови и хиерархија на модели во втората генерација на Еврокод 7 (прилагодено и делумно дополнето, според Bond, 2019). ....	56

<b>Слика 20.</b> Врски помеѓу методите на истражување и анализа, во инженерската геологија и геотехниката, низ т.н. инженерскогеолошки и геотехнички триаголници (според Knill, 2003).	57
<b>Слика 21.</b> Дијаграм за дефинирање на процесот на моделирање во инженерската механика на карпи, според Feng & Hudson, 2004 (преземено од The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007–2014).	57
<b>Слика 22.</b> Основни компоненти на инженерскогеолошки модел (преземено од Baynes, F. J. and Parry, S. 2022. Guidelines for the development and application of engineering geological models on projects. International Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG), Commission 25, Publication No. 1, 129 pp.).	58
<b>Слика 23.</b> Модели на карпест масив за кои се препорачува примена на моделот Hoek-Brown-ов критериум на лом (преземено и комбинирано од презентација, Resat Ulusay: The Roles of engineering geology and rock mechanics in rock slope stability assessment, a review based on the current methods, Градежен факултет, Скопје, 2021).	59
<b>Слика 24.</b> Приказ на трасата на автопатот на геолошка карта на Република Македонија.	61
<b>Слика 25.</b> Панорамен приказ на дел од трасата и фронтален поглед на еден карактеристичен усек на автопатот А2, делница Кичево – Охрид (09.2018).	62
<b>Слика 26.</b> Инженерскогеолошки попречен профил (1 – 1') за карактеристичниот усек.	63
<b>Слика 27.</b> Фото-документација од истражни дупнатини во деградирани шкрилци.	64
<b>Слика 28.</b> Испитување на индексот на точкаста јакост (PLI) во лабораториски услови.	64
<b>Слика 29.</b> Графичка интерпретација на резултати од сопствени истражувања на едноаксијалната јакост на притисок (UCS) изразена преку индекс на точкаста јакост (PLI), за мерења вршени нормално (горе) и паралелно (долу) на фолијација, на вкупно 1610 карпести примероци.	65
<b>Слика 30.</b> Корелативна зависност помеѓу вредностите на индексот на точкаста јакост ( $J_s$ ) за испитувања вршени нормално ( $J_{sn}$ ) и паралелно на фолијацијата ( $J_{sp}$ ), за предметните карпести маси од сопствените истражувања на вкупно 1610 карпести примероци.	66
<b>Слика 31.</b> Стереографска проекција со приказ на падот на трасата на автопатот, ориентација на фолијацијата и евидентирани пукнатински системи за застапените шкрилести карпи.	67
<b>Слика 32.</b> Проценка на јакост на притисок на пукнатински сидови во зависност од одскокот на Schmidt-овиот чекан (SHRV) и соодветната волуменската тежина на карпестата маса, согласно Deere & Miller, 1966.	68
<b>Слика 33.</b> Графичка презентација на вредностите на геолошкиот индекс на јакост (GSI) за комплетно до високо деградирани зони (црвена боја), умерено деградирани зони (сина боја) и релативно поцврстите свежи зони (зелена боја) од застапените карпести маси, согласно квантитативниот пристап предложен од страна на Hoek, Carter & Diederichs, 2013.	70
<b>Слика 34.</b> Прикази на клиновиден лом, регистриран кај застапените анализирани косини, како резултат на комбинација од неповолни пукнатински системи со челото на косината.	71
<b>Слика 35.</b> Приказ на дел од анализирани косини (03.2017 – 06.2020).	72
<b>Слика 36.</b> Хистограми со фреквенција на број на усеци зависно од нивната висина (горе) и квалитетот на карпа (средина) и зависност помеѓу висината и генералниот агол на усеците (долу).	73
<b>Слика 37.</b> Излези од програмскиот пакет RocPlane при анализа на можност од планарен лом, каде шематски се прикажани пресметковните модели и добиените резултати за карактеристична косина која е стабилна без локални деформации (горе) и за карактеристична косина каде е регистриран рамнински лом (долу).	83
<b>Слика 38.</b> Излез од програмскиот пакет Swedge при анализа на можност од клиновиден лом, за карактеристична условно стабилна косина, каде се регистрирани локални деформации.	84
<b>Слика 39.</b> Излез од софтверот Slide за карактеристична условно стабилна косина, во деградирани филитични ( $S_f'$ ) и графитични шкрилци ( $S_{gr}$ ), со кружно-цилиндрична рамнина на лизгање.	85

<b>Слика 40.</b> Излез од софтверот Slide за карактеристична нестабилна косина, во деградирани филитични шкрилци (Sf') делумно деградирани филитични шкрилци (Sf) и свежи графитични шкрилци (Sgr), користејќи полигонална рамнина на лизгање. ....	85
<b>Слика 41.</b> Излези со приказ на веројатноста од лом и соодветниот индекс на доверливост на хистограмски приказ на фреквенцијата на факторот на сигурност (горе) и кумулативната веројатност на факторот на сигурност (долу). ....	86
<b>Слика 42.</b> Приказ на вкупните поместувања во софтверскиот пакет Plaxis 2D, за карактеристична условно стабилна косина, каде јасно се гледа рамнината на лизгање и зоната на деформации. ....	87
<b>Слика 43.</b> Сублимиран графички приказ на анализираните косини во истражувањето, преку Q-slope дијаграмот, предложен од страна на Barton и Var, 2015, 2017. ....	93
<b>Слика 44.</b> График на модифицирана GSI класификација (Sonmez & Ulusay, 2002). ....	95
<b>Слика 45.</b> Графичка зависност помеѓу индексот на hazard и квалитетот на карпеста маса (горе), односно вкупната висина на усечите (долу) кои се дел од истражувањето. ....	97
<b>Слика 46.</b> Меѓусебна зависност на клучните параметри во докторскиот труд, презентирани во форма на Венов дијаграм и нивно влијание во одредување на степенот на ризик. ....	98
<b>Слика 47.</b> Интерпретација на резултатите од анализите и пресметките, преку меѓусебна зависност на вредностите на факторот на сигурност (Fs) и индексот на hazard (Hi). ....	100
<b>Слика 48.</b> Дијаграм за проценка на ниво на ризик за косини кај карпи со слаб квалитет, преку меѓусебна зависност на факторот на сигурност (Fs) и индексот на hazard (Hi). ....	101
<b>Слика 49.</b> Интерпретација на резултатите од анализите и пресметките, преку меѓусебна зависност на вредностите на веројатноста од лом (Pf) и индексот на hazard (Hi). ....	102
<b>Слика 50.</b> Дијаграм за проценка на ниво на ризик за косини кај карпи со слаб квалитет, преку меѓусебна зависност на веројатноста од лом (Pf) и индексот на hazard (Hi). ....	102
<b>Слика 51.</b> Интерпретација на резултатите од анализите и пресметките, преку меѓусебна зависност на вредностите на индексот на доверливост ( $\beta$ ) и индексот на hazard (Hi). ....	103
<b>Слика 52.</b> Дијаграм за проценка на ниво на ризик за косини кај карпи со слаб квалитет, преку меѓусебна зависност на индексот на доверливост ( $\beta$ ) и индексот на hazard (Hi). ....	104
<b>Слика 53.</b> Интерпретација на резултатите од анализите и пресметките, преку меѓусебна зависност на вредностите на факторот на сигурност (Fs) и геометриската карактеристика ( $\alpha/H$ ). ....	105
<b>Слика 54.</b> Дијаграм за проценка на ниво на ризик за косини кај карпи со слаб квалитет, преку меѓусебна зависност на факторот на сигурност (Fs) и индексот на hazard (Hi). ....	105
<b>Слика 55.</b> Приказ на радијален Венов дијаграм, за интегриран пристап при решавање на проблеми во механиката на карпи, со своите под-гранки. ....	106
<b>Слика 56.</b> Детален шематски алгоритам за интегрално решение при справување со проблеми поврзани со стабилноста на косини кај карпести маси со низок квалитет. ....	108
<b>Слика 57.</b> Поглед на усекот неколку дена после активирање на процесот на свлекување, каде се забележуваат одредени попречни пукнатини и контури на свлечиштето (11.2022). ....	111
<b>Слика 58.</b> Поглед на усекот неколку месеци после активирање на процесот на свлекување, каде пукнатините и контури на свлечиштето се поизразени (03.2023). ....	112
<b>Слика 59.</b> Инженерско-геолошка карта за усекот на стационожа km 14+990 – 15+240, автопат A2, делница Кичево – Охрид, секција Подвис – Пресека. ....	115
<b>Слика 60.</b> Карактеристичен инженерскогеолошки профил во зона на свлечиште, на стационожа km 15+160. ....	115
<b>Слика 61.</b> Стереографска проекција со ориентација евидентираните пукнатински системи кај шкрилците и челото на косините на предметниот усек. ....	117
<b>Слика 62.</b> Попречен пресек на избраното техничко решение за санација и стабилизација на предметното свлечиште. ....	118

<b>Слика 63.</b> Приказ на појава на подолжна тензиона пукнатина непосредно во зона на инклинометарот (горе лево), резултати од последното мерење на инклинометарот (горе десно) и приказ на зоната на свлекување во делувиум и распаднати филитични шкрилци, во горна зона на усекот, каде се забележува дека со процесот на лизгање е зафатен и инклинометарот. ....	120
<b>Слика 64.</b> Излези од анализите на стабилност за решение без потпорна конструкција (горе) и за решението за санација и стабилизација со потпорна конструкција (долу) за конкретниот пример. ....	121
<b>Слика 65.</b> Деформирана мрежа на конечни елементи за анализираниот пример, во софтверскиот пакет Plaxis 2D. ....	123
<b>Слика 66.</b> Интерпретација на резултатите од анализите и пресметките за конкретниот пример, на сопствените предложени шематски графикони за проценка на ризикот од обршување кај карпести маси со слаб квалитет. ....	124
<b>Слика 67.</b> Корелација помеѓу вредностите на SMR и Q-slope, за косините од сопствените истражувања во докторскиот труд. ....	127
<b>Слика 68.</b> Q-slope дијаграм (Barton и Var 2015, 2017) за анизотропни шкрилести карпести маси со поволна фолијација и соодветните фактори на сигурност добиени со различни софтверски алатки (Janevski & Jovanovski, 2020) и дилема за идни истражувања за воведување на Qslope-seismic (Jovanovski et al. 2024-in press). ....	128
<b>Слика 69.</b> Q-slope дијаграм (Barton и Var 2015, 2017) со предлог гранична зона за стабилни косини со вклучена сеизмика, за коефициент на сеизмичност во хоризонтален правец $k_h=0.2$ . ....	129
<b>Слика 70.</b> Предлог дијаграм за проценка на геотехничката категорија (GC) за косини во карпести средини со слаб квалитет, зависно од индексот на хазард и вкупната висина на косината. ....	131
<b>Слика 71.</b> Споредба на референтните вредности за индексот на доверливост и веројатноста од лом, во однос на класите на влијание според Еврокод 7, согласно препораките на US Army Corps of Engineers, 1997 и наодите од истражувањето во докторската дисертација, каде со црвена боја е означена зона која е неприфатлива за ниту една класа на влијание, со жолта боја е означена зона која се препорачува за класа на влијание CC1, со цијан е означена препорачаната зона за класа на влијание CC2, додека со зелена боја е означена зоната препорачана за класа на влијание CC3. ...	131
<b>Слика 72.</b> Предлог дијаграм за утврдување на зоната на пореметеност. <a href="https://www.roscience.com/help/slide2/tutorials/tutorials-overview/damage-regions-generalized-hoek-brown">https://www.roscience.com/help/slide2/tutorials/tutorials-overview/damage-regions-generalized-hoek-brown</a> . ....	132
<b>Слика 73.</b> Инженерскогеолошки профил на еден усек од истражувањето, каде се илустрирани две решенија, диспозиција на армирано-бетонска потпорна конструкција (сина боја) и решение со растеретување преку принцип на разграничување на зоната на пореметеност (црна боја). ....	133
<b>Слика 74.</b> Излез од софтверскиот пакет Plaxis 2D, за решение со армирано-бетонска потпорна конструкција, каде се прикажани вкупните поместувања во хоризонтален правец. ....	133
<b>Слика 75.</b> Приказ на косините каде е настанато релативно плитко свлекување, како резултат на распаѓање во површинските зони, поради изложеност на атмосферски услови. ....	134
<b>Слика 76.</b> Графичка зависност помеѓу вредноста на факторот на сигурност и времето на изложеност на косините на атмосферски влијанија, зависно од разгледуваните усеци. ....	136
<b>Слика 77.</b> Зависност меѓу процентот на редукција на едноаксијалната јакост на притисок (UCS), геолошкиот индекс на јакост (GSI) и материјалната константа ( $m_i$ ) во однос на времето на изложеност на косините на атмосферски влијанија, зависно од разгледуваните усеци. ....	136
<b>Слика 78.</b> Нелинеарни анвелопи за јакост на смолкнување за релативно свежи серицитски шкрилци што ја илустрира важноста на влезните параметри кај анизотропните карпи (лево) и дијаграм на дирекциона јакост (десно) на смолкнување (Jovanovski et al., 2024). ....	137
<b>Слика 79.</b> Приказ на свлекување на лева страна на усек со неповолна ориентација (11.2022). ....	137
<b>Слика 80.</b> Излез од повратна анализа на стабилност во софтверскиот пакет Slide, каде теренот е моделиран согласно моделите на Mohr-Coulomb, Hoek-Brown, Barton-Bandis и Anisotropic Strength. ....	138

## СОДРЖИНА:

Податоци и информации за кандидатот и докторскиот труд .....	1
Апстракт .....	2
Abstract .....	3
Благодарност .....	4
ЛИСТА НА ТАБЕЛИ .....	5
ЛИСТА НА СЛИКИ .....	7
1. ВОВЕД .....	13
1.1. Актуелност на проблематиката .....	14
1.2. Предмет на истражување .....	18
1.3. Цели на истражувањето .....	19
1.4. Очекуван придонес .....	20
1.5. Нацрт на содржината .....	21
2. ПРЕГЛЕД НА ДОСЕГАШНИТЕ ИСТРАЖУВАЊА НА НАУЧНАТА ДИСЦИПЛИНА ПОВРЗАНИ СО ПРЕДМЕТОТ НА ИСТРАЖУВАЊЕ .....	23
3. КРАТОК ОСВРТ НА РАБОТНИТЕ ХИПОТЕЗИ И ТЕЗИ .....	29
4. ПРИМЕНЕТИ НАУЧНИ МЕТОДИ И НАЧИН НА РАБОТА .....	38
5. КРАТОК ОСВРТ НА КОРИСТЕНИТЕ МЕТОДИ ЗА ПРОЦЕНКА НА СТАБИЛНОСТА .....	41
5.1. Емпириски методи .....	41
5.2. Стабилност по дисконтинуитети (кинематски услови на лом) .....	46
5.3. Методи на гранична рамнотежа (статички методи) .....	49
5.3.1. Детерминистички пристап .....	50
5.3.2. Пробабилистички (веројатносен) пристап .....	51
5.4. Метод на конечни елементи (нумерички методи) .....	54
5.5. Методологија за моделирање на теренот .....	55
6. ПРИМЕРИ ОД ПРАКСА ЗА РАЗВОЈ НА ИНТЕГРАЛНАТА МЕТОДОЛОГИЈА .....	61
6.1. Геолошки и геотехнички карактеристики на предметната локација .....	62
6.2. Генерални карактеристики на анализираните косини .....	71
6.3. Усвоени параметри и користени алатки при евалуација на стабилноста на косините .....	77
6.3.1. Проценка на стабилноста со емпирискиот метод SMR .....	78
6.3.2. Проценка на стабилноста со емпирискиот метод Q-slope .....	81
6.3.3. Анализи на стабилност по дисконтинуитети .....	82
6.3.4. Детерминистички анализи на стабилност со методи на гранична рамнотежа .....	84
6.3.5. Веројатносни (пробабилистички) анализи на стабилност .....	86
6.3.6. Анализа на стабилност со користење на метод на конечни елементи .....	87
6.4. Интерпретација на резултатите од евалуацијата на стабилноста .....	88
7. ПРЕДЛОГ КЛАСИФИКАЦИОНЕН СИСТЕМ ЗА РАНГИРАЊЕ НА ХАЗАРДОТ КАЈ КОСИНИ ВО КАРПЕСТИ МАСИ СО СЛАБ КВАЛИТЕТ .....	94
7.1. Проценка на хазардот за анализираните косини во истражувањето .....	96
8. МЕТОДОЛОГИЈА ЗА ПРОЦЕНКА НА РИЗИК ОД ПОЈАВА НА НЕСТАБИЛНОСТ КАЈ КАРПИ СО СЛАБ КВАЛИТЕТ .....	98

8.1.	Краток осврт на генералниот концепт на методологијата .....	98
8.2.	Предлог шематски графикони за проценка на ризик од обрушување кај карпести маси со слаб квалитет.....	99
9.	ИНТЕГРАЛЕН ПРИСТАП ЗА ПРОЦЕНКА НА СТАБИЛНОСТА КАЈ КАРПЕСТИ МАСИ СО СЛАБ КВАЛИТЕТ .....	106
10.	Примена на предложената интегрална методологија за проценка на ризик, преку практичен пример .....	111
10.1.	Дефинирање на проблемот.....	111
10.2.	Анализа на постоечки податоци .....	112
10.3.	Проектирање и изведба на дополнителни истражни работи .....	114
10.4.	Синтеза и статистичка анализа на сите утврдени параметри .....	116
10.5.	Изработка на геотехнички модел и усвојување на параметри.....	116
10.6.	Евалуација на стабилноста за усвоеното решение.....	117
10.6.1.	Краток осврт кон техничкото решение за санација и стабилизација .....	118
10.6.2.	Резултати од проценка на стабилноста со емпириски методи .....	118
10.6.3.	Резултати од кинематски анализи (стабилност по пукнатини).....	119
10.6.4.	Резултати од анализите на стабилност со методи на гранична рамнотежа.....	120
10.6.5.	Резултати од нумеричките анализи со метод на конечни елементи .....	122
10.7.	Рангирање на hazardот .....	123
10.8.	Интерпретација на резултатите и проценка на ризикот .....	124
10.9.	Мерки за мониторинг .....	125
11.	ПРИМЕНА НА РЕЗУЛТАТИТЕ ОД ИСТРАЖУВАЊЕТО И МОЖНИ НАСОКИ ЗА ПОНАТАМОШНИ ИСТРАЖУВАЊА.....	126
12.	ЗАКЛУЧОК .....	140
	ПРИЛОГ 1 – КОМЕНТАР НА ВЕШТАЧКА ИНТЕЛИГЕНЦИЈА (ChatGPT) ВО ОДНОС НА ПРЕЗЕНТИРАНАТА МЕТОДОЛОГИЈА ВО ДОКТОРСКИОТ ТРУД.....	142
	СПИСОК НА ЛИТЕРАТУРА И ДРУГИ ИЗВОРИ.....	143

## 1. ВОВЕД

Проценката на ризиците при изведба на косини кај карпести формации со слаб квалитет претставува практичен предизвик на дневна основа, поради сложената литологија, степенот на распаднаост, просторниот распоред на пукнатински системи, хидрогеолошките услови, анизотропијата и сл.

Досегашното искуство, покажало дека е речиси невозможно да се проценат точните параметри на одредена карпеста средина, особено кај карпи со низок квалитет, со кои би ја моделирале целата зона од интерес. Многу често, дури и во случај на екстензивни истражни работи, сеуште постојат одредени неизвесности во однос на параметрите и однесувањето на карпестите маси и многу е тешко да се направи компромис помеѓу економичноста и доверливоста на решението. Намалувањето на ризикот води кон неекономично решение, додека повисокото ниво на ризик може да ја загрози стабилноста. Затоа, треба да се посвети големо внимание на изборот на соодветни (доверливи) параметри за карактеризација на карпите и користење на соодветени методи за анализа на карпестите формации, поради сложените и непредвидливи услови на природниот терен.

Во одреден период од развојот на механиката на карпите, акцентот се ставаше на резултатите од теренските истражни работи и лабораториските испитувања на монолитни примероци, додека вниманието кое се посветуваше на својствата и однесувањето на целата карпеста маса која е во зона на интерес беше помалку анализирано. Ова е брзо согледано како голема неопходност, при што подолг период, во рамките на механиката на карпите, карпестата маса се третира како природно напрегната, хетерогена, анизотропна и дисконтинулана (испукана) средина.

Во денешницата, пред се поради брзиот развој на софтверските алатки и нумеричките методи, акцентот се префрли кон моделирањето и интеракцијата на теренот со вештачките конструктивни елементи, а во моментов едно од основните прашања е посветување на големо внимание кон дефинирање на веродостојноста на влезните параметри за вршење на анализите. Имено, во повеќето случаи во праксата, многу е потешко да се дефинираат доверливи влезни податоци за спроведување на анализите на стабилност отколку да се извршат опсежни симулации и пресметки. Оттука, доколку не постојат доволно доверливи квалитативни и квантитативни податоци од истражните работи, анализите и пресметките имаат само формален карактер.

За адекватно решавање на овие проблеми потребен е мултидисциплинарен пристап каде што геотехничките инженери мора да ги земат во предвид сите неизвесности кои произлегуваат од променливата природа на карпите и проектните услови. Ова значи, дека е потребно е да се подготви во повеќе фази соодветен модел на теренот и прецизно да се предвиди однесувањето на материјалот во сите фази на анализа. За разлика од другите науки, во механиката на карпи и геотехничкото инженерство воопшто, многу е ризично да се прават упростувања, односно да се генерализира моделот и хомогенизира теренот, кој по правило е сложена, дисконтинуална и анизотропна средина.

Имено, во механиката на карпи многу е тешко децидно да се дефинираат сите својства и состојби на карпестите средини, во споредба со проектните услови за произведените материјали.

Затоа, геотехничкиот инженер може да влијае на проценката на специфичните услови и потреби и треба да го имплементира своето практично искуство и да го земе во предвид историјатот на околната средина.

Може да се заклучи, дека подготовката на моделите на теренот, со цел проценка на можните ризици од нестабилност кај карпестите маси, е исклучително сложен истражувачки процес.

### 1.1. Актуелност на проблематиката

Свлечиштата претставуваат еден од најголемите разорни геохазарди, каде се изгубени илјадници човечки животи и последиците создаваат акутна економска загуба поврзана со имотни штети секоја година (Schuster & Highland, 2001; Dilley et al., 2005; Petley, 2012). Во Табела 1 се прикажани просечните економски загуби на различни високо развиени држави ширум светот, предизвикани од свлечишта (Sim et al., 2022).

**Табела 1.** Проценета просечна годишна економска загуба, како последица на свлечишта за различни држави (модифицирано според Sim et al., 2022)

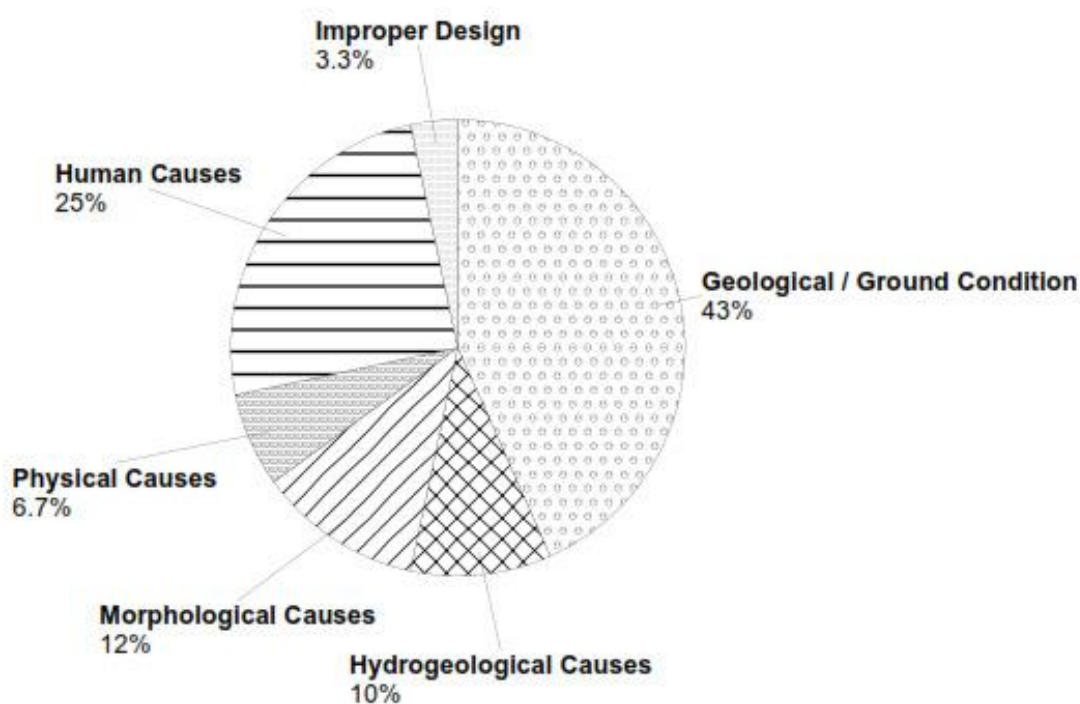
Држава	Просечна годишна директна штета [USD]	Просечна годишна вкупна штета [USD]	Коментар
Канада	/	\$ 0.07 – 1.4 милијарди	/
Јапонија	\$ 1.5 милијарди	\$ 4.0 милијарди	/
Кореа	\$ 60 милиони	/	неоодветна евиденција
Италија	/	\$ 2.6 – 5.0 милијарди	груба проценка
Шведска	\$ 10 – 20 милиони	/	/
Шпанија	\$ 0.2 милијарди	/	/
СССР	\$ 0.5 милијарди	/	/
Нов Зеланд	/	\$ 26.3 милиони	90% во рурални средини
Белгија	\$ 0.85 милиони	\$ 4.48 милиони	/
Германија	\$ 0.3 милијарди	/	/
Индија	\$ 1.3 милијарди	/	/
Кина	\$ 0.5 милијарди	/	Евиденција од 1989 год.
Непал	\$ 19.6 милиони	/	Некомплетна евиденција
Бразил	\$ 45 милиони	\$ 0.35 милијарди	/
На светско ниво	/	\$ 20 милијарди	/



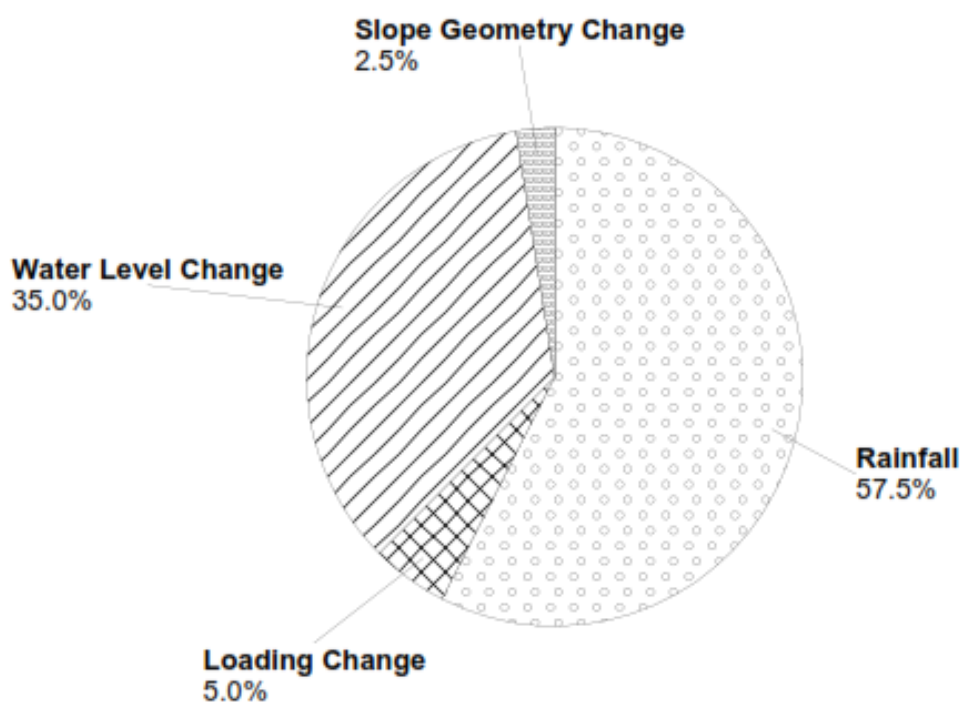
Проблемот е во тоа што интензитетот и квантитетот на свлечиштата не се намалува, туку напротив се повеќе и повеќе се регистрираат трагични настани како резултат на свлечиштата. Согласно Меѓународната база на податоци за катастрофи (EM-DAT) на Центарот за истражување на епидемиологија на катастрофи, нотирано е дека свлечиштата предизвикале 17% од смртните случаи на годишно ниво, поврзани со природни хазарди ширум светот (Lacasse & Nadim, 2014; Aristizábal & Sánchez, 2020). Сепак, изработени се студии кои укажуваат дека EM-DAT често ја потценува бројката на фатални свлечишта за 1400% (Kirschbaum et al., 2015) т.е. 2000% (Petley, 2012), а бројот на смртни случаи за 331% (Kirschbaum et al., 2015) т.е. 430% (Petley, 2012).

Неадекватните податоци, се резултат на перцепцијата на свлечиштата како секундарен хазард, каде причината за смртта е поврзана со примарните хазарди (на пр. земјотрес наместо свлечиште предизвикано од сеизмичка активност) наместо со вистинската причина за штетите (Froude & Petley, 2018). Како последица на овие потценувачки податоци, свеста не е доволно развиена во однос на ризиците од свлекување кај властите и јавноста (Sim et al., 2022). Во новиот милениум, како резултат на свлечиштата, десетици илјади животи се изгубени, со проценет годишен просек на економски загуби од околу 20 милијарди долари, што е 17% од вкупните (121 милијарди долари) годишно значителни глобални загуби од катастрофи, мерено од 1980–2013 год. (Klose et al., 2016).

Во однос на причините кои доведуваат до свлекување на теренот, на светско ниво, најчесто тоа се теренските услови и човечката активност, додека тригерот кој го активира механизмот на свлекување во најголем дел претставуваат интензивните врнежи, рапидното топење на снегот, промената на нивото на водата, вулканската активност, сеизмичките побуди и промената на геометријата на косините (Ng, 2012). Графички прикази на овие наоди се прикажани на Слика 1 и Слика 2.



Слика 1. Дистрибуција на факторите кои придонесуваат за појава на свлечишта на светско ниво (Ng, 2012).

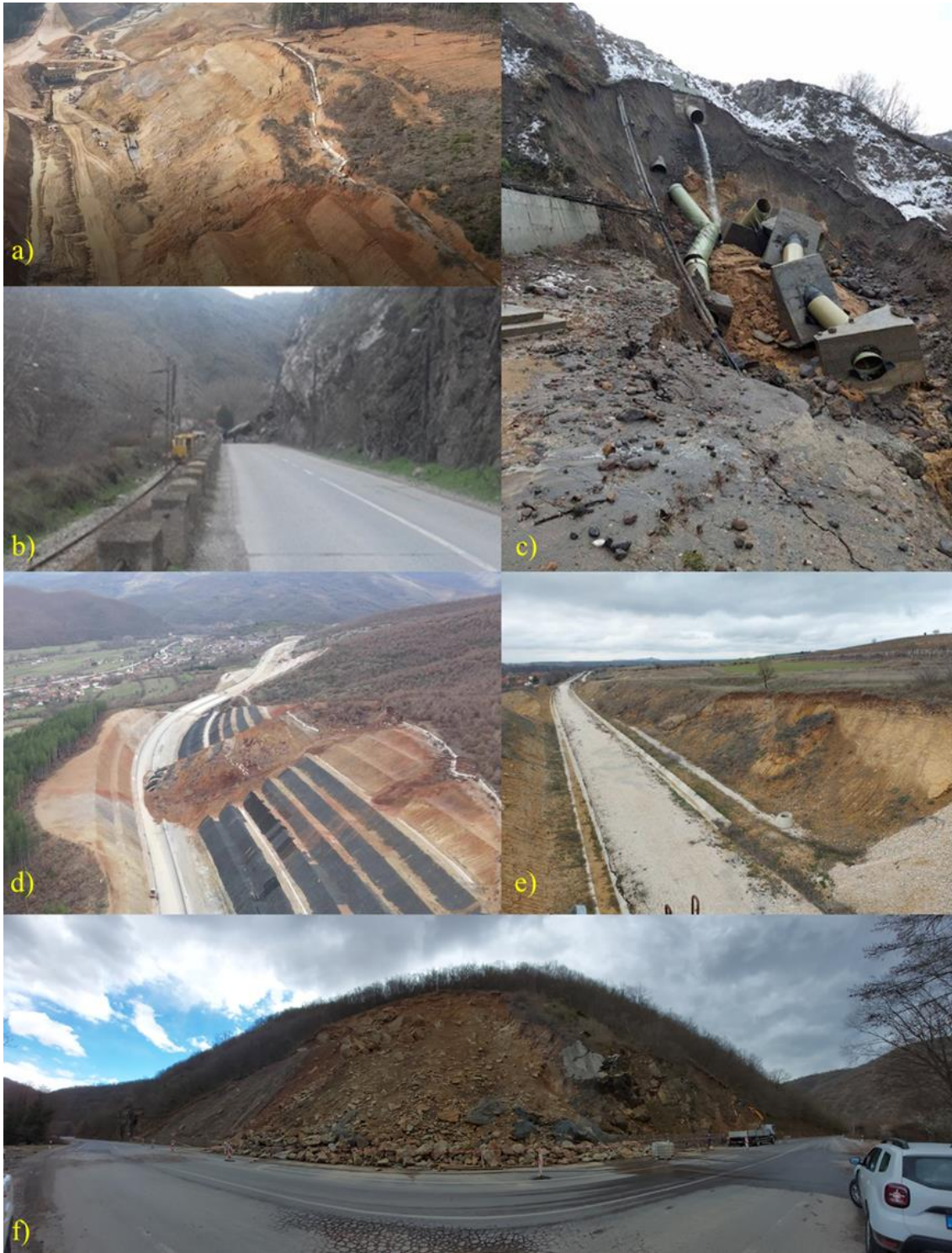


Слика 2. Дистрибуција на изворите кои придонесуваат за појава на свлечишта на светско ниво (Ng, 2012).

Доколку се анализираат податоците на локално ниво во нашата држава, може да се заклучи дека во Република Македонија, штетите од свлечишта и одрони се неминовна и честа појава, особено по должина на трасите на инфраструктурните објекти. Најчеста причина за овие појави претставува негативното влијание на водата, односно интензивните и долготрајни врнежи, додека последиците од овие појави најчесто се одразуваат преку привремено прекинат или отежнат сообраќај, уништени или оштетени објекти, девастирани земјоделски површини, како и загрозување на човечки животи.

Согласно овие поразувачки факти, не само во нашата држава, туку како што беше илустрирано претходно, тоа е случај и на глобално ниво и тоа во едни од најразвиените држави во светот, може да се заклучи дека актуелноста на проблематиката која ги тангира доверливоста и ризикот поврзан со стабилноста на косините е несомнена.

На Слика 3 се прикажани неколку позначајни свлечишта и одрони, настанати изминативе неколку години во Република Македонија, во зони на значајни инфраструктурни објекти. Прикажаните свлечишта јасно илустрираат какви можат да бидат последиците.



**Слика 3.** Приказ на појави на нестабилност во Република Македонија, а) Свлечиште на автопат А2, делница Кичево – Охрид, усек на стациоџа km 3+040, 03.2023; б) Одрон на регионален пат Велес – Градско, 03.2018; в) Свлечиште во зона на цевковод за МХЕЗ од хидросистем Ваташа, 12.2022; д) Свлечиште на автопат А2, делница Кичево – Охрид, усек на стациоџа km 3+700, 12.2023; е) Свлечиште на железницата од Коридор VIII, делница Куманово – Бељаковце, на стациоџа km 26+540; ф) Голем одрон и свлекување на магистралниот пат А3, делница Исти Бања – Акумулација Калиманци, 04.2022.

## 1.2. Предмет на истражување

Согласно на избраната тема за анализа, предмет на истражувањето е поврзан со дефинирање на најзначајните ризици при изведба на косини во карпести маси. Со тенденција да се дефинираат квантитативни методи за процена на класификацијата, големината (или површината) и просторната дистрибуција на нестабилностите од тип на одрони, свлечишта, тензиони пукнатини, во одредени случаи ерозија, бабрење и други современи геолошки или инженерскогеолошки процеси. При тоа, во тезата се среќаваат често термините како доверливост, хазард, ризик, изложеност, повредливост, зонирање и сл. Затоа, во рамките на докторскиот труд, за термините кои ќе бидат најчесто користени, во продолжение се презентирани нивните дефиниции:

- Доверливост – степенот до кој резултатот од истражувањата или пресметката може да зависи за да биде точен. Анализата на доверливост е систематски пристап кој се користи за проценка на конзистентноста на одредена појава или процес. Тоа вклучува идентификација на потенцијален лом, анализа на причините и спроведување мерки за нивно спречување или редуцирање.
- Хазард – одредена состојба со потенцијал да предизвика несакана последица. На пример, описот на хазардот од свлечишта треба да содржи локација, обем (или површина), класификација и брзина на потенцијалните свлечишта и на каков било резултатен одвоен материјал, како и веројатноста за нивна појава во даден временски период.
- Елементи изложени на ризик – население, објекти и пропратни инженерски работи, економски активности, јавни комунални услуги и останати други инфраструктурни и еколошки вредности во зона која е потенцијално зафатена со одреден хазард.
- Повредливост – степен на можна загуба на даден елемент или збир на елементи во областа зафатена со свлекување. На пример, за имотот загубата ќе биде вредноста на штетата во однос на вредноста на имотот; за луѓето веројатноста дека одреден живот (елементот изложен на ризик) ќе биде изгубен, ако лицето е погодено од свлекување.
- Ризик – мерка за веројатноста и големината на несакан ефект по здравјето, имотот, добрата или животната средина. Ризикот често се проценува како производ од веројатноста на феноменот со одредена големина и последиците. Во контекст на ова, ризикот дополнително се дефинира како: а) загуба на живот, односно годишна веројатност дека лицата изложени на ризик ќе го загубат својот живот земајќи го во предвид хазардот од свлекување и временско-просторната веројатност и повредливоста на лицата; б) загуба на имот, т.е. годишна веројатност за даден степен на загуба или годишна загуба земајќи ги во предвид елементите изложени на ризик, нивната временско-просторна веројатност и повредливоста.
- Зонирање – поделба на земјиштето во квази хомогени области или домени и нивно рангирање според степени на реална или потенцијална подложност, хазард или ризик или примена на одредени прописи поврзани со хазардот или ризиците.

Стабилноста на косините кај карпите, особено кај карпите со слаб квалитет е директно поврзана со процесот на атмосферски влијанија кои имаат негативно влијание, преку намалување на јакоста на смолкнување, забрзување на процесот на распаѓање (особено површинските зони) и создавање тензиони пукнатини. Дополнително, карпестите формации со слаб квалитет се широко распространети во регионот, каде што во моментов се градат многу патишта и железници, а значителен процент од трасите минуваат низ усеци со големи висини.

Сето ова е многу значајно, особено доколку се земе во предвид фактот дека во последната декада, сведоци сме на драстична промена на хидролошките услови во регионот, односно интензитетот на врнежи е значително зголемен, со многу сценарија на интензивни и обилни врнежи. Поради овие неповолни атмосферски влијанија, се почесто се јавуваат свлечишта, одрони и потенцијално нестабилни зони по должина на транспортната инфраструктура.

Сознанијата во дисертацијата се главно поврзани со сопствени лабораториски и теренски истражувања и анализи, каде базата на податоци е составена од вкупно 58 усеци од трасата на автопатот А2, делница Кичево – Охрид во Македонија. Најголемиот дел од овие усеци се со висини поголеми од 30 m, додека неколку од усеците се со импозантни висини кои надминуваат 100 m. Автопатот е во изградба веќе речиси една деценија, каде еден од позначајните проблеми е стабилноста на косините. Теренот во доминантен дел е составен од карпи со слаб квалитет, кои се набрани, тектонски пореметени и под влијание на процесот на деградација. Предметните карпести формации се подложни на локални деформации, особено од аспект на интензивни и долготрајни врнежи, земјотреси и постоење на зони со неповолна фолијација и системи од пукнатини со неповолна ориентација.

Малиот број истражувања во комбинација со комплексните услови на теренот придонесоа за големи проблеми поврзани со стабилноста на косините (развој на многу свлечишта, одрони, тензиони пукнатини и потенцијално нестабилни зони) по должина на трасата на автопатот.

Оттука, ова беше главната мотивација и цел за ова истражување, да се подобрат актуелните методологии и да се рedefинираат аспектите поврзани со обезбедување на доверливи параметри, каде врз основа на комбинација од повеќе методолошки пристапи и резултати од сопствени истражувања претставени преку иновативни графикони и алгоритми, да се предложи интегрална методологија за проценка на стабилност и ризик кај карпести маси со слаб квалитет.

### **1.3. Цели на истражувањето**

Предложената методологија претставува сублимат од повеќе методолошки пристапи, каде согласно резултатите од истражувањето, вклучени се позитивните страни а редуцирани се негативните страни на секој од анализираните пристапи, зависно од низа на специфични услови.

Основна цел на истражувањето е преку изработка на интегрална методологија, да се даде придонес кон посигурно проектирање на косини во карпести маси со слаб квалитет. Методологијата претставува алатка која ќе ја ползуваат инженерите од областа на геологијата и геотехниката и лицата кои се одговорни за управување со проектите, при решавање на проблеми со стабилноста на дневна основа.

Предложената методологија нуди сукцесивен пристап на решавање на овие проблеми, каде е опфатен целокупниот процес, од самиот почеток каде се планира изработка на проектна програма, преку потребните истражувања и испитувања, потоа фазата на проектирање и носење на навремени и клучни одлуки, до изведба и експлоатација на финалното решение со адекватен систем од мерки за заштита и мониторинг.

Сите овие аспекти зависат од низа фактори, како што се: предметните теренски услови, категоријата односно значењето на објектот, условите и комбинациите на товари, климатски фактори, пристапноста, периодот за кој треба да се завршат работите и сл.

Во склоп на методологијата, даден е придонес и кон дефинирањето на степенот на hazard од обрушување кај карпести маси со слаб квалитет, преку автентичен систем за класификација. Дополнително, изработени се иновативни графикони за проценка на степенот на ризик за одредена косина во карпеста средина со слаб квалитет. Овие графички дијаграми се засновани на корелации помеѓу неколку клучни параметри кои можат да се дефинираат на релативно лесен начин.

Согласно погоре напоменатото, изработката на овој интегрален методолошки пристап, претставуваше научен и практичен предизвик.

#### **1.4. Очекуван придонес**

Искуството од секојдневната пракса покажува дека често се присутни сериозни проблеми, како за време на изведба (ископ) така и во фаза на експлоатација на усеци со значителни висини (>30 m), особено во сложени геотехнички услови и карпести маси со слаб квалитет.

Причината за појава на овие вообичаени проблеми се непочитување на некои од основните принципи во текот на истражниот процес или пак игнорирање на можните несигурности кои се поврзани со конкретната локација за време на фазата на проектирање.

Научниот придонес на предложената методологија се очекува да биде во делот на критичка примена и прецизноста на различни методолошки пристапи кои егзистираат во современата пракса, во однос на стабилноста на косини кај карпести формации со слаб квалитет.

Со определување на индексот на hazard (Hi) преку наодите од сопствените анализи, се смета дека ќе се стави во употреба практичен класификационен систем, кој претставува модифицирана верзија на системот RHRS (Rockfall Hazard Rating System, Pierson et al., 1990). Со неговата доследна примена, во соодветните фази на истражување и проектирање, се смета дека ризиците во фаза на изведба и експлоатација ќе се сведат на прифатлив минимум.

Се очекува научен придонес и низ формулирањето на поголем број зависимости меѓу различни анализирани параметри, како зависност помеѓу факторот на сигурност и нивото на вложувања во заштита на косините и зависност помеѓу веројатност од нестабилност и нивото на вложувања. Исто така се очекува и придонес во однос на дефинирањето на влијанието на доверливоста при проценка на дозволено ниво на ризик од појава на нестабилности.

Основната цел на интегралната методологија е да се олесни работата на инженерите од областа на геологијата и геотехниката и да се зголеми нивната самодоверба во фаза на планирање и проектирање.

Предложените иновативни дијаграми за проценка на ризикот од обршување на одредена косина ќе придонесат за покомплетна слика за стабилноста која ќе биде од полза и за инвеститорите, со цел навремено да може да се носат одлуки во процесите на истражување, планирање, изведба и мониторинг кај карпестите маси со слаб квалитет.

Авторот се надева дека ќе се придонесе и за подигнување на свеста и значењето на геотехничкото инженерство во градежниот и рударскиот сектор, како и пошироката општествена заедница.

## **1.5. Нацрт на содржината**

Во подготвувањето на дисертацијата вклучени се повеќе фази, каде во суштина користен е мулти-дисциплинарен пристап и конвенционален концепт на научно истражување. Во почетна (подготвителна) фаза е извршен детален преглед и анализа на досегашните истражувања поврзани со предметот на истражување. Фазата на истражување се состои од неколку генерални концепти како што се дефинирање на научниот проблем, научна разработка на проблематиката со главен акцент на полето кое се доистражува и интерпретација на добиените резултати со критички осврт на истите.

Докторскиот труд е составен од вкупно 12 поглавија. Во првото поглавие е даден вовед поврзан со општите аспекти на темата на истражувањето, мотивацијата за истото, актуелноста на проблематиката, предметот и целите на истражување, очекуван научен придонес на тезата и нацрт на содржината на трудот.

Во точка 2 е прикажан хронолошки преглед на досегашните истражувања поврзани со темата, каде главен акцент е ставен на просторот кој нуди можност за надополнување преку нови истражувања.

Третото поглавие се состои од елаборација на работните хипотези и тези кои претставуваат почетна основа за истражувањето.

Во четвртото поглавие се презентирани применетите научни методи и начинот на работа при реализација на истражувањето.

Во точка 5 е прикажан краток осврт на користените методи за проценка на стабилноста, на кои се темели ова истражување и методите кои се користат за нивно утврдување. Имено, во оваа точка се образложени генералните карактеристики на методолошките пристапи базирани на методот на гранична рамнотежа, кинематски услови на лом, нумерички методи, емпириски методи и веројатносни анализи.

Во шестото поглавие ќе се презентира компаративна анализа на методите за проценка на стабилноста кај карпести маси со слаб квалитет преку практични примери. Резултатите од сите овие анализи и пресметки се компарирани и споредени со реалните услови на косините на лице место и се акцентирани позитивните и негативни страни на секој методолошки пристап, односно се дава критички осврт при интерпретацијата на резултатите.

Во точка 7 е презентирана автентична класификација за рејтинг на хазард од обрушување на косини кај карпи со слаб квалитет. Исто така, во продолжение е извршена евалуација на нивото на хазард за сите разгледувани косини во истражувањето.

Поглавие 8 претставува круцијалната точка од докторскиот труд, каде најпрво е образложен генералниот концепт на методологијата. Потоа, прикажани се сопствени шематски графикони за адекватна проценка на стабилноста на косини кај карпести формации со слаб квалитет, односно предложен е графички пристап за проценка на ризикот од обрушување. Шематските дијаграми се изработени врз основа на резултати од опсежни анализи и проценки на стабилност, каде се издвоени одредени клучни параметри, кои може да се дефинираат на релативно лесен начин и имаат клучно влијание на степенот на ризик.

Во точката 9 од докторскиот труд, презентирани се шематски алгоритам за соодветна примена на предложениот методолошки пристап, вклучувајќи и неколку останати аспекти, каде крајната цел е да се изврши адекватна проценка на стабилноста со интегрален и методичен пристап.

Во десеттото поглавие, преку конкретен практичен пример, презентирани се примената на предложената методологија, каде се опфатени сите фази од истата.

Во единаесеттото поглавие, најпрво ќе се даде еден критички осврт на авторот на сопствената методологија и ќе се дадат препораки за потврда на истата преку други практични примери. Во продолжение, ќе бидат презентирани и препораки за подрачјето на примена, ограничувањата на методологијата и ќе се дадат препораки за евентуален понатамошен развој и надополнување на методологијата. Во оваа точка, отворени се солиден број на прашања кои можат да бидат разработени во понатамошни истражувања, со цел што пореално да се толкува и интерпретира вистинското механичко однесување на слабите карпести маси.

Во точка 12 се потенцирани најважните аспекти од докторскиот труд и дадени се завршни напомени на авторот во однос на тезата.

Како прилог на докторскиот труд, прикажан е критички коментар во однос на предложената методологија и добиените наоди од истражувањето кои се акцентирани во овој докторски труд, од страна на се поактуелниот модул на вештачка интелигенција ChatGPT.

На крајот од овој докторски труд, прикажан е список на користената литература, проектна документација и други референтни извори, кои се користени при изработката на дисертацијата.



## 2. ПРЕГЛЕД НА ДОСЕГАШНИТЕ ИСТРАЖУВАЊА НА НАУЧНАТА ДИСЦИПЛИНА ПОВРЗАНИ СО ПРЕДМЕТОТ НА ИСТРАЖУВАЊЕ

Анализите на ризици при изведба на објекти од различен карактер и нивното влијание врз околната средина и објектите, е најзначаен приоритет на денешното ниво на развој на геотехниката и механиката на карпите.

Согласно извршениот детален преглед на досегашните студии кои се директно или индиректно поврзани со предметот на истражување, може да се заклучи дека поради практичниот аспект на проблематиката, квантитетот на научна и стручна литература е многу солиден. Од аспект на полето на истражување, проучени се научно-истражувачки трудови кои тангираат теми како: системи за класификација и карактеризација на карпести маси, дефинирање на параметри и конститутивни модели за моделирање карпести маси (со посебен акцент на карпи со слаб квалитет), доверливост и избор на влезни параметри, методолошки пристапи за проценка на стабилност на косини кај карпи, класификација и рејтинг на хазард од обршување, ризик од појава на обршувања и нестабилни зони, нормативи и правилници за проектирање косини во карпести средини и сл.

Крајот на 50-тите и раните 60-ти години од 20-тиот век се многу важни за општиот развој на механиката на карпи но и генерално за геотехниката, пред се поради големиот број катастрофи на капитални објекти. Овие катастрофи јасно ни дадоа до знаење дека како во почвени, така и во карпести средини „ги надминаваме границите на нашата способност да ги предвидиме последиците од нашите постапки“ (Terzaghi & Voight, 1979). Катастрофите на браните Малпасе во Франција (1959) и Вајонт во Италија (1963), каде за жал животот го загубија илјадници луѓе и штетите изнесуваа стотици милиони долари, беа пресвртница во однос на концептот и пристапот при проектирање и градење капитални објекти.

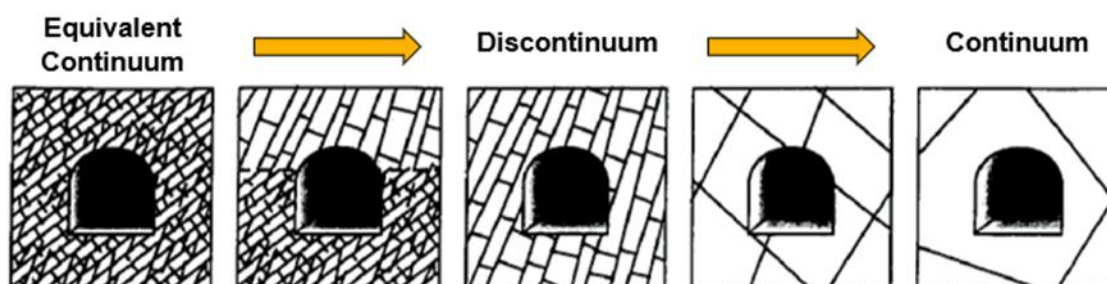
Системите за класификација на карпестите маси почнуваат да се развиваат уште во далечната 1879 год. откако Ritter формира емпириски пристап за определување на мерки за стабилизација на тунел. Оттогаш, развиени се повеќе системи за класификација и категоризација на карпестите маси, кои во најголем дел се развиени врз основа на реални податоци од практични примери. Во продолжение, хронолошки ќе бидат наведени најпознатите, каде голем дел се широко применети и во современата пракса, како што се класификациите на Terzaghi, 1946; Lauffer, 1958; Deere et al., 1963, 1966, 1967, 1988; Wickham et al., 1972; Bieniawski, 1973, 1976, 1989; Pacher et al., 1974; Barton et al., 1974, 2002; ISRM, 1981; Palmstrom, 1982, 1996; Williamson & Kuhn, 1984; Hoek, 1994; Hoek & Kaiser, 1997; Јовановски, 2001; Sen & Bahaeldin, 2003; Aydan et al., 2015; Saroglou et al., 2018 и др. Поради различниот и субјективен пристап на системите, се препорачува примена на најмалку две класификации, бидејќи различни автори користат различен пристап, каде акцентот се става на различни аспекти и параметри.

Современата механика на карпи, благодарение на интензивниот развој на нумеричкото моделирање, нуди решение за исклучително тешки проблеми. За таа цел се применуваат различни модели на идеализирани средини како: модел на дискретна средина, модел на непрекинатата средина (континуум), модели на еластична, пластична, реолошка и испукана средина (Јовановски и др. 2020).

Од аспект на стабилноста на косините кај карпестите формации, особено значење имаат дисконтинуалноста и анизотропијата. Изборот на адекватен модел за симулирање на механичкото однесување на карпите треба да се изврши врз основа на условите на предметната карпеста средина и состојбата напрегања-деформации, која варира зависно од размерот на примерокот кој е напрегнат.

Постои голема поделеност во фелата во однос на тоа во кои услови треба да се примени модел на континуална средина а кога да се користи дисконтинуум. Моделите на континуална средина користат нумеричка техника заснована на равенки на механика на континуум каде се претпоставува дека лизгање или одвојување не се појавува на дискретни ослабени рамнини. Овие модели ја претставуваат нелинеарноста преку конститутивни закони како што се методите на конечни елементи (на пр. Zienkiewicz, 1977), методот на конечни разлики (на пр. Cundall, 1976) и методот на гранични елементи (на пр. Vanerjee & Butterfield, 1981). За разлика од овие модели, дисконтинуумот ги моделира карпите преку статистичко генерирање на пукантински системи, односно врши внатрешна дискретизација на блоковите. Развојот на овој пристап го почнуваат Trollope (Stagg & Zienkiewicz, 1968) и Cundall, 1971, а дополнителни подобрувања кои придонесоа за развој на универзалниот код за 2D дискретни елементи (UDEС) вршат Itasca, 1988 и за тродимензионалниот модел (3DEC) Itasca, 1988; Lemos, 1987 и CICE (Hocking et al., 1985).

На Слика 4 е прикажан предлог од страна на Barton, 1998 за моделирање на теренот околу тунелски отвор, зависно од степеност на испуканост.



Слика 4. Шематски приказ на средини и соодветни модели за карактеризација на теренот, зависно од степенот на испуканост (Barton, 1998).

Авторите чии истражувања имаат значителен придонес во однос на дефинирањето и моделирањето на дисконтинуалноста и генерално на карпестите средини се: Deere & Miller, 1966; Patton 1966; Barton, 1974, 1976, 1998, 2002, 2021, 2022; Barton & Choubey, 1977; Hoek & Brown, 1980a, 1980b; Hencher & Richards, 1982; Hoek, 1983; Hoek & Brown, 1988; Starfield & Cundall, 1988; Barton & Bandis, 1990; Hoek et al., 1991; Cundall, 1993; Cundall & Hart, 1993; Hart, 1993; Hoek, 1994; Hoek & Brown, 1997; Barla et al., 1999, 2000; Hoek et al. 2002; Seilimovic, 2003; Marinos et al., 2007; Yang et al., 2019; Elmo et al., 2022 и др.

Во 1988 Hoek и Brown го развиваат познатиот критериум за апликација кај ископи и косини кај карпи. Подоцна, Hoek, Wood и Shah, 1992 доаѓаат до заклучок дека примената на овој критериум кај карпи со многу слаб квалитет бара дополнителни промени.

Потоа е развиена класификацијата GSI – Geological Strength Index (Hoek 1994, Hoek, Kaiser & Bawden, 1995, Hoek & Brown 1997, Hoek, Marinos & Benissi, 1998), која претрпува низа од модификации низ годините а едни од позначајните се: Sonmez & Ulusay, 1999; Marinos & Hoek, 2001; Hoek, Carranza-Torres & Corkum, 2002, Sonmez & Ulusay, 2002; Morales et al., 2004; Cosar, 2004; Hoek & Diederichs, 2006; Marinos et al., 2006; Osgoui & Unal, 2009; Hashemi et al., 2010; Osgoui et al., 2010; Hoek et al., 2013; Singh & Tamrakar, 2013; Irvani et al., 2015; Morelli, 2015, 2017; Feng et al., 2018; Zhang et al., 2019; Sadeghi et al., 2020; Singh et al., 2022; Xia et al., 2022 и др.

Бидејќи својствата на карпите со слаб квалитет се многу тешко предвидливи, условите кои ја диктираат нивната стабилност исто така се многу тешки за предвидување. Затоа, се поактуелни се анализите за дефинирање на сензитивноста на параметрите. Оваа информација може да биде од клучно значење во процесот на планирање и изработка на програми за истражни работи (методи, тип и квантитет на теренски и лабораториски испитувања), што придонесува за попрецизно дефинирање на овие параметри и зголемување на нивото на доверливост.

Алтернативно, доколку не сме сигурни за вредноста на одреден параметар кој има големо влијание на однесувањето на косината, можеме да направиме компромис преку користење на повисока референтна вредност на факторот на сигурност.

Во минатото, почнувајќи од 1930 година, анализите на стабилност на косини доминантно се вршени согласно методот на гранична рамнотежа. Иако во изминатите децении беа развиени неколку други методолошки пристапи, методот на гранична рамнотежа останува да биде најкористениот метод во геотехничката пракса, пред се поради неговата едноставност (редуциран број на параметри потребни за пресметка) и времето потребно за извршување на анализите.

Најпопуларните, воедно и најкористени методи базирани на принципот на гранична рамнотежа во геотехничката пракса се методите развиени од страна на Bishop, 1955, 1995; Morgenstern-Price, 1965, 1967; Spencer, 1967 и Janbu, 1968, 1973. Сепак, методот на гранична рамнотежа има неколку клучни недостатоци кои полека но сигурно влијаат на неговата популарност, особено во последната декада. Имено, овој методолошки пристап неможе да го земе во предвид однесувањето на материјалот. Дополнително, факторот на сигурност се претпоставува дека е константен по површината на лизгање и точноста на пресметките е дискутабилна во сложени геолошки услови и комплексни проектни ситуации.

Поради напоменатите негативни страни на традиционалниот метод на гранична рамнотежа, методот на конечни елементи добива значителна популарност и станува не само алтернатива, туку во посложени услови и поадекватна варијанта. Овој нумерички пристап покрај проценката на факторот на сигурност, врши пресметка на напрегањата и деформациите во секоја зона од полупросторот и конструктивните елементи, иако напрегањата што се создаваат во зона на косините, генерално се значително помали од јакоста на карпестите маси, со исклучок на косини со висини од неколку стотици метри. Треба да се напомене, дека кај нумеричките методи нема потреба од претходно дефинирана рамнина на лизгање и истата може да има сложен облик, постои можност од моделирање комплексни геометрии и конструктивни елементи, различни услови и фази на оптоварување, можни се повеќекратни рамнини на лизгање и прогресивен лом и сл.

Но, поради посложеното моделирање кое придонесува и за времето потребно за вршење на пресметките, искуството со неговата примена во геотехничката пракса во однос на стабилност на косини е ограничено и сеуште не е широко прифатен за рутински анализи на стабилност, особено кај карпести формации.

Исклучителната работа на Londe и неговите соработници во Франција (Londe, 1965; Londe et al., 1969, 1970), Wittke (1965) и John (1968) во Германија резултираше со поставување на основите за тродимензионалните анализи што се користат и во современата пракса (Hoek, 2007).

Концептот за кинематските услови за лом кај капри, го воведуваат Hoek & Bray, 1981 и Goodman, 1989. Анализата и пресметката се врши врз основа на методот на стереографска проекција, преку внесување на азимутот на предметната косина и пукнатинските системи каде се анализира можност од планарно или просторно лизгање на блокови.

Во однос на емпириските пристапи, постои релативно мал број на развиени методи за проценка на стабилноста кај карпи. Romana (1985, 1995) ја развива класификацијата SMR (Slope Mass Rating) додека Sullivan (2013) го воведува глобалниот индекс за карактеристики на косините. Овие класификациони системи може да се користат за да се процени адекватноста на одредена ископана косина кај карпи и да се предвидат мерки за стабилизација, но сепак, не даваат индикација за потребниот наклон на косините. Значаен напредок во однос на проценката на геометријата на косини кај карпести формации е направена со релативно новата емпириска методологија Q-slope. Овој метод е развиен во текот на последната деценија од страна на Barton & Bar (2015, 2017) со модификација на оригиналниот Q систем (Barton et al. 1974, 2002). Главната предност на овој метод е тоа што може да им помогне на инженерите да го проценат најстрмниот наклон на одредена косина во карпеста средина кој обезбедува долгорочна стабилност, без употреба на дополнителни мерки за стабилизација.

Duncan, 2018, во своите истражувања доаѓа до заклучок, дека не постои сооднос помеѓу висината и наклонот на одредена косина во однос на нејзината стабилност и секоја косина мора да се процени индивидуално. Сепак, емпирискиот метод SSR (Slope Stability Rating) развиен од страна на Taheri et al., 2006 и модифициран 2007 год. од страна на Taheri & Tani, презентира дијаграми со сооднос помеѓу висината на одредена косина кај карпести средини и аголот кој обезбедува стабилност, зависно од добиените рејтинг поени согласно овој пристап.

Компарација на резултати од анализи на стабилност со методи на гранична рамнотежа, кинематски услови на лом и емпириски методи, со реалните услови на лице место, каде се обработени значителен број косини во карпести средини со слаб квалитет, врши авторот на тезата заедно со менторот (Јаневски и Јовановски, 2021).

Анализите базирани на теоријата на веројатност во геотехничкото инженерство првпат се воведени при проектирање на геометрија на отворен коп, каде што е дозволено прифаќање на одреден степен на ризик од обрушување и овој тип на анализа е вклучен во економското планирање на предметниот рудник (Canada DEMR, 1978; Pentz, 1981; Savely, 1987). Најчести примери за негова употреба во градежништвото се при планирање програми за стабилизација на косини кај инфраструктурни објекти (Wyllie, McCammon & Brumund, 1979; McGuffey, Athanasiou-Grivas, Lori et al., 1980), опасност од лизгање на земјиште (Fell, 1994, 1997) и кај капацитети за складирање на опасен отпад (Roberts, 1984, 1986).

Иако почетоците на веројатносните анализи датираат од пред половина век, сепак нивната примена е лимитирана. Можна причина за овој скептицизам од прифаќање на овие анализи е поради тоа што терминот како „5% веројатност за лом“ не е добро разбран, а искуството е ограничено на прифатлива веројатност за употреба при фаза на проектирање. Поприфатлив термин за инвеститорите би бил „95% сигурност“, но во реалноста никој не сака да добие информација дека постои одреден процент на можност од обрушување (Duncan, 2018).

Хазардот во однос на обрушувања кај косини во карпести средини, е најчестиот проблем во транспортната инфраструктура. Оттука, последиците можат да бидат огромни ако истите се игнорираат.

Постојат голем број на класификациони системи за рејтинг на хазардот, каде најголемиот дел од нив се развиени и наменети за опасност од одрони и се имплементирани во САД и Канада (Ho & Norton, 1991; Pierson et al., 1990; Bateman, 2002; Fish & Lane, 2002; Hadjin, 2002; Pack & Boie, 2002; Bellamy et al., 2003; Maerz et al., 2005; Vandewater et al., 2005 и др.). Треба да се напомене сопствениот придонес на авторот на докторската теза, кој предлага класификација на хазардот кај косини во распаднати карпи (Јаневски и Јосифовски, 2021), која претставува модификација на класификацијата RHRS (Rockfall Hazard Rating System, 1990).

Во современата пракса, егзистираат многу насоки за проектирање косини кај карпести маси, каде дозволените вредности на факторите на сигурност варираат во зависност од категоријата и важноста на објектот, условите на теренот, проектните услови, комбинацијата на оптоварување и други специфични услови. Сепак, многу се оскудни нормативите кои во предвид ја земаат и анизотропијата на материјалите, дисконтинуалноста, степенот на деградација, квалитетот и квантитетот на извршените геотехнички испитувања, иако секој од овие аспекти може да има круцијално влијание врз косините. Кај инфраструктурните проекти како што се автопатиштата и железниците, треба да се инсистира на висок степен на доверливост, бидејќи појави како свлечишта и одрони ретко можат да се толерираат. Дополнително, животниот век на косините кај инфраструктурните објекти е обично децениски а може да надмине и 100 години (Duncan, 2018).

Елаборација на прашања поврзани со веродостојноста на параметрите и на теренските услови генерално, каде се дадени и одредени препораки во однос на прифатливи критериуми поврзани со стабилноста кај карпите, со акцент на доверливоста и ризикот, врши Carter, 1992.

И покрај фактот што некои од методолошките пристапи можат да ја земат во предвид доверливоста, голем недостаток што сеуште е енигма, е предизвикот да се дефинира прифатливо (соодветно) ниво на ризик. Концептот за евалуација на неизвесноста кај стабилноста на косини и врска помеѓу недоверливоста и безбедноста е објаснет од Whitman, 1984. Детална елаборација на теоријата на веројатност и веродостојноста може да се најде во Harr, 1987. Пристап за проценка на ризик од свлечиште преку практични примери е истражуван од Hunt, 1984; Varnes, 1984; Morgan, 1991; Morgan et al., 1992; Fell, 1994; Fell & Hartford, 1997 и др. Пристап за евалуација на нивото на ризик за косини во цврсти карпести маси е предложен од страна на Пешевски и др., 2018.

Клучно влијание во проценката на стабилноста има и искуството на инженерот, поради недостаток на доверливи влезни параметри и може да биде од пресудно значење, поради уникатноста на теренските и другите специфични услови.

Kulhawy & Phoon, 96, доаѓаат до заклучок дека иако развојот на теоријата и особено на софтверските алатки бележи рапиден раст последните декади, важноста на субјективните инженерски проценки воопшто не е намалена, иако повеќе е фокусирана на аспектите надвор од опсегот на теоретските анализи.

Неизбежно е да бидат напоменати и достигнувањата поврзани со Еврокодovите од полето на стабилност кај карпи. Еврокодот наменет за геотехничко проектирање, познат како EC7 е составен од два дела: EN-1997-1:2004 – Генерални правила (CEN 2004) и EN 1997-2:2007 – Истражни работи и тестови (CEN 2007). Овој код е публикуван во 2006 год. од Европскиот Комитет за Стандардизација (CEN), додека од 2010 год. е референтен сет нормативи за геотехничко проектирање.

Сепак, EC7 го достигна својот сегашен статус без формален и методичен придонес од пошироката заедница од полето на механика на карпи. Како резултат на тоа, многу инженери од фелата известуваат дека овие нормативи е многу тешко, а во одредени околности и невозможно, да се применат во механиката на карпи (Harrison et al., 2015). Затоа, започнат е процес за ревизија на EC7, каде главна цел е еднаков третман на карпите со почвите. Иако се извршени значајни модификации во насока на подобрување и полесно имплементирање во механиката на карпи, сепак постојат многу аспекти кои треба да бидат адресирани (Lamas et al., 2020).

На крајот од ова поглавие, ќе се даде еден краток осврт на сопственото истражување на авторот, кое е тесно поврзано со полето на истражување во тезата. Најпрво, се потенцира, дека темата на истражување е продолжување на научните истражувања разработени во магистерска теза со наслов „Пристап за анализа на стабилност на длабоки усеци кај анизотропни карпести маси со слаби физичко-механички својства“, 2013. На овој начин се создава континуитет и надополнување на истражувањата. Исто така изминатите години авторот врши континуирано истражување на темата преку презентација и публикување на повеќе научно-истражувачки трудови на еминентни меѓународни конференции и издавачки куќи, од кои најзначајни се студиите: Јаневски, 2016; Јаневски и Милановски, 2018; Јаневски и Јосифовски, 2021; Јаневски и Јовановски, 2021; Јаневски и др., 2022.

### 3. КРАТОК ОСВРТ НА РАБОТНИТЕ ХИПОТЕЗИ И ТЕЗИ

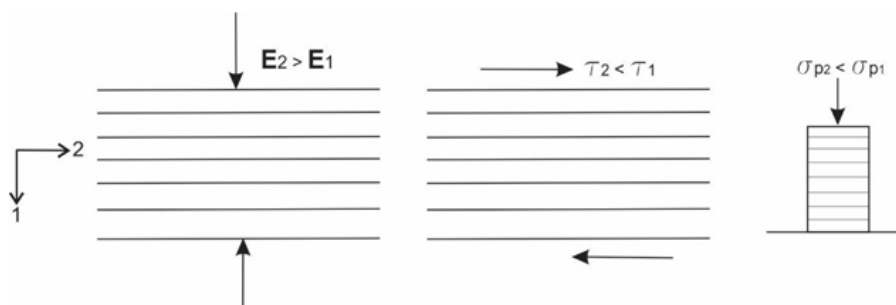
Главната подлога, односно основата на ова истражување претставува огромната база на оригинални податоци од реални примери во праксата, што ќе претставува референтна точка за изработка на предметната интегрална методологија за проценка на стабилност и ризик од обрушување на косини кај карпести маси со слаб квалитет. Целта е да се елиминираат или сведат на минимум симплификации и поедноставувања, а што повеќе да се користат податоци од реалното однесување на теренот на лице место, каде голем акцент ќе се стави на доверливоста на геотехничките параметри.

Предмет на истражувањето се вкупно 58 косини кај карпести формации со низок квалитет. За анализираните косини изработена е солидна база на податоци. Предметните косини се изведени во терен изграден од шкрилести карпи со многу слаб квалитет. По ископот на овие косини, поради атмосферските влијанија, карпите значително ги губат своите физичко-механички карактеристики, особено во површинските зони, односно се работи за шкрилци од групата на филитоиди кои се многу подложни на ерозија и локални деформации.

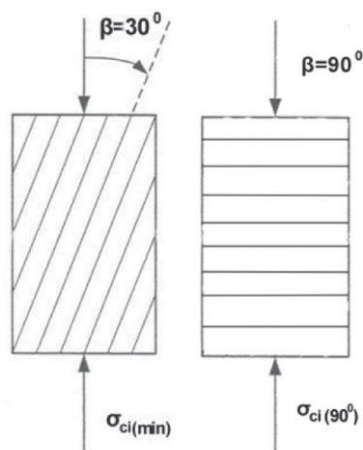
Речиси една третина од анализираните косини (18) се стабилни и без видливи знаци на потенцијална нестабилност, кај 18 косини се појавени помалку значајни (локални) обрушувања но и можност од дополнителни слични деформации, додека кај 22 од косините се регистрирани значајни свлечишта и развиени се нестабилни зони со релативно голем опсег, кои условуваат потреба од примена на мерки за стабилизација и заштита.

Се напоменува, дека како опис и дефиниција за карпести маси со слаб квалитет, како и за анизотропија на ниво на монолит, се користат генерално термините утврдени од Меѓународното друштво за механика на карпи (ISRM).

На пример, постои сосема различен начин на пројавување анизотропија на деформабилност на масив во однос на јакоста на смолкнување на масив и јакоста на притисок на монолит (Слика 5). Очигледно е дека деформабилноста на масив, изразена преку модулот на еластичност во два разгледувани правци ( $E_1$  и  $E_2$ ), на некој начин појавува обратна анизотропија, условно и релативно, споредено со јакоста на смолкнување ( $\tau$ ) на масив и јакоста на притисок на монолит ( $\sigma_p$ ). Според резултатите од голем број на испитувања, се покажува дека најчесто најголема вредност на јакоста на притисок при еднооксијално оптоварување, се добива кога примерокот е оптоварен нормално на фолијација (или слоевитост), додека најниска паралелно на фолијацијата, при агол од околу  $30^\circ$  (Слика 6).



Слика 5. Анизотропија на деформабилност ( $E$ ), јакост на смолкнување на масив ( $\tau$ ) и јакост на притисок на монолит ( $\sigma_p$ ) во правци 1 и 2.

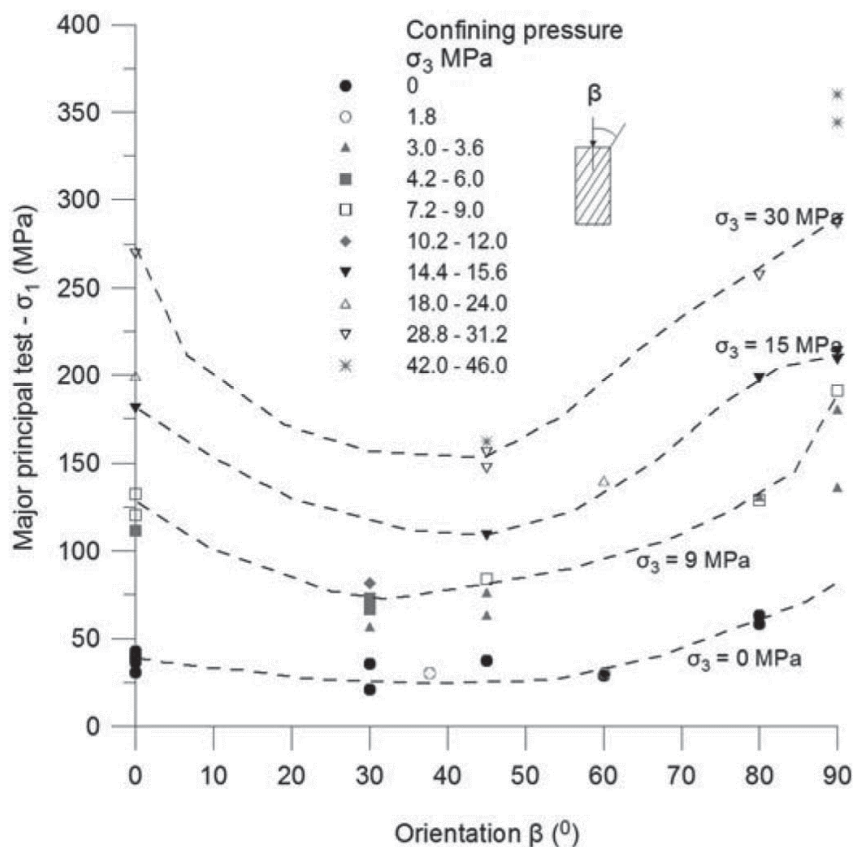


Слика 6. Влијание на правецот на оптоварување на примерок во однос на рамнини на фолијација, за едноосијална состојба на напрегање (Saroglou, 2013).

Според испитувањата на Ramamurthy, 1993, опишано и во препораките на ISRM, 2007, анизотропијата на јакоста се определува со т.н. индекс на анизотропија на јакоста ( $R_c$ ) според равенството (1):

$$R_c = \sigma_{c,90} / \sigma_{c,min} \dots\dots\dots(1)$$

Слично однесување на карпестите примероци се јавува и при испитување во услови на триаксијална компресија (Слика 7).



Слика 7. Приказ на влијание на насоката на оптоварување на примерок во однос на рамнини на фолијација, за триаксијална состојба на напрегање, за гнајс (Saroglou, 2013).



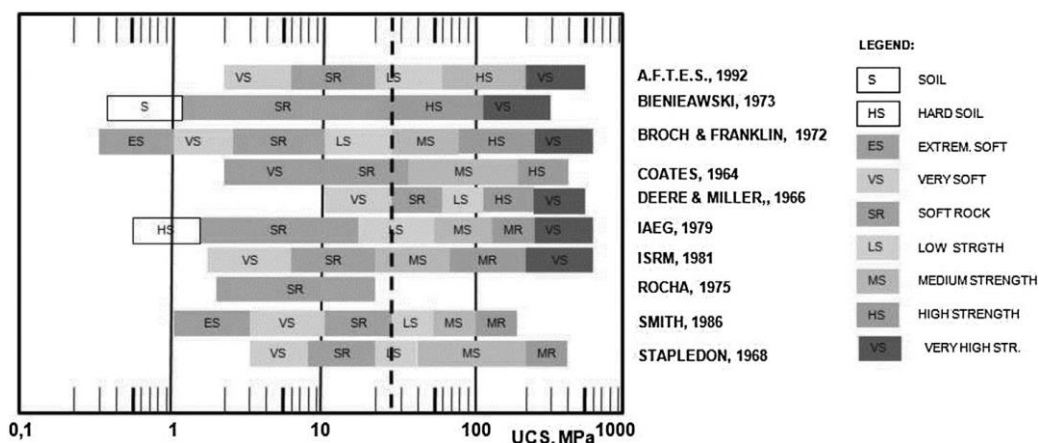
Во праксата постои и класификација на анизотропијата според вредностите на еластичните сеизмички бранови мерени со ултразвук на примерок. За вакви случаи, според Tsidzi, 1997, како параметар за опис на анизотропијата се користи вредност на индекс на брзини на сеизмички бранови  $I_{vp}$ .

Постојат и препораки за дефинирање на анизотропијата според вредностите на модулот на деформација и на Поасоновиот коефициент (Ramamurthy, 1993 & Kwasniewski, 1993). Врз основа на овие трудови, Saroglou & Tsiambaos, 2007, го воведуваат и терминот индекс на анизотропија, при испитување на индекс на точкасто оптоварување со дијаметрален тест ( $I_d$ ). Авторите ја изработиле класификацијата согласно референтни вредности на неколку параметри и истата е прикажана во Табела 2. Податоците од предложената класификација понатаму се користат за дефинирање на одредени критериуми на лом за карпестите маси.

**Табела 2.** Класификација за дефинирање на анизотропија според неколку различни параметри, Saroglou & Tsiambaos, 2007

Опис на категорија на анизотропија	Индекс на анизотропија на јакост на притисок, $I_{\sigma_c}$	Индекс на брзини на сеизмички бранови, $I_{vp}$	Индекс на анизотропија на точкаста јакост, $I_d$
Изразена изотропија	$< 1.1$	/	1.0
Малку изразена анизотропија	$1.1 < I_{\sigma_c} < 2.0$	$< 1.5$	$1.0 < I_d < 2.0$
Средно изразена анизотропија	$2.0 < I_{\sigma_c} < 3.0$	$1.5 < I_{vp} < 2.0$	$2.0 < I_d < 4.0$
Висока анизотропија	$3.0 < I_{\sigma_c} < 5.0$	$> 2.0$	$> 4.0$
Многу висока анизотропија	$> 5.0$	/	/

Поделбата на карпите, заснована на јакоста на притисок на монолит, е прикажана на Слика 8, компаративно согласно истражувањата на разни автори.



**Слика 8.** Класификација на карпи според јакост на притисок (Galvan, 1999): S-почва, HS-тврда почва, ES-екстремно мека карпа, VS-многу мека карпа, SR-мека карпа, LS-карпа со ниска јакост, MS-карпа со средна јакост, HS-карпа со висока јакост, VHS-карпа со многу висока јакост.

Меѓународното друштво за механика на карпи (ISRM) има разработено постапка за опис на карпестите маси според вредноста на јакоста на притисок на монолит (Табела 3). Треба да се потенцира, дека категориите од R2 до R0 прикажани во Табела 3, најчесто во инженерството се нарекуваат слаби карпи („weak rocks“) или меки карпи („soft rocks“).

**Табела 3.** Класификација на материјалите, согласно ISRM (Marinos & Hoek, 2001)

Класа	Опис	Теренска идентификација	Јакост на притисок [MPa]
R6	Екстремно цврста карпа	Примерокот единствено може да биде изделен од масив со геолошки чекан	> 250
R5	Многу цврста карпа	Примерокот за да биде скршен треба да биде удрен со геолошки чекан повеќе пати	100 – 250
R4	Цврста карпа	Примерокот за да биде скршен треба да биде удрен со геолошки чекан повеќе од еднаш	50 – 100
R3	Средно цврста карпа	Примерокот не може да биде делкан со џебен нож, а се крши со еден силен удар од чекан	25 – 100
R2	Слаба карпа	Може да биде длабена со џебен нож, а удар од чекан остава плитка трага	5 – 25
R1	Многу слаба карпа	Примерокот се дроби целосно со удар од чекан и може лесно да се длаби со џебен нож	1 – 5
R0	Екстремно слаба карпа	Тешко се зарежува со клин	0.25 – 1
S6	Цврста глина	Се зарежува со клин	> 0.5
S5	Многу збиена крута глина	Лесно се зарежува со клин	0.25 – 0.5
S4	Крута глина	Лесно се зарежува со клин, но тешко се продира низ материјалот	0.25
S3	Тврда глина	Може да биде продрено низ материјалот неколку сантиметри со клин со среден напор	0.05 – 0.1
S2	Мека глина	Лесно се продира со клин	0.025 – 0.05
S1	Многу мека глина	Лесно се продира низ материјалот неколку сантиметри со тупаница	< 0.025

Во однос на проценката на влезните параметри за анализа, резултатите од лабораториските и теренските истражувања, искористени за проценка на јакоста на ниво на масив, главно се извршени согласно критериумот на лом според Hoek & Brown. Нивниот оригинален критериум од 1980 година, подоцна врз основа на сознанија од голем број проекти, е модифициран во 1988 и во 2002 година. Генерален облик на овој критериум, кој ги инкорпорира заедно оригиналната и модифицираната форма, е прикажан со следното равенство (2):

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_c \left( m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_c} + s \right)^a \quad \dots\dots\dots(2)$$

Каде што,  $\sigma_1'$  и  $\sigma_3'$  претставуваат ефективните максимални и минимални напрегања, додека  $\sigma_c$  претставува едноаксијалната јакост на притисок на монолит. Материјалните константи  $m_b$ ,  $s$  и  $a$ , зависат од квалитетот на карпестата маса (GSI) и се определуваат согласно равенствата (3), (4) и (5), односно:

$$m_b = m_i \exp \left( \frac{GSI - 100}{28 - 14D} \right) \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$s = \exp \left( \frac{GSI - 100}{9 - 3D} \right) \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} (e^{-GSI/15} - e^{-20/3}) \quad \dots\dots\dots(5)$$

Каде што,

$m_i$  – материјална карактеристика за интактен карпест примерок;

$m_b$  – редуцирана вредност материјална карактеристика за монолит;

$s, a$  – емпириски константи за карпеста маса;

$GSI$  – геолошки индекс на јакост;

$D$  – фактор на пореметеност, зависно од методот на ископ или при релаксација на напоните.

Вредностите на факторот на пореметеност ( $D$ ), се движат во дијапазон од 0 за непореметена карпеста средина, до 1.0 за целосно пореметена карпеста маса. Во врска со овој параметар, одредени анализи и предлози се прикажани во рамките на дисертацијата.

Вреди да се спомене, дека постојат и модификации на овој критериум за екстраполација од монолит на масив и кај анизотропни карпести маси, што во кратки црти е образложено во продолжение на ова поглавие. Имено, од страна на Saroglou et al., 2019, е предложена следната модификација:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci,\beta} \left( k_b \left( m_{b,an} \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci,\beta}} + s_{an} \right) \right)^a \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$m_{b,an} = m_i \exp \left( \frac{ARMR - 100}{28 - 14D} \right) \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$s_{an} = \exp \left( \frac{ARMR - 100}{9 - 3D} \right) \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$a = 0.5 + \frac{1}{6} (e^{-ARMR/15} - e^{-20/3}) \quad \dots\dots\dots(9)$$

Каде што,

$m_{b,an}$  – материјална карактеристика за анизотропна карпеста маса;

$s_{an}$  – емпириска константа за анизотропна карпеста маса;

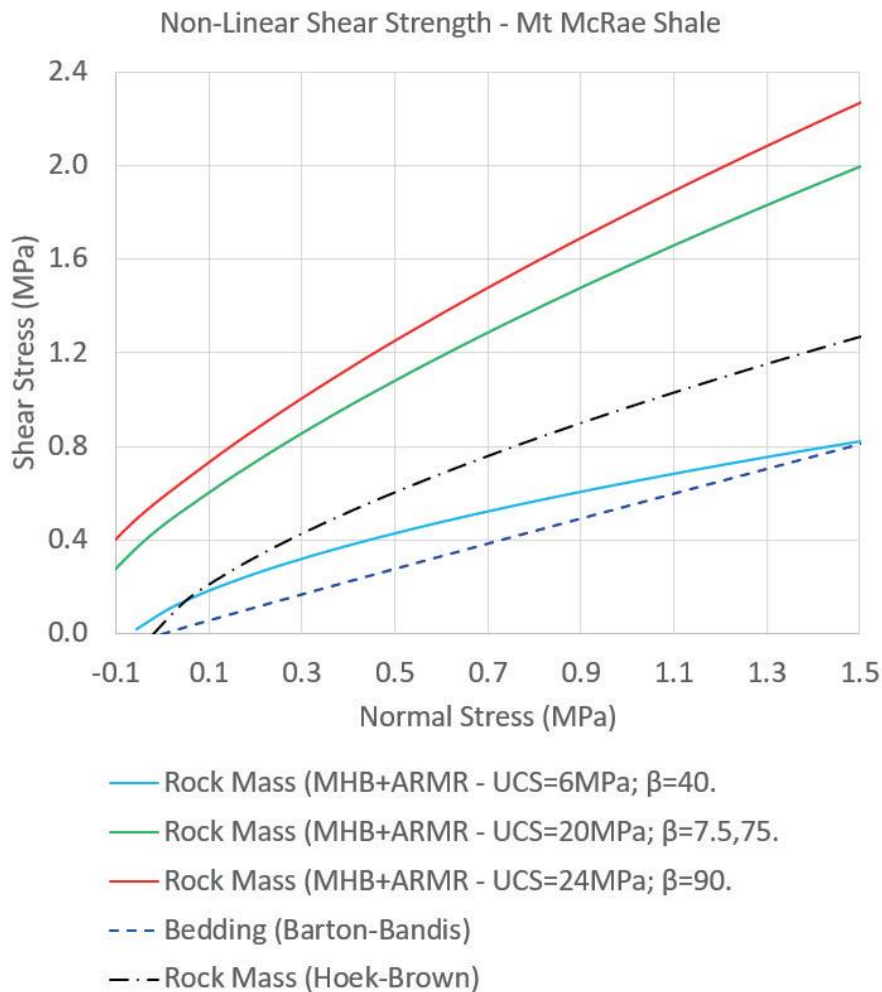
$\sigma_{ci,\beta}$  – еднооксијалната јакост на притисок на монолит, зависно од аголот на испитување на јакоста во однос на ориентацијата на анизотропијата ( $\beta$ );

$ARMR$  – рејтинг на анизотропна карпеста маса (Saroglou et al., 2018).

Соодветна корекција се врши и за глобалната јакост на карпетата маса, согласно равенството (10):

$$\sigma_{cm,an} = \sigma_{ci,\beta} \frac{\left(m_{b,an} + 4s_{an} - a(m_{b,an} - 8s_{an})\right) \left(\frac{m_{b,an}}{4} + s_{an}\right)^{a-1}}{2(1+a)(2+a)} \dots\dots\dots(10)$$

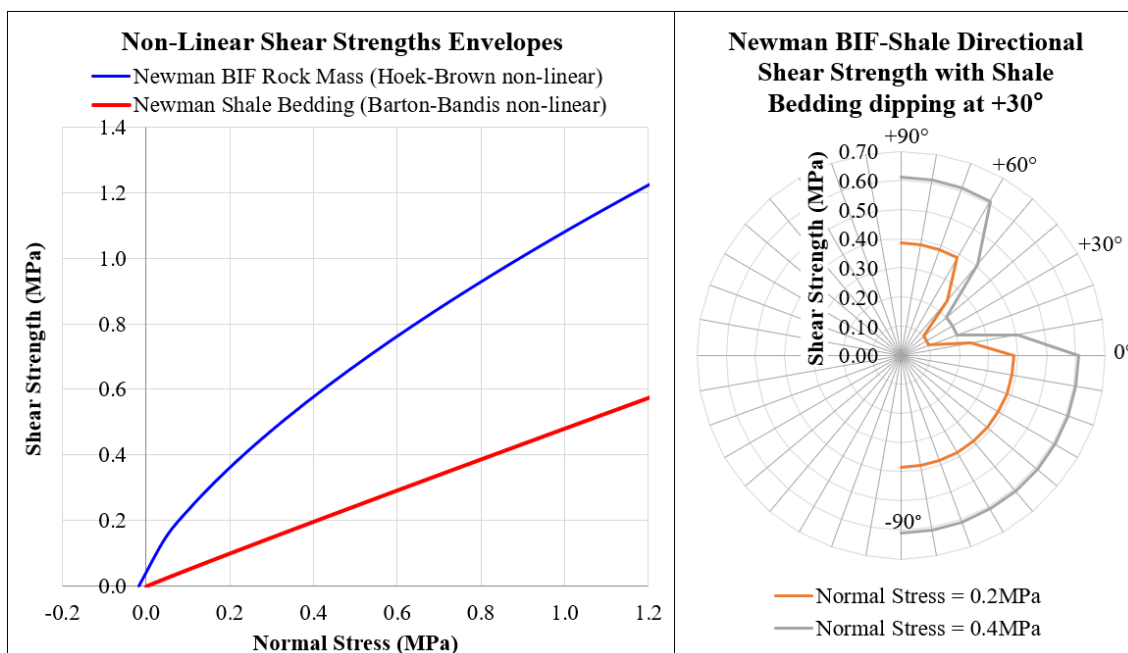
Во овој контекст, на Слика 9 е прикажан дијаграм, од каде што може да се процени какво е влијанието на аголот  $\beta$  (ориентација на анизотропијата) во однос на дефинирањето на анизотропијата.



**Слика 9.** Компарација на анвелопи на лом за анизотропни карпи – глинци, добиени за различна ориентација на анизотропијата, користејќи модели на Hoek-Brown, модифициран Hoek-Brown согласно ARMR и смолкнување по слоевитост согласно Barton-Bandis, (Saroglou & Bar, 2019).

Како заклучок, поврзан со примената на критериумот на лом Хоек-Brown, може да се потенцира дека тој, во суштина, е нелинеарен. Во оригинална форма се однесува на изотропна карпеста маса, каде што нема значајно влијание на долги дисконтинуитети. На ниво на карпест масив, се користи за случаи на квазихомогена карпеста маса со изедначена испуканост.

Од прикажаното, може да се резимира дека вредностите на јакосните параметри, добиени според разни методи, може да се корелираат, па имајќи го нивното значење во геотехниката, зависно од користените моделите за анализа, овие наоди можат да се употребат и при анализи на стабилност, со користење на т.н. дирекциски модели за анализа (Слика 10).



**Слика 10.** Анвелопи на лом согласно различни модели (лево) и дирекциски модел за одредување на анвелоп на јакост (десно), за ниво на нормален напон од 0.2 и 0.4 МПа, за рамнини на слоевитост од  $30^{\circ} \pm 5^{\circ}$ , (Bar et al., 2018).

При формирање на дирекциските модели за утврдување на јакоста, постојат четири клучни фази и тоа:

- Дефинирање на јакоста на карпест масив, користејќи некој од најчесто применуваните критериуми на лом;
- Определување на јакоста на смолкнување по должина на рамнините на лом, односно по главните рамнини на анизотропија;
- Утврдување на ориентацијата на рамнините на анизотропија во однос на ископот;
- Дефинирање на правци во просторот, каде што е меродавна јакоста на смолкнување по должина на пукнатините, при што се дефинира зона на преод од јакост на масив кон јакост на пукнатини.

Во однос на користените податоци од сопствените истражувања, особено од лабораториските тестови, се напоменува дека поради многу лошиот квалитет на застапените карпести маси, со истражните дупнатини не беше можно да се извади квалитетно јадро за одредување на јакоста на притисок. Имено, вредноста на еднооксијалната јакост на притисок (UCS) е добиена емпириски, со користење на следното равенство:  $UCS = (15 \div 23)PLI$ , каде што PLI претставува коригирана вредност на индексот на јакост за дијаметар на примерок од 50 mm ( $J_{s(50)}$ ), добиена преку лабораториски опит на точкасто оптоварување (PLT). Во овој контекст се напоменува дека користеното емпириско равенство не е строго дефинирано, туку напротив постои релативно голем дијапазон на варијација на вредноста со која се мултиплицира индексот на јакост. Во Табела 4 се дадени препораки за одредување на вредноста на еднооксијалната јакост на притисок преку индексот на точкаста јакост од разни автори, зависно од типот и квалитетот на карпеста маса.

**Табела 4.** Преглед на препорачана зависност помеѓу еднооксијалната јакост на притисок (UCS) и индексот на точкаста јакост (PLI)

Автор / Референца	Тип на карпа	Предложена емпирииска зависност
Broch & Franklin (1972)	Разни типови на карпи	$UCS = 23.7PLI$
Bieniawski (1975)	Песочник	$UCS = 23.9PLI$
Hassani et al. (1980)	Седиментни карпи	$UCS = 29PLI$
Read et al. (1980)	Седиментни карпи	$UCS = 20PLI$
ISRM (1985)	Разни типови на карпи	$UCS = (20 \div 25)PLI$
Das (1985)	Песочник	$UCS = 18PLI$
	Шкрилец	$UCS = 12.6PLI$
Hawkins & Olver (1986)	Варовник	$UCS = 26.5PLI$
	Песочник	$UCS = 24.8PLI$
O'Rourke (1988)	Седиментни карпи	$UCS = 30PLI$
Vallejo et al. (1989)	Песочник	$UCS = 17.4PLI$
	Шкрилец	$UCS = 12.6PLI$
Tsidzi (1991)	Разни типови на карпи	$UCS = (14 \div 82)PLI$
Ulusay et al. (1994)	Песочник	$UCS = 19PLI + 12.7$
Smith (1997)	Песочник и варовник	$UCS = 24PLI$
	Шкрилец	$UCS = 12.6PLI$
Rusnak & Mark (1999)	Песочник	$UCS = 20.6PLI$
	Варовник	$UCS = 21.9PLI$
	Шкрилец	$UCS = 21.8PLI$
Kahraman (2001)	Разни типови на карпи	$UCS = 8.41PLI + 9.51$
Quane and Russel (2003)	Слаби карпести маси	$UCS = 3.86(PLI)^2 + 5.65PLI$
Tsiambaos & Sabatakakis (2004)	Разни типови на карпи	$UCS = 23PLI$
Fener et al. (2005)	Разни типови на карпи	$UCS = 9.08PLI + 39.32$
Kahraman et al. (2005)	Разни типови на карпи	$UCS = 10.91PLI + 27.41$
Karaman & Kesimal	Разни типови на карпи	$UCS = 20.42PLI - 5.146$

Врз основа на овие поставки, а за избраните косини од практичните примери, за изработка на интегралната методологија, најпрво ќе се анализира и лоцира изворот на проблемите кај анализираните косини во карпести средини со низок квалитет, а потоа ќе се дадат методични насоки како да се дојде до оптимално решение, за кое ќе се дефинира соодветен степен на ризик. Фазното решавање на овие комплексни проблеми ќе претставува синтеза на достапните методолошки пристапи, но ќе се вметнат и сопствени оригинални методи.

Имајќи го ова во предвид и спроведените анализи, пресметки и евалуации на стабилноста согласно различни методолошки пристапи, ќе се изнесат позитивните и негативните страни на разгледуваните методи, но ќе се потенцираат и одредени критички заклучоци во однос на применливоста на истите (зависно од условите на лице место) и нивната прецизност. Сето ова ќе кулминира со предлог на шематски алгоритми, емпириски зависности и дијаграми за адекватно справување со оваа проблематика.

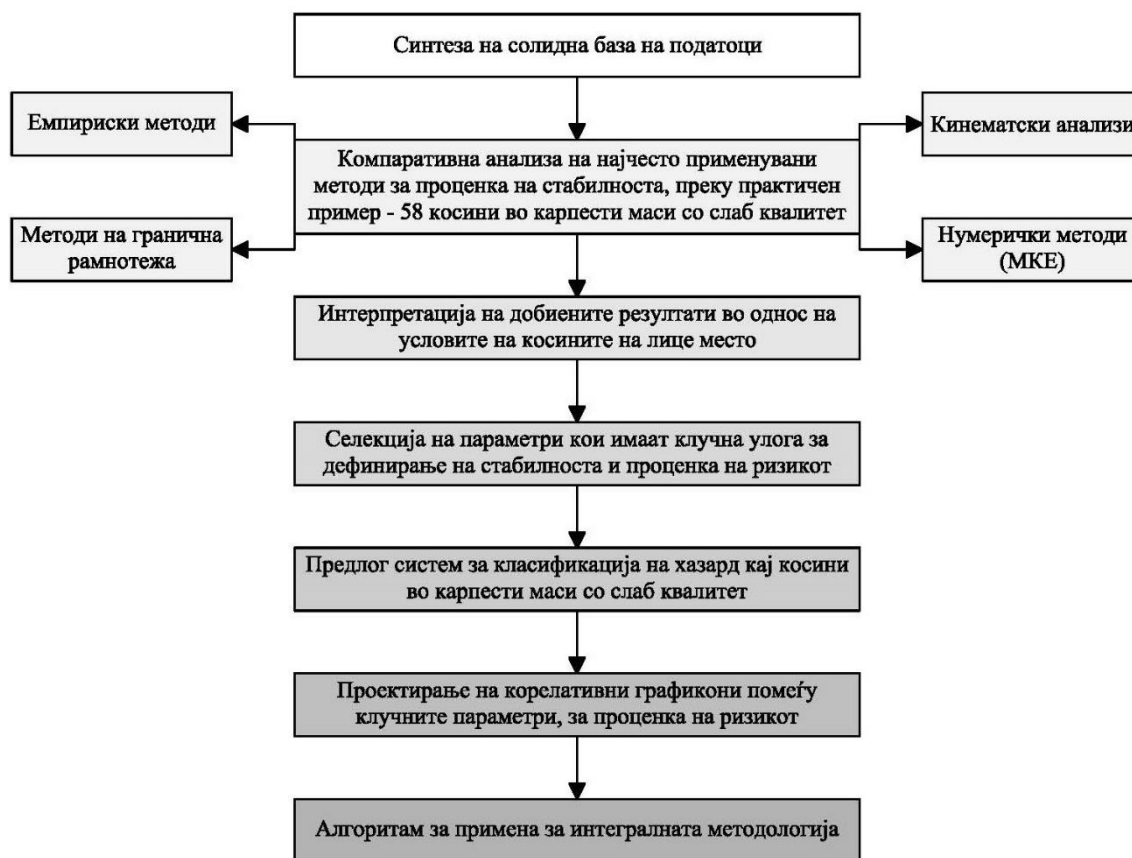
Со оглед на фактот дека кај стабилните косини нивото на ризик е прифатливо, кај косините со помали локални обрушувања степенот на ризик е условно прифатлив (зависи од многу специфични услови), додека кај косините со значајни обрушувања нивото на ризик е неприфатливо, ќе се презентираат иновативни корелативни дијаграми помеѓу одредени клучни параметри. Со помош на овие шематски дијаграми ќе може да се процени степенот на ризик на одредена косина во карпеста средина со слаб квалитет.

#### 4. ПРИМЕНЕТИ НАУЧНИ МЕТОДИ И НАЧИН НА РАБОТА

Согласно претходно дефинираните прашања поврзани со предметната проблематика, истражувањето се заснова на следните видови на анализи:

- Лабораториски испитувања на повеќе од 1600 карпести примероци;
- Подготовка и реализација на повеќе од 500 теренски опити;
- Анализа и синтеза на сите резултати од истражувањата и испитувањата и нивна инкорпорација во околу 350 излези од тестовите.

Истражувањето е спроведено во неколку последователни фази, односно во согласност со шематскиот алгоритам илустриран на Слика 11. Овој дијаграм, претставува симплифицирана форма, за да не дојде до обременување на истиот со детали, иако во суштина постојат голем број на под-гранки за реализација на целокупниот процес.



Слика 11. Шематски приказ на методологијата на работа, за реализација на целите на истражувањето во докторскиот труд.

Согласно методичниот пристап за сроведување на истражувањето (Слика 11), заедно со постапките за реализирање на целта на истражувањето, во продолжение се образложени и научните методи применети во истражувањето.

Најпрво, користени се техники за статистичка обработка на податоците од теренските истражни работи и лабораториските испитувања, а во согласност со специфичните услови кои ги карактеризираат предметните косини.



Поради релативно големиот број регистрирани свлекувања кај анализираните косини, извршени се и повратни анализи на стабилноста. На овој начин се дефинирани границите на варијација на параметрите, преку одредено калибрирање на геотехничките параметри, односно дефинирани се веродостојни влезни параметри, што е круцијален аспект за сите понатамошни анализи, пресметки, евалуации и компарации.

Потоа, извршена е проценка на стабилноста со мулти-дисциплинарен пристап, согласно најактуелните методи во праксата, на вкупно 58 косини (усеци) изведени во карпести маси со слаб квалитет. Имено, од емпириските методи за проценка на стабилноста, користен е методот Q-slope (Barton & Bar, 2015, 2017), додека од статичките методи користен е принципот на гранична рамнотежа, каде анализите се вршени согласно детерминистички и веројатносен (пробабилистички) пристап. Дополнително, анализирани се кинематските услови на лом (стабилност по дисконтинуитети), додека од нумеричките методи користен е методот на конечни елементи. Емпирискиот метод Q-slope (Barton & Bar, 2015, 2017) е користен за проценка на најстрмниот агол на одредена косина, кој обезбедува долгорочна стабилност без дополнителни мерки за стабилизација и истиот е спореден со аголот со кој е изведена анализираната косина. При анализите на стабилност, карпестите маси се моделирани согласно генерализираниот критериум на лом Ноек-Вгown (Ноек et al., 2002), додека однесувањето на пукнатинските системи е моделирано согласно критериумот на Barton & Bandis, 1990.

Согласно интерпретацијата на резултатите од анализите и пресметките и состојбата на косините на лице место, издвоени се одредени параметри за кои авторот смета дека имаат круцијална улога во дефинирањето на условите за стабилност, и кои ќе бидат искористени за проценка на ризикот од обрушување.

При изборот на параметрите, водено е сметка истите да можат да се утврдат релативно едноставно, со помош на најчесто користените методи во праксата, додека за индексот на хазард ( $H_i$ ) од авторот е предложен систем за бодување и класификација на истиот. Параметрите кои претставуваат референтна основа во предложената методологија се:

- Фактор на сигурност ( $F_s$ );
- Веројатност од лом ( $P_f$ );
- Индекс на доверливост ( $\beta$ );
- Индекс на хазард ( $H_i$ );
- Однос помеѓу аголот [ $^\circ$ ] и висината [m] на разгледуваната косина ( $\alpha/H$ ).

Во продолжение се презентирани основни податоци, во однос на утврдувањето на овие параметри во ова истражување. Факторот на сигурност ( $F_s$ ) е определен согласно детерминистички анализи, базирани на принципи на гранична рамнотежа, кинематски услови на лом, како и со користење на методи на конечни елементи. Анализите се спроведени користејќи кружни, кружно-цилиндрични, полигонални и сложени рамнини на лизгање (кај методот на конечни елементи).

Веројатноста од лом ( $P_f$ ) и индексот на доверливост ( $\beta$ ) се проценети согласно пробабилистички пристап, каде е користена Monte-Carlo симулација преку тип на анализа за глобален минимум.

За определување на индексот на хазард ( $H_i$ ) во склоп на овој докторски труд, предложен е автентичен систем за рејтинг, кој претставува модифицирана верзија на класификацијата RHRS (Rockfall Hazard Rating System, Pierson et al., 1990). Системот се базира на 8 категории за кои се врши соодветно бодување и во зависност од рангирањето, се врши класификација на нивото на хазард за одредена разгледувана косина.

Последниот клучен параметар претставува соодносот помеѓу аголот ( $\alpha$ ) и висината на анализираната косина, кој претставува геометриска карактеристика за која не се потребни никакви претпоставки, анализи и пресметки. Доколку се разгледува локална косина ( $h$ ) тогаш геометриската карактеристика се однесува на локалната косина (берма), но доколку се разгледува глобално проблемот, тогаш се користат генералниот агол и висина на предметниот усек ( $H$ ).

За сите анализирани косини се дефинирани карактеристични вредности на клучните параметри и овие резултати се инкорпорирани на автентични графички дијаграми преку меѓусебна зависност.

Согласно реалната состојба на косините на лице место, проектирани се референтни зони на дијаграмите кои прават дистинкција помеѓу косините со значајни деформации, косините со локални деформации и стабилните косини, каде што за овие зони соодветно, степенот на ризик е дефиниран како неприфатлив, условно прифатлив и прифатлив ризик од обрушување.

Потоа, предложен е алгоритам за примена на предложената интегрална методологија. Овој методичен шематски приказ претставува сублимат од неопходните постапки, за интегрален пристап при проценка на стабилноста и ризикот од обрушување, на косини кај карпести маси со слаб квалитет.

На самиот крај, отворени се солиден број на прашања кои можат да бидат разработени во понатамошни истражувања.

## 5. КРАТОК ОСВРТ НА КОРИСТЕНИТЕ МЕТОДИ ЗА ПРОЦЕНКА НА СТАБИЛНОСТА

### 5.1. Емпириски методи

Во десегашната геотехничка пракса, релативно мал број на емпириски методи се разработени за проценка на стабилноста на косини кај карпести средини. Методот на Sullivan, 2013 кој е познат и како индекс за глобално однесување на косините (GSPI – Global Slope Performance Index), претставува едноставен емпириски систем за предвидување на актуелните и понатамошните перформанси на ископаните косини. Овој метод се заснова на три фактори кои влијаат на однесувањето на косините: јакост на интактен примерок, геолошка структура и влијанието на подземната вода. Врз основа на вкупниот рејтинг, се проценува дали косината е стабилна, дали постои можност од развој на локални деформации и одрони, нестабилност со поголеми размери, па се до глобален лом.

SMR (Slope Mass Rating) методот развиен од страна на Romana, 1985, 1995, може да се користи за да се процени состојбата на одредена ископана косина во карпеста средина и да се предвидат мерки за стабилизација и заштита. Во суштина, постапката претставува модификација на класификацијата на Bieniawski, 1989, со тоа што се вршат одредени поправки во однос на ориентацијата на меродавните пукнатински системи во однос на наклонот на косините, каде е земено во предвид и влијанието од методологијата на ископ. Иако овој методолошки пристап нуди можност за проценка на мерки за стабилизација и заштита на косините, сепак не може да се процени потребниот наклон на предметната косина за да се обезбеди нејзината долгорочна стабилност. Во последната декада, SMR се користи најчесто за геотехничка класификација и бодување на косини во карпести средини, прелиминарни истражни работи со цел да се одреди ранливоста на косината и како основен индикатор за инженерски решенија на косини при лом.

Деталите на SMR класификацијата се презентирани во Табела 5, каде P (planar failure) означува планарен лом, T (toppling) означува превртување, додека W (wedge failure) означува клиновиден лом. Овој пристап се темели на пет параметри и се пресметува согласно равенството (11):

$$SMR = RMR_b + (F_1 + F_2 + F_3) + F_4 \quad \dots\dots\dots(11)$$

Каде што,

$RMR_b$  рејтинг на карпеста маса, согласно Bieniawski, 1989;

$F_1$  фактор кој зависи од степенот на паралелност ( $A$ ) меѓу азимутот на доминантниот пукнатински систем  $\alpha_j$  и азимутот на косината  $\alpha_s$ ;

$F_2$  фактор кој зависи од падниот агол на дисконтинуитетите  $B=\beta_j$  во однос на наклонот на рамнината на лизгање;

$F_3$  фактор кој зависи од соодносот ( $C$ ) помеѓу наклонот на лецето на косината  $\beta_s$  и доминантниот пукнатински систем  $\beta_j$ ;

$F_4$  корекционен фактор кој зависи од начинот на ископ на материјалот.

Табела 5. SMR класификација на карпести маси за косини (Romana, 1985, 1995)

Случај на лом		Многу поволна	Поволна	Прифатлива	Неповолна	Многу неповолна
P T W	A= $ \alpha_j - \alpha_s $ $ \alpha_j - \alpha_s - 180^\circ $ $ \alpha_j - \alpha_s $	$>30^\circ$	$30^\circ \div 20^\circ$	$20^\circ \div 10^\circ$	$10^\circ \div 5^\circ$	$<5^\circ$
P/W/T	$F_1$	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
P W	B= $ \beta_j $ $ \beta_j $	$<20^\circ$	$30^\circ \div 20^\circ$	$35^\circ \div 30^\circ$	$45^\circ \div 35^\circ$	$>45^\circ$
P/W	$F_2$	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
T	$F_2$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
P	C= $ \beta_j - \beta_s $ $ \beta_j - \beta_s $	$> 10^\circ$	$10^\circ \div 0^\circ$	$0^\circ$	$0^\circ \div (-10^\circ)$	$<(-10^\circ)$
T	C= $ \beta_j + \beta_s $	$< 110^\circ$	$110^\circ \div 120^\circ$	$> 120^\circ$	/	/
P/W/T	$F_3$	0	-6	-25	-50	-60
Тип на ископ	Природна косина	Контролирано минарање	Мазно минарање	Минарање	Механички ископ	Слабо минарање
$F_4$	+15	+10	+8	0	0	-8
<b>SMR вредност</b>		<b>0 ÷ 20</b>	<b>21 ÷ 40</b>	<b>41 ÷ 60</b>	<b>61 ÷ 80</b>	<b>81 ÷ 100</b>
<b>Класа</b>		<b>V</b>	<b>IV</b>	<b>III</b>	<b>II</b>	<b>I</b>
Опис на карпест масив		Многу деградиран	Деградиран	Малку деградиран	Испукан	Цврст
Стабилност		Комплетно нестабилно	Нестабилно	Делумно стабилно	Стабилно	Комплетно стабилно
Тип на лом		Голем планарен лом или кружно-цилин.	Рамнински или клиновиден	Лом по пукнатини или клин	Превртување	Нема лом
Веројатност на лом		0.90	0.60	0.40	0.20	0.00
SMR класа		SMR вредност	Мерки за стабилизација			
Ia		91 ÷ 100	Не е потребна			
Ib		81 ÷ 90	Не е потребна до отстранување на слаб материјал			
IIa		71 ÷ 80	Растретување, одводнување во ножица, заштитна мрежа			
IIb		61 ÷ 70	Одводнување во ножица, заштитна мрежа или анкери			
IIIa		51 ÷ 60	Одводнување во ножица, заштитна мрежа, шематско анкерисување или прскан бетон			
IIIb		41 ÷ 50	Одводнување во ножица и сид, шематско анкерисување, системско прскање на бетон, пломбирање со бетон			
IVa		31 ÷ 40	Анкерисување, системско прскање на бетон, бетонски потпорен сид, корекција на ископ, длабоко дренирање			
IVb		21 ÷ 30	Сисемско прскање на преднапрегнат бетон, бетонски потпорен сид, корекција на ископ, длабоко дренирање			
V		11 ÷ 21	Корекција на ископ, длабоко дренирање, масивен потпорен сид, анкерисан потпорен сид со потпори			

Емпирискиот метод SSR (Slope Stability Rating) развиен од страна на Taheri et al., 2006 и модифициран 2007 год. од страна на Taheri & Tani, презентира дијаграми со сооднос помеѓу висината на одредена косина кај карпести средини и аголот кој обезбедува стабилност, зависно од добиените рејтинг поени. Овој метод се темели на основа на модифициран GSI (Sonmez & Ulusay, 1999), како и еднооксијалната јакост на притисок, типот на карпа, начинот на ископ, присуство на подземна вода и сеизмичкото хоризонтално забрзување, за кои авторите нудат соодветни рејтинг поени. Преку овој метод, авторите нудат графички дијаграми од каде, во зависност од висината на анализираната косина и добиените рејтинг поени, може да се процени потребниот наклон. Ова е првиот емпириски пристап кој дава индикација за потребниот наклон на одредена косина, за да се обезбеди нејзината стабилност. Притоа, проценетиот наклон се однесува на генералната (вкупна) висина на разгледуваната косина (усек). Се напоменува, дека овој метод беше анализиран за предметните косини во истражувањето, но поради големите девијации на резултатите нема да биде дополнително елабориран во докторскиот труд.

Методот Q-slope претставува релативно нова методологија за евалуација на стабилноста на косини во карпести формации. Овој метод е развиен во последната декада од страна на Barton и Bar, 2015, 2017, преку модификација на оригиналниот Q-system (Barton, Lien и Lunde, 1974). Имено, според групирањето на параметрите, оваа методологија се разгледува како функција од три генерални параметри: големина на блок ( $RQD/J_n$ ), јакост на смолкнување ( $J_r/J_a$ ) и соодносот помеѓу влијанието на надворешните фактори и факторот на редукција ( $J_{wice}/SRF_{slope}$ ). Вредноста Q-slope се проценува согласно емпириската равенка (12), односно:

$$Q_{slope} = \frac{RQD}{J_n} \left( \frac{J_r}{J_a} \right) \frac{J_{wice}}{SRF_{slope}} \dots\dots\dots(12)$$

Каде што,

- $RQD$  индекс за оценка на степен на испуканост (Rock Quality Designation);
- $J_n$  коефициент зависен од број на пукнатиснки системи;
- $J_r$  коефициент зависен од рапавоста на пукнатинските сидови;
- $J_a$  фактор на алтерација (измена на примарни својства) на пукнатините;
- $O$  коефициент зависен од ориентацијата на пукнатинските системи;
- $J_{wice}$  параметар зависен од климатските и геолошките услови;
- $SRF_{slope}$  фактор на редукција на јакоста на карпестата маса.

За сите горенаведени параметри, авторите нудат сет на вредности зависни од предметните услови на разгледуваната косина, што значи дека овој метод е интуитивен и постои голема веројатност различни инженери да дадат различна проценка за стабилноста. Првите четири параметри во равенката ( $RQD$ ,  $J_n$ ,  $J_r$  и  $J_a$ ) се определуваат на ист начин како и во оригиналниот Q-system (Barton et al., 1974, Barton & Bar, 2015).

Доколку  $RQD < 10$ , во пресметката се усвојува номинална вредност  $RQD = 10$ , додека за во случај кога  $RQD > 10$ , оваа вредност може да се заокружи на интервали од 5 поени (15, 20, 25 итн.).

Коефициентот зависен од бројот на пукнатински системи ( $J_n$ ) се движи од 0.5 за масивни карпи без пукнатини, до 20 за комплетно деградирана карпа, на ниво на резидуална почва.

Коефициентот зависен од рапавоста на пукнатинските сидови ( $J_r$ ) се движи во граници од 0.5 за континуални лизгачки и планарни пукнатини, до 4.0 за дисконтинуални и брановидни пукнатини.

Факторот на алтерација ( $J_a$ ) се движи во граници од 0.75 кога постои контакт помеѓу пукнатините со непропусен наполнител, до 10 (20) кога помеѓу пукнатините нема контакт, односно постојат релативно дебели континуални слоеви од глина.

Вредноста на коефициентот зависен од ориентацијата на пукнатинските системи ( $O$ ) се движи во граници од 0.25 за пукнатини кои предизвикуваат лизгање доколку нема мерки за стабилизација, до 2.0 за многу поволна ориентација на пукнатинскиот систем.

Вредностите на коефициентот зависен од рапавоста на пукнатините ( $J_r$ ), факторот на алтерација ( $J_a$ ) и коефициентот зависен од ориентацијата на пукнатините ( $O$ ), се директно поврзани со главниот систем на пукнатини и индиректно со секундарен систем на пукнатини, односно доколку постои можност од отцепување на блокови се користат по две вредности, за примарен систем на пукнатини ( $A$ ) и секундарен систем на пукнатини ( $B$ ). Имено, доколку не постои можност од клиновиден лом како резултат на два пукнатински системи, тогаш се користи равенството (13), додека доколку постои оваква можност, тогаш се користи равенството (14).

$$\left(\frac{J_r}{J_a}\right)_O = \frac{J_r}{J_a} * O \quad \dots\dots\dots(13)$$

$$\left(\frac{J_r}{J_a}\right)_O = \left(\frac{J_r}{J_a} * O\right)_A * \left(\frac{J_r}{J_a} * O\right)_B \quad \dots\dots\dots(14)$$

Вредноста на параметарот зависен од климатските и геолошките услови ( $J_{\text{wice}}$ ) се движи од 0.05 за услови на тропски бури кај некомпетентни карпи со нестабилна структура, до 1.0 за услови на пустинска околина кај компетентни карпи со стабилна структура.

За факторот на редукција на јакоста на карпестата маса ( $SRF_{\text{slope}}$ ) авторите нудат сет од три вредности, физичките услови на карпестата маса (подложност на ерозија и распаѓање), односот на јакоста на притисок и напрегањата на кои се изложени карпестите маси и карактеристиките на позначајните дисконтинуитети, каде се усвојува најголемата добиена вредност. Овој параметар се движи во граници од 1.0 за поволни пукнатини каде односот помеѓу јакоста на притисок и напрегањата е умерен ( $\sigma_c/\sigma_1 = 200$ ), до 20 (24) за многу неповолни пукнатини кои предизвикуваат лом и за многу меки карпи на ниво на резидуална почва каде се појавуваат пластични деформации ( $\sigma_c/\sigma_1 = 1$ ).

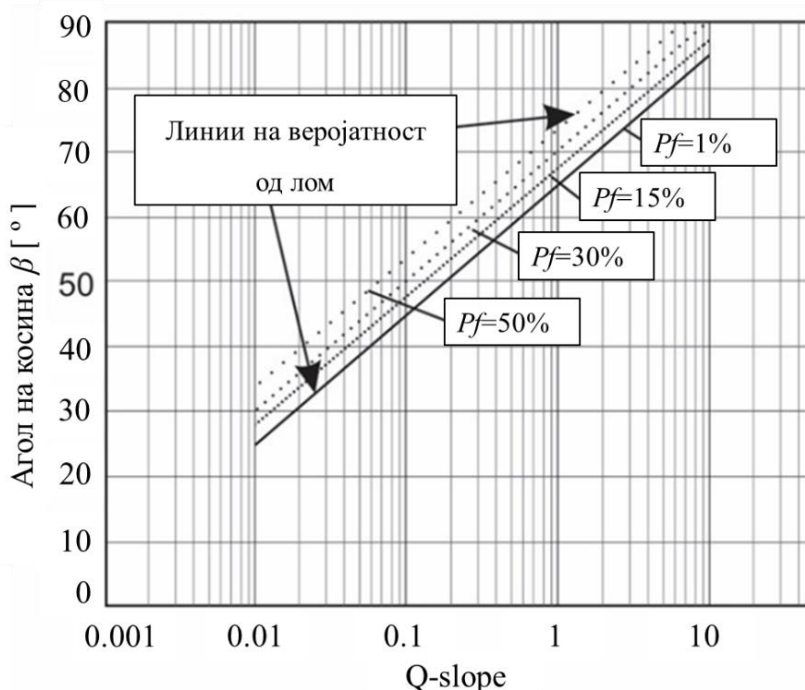
По пресметка на вредноста  $Q$ -slope, може да се процени најстрмниот агол кој обезбедува долгорочна стабилност ( $\beta_Q$ ) на одредена косина во карпеста средина, без користење дополнителни мерки за стабилизација и заштита (15).

$$\beta_Q = 20 \log_{10} Q_{slope} + 65^\circ \dots\dots\dots(15)$$

Овој агол во дисертацијата е означен со индекс „Q“ за да не дојде до конфузија со индексот на доверливост ( $\beta$ ). Се напоменува, дека најстрмниот агол кој обезбедува долгорочна стабилност на одредена косина во карпеста средина, без користење дополнителни мерки за стабилизација и заштита, се однесува на локалните агли на засебните косини во склоп на одреден усек.

Иако методот Q-slope не дава индикација за вредноста на факторот на сигурност, сепак значително се истакнува во однос на останатите емпириски методи и засега заедно со методот SSR (Taheri et al., 2006 и Taheri & Tani, 2007) е единствен емпириски метод кој нуди можност за проценка на најстрмниот агол на одредена косина во карпеста средина, кој обезбедува долгорочна стабилност, без употреба на дополнителни мерки за стабилизација и заштита.

На Слика 12 е прикажан дијаграм, предложен од авторите на Q-slope методот, со проектирани граници помеѓу нестабилни наклони (лева страна од правите) и стабилни наклони (десна страна од правите), зависно од вредноста на веројатноста од лом (Pf).



Слика 12. Дијаграм за проценка на веројатност на лом (Pf) за косини со примена на методолошкиот пристап Q-slope (Bar & Barton, 2017).

Резултатите од проценката на стабилноста со методот Q-slope, методот SMR, како и методите на гранична рамнотежа, конечни елементи и кинематските услови на лом, се дадени во поглавието 6.

## 5.2. Стабилност по дисконтинуитети (кинематски услови на лом)

Сите карпести маси во природата се повеќе или помалку испукани. Во површинските зони од теренот, каде што интензитетот на напрегања е низок, многу е мала веројатноста од лом на карпестата маса, односно однесувањето е најчесто условено од карактерот и просторниот распоред на пукнатинските системи.

Со цел систематски да се анализира стабилноста на одделни карпести блокови, потребно е детално проучување на факторите кои ја диктираат јакоста на смолкнување по дисконтинуитети. Пресметковниот модел се дизајнира за конкретните структурно-геолошки и инженерско-геолошки услови во однос на геометријата на косината, каде што треба да се земат во предвид следните аспекти:

- Адекватно да се дефинира состојбата на напрегања и да се интерпретира ефектот на размер, односно соодносот меѓу геометриските карактеристики на косината и дисконтинуитетите, како и нивниот просторен распоред;
- Јакоста на интактен карпест примерок е поголема од јакоста на смолкнување по должина на пукнатините;
- При појава на дополнителни напрегања, постоење на заостанати напрегања или дисипација на напрегањата, често доведува до развој на нови дисконтинуитети во карпестите маси;
- Во анализите треба да се вклучи и неповолното дејство од водата, чија големина и насока на делување зависи од просторниот распоред на дисконтинуитетите.

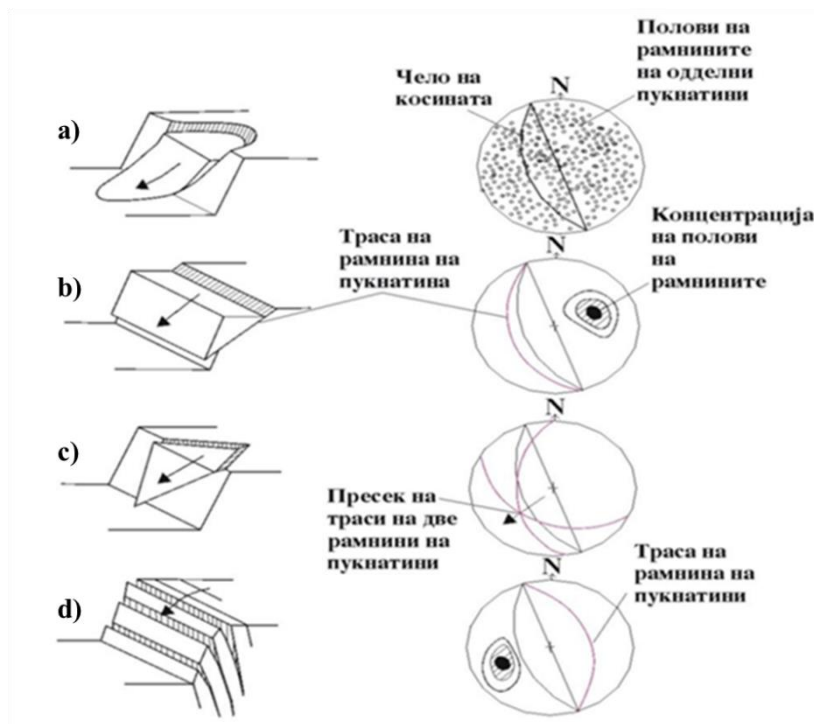
За решавање на овие проблеми, најчесто во почетна фаза, се користи стереографски приказ (проекција) од каде што се добива поконкретен сликовит приказ за неповолните пукнатински системи и нивните комбинации кои можат да предизвикаат појава на одреден тип на лом (Слика 13).



Слика 13. Шематски приказ на стереографска проекција за пресметка на стабилност на клин оформен од две пукнатини (Јовановски и др., 2020).



Кај карпестите маси, можните видови на свлекување настануваат како резултат на квалитетот на карпеста маса (ротација кај комплетно деградирани или многу меки карпи), како и просторниот распоред на неповолните пукнатински системи во однос на теренските услови (Слика 14).



**Слика 14.** Поделба на основни видови на лом кај карпи и геометриски услови, со приказ на главните елементи на пад преку стереографска проекција, според Е. Ноек и Ј. В. Брау, 1981: а) лом по должина на кружно-цилиндрични рамнини на лизгање, б) рамнински лом по должина на една пукнатина, в) клиновиден лом со пресек на две пукнатини, д) лом со превртување.

Во геотехничката пракса најчесто се јавува рамнински лом (дводимензионален проблем), каде лизгањето се врши по изразена рамнина (слоевитост, фолијација или раседи) со иста насока како и косината и клиновиден лом (тродимензионален проблем), каде ломот настанува со пресек на две пукнатини со челото на косината.

Многу поретки се појавите на превртување на блокови, кога има појава на два пукнатински системи со иста ориентација како и косината, од кои главниот систем на пукнатини има пад спротивен од косината, но вториот пукнатински систем придонесува за потсекување на блоковите.

При анализите на рамнински (планарен) лом, најзначајно е што поточно да се процени јакоста на смолкнување по должина на дисконтинуитетите. За дефинирање на овој параметар, во праксата еден од најчесто применуваните методи е емпирискиот нелинеарен критериум на лом според Barton & Choubey, 1977, односно критериумот на Barton & Bandis, 1990:

$$\tau = \sigma_n \operatorname{tg} \left[ JRC \cdot \log \left( \frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \varphi_r \right] \dots\dots\dots(16)$$

$$\varphi_r = (\varphi_b - 20) + 20 \left( \frac{r}{R} \right) \dots\dots\dots(17)$$

Каде што,

$\tau$  – напрегање на смолкнување;

$\sigma$  – нормално напрегање;

$JRC$  – коефициент на рапавост на пукнатински површини (Слика 15);

$JCS$  – јакост на притисок на пукнатински сидови;






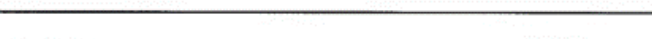




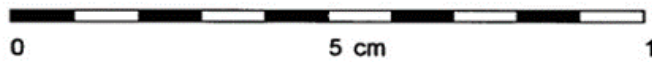
$SHRV$  – средна вредност на одскокот на Schmidt-ов чекан;

$\varphi_b$  – базен агол на триење;

$\varphi_r$  – резидуален агол на триење;

$r$  – одскок на Schmidt-ов чекан за влажни и изменети пукнатини;

$R$  – одскок на Schmidt-ов чекан за суви и здрави пукнатини.

	$JRC = 0 - 2$
	$JRC = 2 - 4$
	$JRC = 4 - 6$
	$JRC = 6 - 8$
	$JRC = 8 - 10$
	$JRC = 10 - 12$
	$JRC = 12 - 14$
	$JRC = 14 - 16$
	$JRC = 16 - 18$
	$JRC = 18 - 20$
	

Слика 15. Шематски приказ за проценка на коефициентот на рапавост ( $JRC$ ), согласно препораките на Barton и Choubey, 1977.

### 5.3. Методи на гранична рамнотежа (статички методи)

Почнувајќи од 1930 година, па се до денешен ден, анализите на стабилност на косини генерално се вршат според методот на гранична рамнотежа (МГР). Иако во изминатите неколку децении беа развиени неколку други методи, пристапот на гранична рамнотежа сеуште претставува најкористен метод во геотехничката пракса, пред се поради неговата едноставност, широкиот спектар на софтверски алатки базирани на овој пристап, едноставноста на моделирањето и егзекуцијата на пресметките. Методите на гранична рамнотежа се базирани на една вредност, која го определува или факторот на сигурност или веројатноста од лом, зависно од пристапот на анализа.

Димензионирањето на косините со помош на овие методи се врши така што се претпоставува кружно-цилиндрична или полигонална рамнината на лизгање. Кружно-цилиндрична рамнина на лизгање, се јавува кај косини претставени со хомогени почви или комплетно деградирани карпести маси, полигоналните рамнини на лизгање се типични за површинско лизгање на почвен или послаб карпест слој врз цврста карпа (особено во услови на подземна вода) или кај испукани карпести маси, додека сложените рамнини на лизгање се јавуваат кај косини кои со нехомоген состав или каде постои промена во геометриските карактеристики на теренот. Усвоената рамнина на лизгање се дели на ламели и се врши воспоставување на основните услови за статичка рамнотежа за секоја ламела, зависно од методот кој се користи:

$$\sum X = 0; \sum Y = 0; \sum M = 0; \dots\dots\dots(18)$$

Но, при дефинирање на основните услови за рамнотежа се јавува проблем, поради тоа што истите се недоволни за потполно дефинирање на состојбата на напрегањата во зоната на рамнината на лизгање, со што проблемот станува статички неопределен. За да го решиме проблемот вршиме одредени претпоставки во однос на распределувањето и правецот на дејствување на напрегањата во претпоставената рамнина на лизгање. Сите статички методи го решаваат проблемот по следнава процедура:

- Проблемот најчесто се разгледува како дводимензионален и се претпоставува континуална површина на лизгање (кружно-цилиндрична или прекршена линија);
- Се претпоставува дека ломот е круто-пластичен, односно дека нема деформација се додека не настане лизгање (лом);
- Факторот на сигурност се добива како однос помеѓу силата на јакоста на смолкнувањето и тангенцијалните напрегања во потенцијалната рамнина на лизгање кои тежнеат да го придвижат клизното тело;
- Постапката се повторува за доволен број на потенцијални рамнини на лизгање, се додека не се дефинира критичната рамнина која дава минимален фактор на сигурност.

Најпопуларните методи кои се користат во современата пракса и нивните генерални карактеристики, хронолошки се прикажани во Табела 6.

**Табела 6.** Карактеристики на најкористените методи на гранична рамнотежа

Метод	Услови	Поле на примена и прецизност
Fellenius (1927)	$\Sigma M = 0$	Кружни рамнини на лизгање, нехомогени услови Дискутабилна прецизност за ефективни напрегања во услови на висок порен притисок
Bishop (1955)	$\Sigma Y = 0$ $\Sigma M = 0$	Кружни рамнини на лизгање, нехомогени услови Попрецизна од традиционалниот метод на ламели, особено во услови на висок порен притисок
Morgenstern-Price (1965)	$\Sigma X = 0$ $\Sigma Y = 0$ $\Sigma M = 0$	Сложени рамнини на лизгање и материјали Голема прецизност
Spencer (1967)	$\Sigma X = 0$ $\Sigma Y = 0$ $\Sigma M = 0$	Сложени рамнини на лизгање и материјали Наједноставна процедура за целосна рамнотежа на сили и моменти
Janbu (1968)	$\Sigma X = 0$ $\Sigma Y = 0$	Голема прецизност за плитки и долги полигонални рамнини на лизгање кои не се паралелни со теренот

Овој метод иако е најприменуван во праксата поради брзината и едноставноста, сепак има неколку недостатоци. Имено, постапката тргнува со однапред дефинирани услови, се претпоставува дека вредноста на факторот на сигурност е константна по должина на рамнината на лизгање, не е вклучено однесувањето на теренот, а исто така и прецизноста е дискутабилна во сложени теренски и/или проектни услови.

### 5.3.1. Детерминистички пристап

Генерално, при решавање на проблеми поврзани со стабилноста на косините, во процесот на проектирање се врши проценка на глобалната стабилност, која најчесто се дефинира преку фактор на сигурност ( $F_s$ ). Оваа бездимензионална вредност потоа се споредува со одредена минимално дозволена референтна вредност ( $F_{s_{doz}}$ ), определена согласно одредени национални или интернационални правилници и нормативи, која варира во зависност од видот на проблемот што се анализира и низа на други специфични услови.

Факторот на сигурност најчесто се пресметува со детерминистички пристап, каде не е вклучена варијација на параметрите. Оваа вредност претставува однос помеѓу јакоста на смолкнување на материјалот ( $S$ ) по должина на анализираната рамнина на лизгање и мобилизираната јакост на смолкнување ( $S_m$ ) во оваа зона (19).

$$F_s = \frac{S}{S_m} \geq F_{s_{doz}} \dots\dots\dots(19)$$

Постапката се повторува за голем број на рамнини на лизгање, се додека не се дефинира критичната рамнина која дава минимален коефициент на сигурност.

Доколку факторот на сигурност е поголем од дозволената вредност, се смета дека е обезбеден ризикот од активирање на механизмот за лизгање. Сепак, ова може да доведе до одредена заблуда во однос на целокупната стабилност, бидејќи дозволениот фактор на сигурност најчесто не го вклучува степенот на доверливост на влезните параметри.

Во достапната литература, не е секогаш апсолутно јасно која е дозволената вредност на факторот на сигурност, која треба да се користи за различни геотехнички услови. Овој податок дополнително ја зголемува недоверливоста. Дозволениот фактор на сигурност најчесто се движи во граници 1.3 – 1.5 а во одредени исклучителни случаи и до 2.0, но генерално зависи од класификацијата на објектот, геометриските карактеристики, теренските услови, доверливоста на влезните параметри, користениот метод и сл.

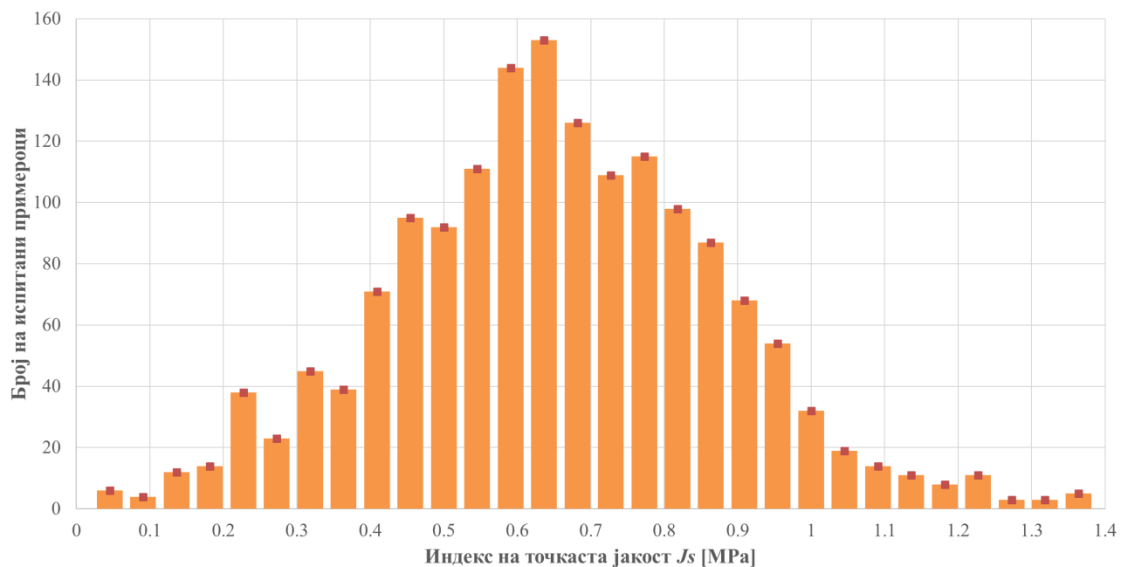
Затоа, во ова истражување е направен напор за да се прошири концептот на користење на исклучиво традиционален фактор на сигурност, преку вклучување на теоријата на веројатност и доверливост.

### ***5.3.2. Пробабилитички (веројатносен) пристап***

Во изминатите неколку децении, методолошкиот пристап заснован на теоријата на веројатност рапидно ја акумулираше популарноста во геотехничката пракса, при решавање на проблеми поврзани со стабилност на косини, каде влезните параметри од детерминистичкиот модел учествуваат со веројатносна распределба при проценката на можноста од лом.

Најголемата придобивка која може да биде исползувана од овој методолошки пристап, би била во случаи кога некои од параметрите на материјалот не можат прецизно да се дефинираат, тие варираат во релативно голем опсег или кога постои било каков скептицизам во однос на доверливоста на параметрите. Ова е често случај кога нема доволно теренски испитувања, или како во презентираното истражување, каде предметниот материјал е многу деградиран и се карактеризира со анизотропија и дисконтинуалност. Односно, својствата на материјалот варираат во зависност од насоката. Затоа, не се препорачува да се карактеризира материјалот со фиксни параметри користејќи исклучиво детерминистички пристап.

Пробабилитичкиот или веројатносен пристап, често се нарекува дизајн базиран на доверливост. Фундаменталната разлика помеѓу овој веројатносен пристап и детерминистичкиот пристап е во фактот што доверливоста на параметрите може да се квантифицира преку функција од веројатносна дистрибуцијата на параметрите. Ова се врши преку статистичка распределба и интервал на доверба на одреден параметар. На Слика 16 е прикажан хистограм со дистрибуција вредностите за индексот на точкаста јакост ( $J_s$ ) од вкупно 1610 карпести примероци кои се дел од истражувањето презентирано во дисертацијата.



**Слика 16.** Хистограмски приказ со фреквенција на нормалната дистрибуција на индексот на точкаста јакост, од сопствени истражувања на вкупно 1610 карпести примероци.

При постапката на извршување на веројатносни анализи, неопходно е да се дефинира барем еден од физичко-механичките или јакосно-деформабилните параметри на материјалите (еднооксијална јакост на притисок, геолошки индекс на јакост, константа на интактен карпест примерок и сл.), кои имаат влијание врз стабилноста, како променлива, преку дистрибуција на неговите вредности. Потоа, за секоја од променливите, треба да се дефинираат средна вредност, стандардно отстапување (девијација), релативен минимум и релативен максимум.

Минималните и максималните вредности претставуваат релативни (разлики од средната вредност) а не апсолутни вредности. За нормална дистрибуција, 99.7% од вредностите треба да се во дијапазон на три стандардни отстапувања од средната вредност. Затоа, релативните минимални и максимални вредности треба да бидат најмалку три пати поголеми од стандардното отстапување, за да се осигура дека е дефинирана целосна (нескратена) нормална дистрибуција.

Веројатноста од лом ( $P_f$ ) е дефинирана согласно равенството (20), каде,  $N_f$  претставува број на пресметки за  $F_s < 1.0$ , додека  $N_s$  претставува вкупниот број на пресметки (дефинирани на стартот на калкулацијата), кој обично изнесува 1000.

$$P_f = \frac{N_f}{N_s} * 100\% \dots\dots\dots(20)$$

Во зависност од категоријата на објектот, треба да се усвои максималната вредност на можноста од лом, како прифатлив степен на ризик. Во геотехничката пракса нема универзално утврдени препорачани вредности за веројатноста од лом, но најчесто овој параметар се движи во граници до околу 1% – 2%. Треба да се напомене, дека инсистирањето да не постои веројатност од лом ( $P_f = 0\%$ ), има импакт врз економичноста на објектот, додека висок процент на веројатност од обрушување го зголемува ризикот во фаза на експлоатација. Затоа, треба да се најде компромис и да се усвои оптимално (прифатливо) ниво на ризик. Овој докторски труд, го акцентира овој проблем и нуди пристап за надминување на истиот.

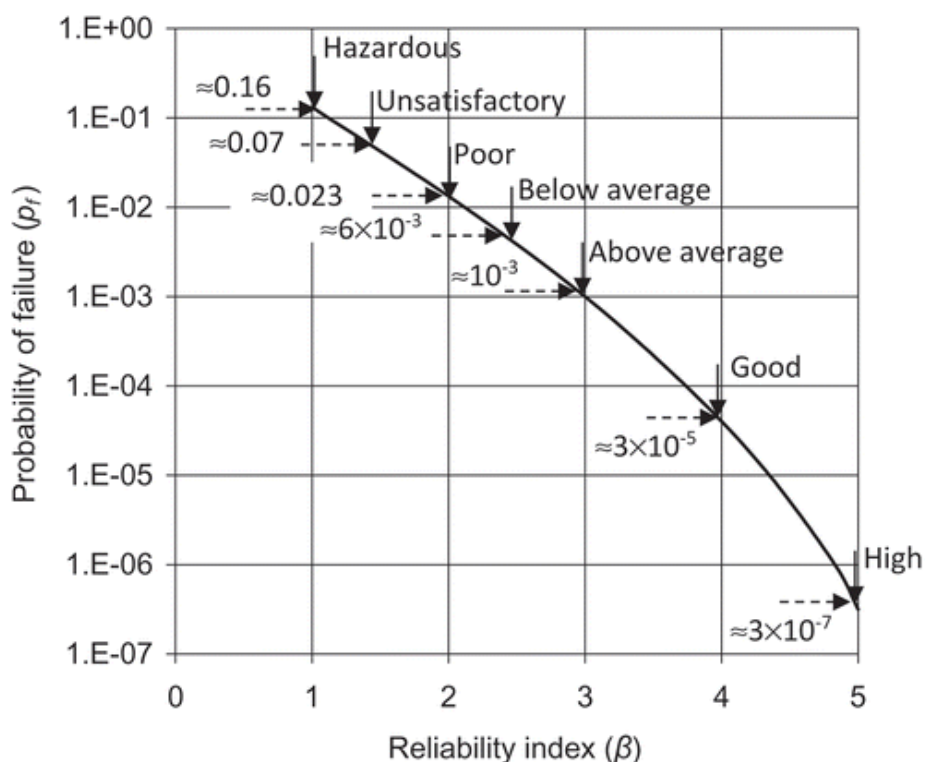
Како алтернатива на користењето на процентуална вредност за веројатност од лом, во праксата често се користи и индексот на доверливост ( $\beta$ ). Овој параметар дава индикација за бројот на стандардни отстапувања кои ја одделуваат средната вредност на факторот на сигурност од критичниот фактор на сигурност ( $F_s=1.0$ ), кој обезбедува лабилна рамнотежа. Индексот на доверливост се пресметува со користење на нормална (21) или лог-нормална (22) дистрибуција на резултатите.

$$\beta = \frac{\mu - 1}{\sigma} \dots\dots\dots(21)$$

$$\beta_{LN} = \frac{\ln \left[ \frac{\mu - 1}{\sqrt{1 + V^2}} \right]}{\sqrt{\ln(1 + V^2)}} \dots\dots\dots(22)$$

Каде,  $\mu$  претставува средна вредност на факторот на сигурност,  $\sigma$  претставува стандардна девијација на факторот на сигурност, додека  $V$  претставува коефициент на варијација на факторот на сигурност ( $\sigma/\mu$ ).

Слично како и за вредноста на веројатноста од лом, во геотехничката пракса нема универзално утврдени препорачани вредности за индексот на доверливост, но најчесто овој параметар се движи во граници 2 – 4. На Слика 17 е прикажан дијаграм со степенот на ризик зависно од вредностите на веројатноста од лом и индексот на доверливост.



Слика 17. Препораки за вредностите на индексот на доверливост и веројатноста од лом (US Army Corps of Engineers, 1997).

#### 5.4. Метод на конечни елементи (нумерички методи)

Рапидниот развој на хардверот и софтверот последниве децении, придонесе значително да се зголеми популарноста и примената на методот на конечни елементи (МКЕ) при пресметката на стабилноста на косините.

Методологијата на овој пристап се состои во дискретизација на моделот на едноставни геометриски конечни елементи, каде што секој елемент е подложен на дејствата од соседните елементи. Притоа, се пресметуваат силите и напрегањата за секој елемент, врз основа на усвоениот конститутивен закон за предметниот материјал. Најпрво, по изработка на моделот, се дефинираат граничните услови. Потоа се одбираат соодветни модели за карактеризација на теренот и евентуалните конструктивни елементи и потоа се вршат пресметките каде треба прецизно да се симулираат сите фази од изведбата.

Генерално, концептуалниот пристап на методот на конечни елементи се состои од дефинирање на полупросторот како континуална средина, но постои можност и од дефинирање на однесувањето на системите на дисконтинуитети.

Главната предност на МКЕ во однос на останатите методи е тоа што овој метод дава јасна претстава за состојбата на напрегања и деформации во било која точка од полупросторот. Исто така, нема претпоставки, рамнините на лизгање можат да бидат со сложена геометрија, не се користат претходно дефинирани рамнини на лизгање, вклучен е ефектот на прераспределба на напрегањата, можност од прогресивен лом, моделирање на многу сложени геометрии и конструктивни елементи и анализа на различни услови и фази на изведба. Сепак, поради ограниченото искуство со неговата примена во геотехничката пракса при стабилност на косини, тој не е широко прифатен за рутински анализи.

Факторот на сигурност се пресметува со т.н. техника SSH (Shear Strength Reduction). Оваа техника се заснова на истовремено намалување на јакосните параметри во чекори (инкременти), додека не се дојде до лом. Факторот на сигурност се определува како однос помеѓу усвоените јакосни параметри и редуцираните вредности на јакосните параметри во моментот на лом:

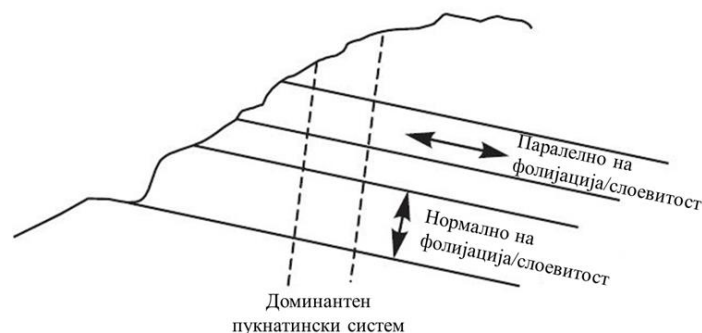
$$F_s = \frac{\tan \varphi}{\tan \varphi_r} = \frac{c}{c_r} \dots\dots\dots(23)$$

Материјалите може да имаат различни својства во различни насоки, особено шкрилестите карпи кои по правило се анизотропни средини. Како резултат на тоа, одговорот на овие карпести маси варира зависно од разгледуваниот правец. Еден од најчесто користените модели за карактеризација на анизотропни и испукани карпести маси претставува моделот „Jointed Rock“. Овој модел претставува анизотропен еластичен совршено пластичен модел, кој е особено наменет за симулирање на однесувањето кај карпести маси со изразена фолијација или слоевитост. Во насока нормална на фолијацијата или слоевитоста, се претпоставува дека напрегањата на смолкнување се ограничени согласно критериумот на лом Mohr-Coulomb. По постигнување на максималното напрегање на смолкнување во конкретната насока, ќе се појави пластично лизгање. Може да се дефинираат најмногу три насоки (рамнини) на лизгање, од кои првата рамнина се претпоставува дека се совпаѓа со насоката на еластичната анизотропија.



Секоја од потенцијалните рамнини на лизгање може да има различни јакосно-деформабилни параметри. Покрај пластичното смолкнување, напрегањата на затегање се нормални на трите рамнини кои се ограничени според однапред дефинирана јакост на затегање.

На Слика 18 е прикажан концептот на моделот Jointed Rock, каде се прикажани правците на делување на материјалот зависно од фолијацијата/слоевитоста, како и одреден дополнителен доминантен пукнатински систем.



Слика 18. Шематски концептуален приказ на моделот Jointed Rock.

За карактеризација на теренот со моделот Jointed Rock, покрај аголот на внатрешно триење ( $\phi$ ), кохезијата ( $c$ ) и аголот на дилатација ( $\psi$ ), за секој правец на делување, треба да се дефинираат и модулот на еластичност ( $E$ ), тангенцијалниот модул ( $G$ ), Поасоновиот коефициент ( $\nu$ ) паралелно и нормално на фолијација (слоевитост), јакоста на затегање ( $\sigma_t$ ) и азимутот ( $\alpha_2$ ) на хоризонталата од пукнатинскиот систем и соодветниот агол ( $\alpha_1$ ).

Поради големата нумеричка точност и широката лепеза од софтверски алатки базирани на принципот на конечни елементи, треба да се потенцира дека повеќе внимание треба да се посвети на обезбедување на веродостојни влезни податоци (карактеристиките на материјалот) и по потреба нивно калибрирање. Ова претставува одличен тренд во праксата, каде што геотехничките истражувања и испитувања добиваат на значење.

## 5.5. Методологија за моделирање на теренот

Во рамки на истражувањето спроведено во докторската дисертација, применети се различни модели за карактеризација на теренот. Јасно е дека поедноставувањата при подготовката на моделите се неопходни, бидејќи никогаш не е можно сите својства и состојби на карпестата маса да се прикажат какви што се во природата. Ова укажува дека секој модел на некој начин е идеализација и генерализација на вистинската состојба на теренот.

Во досегашната пракса, во инженерската геологија и механиката на карпи, многу успешно се развиени различни концептуални форми за моделирање. На пр., особено е развиена методологијата на инженерско-геолошко моделирање по параметри од интерес за проектирање (Kujundžić, 1973). Оваа постапка е всушност графичко претставување на некои селектирани својства и состојби на карпестите маси во вид на визуелен (физички) приказ, кој може да биде поткрепен и со аналитички зависности помеѓу некои од анализираните параметри.

На овој проблем, големо внимание се посветува и во новата генерација на Еврокод 7, каде најчесто се застапени неколку нивоа на подготовка на еден модел (Слика 19).

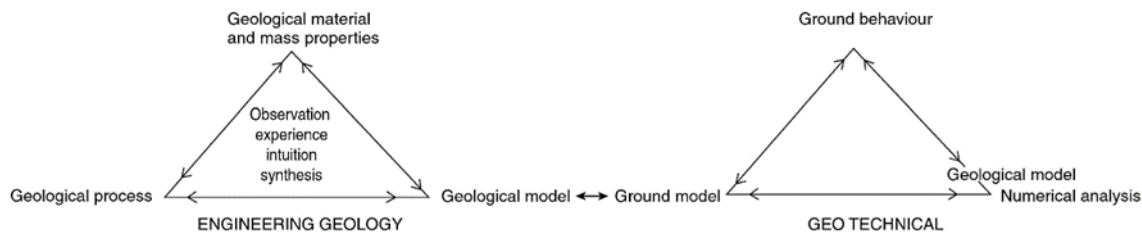


Слика 19. Видови и хиерархија на модели во втората генерација на Еврокод 7 (прилагодено и делумно дополнето, според Bond, 2019).

Често се прифаќа ставот дека поимот геотехнички модел треба да се разбира во поширок смисол, како спој помеѓу теоретските и практичните сознанија за својствата на природната геолошка средина и промените кои настануваат во неа под дејство на инженерската дејност (Pavlović, 1996) и каде сложениот геотехнички модел се состои од три основни видови на модели, односно:

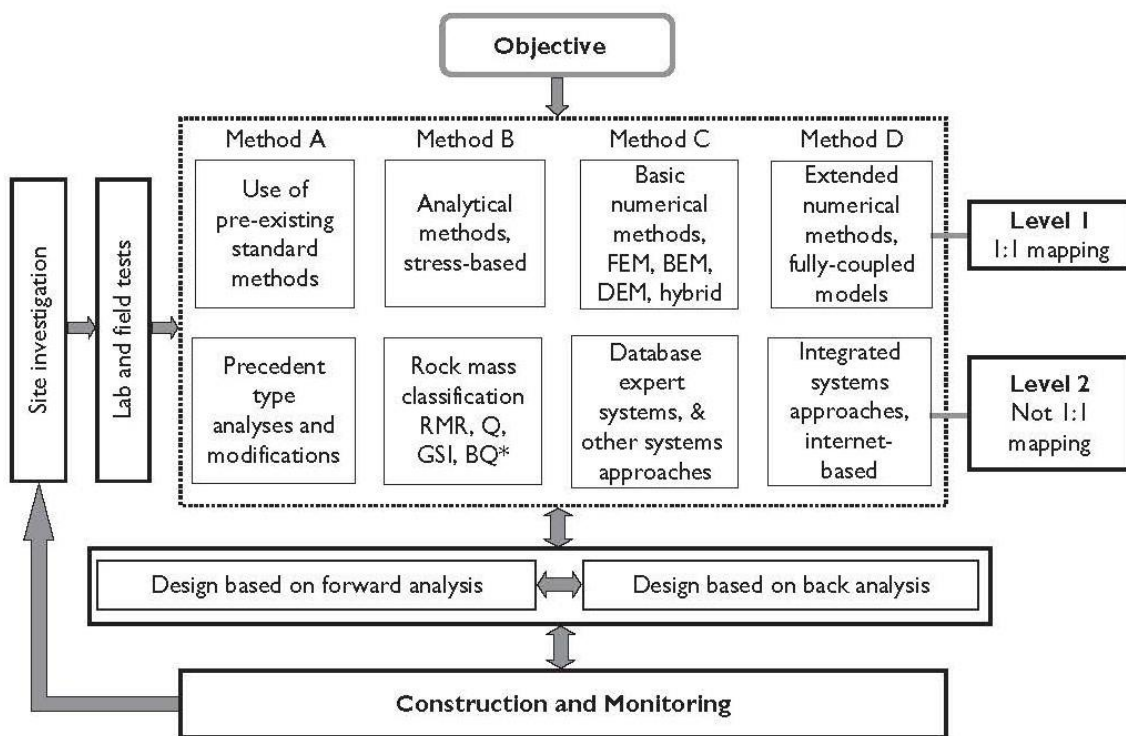
- Модел на природна геолошка средина кој се изработува во вид на инженерскогеолошки пресеци, интегрален инженерскогеолошки пресек и инженерскогеолошки модел;
- Модел на инженерска дејност или геотехнички модел во потесен смисол;
- Модел на интеракција, односно модел на анализа на напонско-деформациско однесување.

Според Knill, 2003, воспоставена е одредена врска за начинот на сублимирање на резултатите од различните фази и процеси, при формирањето на моделот на теренот (Слика 20).



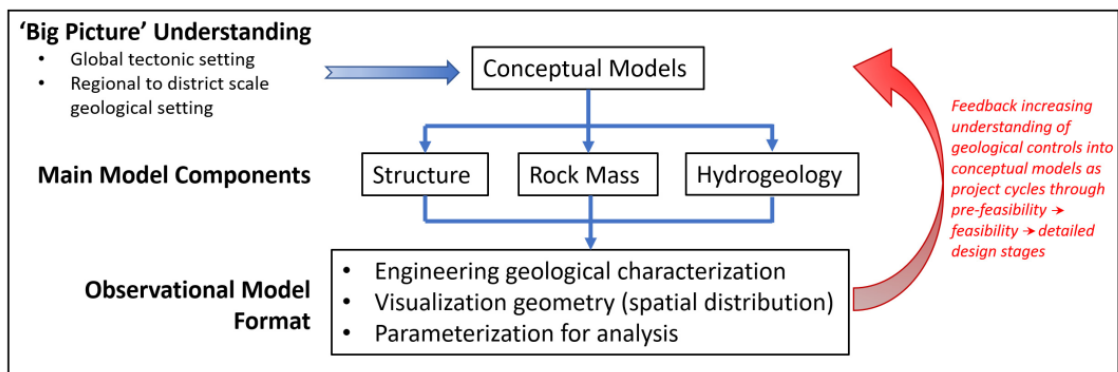
Слика 20. Врски помеѓу методите на истражување и анализа, во инженерската геологија и геотехниката, низ т.н. инженерскогеолошки и геотехнички триаголници (според Knill, 2003).

Во последните години, структурата на моделите е предмет на анализа на голем број на автори, при што Меѓународното друштво за механика на карпи (ISRM) препорачува соодветен процес за моделирање, изработен од страна на Feng & Hudson, 2015, кој е презентiran на Слика 21.



Слика 21. Дијаграм за дефинирање на процесот на моделирање во инженерската механика на карпи, според Feng & Hudson, 2004 (преземено од The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007–2014).

Интересен е и пристапот кој што се предлага од Меѓународното друштво за инженерска геологија и животна средина (IAEG – International Association for Engineering Geology and Environment) при подготовката на т.н. концептуални модели (Слика 22).



**Слика 22.** Основни компоненти на инженерскогеолошки модел (преземено од Baynes, F. J. and Parry, S. 2022. Guidelines for the development and application of engineering geological models on projects. International Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG), Commission 25, Publication No. 1, 129 pp.).

Како што може да се заклучи од прикажаните шематски дијаграми на Слика 20, Слика 21, и Слика 22, јасно е дека сите видови на модели можат и треба да се надоврзуваат еден на друг, со крајна цел низ неколку последователни активности во различни фази на истражување и проектирање, да се овозможи што подобро дефинирање на проблемот, од аспект на интеракција помеѓу карпестата маса и објектот.

При формирање на моделот, треба да се знае дека не само што својствата и состојбите на карпестите маси влијаат врз елементите на инженерската дејност, туку и изведбата на објектите има соодветно влијание врз карпестата маса.

Секогаш, инженерите треба да настојуваат на користење на барем два различни методолошки пристапи за моделирање, каде целта треба да претставува успешно дефинирање на различни видови интеракции.

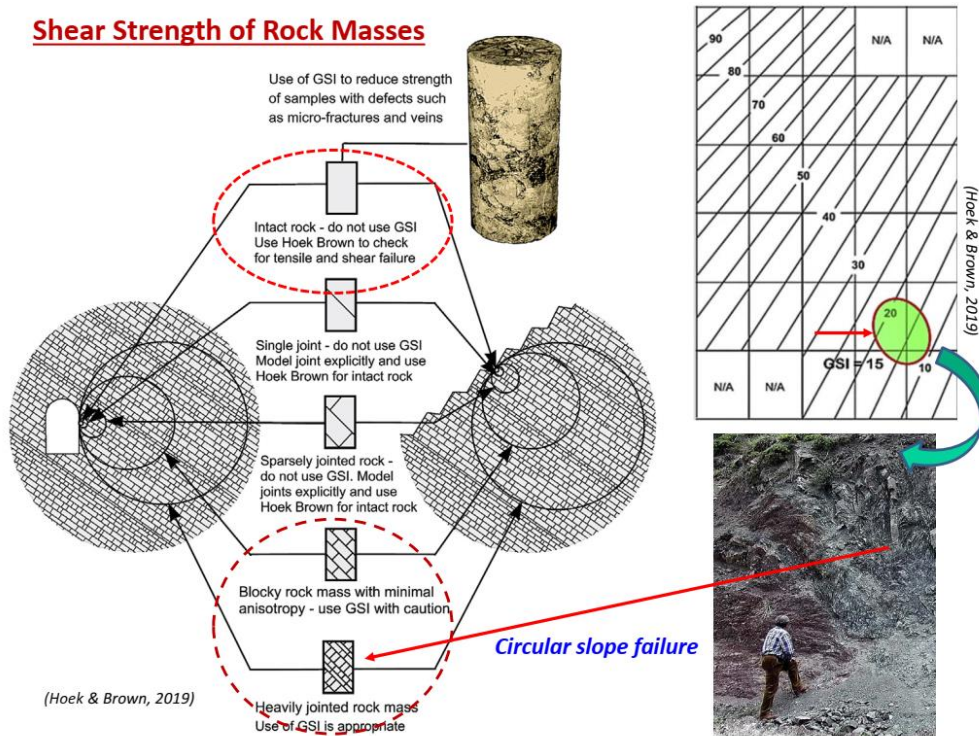
При развој на методологијата која е прикажана во дисертацијата, во прва фаза извршена е анализа на класите на геотехничка комплексност (GCC – Geotechnical Complexity Class) како и класите на влијанија (CC – Consequence Class), па за соодветната комбинација, усвоен е пристапот за анализа на одредената геотехничка категорија (GC – Geotechnical Category). Овој методолошки пристап за дефинирање на геотехничката категорија, согласно Еврокод 7, е прикажан во Табела 7.

**Табела 7.** Начин на дефинирање на геотехничка категорија (GC) по Еврокод 7, преку комбинации на геотехничка комплексност (GCC) и класите на влијанија (CC), согласно Walter, 2017

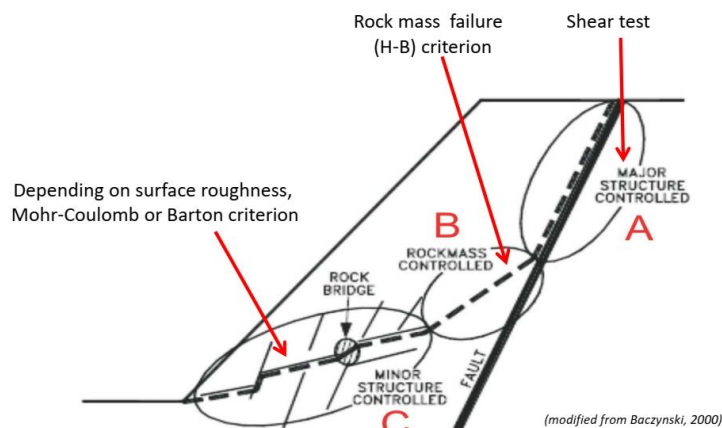
Класа на влијанија (CC)	Класа на геотехничка комплексност (GCC)		
	Ниско (GCC1)	Средно (GCC2)	Високо (GCC3)
Високо (CC3)	GC2	GC3	GC3
Средно (CC2)	GC2	GC2	GC3
Ниско (CC1)	GC1	GC2	GC2

Веројатноста од лом и ризиците кои произлегуваат од изборот на влезните параметри и формирање на моделите се пресудни, бидејќи погрешно толкуваните и формулирани геолошки и геотехнички модели од ниво 2 и 3 носат доста скриени замки, кои можат да бидат со катастрофални последици и не е лесно да се надминат дури ни од искусни експерти.

Многу значаен проблем при моделирањето е да се определи при кои услови важат концептуалните модели, кога може да се користат параметрите на јакост на масивот, а кога по должина на дисконтинуитетите. Една илустрација на овој проблем е прикажана на Слика 23.



### Parameter Selection for Complex Rock Slopes



**Слика 23.** Модели на карпест масив за кои се препорачува примена на моделот Hoek-Brown-ов критериум на лом (преземено и комбинирано од презентација, Resat Ulusay: The Roles of engineering geology and rock mechanics in rock slope stability assessment, a review based on the current methods, Градежен факултет, Скопје, 2021)

Овие аспекти, кај карпестите маси дополнително придонесуваат за отежнување на проблемот, при дефинирање на сите карактеристики на пукнатинските системи (дисконтинуитетите воопшто), за што се препорачува да се користат насоките дадени од страна на ISRM, 2007 (The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006) и ISRM, 2015 (The ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 2007-2014).

Ваков вид на дилеми, односно мулти-дилеми не се присутни само кај методите за анализа во цврстите испукани карпи, туку и кај почвените материјали, а особено е проблематична преодната група на т.н. тврди почви кон меки карпи и обратно. Овие прашања се едни од критичните во понатамошниот развој на Еврокод 7, за кои сеуште не се дефинирани прецизни насоки за надминување на овие проблеми.

## 6. ПРИМЕРИ ОД ПРАКСА ЗА РАЗВОЈ НА ИНТЕГРАЛНАТА МЕТОДОЛОГИЈА

Како практична основа за развој на методологијата се користени податоци од вкупно 58 релативно високи усеци по должина на трасата на автопатот А2, делница Кичево – Охрид, кој е во фаза на изградба. Автопатот А2 претставува дел од многу значајниот Пан – Европски Коридор VIII и претставува капитален објект за Р. Македонија. Бидејќи најголем дел од трасата е проектирана низ ридско-планински регион, постојат многу голем број на усеци од кои најголемиот дел се со висина поголема од 30 m, додека неколку усеци се со висина која надминува 100 m. Во фаза на изведба на работите, појавени се многу проблеми поврзани со стабилноста на косините на усеците. На Слика 24 е прикажана трасата на овој автопат на геолошка подлога за предметниот регион од Република Македонија.



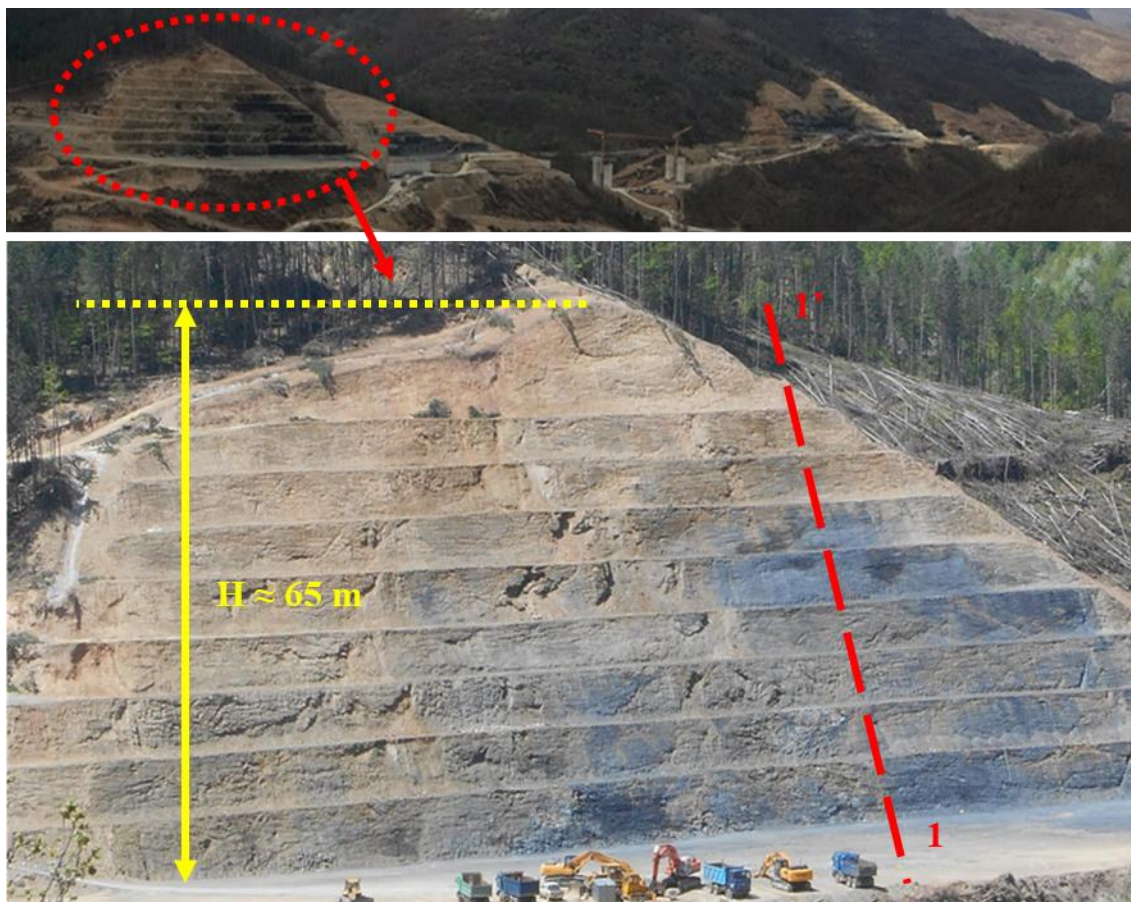
Слика 24. Приказ на трасата на автопатот на геолошка карта на Република Македонија.

## 6.1. Геолошки и геотехнички карактеристики на предметната локација

Локацијата во најголем дел е изградена од филитоиди, ниско метаморфни карпи од палеозојска старост каде преовладуваат филитичните шкрилци, но се среќаваат и графитични шкрилци и кварц-серицитски шкрилци. Овие анизотропни карпести маси се тектонски пореметени, зафатени со процес на распаѓање и често набрани, односно може да се класифицираат како карпести маси со слаби до многу слаби физичко-механички својства.

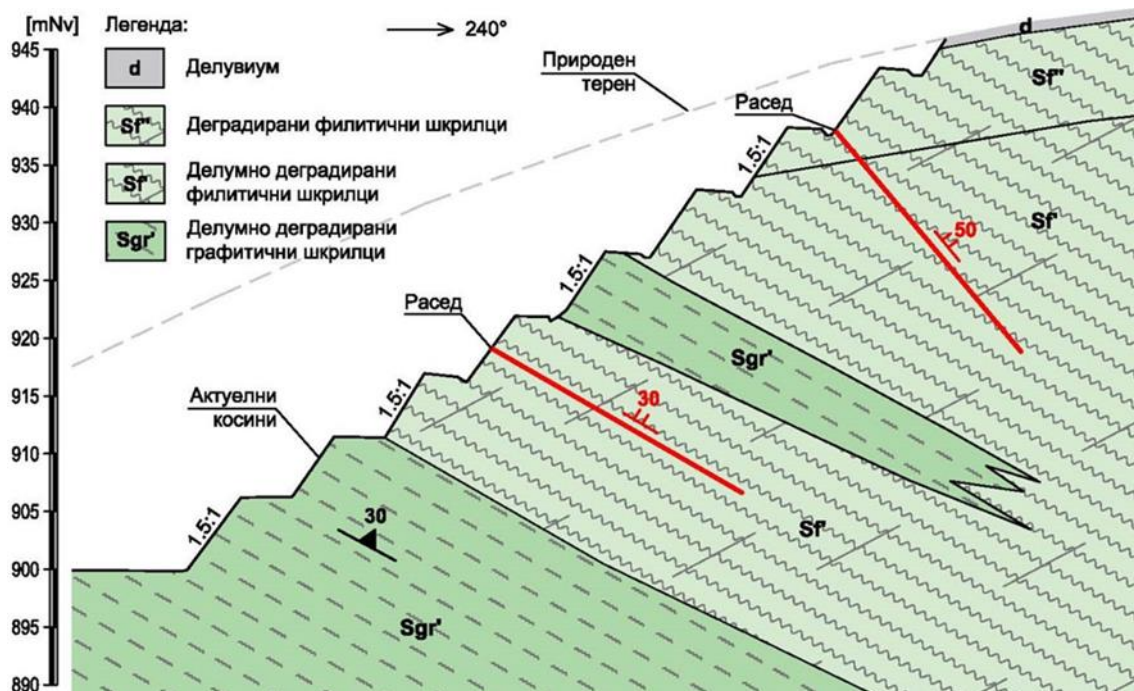
Карпестите маси често се трансформираат од еден во друг тип како во вертикален, така и во хоризонтален правец. Позитивна страна, од аспект на стабилноста е поволната фолијација, која генерално се движи во граници  $30^{\circ} - 50^{\circ}$ , ориентирана кон брдото. Сепак, предметните карпести формации се многу подложни на локални деформации, особено во услови на долготрајни или интензивни врнежи. Во контакт со вода овие карпи омекнуваат, значително редуцирајќи ги нивните физичко-механички и јакосно-деформабилни параметри. Во голем број на случаи долж трасата, регистрирани се раседни зони и неповолни пукнатински системи кои дополнително ја отежнуваат изведбата на ископите и формирањето на косините.

На Слика 25 е прикажан панорамен приказ на дел од трасата на предметниот автопат и фронтален поглед на еден карактеристичен усек, додека на Слика 26 е прикажан попречен пресек на соодветниот инженерскогеолошки профил (1 – 1').



Слика 25. Панорамен приказ на дел од трасата и фронтален поглед на еден карактеристичен усек на автопатот А2, делница Кичево – Охрид (09.2018).



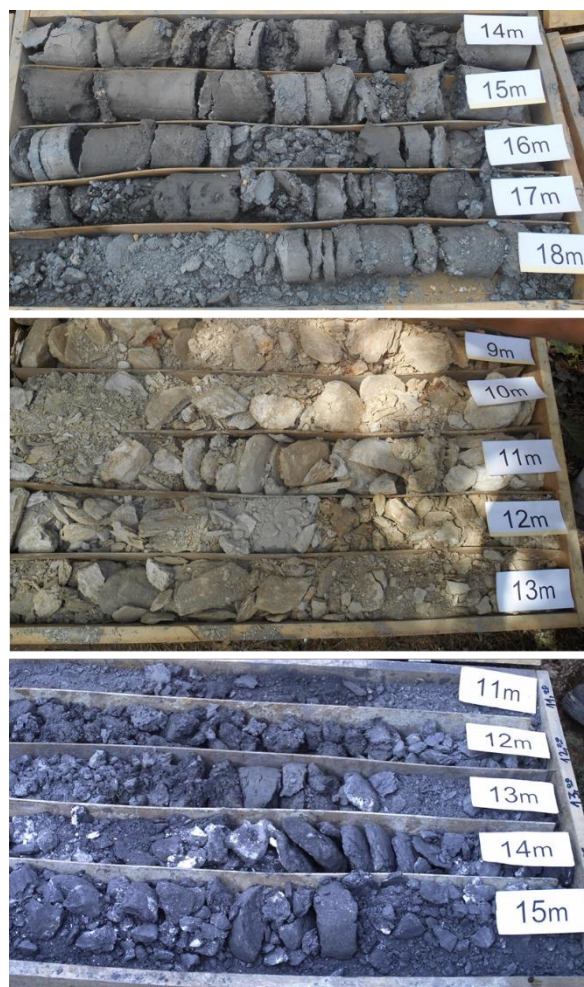


Слика 26. Инженерскогеолошки попречен профил (1 – 1') за карактеристичниот усек.

Трасата на автопатот е лоцирана во склоп на Западно-Македонската зона која претставува една од геотектонските единици од I ред. Оваа зона се одликува со крупни структурни форми и интензивни пликативни форми, навлаки, лушпи и др. Протегањето на структурите во Западно-Македонската единица е во правец СЗ–ЈИ до ССЗ–ЈЈИ. Основната градба на теренот е оформена со херцинската и алпската орогенеза. Со херцинската орогенеза палеозојските седименти биле регионално метаморфисани и набрани во благи синклинални и антиклинални форми, додека алпската орогенеза се карактеризира со интензивен метаморфизам, набирање и преработување на херцинските структури.

На предметната локација, во неколку наврати, почнувајќи од 2001 кога се започнати истражните работи за потреби на Основниот проект за трасата на автопатот, па се до тековните истражни работи при пробивањето на трасата, каде се извршени голем број на геотехнички истражни работи. Имено, извршено е детално инженерскогеолошко картирање, истражно дупчење, истражни раскопи, инклинометарски дупнатини, тестирања со склерометар (Schmidt-ов чекан), опити на наклонување, како и соодветен број на лабораториски тестови на карпестите примероци, за дефинирање на физичко-механичките и јакосно-деформабилните карактеристики. Повеќе од 1600 карпести примероци се лабораториски тестирани и спроведени се повеќе од 500 теренски опити, каде што резултатите од овие испитувања се инкорпорирани во околу 350 излези од тестовите.

На Слика 27 се прикажани слики од фото-документација од истражно дупчење, од каде може да се констатира дека карпестите маси се многу деградирани, не само во површинските зони туку и на релативно големи длабини. Овде може да се истакне и тоа дека во почетна фаза при ископ овие карпести маси се релативно цврсти, но по одредено време на изложеност на атмосферските услови, истите значително ги губат своите својства и омекнуваат, особено во површинските зони.

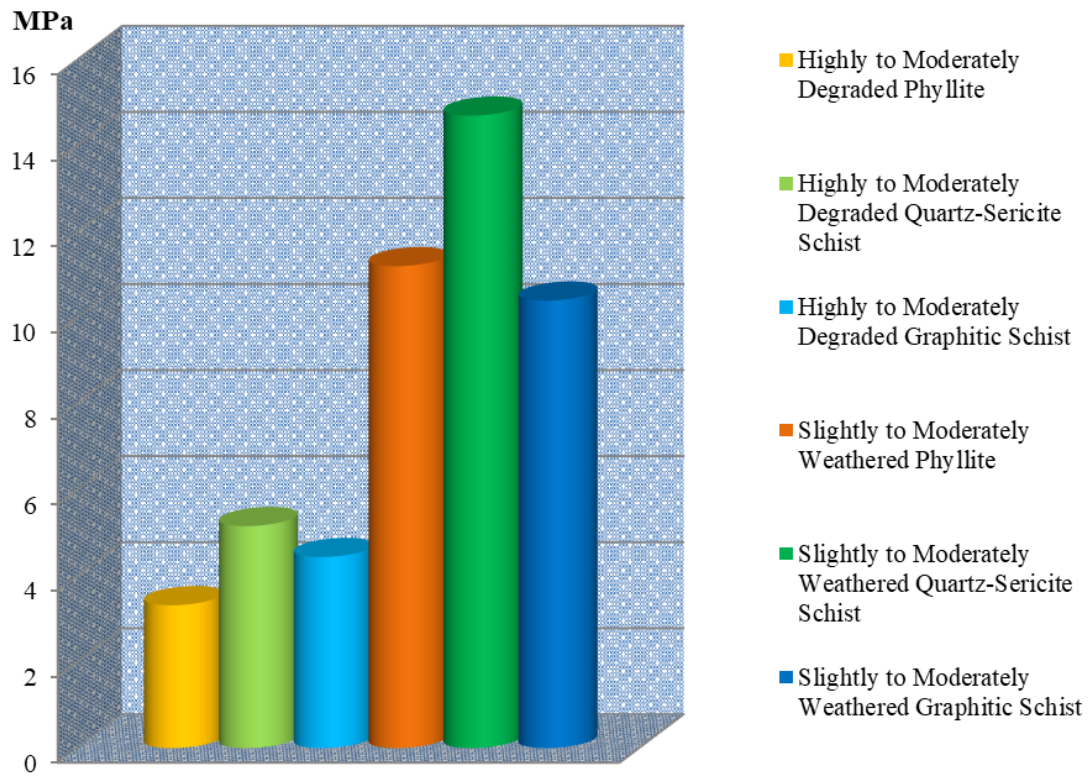
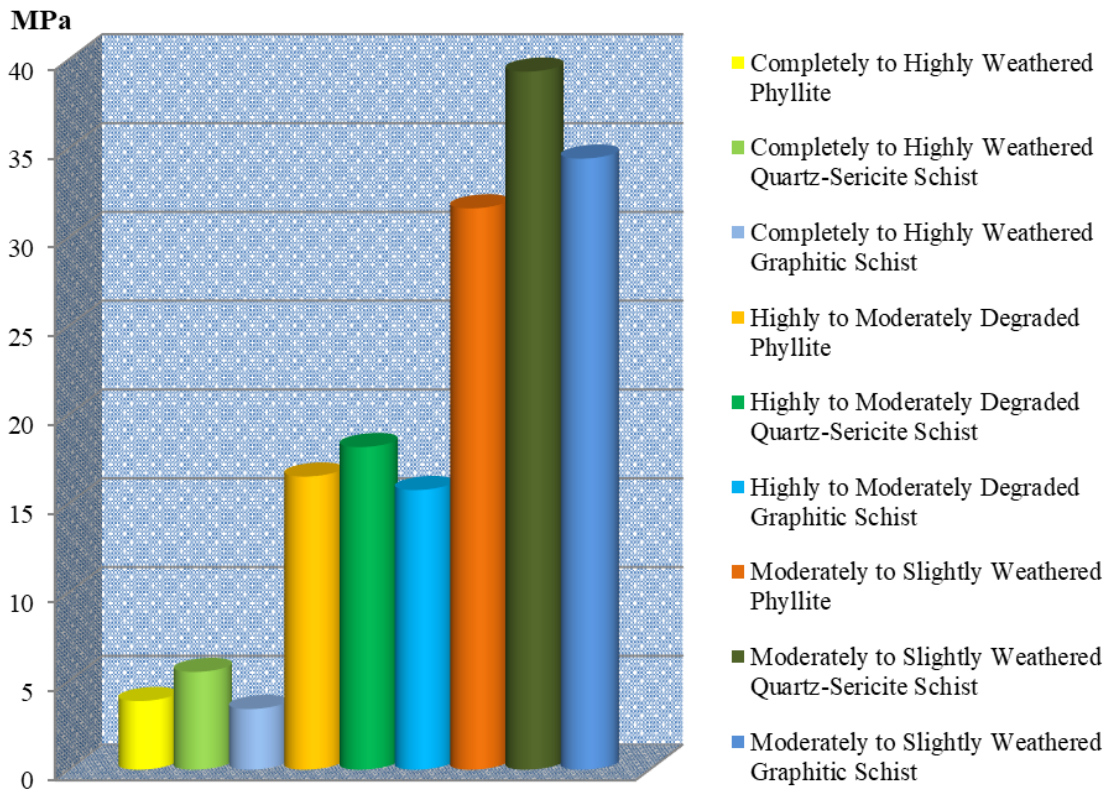


Слика 27. Фото-документација од истражни дупнатини во деградирани шкрилци.

На Слика 28 даден е приказ од тестовите на точкастата јакост од сопствените истражувања, додека на Слика 29 графички е интерпретирана еднооксијалната јакост на притисок изразена преку индексот на точкаста јакост (PLI), од каде може да се заклучи дека јакоста значително варира зависно од насоката на испитување, што ја потврдува анизотропијата на овие шкрилести карпести маси.



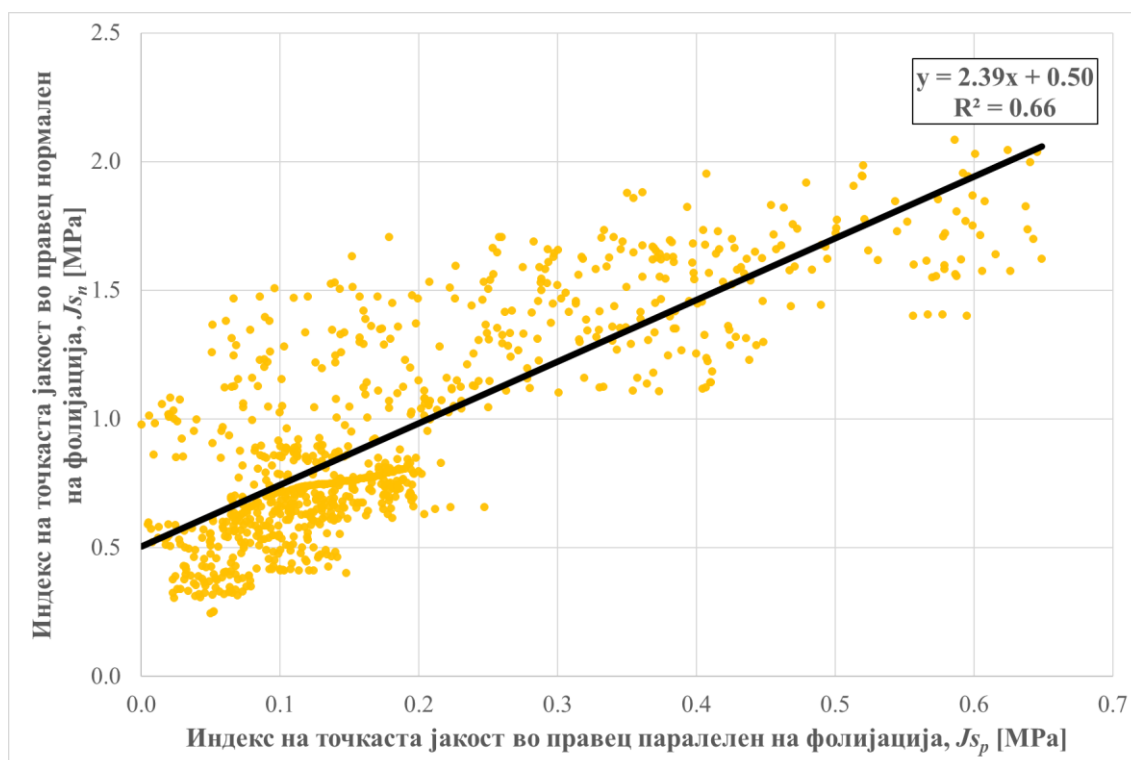
Слика 28. Испитување на индексот на точкаста јакост (PLI) во лабораториски услови.



**Слика 29.** Графичка интерпретација на резултати од сопствени истражувања на еднооксијалната јакост на притисок (UCS) изразена преку индекс на точкаста јакост (PLI), за мерења вршени нормално (горе) и паралелно (долу) на фолијација, на вкупно 1610 карпести примероци.

Треба да се потенцира, дека во конкретниот случај, еднооксијалната јакост на притисок (UCS) е добиена емпириски, со користење на следното равенство:  $UCS=20J_{s(50)}$ , каде што  $J_{s(50)}$  претставува коригирана вредност на индексот на јакост за дијаметар од 50 mm, добиена преку опит на точно оптоварување (PLT).

Согласно прикажаните резултати на Слика 29, извршена е корелација од аспект на функционална зависност помеѓу вредностите на индексот на точката јакост на притисок испитана нормално ( $J_{s_n}$ ) и паралелно ( $J_{s_p}$ ) на фолијацијата, зависно од типот и квалитетот на шкрилестите карпи. Имено, наодите од сопствените истражувања за варијацијата на вредностите на индексот на точката јакост, зависно од правецот на испитување, се прикажани на дијаграмот на Слика 30.



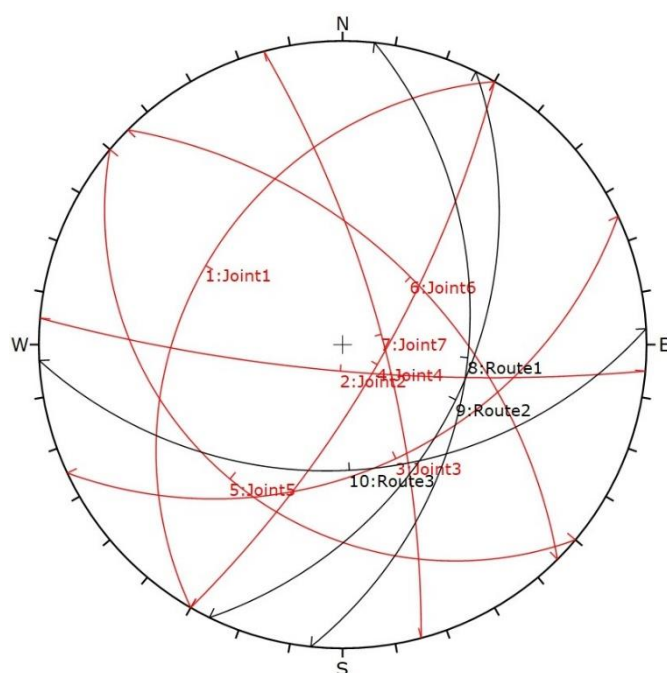
**Слика 30.** Корелативна зависност помеѓу вредностите на индексот на точката јакост ( $J_s$ ) за испитувања вршени нормално ( $J_{s_n}$ ) и паралелно на фолијацијата ( $J_{s_p}$ ), за предметните карпести маси од сопствените истражувања на вкупно 1610 карпести примероци.

Имајќи во предвид дека се работи за релативно голем број на испитувања (повеќе од 1600 карпести примероци), дијаграмот на Слика 30 може да послужи за ориентациона проценка на зависноста помеѓу јакоста на притисок зависно од разгледуваниот правец, кај анизотропни шкрилести карпи со релативно низок квалитет. Имено, проектирана е линија на тренд од добиените резултати и за истата е прикажано равенство, од каде може релативно лесно да се определи индексот на точката јакост на притисок нормално на фолијацијата, доколку е дефиниран индексот на точката јакост паралелно на фолијацијата и обратно.

Сепак, се напоменува, дека треба да се биде внимателен при користење на вакви емпириски зависимости, бидејќи карпестите маси се уникатни за одредени теренски и други специфични услови, но овие наоди можат да послужат за прелиминарни анализи и проценки.

Просторниот распоред на дисконтинуитетите има многу значајно влијание врз механичкото однесување на карпестите маси и најчесто го диктира типот на лом. Фолијацијата на карпестите маси (230-30/20-56) е поволна во однос на падот на лицето на косините на десната страна (95-240/34-79), но неповолна во однос на падот на косините за левата страна (275-35/34-79). Затоа, многу е важно да се земе во предвид анизотропијата на застапените карпести маси.

Најчестите пукнатински системи и падот на косините по должина на трасата на автопатот се прикажани на стереографската проекција презентирани на Слика 31, додека главните карактеристики на застапените пукнатински системи кај предметните карпи: густина и состојба на пукнатини, вредност на отскок на Schmidt-ов чекан (SHRV) и коефициент на рапавост на пукнатински видови (JRC) се прикажани во Табела 8.

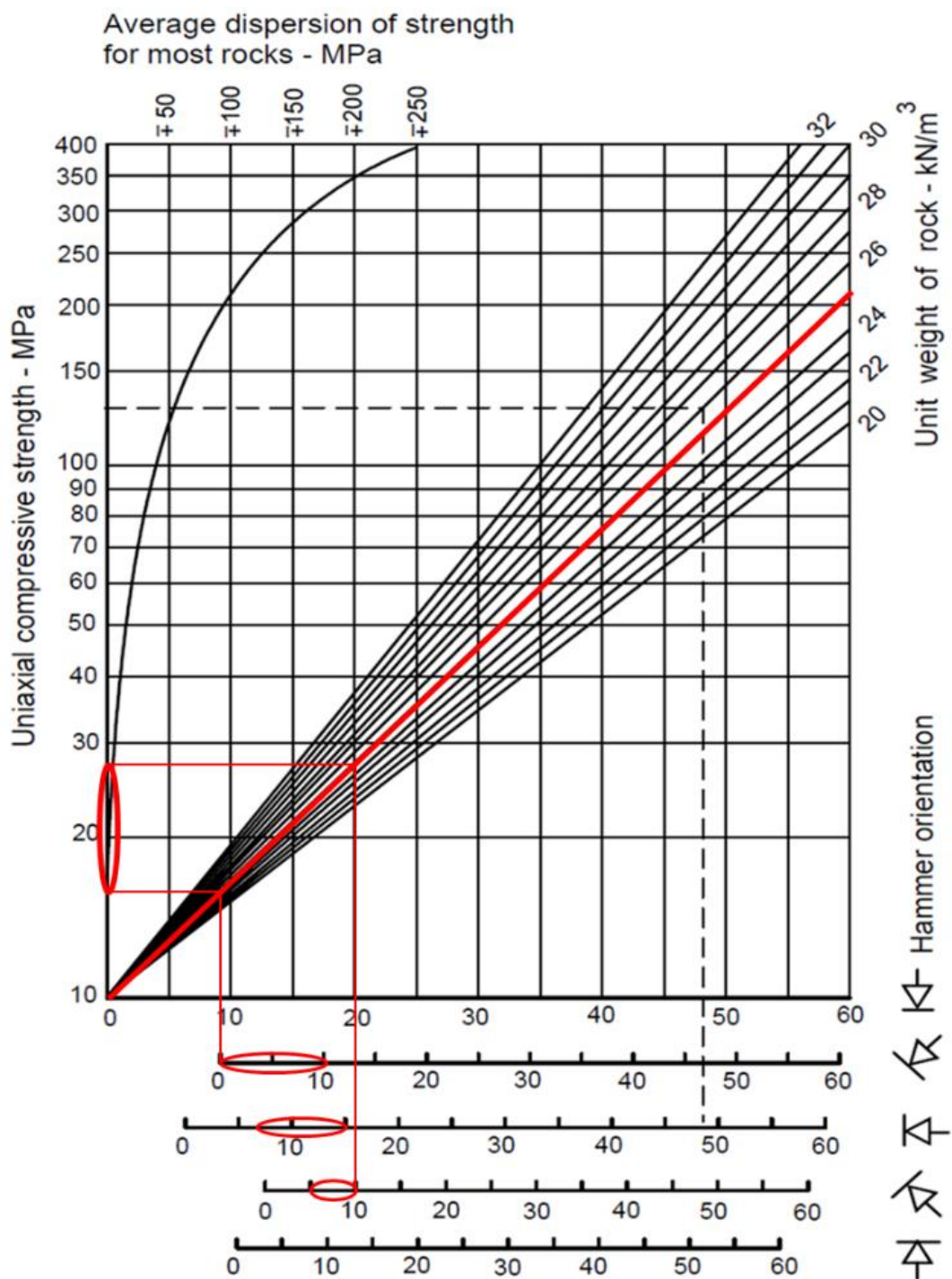


Слика 31. Стереографска проекција со приказ на падот на трасата на автопатот, ориентација на фолијацијата и евидентираните пукнатински системи за застапените шкрилести карпи.

Табела 8. Карактеристики на најчесто застапените пукнатински системи

Пукнатински систем	Густина/m'	Состојба на пукнатини	SHRV	JRC
230-30/20-56	10 – 20	Затворени или исполнети со глина, мазни	0 – 10	6 – 8
245-260/70-90	3 – 6	Затворени или исполнети со глина, мазни	5 – 10	8 – 10
170-200/50-80	6 – 12	Отворени, исполнети со глина, рапави	7 – 13	10 – 12
140-180/50-85	4 – 6	Отворени, исполнети со лимонит, рапави	6 – 10	6 – 8
90-120/70-80	4 – 6	Затворени или исполнети со глина, мазни	7 – 11	8 – 10
50/60-70	6 – 12	Отворени, исполнети со глина, мазни	5 – 10	8 – 10
30-60/65-80	3 – 6	Отворени, исполнети со лимонит, рапави	5 – 12	10 – 12
90-110/30-40	2 – 4	Отворени, исполнети со глина, рапави	7 – 15	6 – 8

Принципот на склерометарската метода е заснован на мерење на еластичниот отскок на ударното тело, кое влегува во апаратурата на Schmidt-овиот чекан. Оваа метода е многу брза и економична метода за одредување на јакоста на притисок преку одредени корелациони зависности на вредноста на одскокот на Schmidt-овиот чекан (SHRV). Со оваа проблематика се занимавале голем број на автори, но во овој докторски труд, јакоста на притисок на пукнатинските видови е добиена преку корелацијата предложена од страна на Deere & Miller, 1966 (Слика 32).



Слика 32. Проценка на јакост на притисок на пукнатински видови во зависност од одскокот на Schmidt-овиот чекан (SHRV) и соодветната волуменската тежина на карпестата маса, согласно Deere & Miller, 1966.

Пресметката на едноосијалната јакост на притисок на пукнатинските сидови е извршена според методологијата на Deere & Miller, 1966, зависно од отскокот на Schmidt-овиот чекан, правецот на вршење на тестот и волуменската тежина на предметните карпи. Резултатите од испитувањата се прикажани на Слика 32, каде со елипси се означени резултатите од тестовите, зависно од правецот на вршење на испитувањата. Се напоменува, дека испитувањата се вршени кај умерено распаднатите карпи, кои се посвежи и имаат поизразени пукнатини. Согласно резултатите, може да се забележи дека јакоста на притисок на пукнатинските сидови за умерено деградираните зони и посвежите партии на застапените анизотропни шкрилести карпести маси се движи во границите 16.5 – 27.5 МПа.

Вредноста на геолошкиот индекс на јакост (GSI) е проценета согласно равенството (24), препорачано од страна на Hoek, Carter & Diederichs, 2013. Овој пристап претставува квантитативен метод за пресметка на GSI преку рејтингот за состојбата на пукнатините ( $J_{Cond}$ ) и RQD (Rock Quality Designation), односно:

$$GSI = 1.5 J_{Cond89} + RQD/2 \quad \dots\dots\dots(24)$$

Каде,  $J_{Cond89}$  е дефиниран согласно препораките предложени од страна на Bieniawski, 1989, кои се прикажани во Табела 9 и претставува збир од рејтингот на сите засебни категории.

**Табела 9.** Рејтинг за состојба на пукнатини ( $J_{Cond89}$ ), согласно Bieniawski, 1989

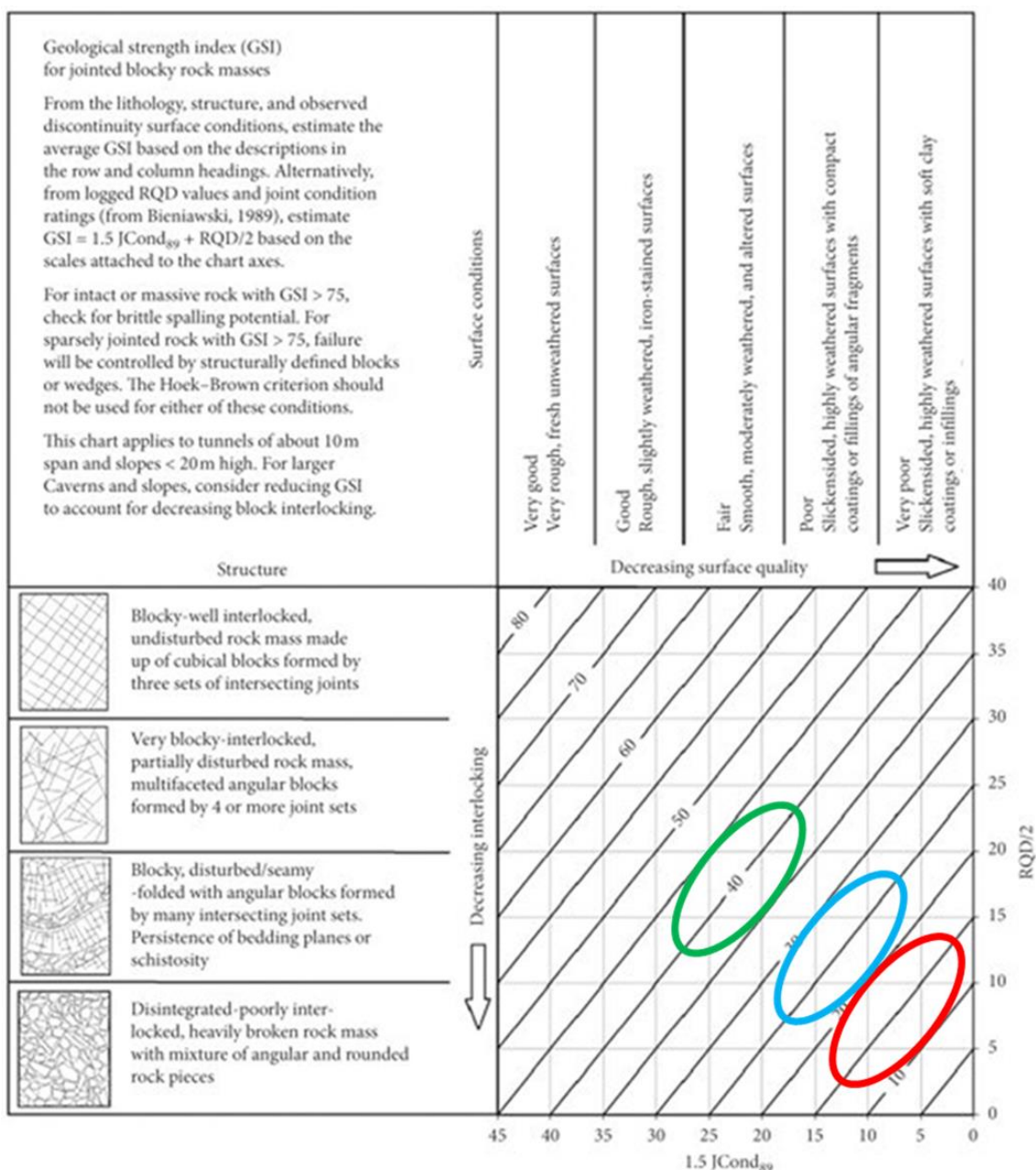
Состојба на пукнатини	Услови и рејтинг поени				
	< 1 m	1 – 3 m	3 – 10 m	10 – 20 m	> 20 m
Должина	6	4	2	1	0
Отвор	Без отвор 6	< 0.1 mm 5	0.1 – 1.0 mm 4	1 – 5 mm 1	> 5 mm 0
Рапавост	Многу рапави 6	Рапави 5	Малку рапави 3	Мазни 1	Лизгачки 0
Исполна	Без исполна 6	Тврда < 5 mm 4	Тврда > 5 mm 2	Мека < 5 mm 2	Мека > 5 mm 0
Распаднаост	Нераспаднато 6	Мала 5	Умерена 3	Голема 1	Тотална 0

Испуканоста на шкрилестите карпести маси, се манифестира во вид на пукнатини од стиснат тип, со метарски димензии, различно ориентирани, каде во најголем дел RQD параметарот е определен од ископаното јадро од истражните дупнатини, но исто така и преку мерења извршени на ископаните површини. Проценката на квалитетот на карпеста маса, е извршена според методологијата на Palmstrom, 2005, прикажана на равенството (25), каде RQD параметарот директно зависи од бројот на пукнатини на единица волумен ( $J_v$ ):

$$RQD = 110 - 2.5J_v \quad \dots\dots\dots(25)$$

Согласно користената методологија, се добива дека RQD параметарот изнесува околу 0 – 30% за комплетно деградираните зони, додека за делумно деградираните и посвежите зони изнесува околу 30 – 60%.

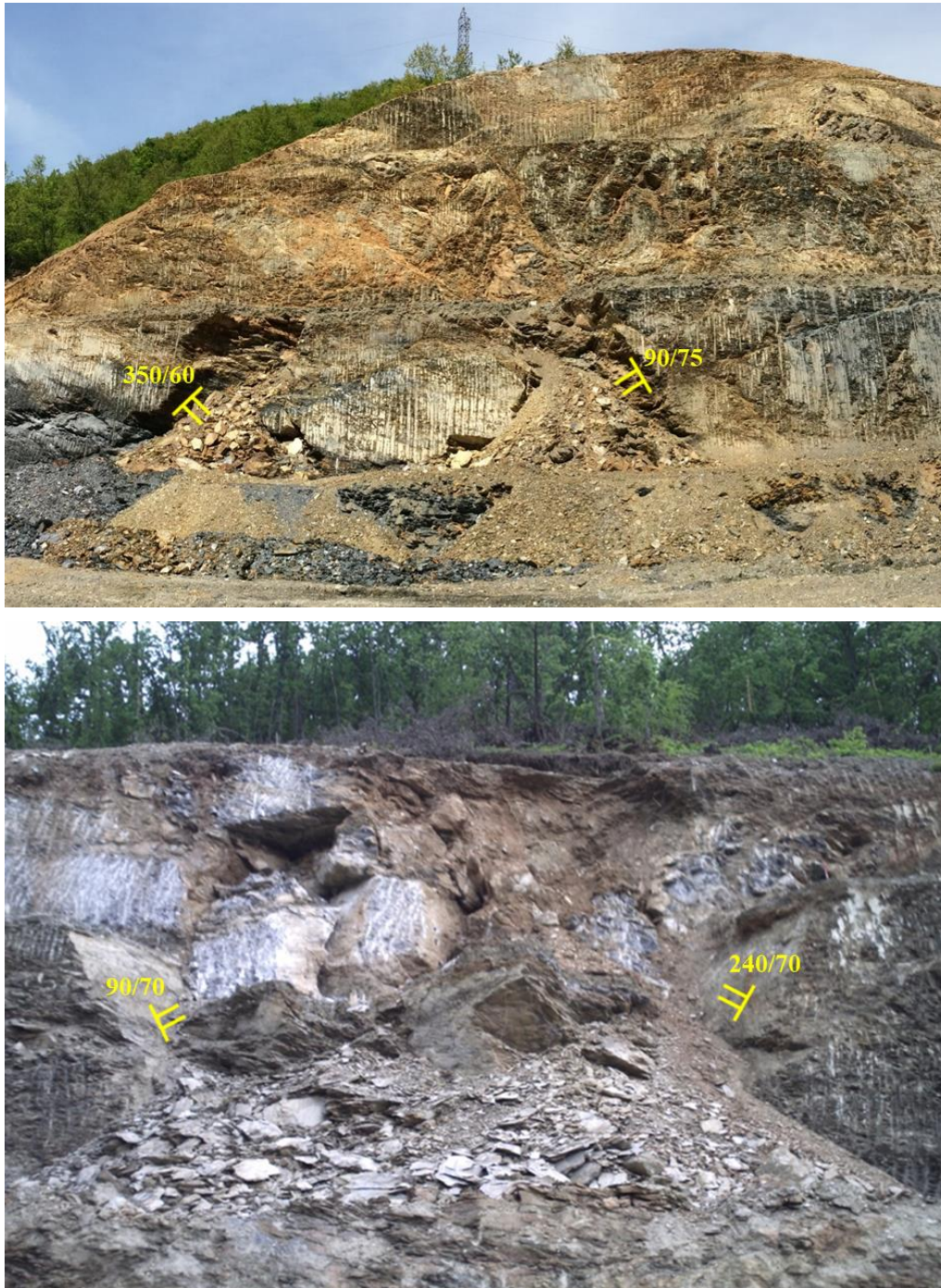
На Слика 33 е презентираниот графикот препорачан од страна на Хоек, Carter & Diederichs, 2013, каде се прикажани зоните на варијација на GSI параметарот за застапените карпести маси. Црвената елипса ги претставува резултатите за комплетно до високо деградираните карпести маси каде  $GSI=10-20$ , сината елипса се однесува на високо до умерено распадатите зони каде  $GSI=20-30$ , додека со зелена елипса се означени резултатите за умерено до малку распадатите шкрилести карпи каде  $GSI=35-45$ .



**Слика 33.** Графичка презентација на вредностите на геолошкиот индекс на јакост (GSI) за комплетно до високо деградираните зони (црвена боја), умерено деградираните зони (сина боја) и релативно поцврстите свежи зони (зелена боја) од застапените карпести маси, согласно квантитативниот пристап предложен од страна на Хоек, Carter & Diederichs, 2013.

На Слика 34 се прикажани два карактеристични усеци од предметната локација каде е настанат просторен клиновиден лом.

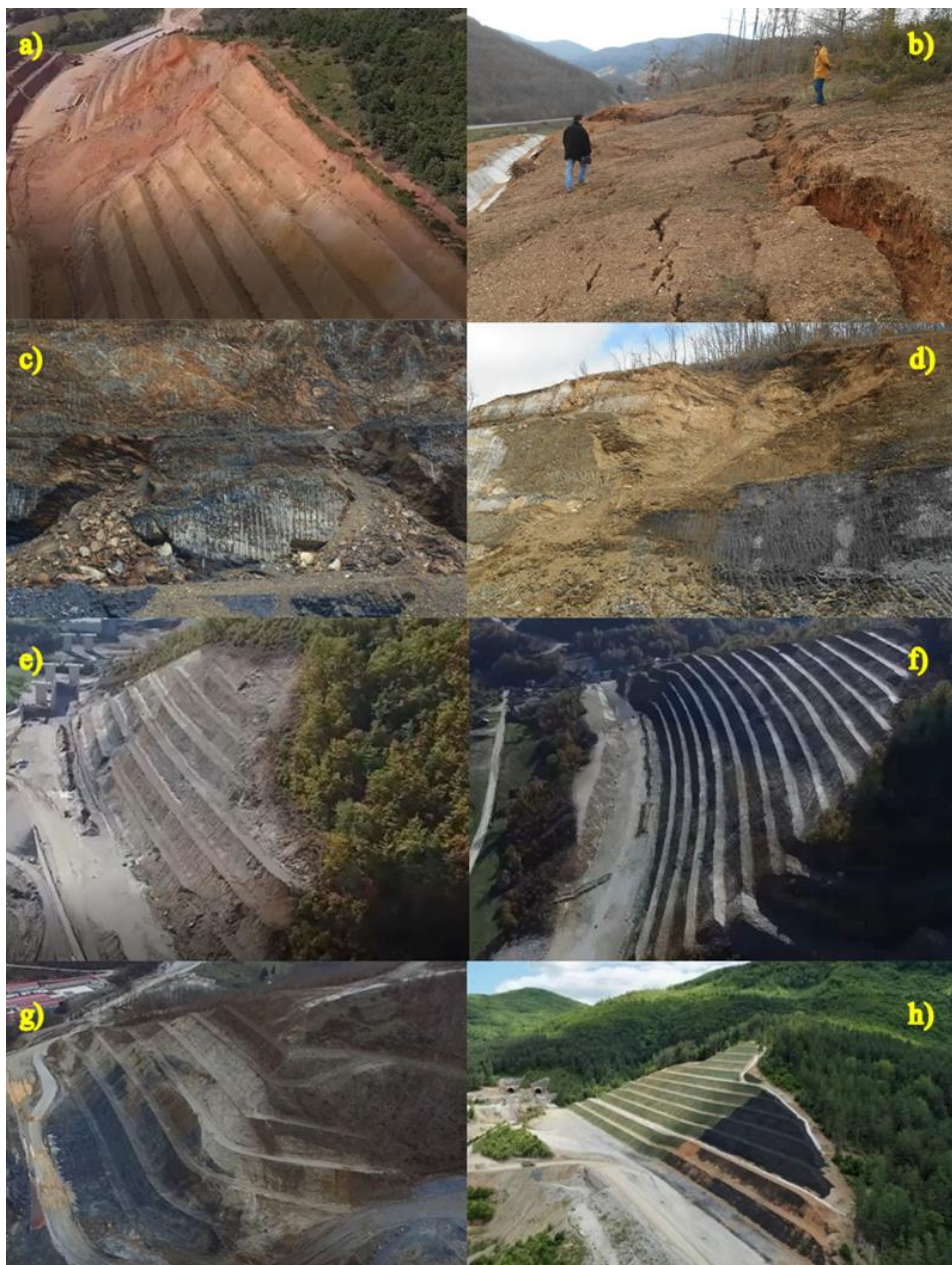




Слика 34. Прикази на клиновиден лом, регистриран кај застапените анализирани косини, како резултат на комбинација од неповолни пукнатински системи со челото на косината.

## 6.2. Генерални карактеристики на анализираниите косини

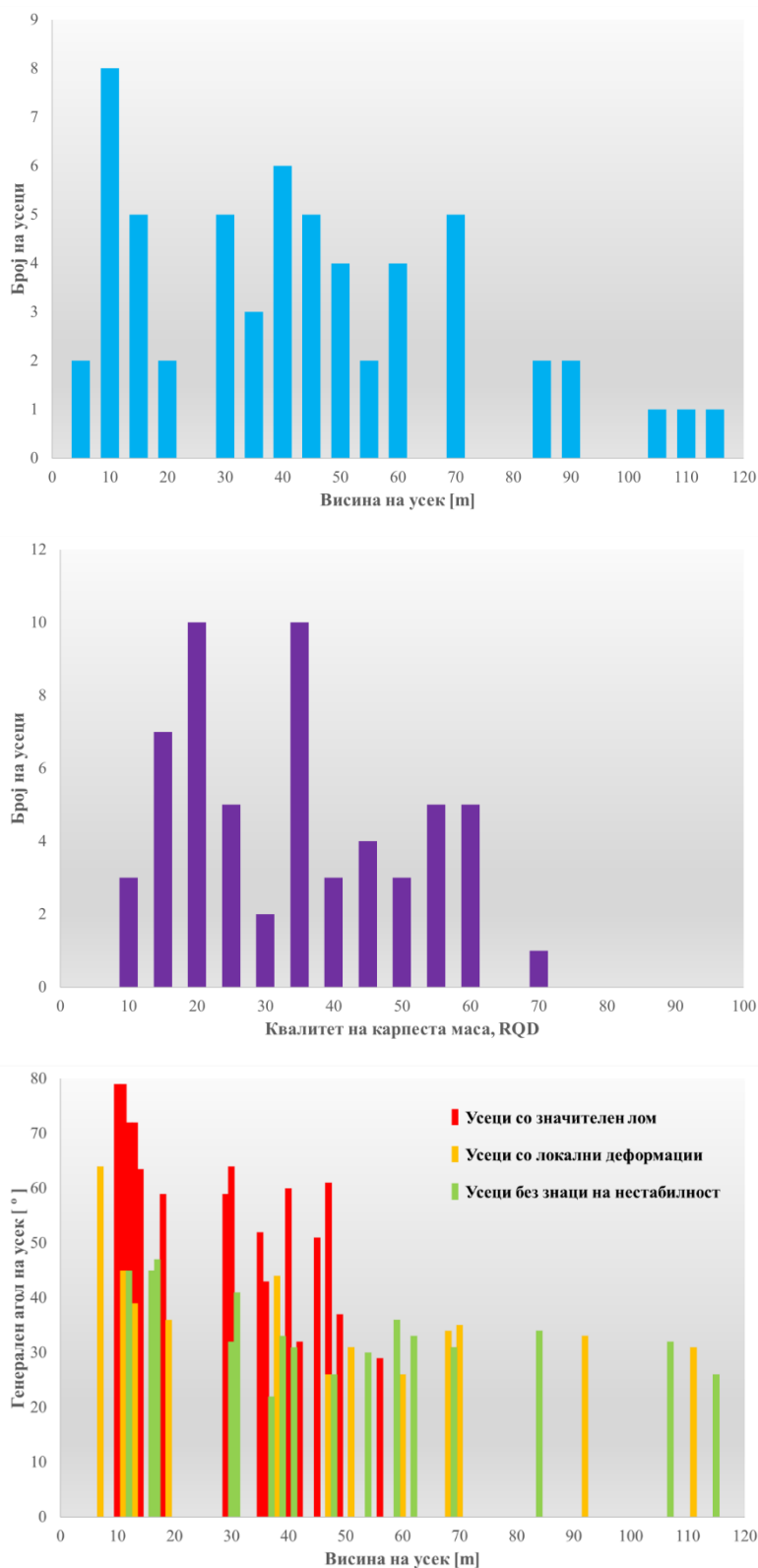
Проценката на стабилноста е извршена на вкупно 58 косини (усеци). Според наодите во дисертацијата, речиси една третина од анализираниите косини (18) се стабилни, без видливи знаци на потенцијална нестабилност, кај 18 косини се појавени помалку значајни (локални) обрушувања но и можност од дополнителни слични деформации, додека кај 22 од косините се регистрирани позначајни нестабилни зони со релативно голем обем и загрозувачки карактер.



Слика 35. Приказ на дел од анализираниите косини (03.2017 – 06.2020).

На Слика 35 се прикажани 8 репрезентативни усеци за да се добие подобар впечаток за проблематиката. На горните две фотографии (Слика 35a и 35b) прикажани се усеци каде е настанат глобален лом од ротационо-транслаторен карактер. На Слика 35c и 35d прикажани се косини со регистриран локален, но значителен лом, како резултат на пресек на две пукнатини со челото на косината (клиновиден лом). На Слика 35e и 35f прикажани се усеци со незначителни локални деформации, додека на најдолните две фотографии (Слика 35g и 35h) прикажани се усеци во добра состојба, каде не се регистрирани деформации. Свлучиштата на горните две фотографии се настанати неколку месеци по ископот на косините, додека клиновидниот лом на следните две фотографии е настанат неколку недели по фазата на ископ. Главната причина за свлекувањето претставува несоодветната геометрија на косините, додека процесот (тригерот) кој го иницирал свлекувањето претставуваат долготрајните и интензивни врнежи.

На Слика 36 прикажани се хистограмски прикази на фреквенцијата на усеци зависно од нивната висина (горе) и квалитетот на карпеста маса (средина), како и зависноста меѓу вкупната висина и генералниот агол на усеците (долу).



**Слика 36.** Хистограми со фреквенција на број на усеци зависно од нивната висина (горе) и квалитетот на карпа (средина) и зависност помеѓу висината и генералниот агол на усеците (долу).

Во Табела 10, се прикажани генералните геометриски карактеристики и типот на карпеста маса, за косините каде е настанато свлекување од поголем обем, односно каде истото предизвикало стопирање на сите активности и условување од употреба на дополнителни мерки за стабилизација и заштита. Покрај редниот број на усеците, во првата колона се прикажани и дел од косините презентирани на Слика 35.

**Табела 10.** Генерални арактеристики на косините со значајно свлекување

Усек	Тип на карпа	Наклон/агол на косини	Висина на берми [m]	Ширина на берми [m]	Генерален агол [ ° ]	Генерална висина [m]
1	<i>Sf'', Sf''</i>	1:1 / 45.0°	6	3	37	29
2	<i>Sqse'', Sqse'</i>	1.5:1 / 56.3°	6	3	41	45
3 (a)	<i>Sf'', Sf', Sf</i>	1.5:1 / 56.3°	6	3	37	49
4	<i>Sf', Sqse', Sqse</i>	3:1 / 71.6°	10	4	59	18
5	<i>Sf', Sgr'</i>	1.5:1 / 56.3°	6	4	43	36
6	<i>Sf', Sgr'</i>	3:1 / 71.6°	10	4	59	29
7	<i>Sf', Sgr', Sf, Sgr</i>	5:1 / 78.7°	10	4	59	47
8	<i>Sqse', Sgr'</i>	3:1 / 71.6°	13	/	72	13
9	<i>Sqse'', Sqse'</i>	5:1 / 78.7°	10	4	60	40
10 (c)	<i>Sf', Sgr', Sf, Sgr</i>	5:1 / 78.7°	10	4	61	47
11 (d)	<i>Sf', Sgr', Sf, Sgr</i>	5:1 / 78.7°	10	4	64	30
12 (b)	<i>Sqse'', Sqse'</i>	1.5:1 / 56.3°	6	4	39	38
13	<i>Sf'', Sgr'', Sf'</i>	1:1.25 / 38.7°	6	4	29	56
14	<i>Sf'', Sf'</i>	1:1 / 45.0°	6	4	32	42
15	<i>Sf', Sqse'</i>	5:1 / 78.7°	11	/	79	11
16	<i>Sf', Sgr', Sgr</i>	5:1 / 78.7°	6	4	51	45
17	<i>Sf', Sgr'</i>	4:1 / 76.0°	7	/	76	10
18	<i>Sqse'', Sgr', Sgr</i>	5:1 / 78.7°	6	4	52	35
19	<i>Sf', Sqse'</i>	5:1 / 78.7°	6	4	61	11
20	<i>Sf'</i>	3:1 / 71.6°	12	/	72	12
21	<i>Sqse', Sgr'</i>	5:1 / 78.7°	6	4	64	14
22	<i>Sf', Sgr', Sqse'</i>	5:1 / 78.7°	10	/	79	10

\* *Sf'*: филитични шкрилци; *Sqse'*: кварц-серицитски шкрилци, *Sgr'*: графитични шкрилци, ' (прим): делумно деградирани карпи, '' (секундум): комплетно деградирани карпи.

Од прикажаните податоци во Табела 10, може да се заклучи дека наклонот на косините е многу стрмен за ваков тип на карпести маси, особено имајќи ја во предвид вкупната висина на усеците. Затоа, може да се забележи дека и во услови на релативно поблаг наклон, настанато е свлекување, поради големата површина на изложеност и подложност на развивање на потенцијално нестабилни зони. Исто така и висината на бермите кај дел од усеците е несвојствена. Сето ова, во комбинација со степенот на распаднаост на застапените карпи, комбинациите на неповолни пукнатини, како и негативното атмосферско влијание, претставува главен извор на проблемите, што резултира со развој на голем број на тензиони пукнатини, нестабилни зони и свлекување со големи размери.

Во Табела 11 се прикажани карактеристиките на косините каде е настанато локално свлекување од помал карактер кое не ја загрозува глобалната стабилност.

**Табела 11.** Генерални карактеристики на косините со локална нестабилност

Усек	Тип на карпа	Наклон/агол на косини	Висина на берми [m]	Ширина на берми [m]	Генерален агол [ ° ]	Генерална висина [m]
1	<i>Sf</i>	1:1 / 45.0°	6	4	36	19
2	<i>Sf', Sf, Sf</i>	1:1 / 45.0°	6	4	31	51
3	<i>Sf, Sgr'</i>	1:1 / 45.0°	11	/	45	11
4	<i>Sf</i>	1:1.5 / 33.7°	11	/	28	11
5	<i>Sf</i>	1:1 / 45.0°	7	/	45	7
6 (e)	<i>Sqse', Sgr', Sqse</i>	1.5:1 / 56.3°	6	4	31	51
7	<i>Sf, Sgr', Sf, Sgr</i>	1.5:1 / 56.3°	6	4	35	70
8	<i>Sf'', Sgr'', Sgr'</i>	1:1 / 45.0°				
9 (f)	<i>Sqse', Sgr', Sf, Sgr</i>	1.5:1 / 56.3°	6	4	33	92
10 (f)	<i>Sqse'', Sf'', Sf</i>	1:1 / 45.0°				
11	<i>Sf'', Sf, Sgr', Sf</i>	1:1 / 45.0°	6	4	34	68
12	<i>Sf, Sgr', Sf, Sgr</i>	1.5:1 / 56.3°	6	4	31	69
13	<i>Sf'', Sf</i>	1:1 / 45.0°	6	4	39	13
14	<i>Sf'', Sf</i>	2:1 / 63.4°	7	/	64	7
15	<i>Sqse'', Sqse', Sgr'</i>	1:1.5 / 33.7°	6	4	26	60
16	<i>Sqse'', Sqse', Sgr'</i>	1:1.5 / 33.7°	6	4	26	47
17	<i>Sqse', Sqse, Sf</i>	1:1 / 45.0°	6	4	31	111
18	<i>Sf, Sf</i>	2:1 / 63.4°	8	4	44	38

\* *Sf*: филитични шкрилци; *Sqse*: кварц-серицитски шкрилци, *Sgr*: графитични шкрилци, ' (прим): делумно деградирани карпи, '' (секундум): комплетно деградирани карпи.

Кај косините со локални (минорни) деформации (Табела 11), може да се забележи дека наклонот е значително поблаг за разлика од косините каде е регистрирано значајно свлекување. Исто така и висината на бермите е вообичаена и само во еден случај (18) надминува 6.0 m. Се потенцира дека усеците под реден број 7 и 8, односно 9 и 10 се изведени со различен наклон на косините. За напомена е и висината на дел од усеците, која е нереално висока, особено за усекот под реден број 17. Локалното свлекување, во најголем дел се должи на големината и висината на усеците, имајќи го во предвид непредвидливиот распоред на карпестите маси, степенот на распаднаост, како и просторниот распоред на пукнатинските системи.

Во Табела 12 се прикажани геометриските параметри на косините кои се стабилни и каде не се забележани знаци на потенцијална нестабилност.

**Табела 12.** Генерални карактеристики на анализираниите косини кои се стабилни

Усек	Тип на карпа	Наклон/агол на косини	Висина на берми [m]	Ширина на берми [m]	Генерален агол [ ° ]	Генерална висина [m]
1	<i>Sf</i>	1:1 / 45.0°	12	/	45	12
2	<i>Sf, Sqse', Sgr', Sf</i>	1:1 / 45.0°	6	4	32	107
3	<i>Sf', Sf</i>	1:1 / 45.0°	6	4	31	41
4	<i>Sf</i>	1:1.5 / 33.7°	6	4	47	17
5	<i>Sqse'', Sqse', Sgr''</i>	1:1 / 45.0°	6	4	34	84
6	<i>Sqse', Sgr', Sqse</i>	1.5:1 / 56.3°				
7	<i>Sgr', Sf', Sgr, Sf</i>	1.5:1 / 56.3°	6	4	36	59
8	<i>Sf'', Sf</i>	1:1 / 45.0°				
9 (g)	<i>Sqse', Sgr', Sqse</i>	1.5:1 / 56.3°	6	4	33	39
10	<i>Sf', Sgr', Sf, Sgr</i>	1:1 / 45.0°	6	4	26	115
11	<i>Sf', Sgr'</i>	1:1 / 45.0°	6	4	41	31
12 (h)	<i>Sf', Sgr', Sf, Sgr</i>	1.5:1 / 56.3°	6	4	31	69
13	<i>Sf'', Sf', Sf</i>	1:1 / 45.0°	6	4	22	37
14	<i>Sqse'', Sqse', Sqse</i>	2:1 / 63.4°	6	4	26	48
15	<i>Sqse', Sqse</i>	1:1.5 / 33.7°	6	4	33	62
16	<i>Sf', Sgr', Sf</i>	1:1.5 / 33.7°	6	4	30	54
17	<i>Sf', Sf</i>	1:1 / 45.0°	6	4	32	30
18	<i>Sf', Sgr', Sgr</i>	2:1 / 63.4°	16	/	45	16

\* *Sf*: филитични шкрилци; *Sqse*: кварц-серицитски шкрилци, *Sgr*: графитични шкрилци, ' (прим): делумно деградирани карпи, '' (секундум): комплетно деградирани карпи.

Иако значителен дел од усеците кои немаат знаци на нестабилност (Табела 12) се со нерационално голема вкупна висина, сепак поради поблагитот наклон на косините, како и релативно подобриот квалитет на карпести маси, не се забележани деформации и обрушување на косините.

### 6.3. Усвоени параметри и користени алатки при евалуација на стабилноста на косините

Проценката на стабилноста е извршена на вкупно 58 косини (усеци), со мулти-дисциплинарен пристап. Имено, од емпириските методи за проценка на стабилноста, користени се методот SMR (Romana, 1985, 1995) и методот Q-slope (Barton & Bar, 2015, 2017), додека од статичките методи користен е принципот на гранична рамнотежа, каде анализите се вршени согласно детерминистички и веројатносен (пробабилистички) пристап.

Резултатите од детерминистичките анализи се компарирани со резултатите од нумеричките методи, поточно принципот на конечни елементи, при што е усвоена критичната вредност на факторот на сигурност.

Дополнително, извршени се и анализи за кинематските услови на лом, односно направена е проценка на стабилноста по дисконтинуитети.

Со оглед на фактот што предметните карпести формации се многу испукани и деградирани, нивното однесување е моделирано согласно генерализираниот модел на Хоек-Браун (Hoek et al., 2002).

Во Табела 13 се прикажани усвоените вредности за волуменската тежина ( $\gamma$ ), еднооксијалната јакост на притисок (UCS), геолошкиот индекс на јакост (GSI), материјалната константа ( $m_i$ ) и факторот на пореметеност (D), зависно од типот на карпеста маса. Овие влезни параметри се користени и при анализите на стабилност базирани на методот на гранична рамнотежа (МГР) и во нумеричките анализи со методот на конечни елементи (МКЕ).

**Табела 13.** Усвоени влезни параметри за карпите, согласно генерализираниот модел Хоек-Браун (Hoek et al., 2002), при анализата на стабилност со МГР и МКЕ

Тип на карпа	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	UCS [MPa]	GSI [ / ]	$m_i$ [ / ]	D [ / ]
Комплетно до многу деградирани шкрилци	22.5 – 24.0	3.0 – 5.0	10 – 20	4 – 5	0.2 – 0.4
Делумно деградирани шкрилци	25.0 – 26.0	10.0 – 15.0	20 – 30	6 – 7	0.5 – 0.7
Релативно свежи шкрилци	25.5 – 26.5	30.0 – 35.0	35 – 45	8	0.7 – 0.8

Во продолжение се презентирани круцијалните аспекти на користените пристапи за проценка на стабилноста и прикажани се излези од користените софтверски пакети, за дел од анализираните косини, зависно од методолошкиот пристап со кој се извршени анализите.

### 6.3.1. Проценка на стабилноста со емпирискиот метод SMR

Најпрво, треба да се потенцира, дека за адекватна примена на овој метод, неопходен е увид на ископани карпести површини (косини), каде прецизно би се утврдиле сите доминантни пукнатински системи. Во Табела 14 се прикажани позначајните пукнатински системи кои предизвикуваат појава на планарен (рамнински) лом со челото на косините, како и соодветните рејтинг поени на параметрите, согласно SMR (Slope Mass Rating) класификацијата.

**Табела 14.** SMR (Romana, 1985, 1995) класификација за предметните косини од истражувањето, каде е проценета класата за услови на планарен лом

Азимут/наклон на пукнатински систем	Азимут/наклон на косина	RMR <sub>b</sub>	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>	SMR	Класа
<b>Планарен лом</b>								
190/70	165/79	27	0.4	1.0	6.0	0.0	24.6	IV
340/30	345/79	15	1.0	0.7	0.0	0.0	15.0	V
245/70	215/79	22	0.4	1.0	-6.0	0.0	19.6	V
194/30	215/79	17	0.4	0.7	0.0	0.0	17.0	V
194/30	215/45	22	0.4	0.4	0.0	0.0	22.0	IV
244/56	35/79	17	0.15	1.0	0.0	0.0	17.0	V
152/70	175/79	31	0.4	1.0	-6.0	0.0	28.6	IV
176/65	175/79	20	1.0	1.0	-6.0	0.0	15.0	V
30/20	355/79	20	0.15	0.4	0.0	-60.0	-40.0	V
30/20	355/34	20	0.15	0.15	0.0	0.0	20.0	V
320/30	355/79	20	0.15	0.4	0.0	-60.0	-40.0	V
320/30	355/34	20	0.15	0.15	0.0	0.0	20.0	V
330/35	327/50	18	1.0	0.7	0.0	0.0	18.0	V
330/35	327/39	18	1.0	0.7	0.0	0.0	18.0	V
90/75	95/79	26	1.0	1.0	-6.0	0.0	20.0	V
300/35	275/79	21	0.4	0.7	0.0	0.0	21.0	IV
260/75	275/79	21	0.7	1.0	-6.0	0.0	16.8	IV
230/40	240/56	23	0.7	0.85	0.0	0.0	23.0	IV
230/40	240/45	23	0.7	0.85	-6.0	0.0	19.4	V

Согласно прикажаните резултати во Табела 14, може да се заклучи дека поголем дел од анализираните косини (68%) се класифицирани во V класа која се одликува со многу деградирани карпести средини, каде стабилноста е дефинирана како комплетно нестабилна и се очекува планарен или кружно-цилиндричен лом со поголеми размери. Останатите косини (32%), се класифицирани во IV класа, која е карактеристична за средно деградирани карпести маси, каде има веројатност од појава на нестабилност во вид на класичен рамнински лом. Кај сите разгледувани косини, рејтингот на поените укажува на неопходност од мерки за стабилизација, како што се корекција на геометријата, длабоко дренирање, масивни потпорни конструкции, анкерисан потпорен сид и сл.



Во Табела 15 се дадени неповолни комбинации од позначајните пукнатински системи кои предизвикуваат клиновиден (просторен) лом со челото на косините, како и соодветните рејтинг поени на параметрите, согласно SMR класификацијата.

**Табела 15.** SMR (Romana, 1985, 1995) класификација за предметните косини од истражувањето, каде е проценета класата за услови на клиновиден лом

Азимут/наклон на пукнатински системи	Азимут/наклон на косина	RMR <sub>b</sub>	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>	SMR	Класа
<b>Клиновиден лом</b>								
115/70 + 250/40	165/79	27	0.15	1.0	-6.0	0.0	26.1	IV
115/70 + 250/40	165/45	27	0.15	1.0	0.0	0.0	27.0	IV
115/70 + 230/30	165/79	27	0.15	1.0	-6.0	0.0	26.1	IV
115/70 + 230/30	165/45	27	0.15	1.0	0.0	0.0	27.0	IV
115/70 + 190/70	165/79	27	0.15	1.0	-6.0	0.0	26.1	IV
250/40 + 230/30	165/79	27	0.15	1.0	-60.0	0.0	19.3	V
250/40 + 230/30	165/45	27	0.15	0.7	-50.0	0.0	21.7	IV
50/65 + 190/70	165/79	27	0.4	0.85	-6.0	0.0	24.6	IV
340/30 + 115/70	345/79	15	1.0	1.0	-6.0	0.0	9.0	V
340/30 + 250/40	345/79	15	1.0	0.85	0.0	0.0	15.0	V
340/30 + 50/65	345/79	15	1.0	1.0	0.0	0.0	15.0	V
340/30 + 230/30	345/79	15	1.0	0.7	0.0	0.0	15.0	V
340/30 + 190/70	345/79	15	1.0	0.7	-6.0	0.0	10.8	V
250/40 + 50/65	345/79	15	0.15	0.85	0.0	0.0	15.0	V
250/40 + 50/65	345/34	15	0.15	0.85	0.0	0.0	15.0	V
230/30 + 190/70	345/79	15	1.0	0.7	-6.0	0.0	22.6	IV
100/35 + 245/70	215/79	22	0.4	1.0	0.0	0.0	22.0	IV
100/35 + 245/70	215/45	22	0.4	1.0	0.0	0.0	22.0	IV
245/70 + 260/90	215/79	22	0.4	1.0	0.0	0.0	22.0	IV
245/70 + 194/30	215/79	22	0.4	1.0	0.0	0.0	22.0	IV
245/70 + 194/30	215/45	22	0.4	1.0	0.0	0.0	22.0	IV
260/90 + 194/30	215/79	22	0.4	1.0	0.0	0.0	22.0	IV
260/90 + 194/30	215/45	22	0.15	1.0	0.0	0.0	22.0	IV
100/35 + 45/35	35/79	17	0.85	0.85	0.0	0.0	17.0	V
245/70 + 45/35	35/79	17	0.85	0.85	0.0	0.0	17.0	V
245/70 + 45/35	35/34	17	1.0	0.85	0.0	0.0	17.0	V
260/90 + 45/35	35/79	17	0.85	0.85	0.0	0.0	17.0	V

Азимут/наклон на пукнатински системи	Азимут/наклон на косина	RMR <sub>b</sub>	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>	SMR	Класа
<b>Клиновиден лом</b>								
260/90 + 45/35	35/34	17	0.7	1.0	0.0	0.0	17.0	V
45/35 + 194/30	35/79	17	0.85	0.85	0.0	0.0	17.0	V
30/20 + 176/65	175/79	31	0.15	1.0	0.0	0.0	31.0	IV
152/70 + 320/30	175/79	31	0.15	1.0	-6.0	0.0	28.6	IV
152/70 + 320/30	175/56	31	0.4	1.0	0.0	0.0	31.0	IV
176/65 + 320/30	175/79	31	0.4	1.0	-6.0	0.0	30.1	IV
176/65 + 320/30	175/79	31	0.4	1.0	0.0	0.0	31.0	IV
30/20 + 152/70	355/79	20	0.15	1.0	-6.0	0.0	19.1	V
30/20 + 270/80	355/79	20	0.15	1.0	-6.0	0.0	19.1	V
30/20 + 320/30	355/79	20	0.4	0.4	0.0	0.0	20.0	V
30/20 + 320/30	355/34	20	0.15	0.4	-6.0	0.0	19.6	V
270/80 + 320/30	355/79	20	0.4	1.0	-6.0	0.0	17.6	V
270/80 + 320/30	355/34	20	0.15	1.0	0.0	0.0	20.0	V
40/80 + 180/50	95/79	26	0.15	1.0	-25.0	0.0	22.2	IV
40/80 + 180/50	95/45	26	0.15	0.7	0.0	0.0	21.0	IV
300/35 + 260/75	275/79	21	0.7	1.0	-6.0	0.0	16.8	V
300/35 + 40/80	275/79	21	0.4	1.0	-25.0	0.0	11.0	V
300/35 + 180/50	275/79	21	0.4	1.0	0.0	0.0	21.0	IV
260/75 + 40/80	275/79	21	0.7	1.0	-25.0	0.0	3.5	V
140/67 + 230/40	240/56	23	0.7	1.0	0.0	0.0	23.0	IV
140/67 + 230/40	240/45	23	0.7	1.0	0.0	0.0	23.0	IV
230/40 + 190/50	240/56	23	0.7	1.0	-6.0	0.0	18.8	V
230/40 + 190/50	240/45	23	0.7	1.0	-6.0	0.0	18.8	V
230/40 + 170/70	240/56	23	0.7	1.0	0.0	0.0	23.0	IV
230/40 + 170/70	240/45	23	0.7	1.0	0.0	0.0	23.0	IV
190/50 + 170/70	240/56	23	0.15	1.0	-6.0	0.0	22.1	IV
190/50 + 170/70	240/45	23	0.15	1.0	0.0	0.0	23.0	IV
190/50 + 150/85	240/56	23	0.15	1.0	-6.0	0.0	22.1	IV
190/50 + 150/85	240/45	23	0.15	1.0	0.0	0.0	23.0	IV

Согласно прикажаните резултати во Табела 15, може да се заклучи дека дел од анализираните косини (43%) се класифицирани во V класа која се одликува со многу деградирани карпести средини, каде стабилноста е дефинирана како комплетно нестабилна и се очекува лом од поголеми размери. Останатите косини (57%), се класифицирани во IV класа, која е карактеристична за средно деградирани карпести маси, каде има веројатност од појава на нестабилност во вид на класичен клиновиден лом.

И во овој случај каде е разгледана можноста од клиновиден лом, исто како и кај можноста од планарен лом, за сите разгледувани косини рејтингот на поените укажува на неопходност од мерки за стабилизација, како што се корекција на геометријата, длабоко дренирање, масивни потпорни конструкции, анкерисан потпорен ѕид и сл. Ова е уште една потврда дека емпириските методи се и тоа како корисни и треба да бидат составен дел од сите евалуации во фаза на планирање и проектирање на косини во карпести средини.

### 6.3.2. Проценка на стабилноста со емпирискиот метод *Q-slope*

Во Табела 16 е прикажана варијацијата на вредноста на проценетите параметри од емпириската равенка за проценка на стабилноста согласно методот *Q-slope*. Треба да се потенцира, дека за адекватна примена на овој метод, неопходен е увид на ископани карпести површини (косини).

**Табела 16.** Дијапазон на варијација на параметрите во *Q-slope* методот, зависно од квалитетот на карпеста маса

Параметар	Деградирани шкрилци	Делумно деградирани шкрилци
Степен на испуканост, $RQD$ [%]	10 – 30	30 – 60
Број на пукнатиснки системи, $J_n$	3 – 20	3 – 12
Рапавост на пукнатински ѕидови, $J_r$	A = 1.0 – 3.0	A = 1.0 – 4.0
	B = 0.5 – 2.0	B = 1.5 – 4.0
Алтерација на пукнатински ѕидови, $J_a$	A = 4.0 – 6.0	A = 4.0 – 6.0
	B = 4.0 – 6.0	B = 4.0 – 6.0
Ориентација на пукнатини, $O$	A = 0.5 – 1.0	A = 0.5 – 1.0
	B = 0.8 – 1.5	B = 0.8 – 1.5
Климатски и геолошки услови, $J_{wice}$	0.3 – 0.7	0.5 – 0.7
Редукција на јакост, $SRF_{slope}$	10 – 15	5 – 10

### 6.3.3. Анализи на стабилност по дисконтинуитети

Во Табела 17 се прикажани усвоените вредности за волуменската тежина на карпестите маси ( $\gamma$ ), коефициентот за рапавост на пукнатини (JRC), резидуалниот агол на внатрешно триење ( $\phi_r$ ) и јакоста на притисок на пукнатински сидови (JCS), при анализата на стабилност по дисконтинуитети (кинематски услови на лом).

Се напоменува дека прикажаните влезни параметри во Табела 17, како и анализите по дисконтинуитети генерално, се однесуваат на посвежите зони, односно за умерено деградираните партии и карпестите маси со релативно подобар квалитет.

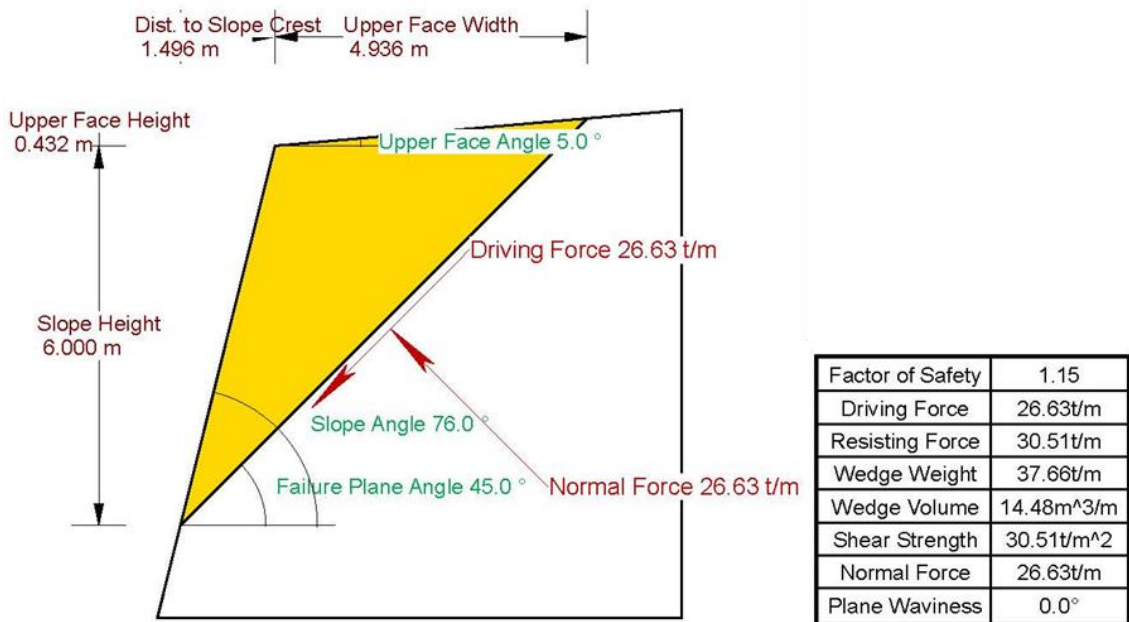
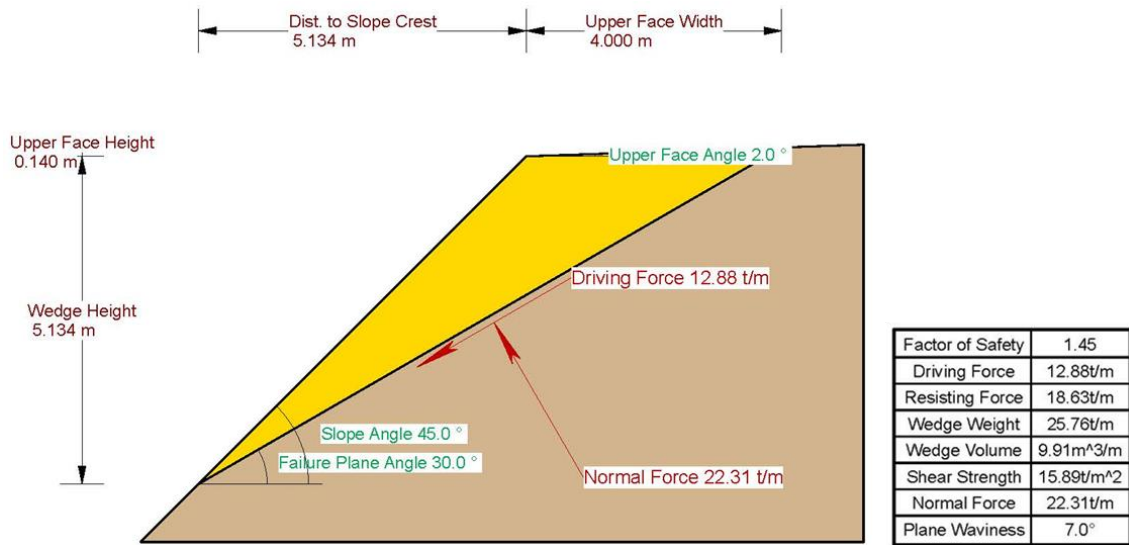
**Табела 17.** Усвоени параметри за застапените пукнатински системи

Дисконтинуитет	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	JRC [ / ]	$\phi_r$ [ ° ]	JCS [MPa]
280-330/20-50	24.0 – 25.0	6 – 8	20	10 – 16
170-200/80	25.0 – 26.0	8 – 10	23	14 – 18
140-170/30-60	25.0 – 26.0	10 – 12	22	13 – 16
110-130/70-80	25.0 – 26.0	6 – 8	21	14 – 17
220/30	24.5 – 25.5	8 – 10	21	12 – 16
30-50/60-80	25.0 – 26.0	8 – 10	22	12 – 16
70-80/70-85	25.5 – 26.5	10 – 12	23	14 – 20

Кинематските анализи, односно можноста за отцепување и лизгање на блокови, при неповолен просторен (клиновиден) или рамнински (планарен) распоред на пукнатински системи, се извршени во софтверските пакети Swedge и RocPlane од компанијата RocScience. За дефинирање на јакоста на смолкнување по пукнатини применет е емпирискиот нелинеарен критериум на лом дефиниран од страна на Barton & Bandis, 1990.

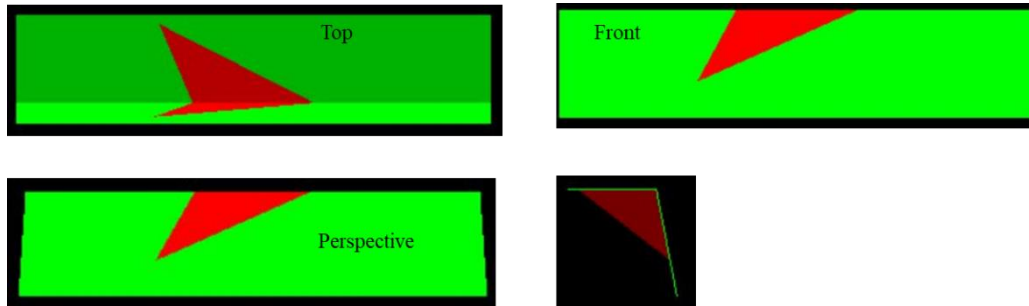
Исто така користени се и структурни стереографски дијаграми, каде се анализирани сите позначајни евидентирани и претпоставени раседи, неповолни литолошки контакти и пукнатински системи, како и елементите на пад на геометријата на косините.

На Слика 37 се прикажани дел од излезите од извршените анализи на стабилност во софтверкиот пакет RocPlane, каде е анализирана можноста од рамнински лом. Од резултатите, може да се заклучи дека вредностите на факторите на сигурност ја потврдуваат реалната состојба на лице место. Имено за косината каде не се регистрирани никакви деформации, факторот на сигурност изнесува 1.45, додека за косината каде е настанато планарно лизгање, факторот на сигурност иако не укажува на лом ( $F_s=1.15$ ), сепак е далеку од вообичаените референтни вредности.



Слика 37. Излези од програмскиот пакет RocPlane при анализа на можност од планарен лом, каде шематски се прикажани пресметковните модели и добиените резултати за карактеристична косина која е стабилна без локални деформации (горе) и за карактеристична косина каде е регистриран рамнински лом (долу).

На Слика 38 е прикажан излез од извршена анализа на стабилност во софтверскиот пакет Swedge, каде е анализирана можност од просторен лом, како резултат на пресек на две пукнатини со челото на косината. Согласно резултатите, може да се констатира дека вредноста на факторот на сигурност е за дискусија. Овие резултати ја потврдуваат и реалната состојба со косините кај овој усек, бидејќи на лице место се регистрирани одредени деформации од локален карактер кои не ја загрозуваат глобалната стабилност на усекот.



#### Analysis Results:

Analysis type=Deterministic  
 Safety Factor=1.37595  
 Wedge height(on slope)=6 m  
 Wedge width(on upper face)=1.82326 m  
 Wedge volume=9.84496 m<sup>3</sup>  
 Wedge weight=25.5969 tonnes  
 Wedge area (joint1)=37.7447 m<sup>2</sup>  
 Wedge area (joint2)=4.77114 m<sup>2</sup>  
 Wedge area (slope)=29.7425 m<sup>2</sup>  
 Wedge area (upper face)=6.39087 m<sup>2</sup>  
 Normal force (joint1)=21.5147 tonnes  
 Normal force (joint2)=3.37993 tonnes  
 Driving force=16.2149 tonnes  
 Resisting force=22.3109 tonnes

*Failure Mode:*  
 Sliding on intersection line (joints 1&2)

*Joint Sets 1&2 line of Intersection:*  
 plunge=39.3067 deg, trend=242.664 deg  
 length=10.07 m

*Trace Lengths:*  
 Joint1 on slope face=11.0964 m  
 Joint2 on slope face=8.48644 m  
 Joint1 on upper face=7.73073 m  
 Joint2 on upper face=1.89118 m

*Maximum Persistence:*  
 Joint1=11.0964 m  
 Joint2=10.07 m

*Intersection Angles:*  
 J1&J2 on slope face = 39.1745 deg  
 J1&Crest on slope face = 49.8793 deg  
 J1&Crest on upper face = 13.6415 deg  
 J2&Crest on slope face = 90.9463 deg  
 J2&Crest on upper face = 105.402 deg  
 J1&2 on upper face = 60.9563 deg

#### Joint Set 1 Data:

dip=40 deg, dip direction=230 deg  
 cohesion=0.3 tonnes/m<sup>2</sup>, friction angle=21 deg

#### Joint Set 2 Data:

dip=70 deg, dip direction=170 deg  
 cohesion=0.3 tonnes/m<sup>2</sup>, friction angle=21 deg

#### Slope Data:

dip=45 deg, dip direction=240 deg  
 slope height=6 meters  
 bench width=4 meters  
 rock unit weight=2.6 tonnes/m<sup>3</sup>  
 Water pressures in the slope=NO  
 Overhanging slope face=NO  
 Externally applied force=NO  
 Tension crack=NO

#### Upper Face Data:

dip=12 deg, dip direction=240 deg

#### Wedge Vertices:

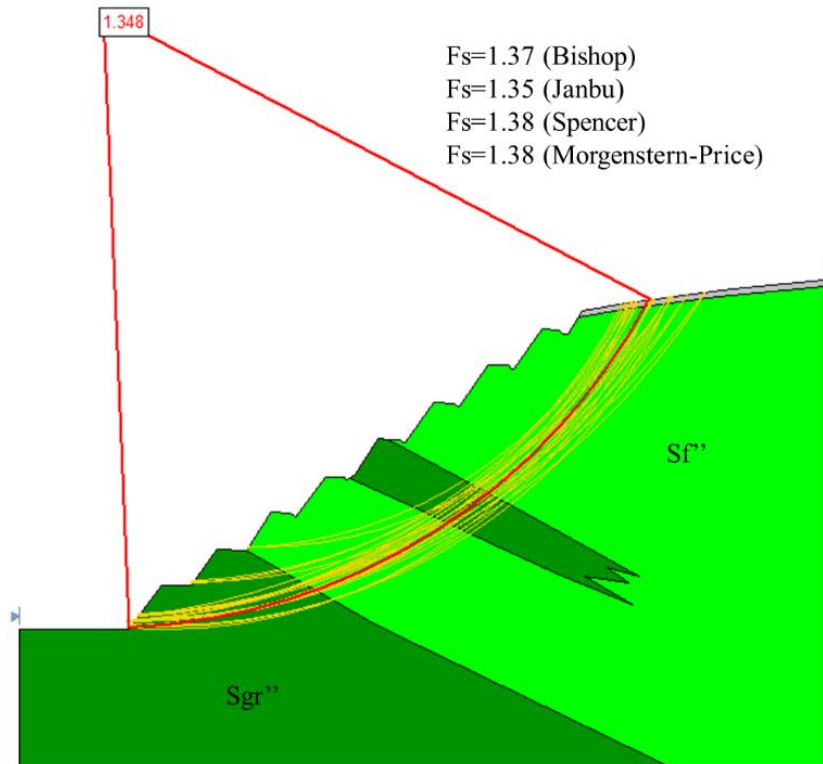
*Coordinates in Easting,Northing, Up Format*  
 1=Joint1, 2=Joint2, 3=Upper Face, 4=Slope  
 Point 124: 0, 0, 0  
 Point 134: 1.62, 9.19, 6  
 Point 234: 5.13, 3.12, 6  
 Point 123: 6.92, 3.58, 6.38

Слика 38. Излез од програмскиот пакет Swedge при анализа на можност од клиновиден лом, за карактеристична условно стабилна косина, каде се регистрирани локални деформации.

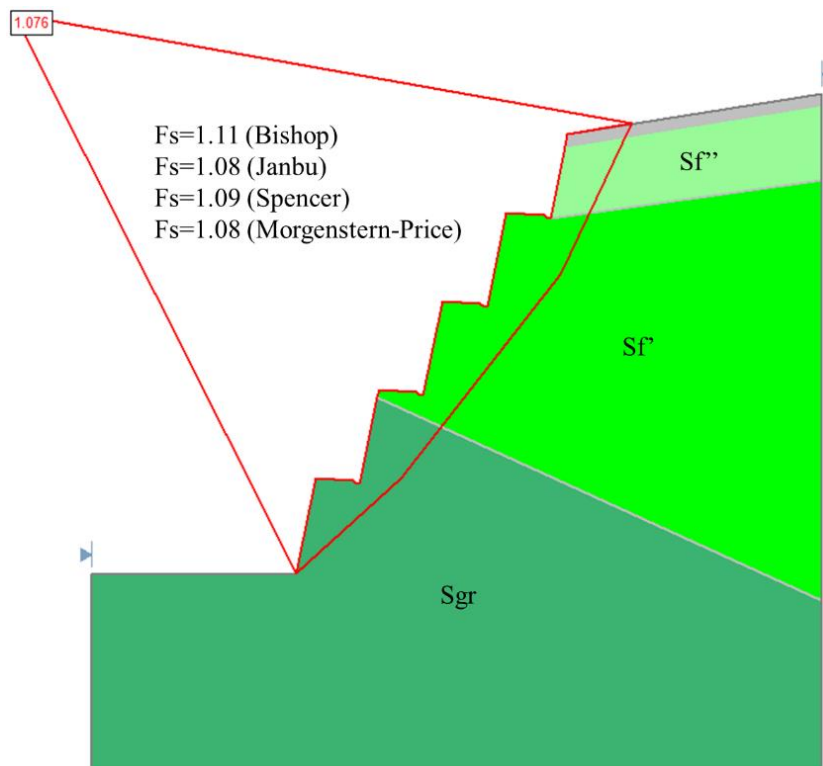
### 6.3.4. Детерминистички анализи на стабилност со методи на гранична рамнотежа

Анализите на стабилност согласно методот на гранична рамнотежа, се извршени со методите на Bishop, Janbu (corrected), Morgenstern-Price и Spencer. Детерминистичките анализи на стабилност се извршени во софтверскиот пакет Rocscience Slide. Анализите се извршени со автоматско барање на минимални фактори на сигурност за дадените геометриски и геотехнички гранични услови, со помош на кружно-цилиндрични и полигонални рамнини на лизгање.

На Слика 39 е прикажан излез од анализата на стабилност во софтверскиот пакет Slide, за косина со детектирани локални обрушувања, каде што и добиените вредности на факторот на сигурност не се во рамки на задоволителните вредности и истите се за дискусија, со оглед на тоа дека се работи за косини на усек по должина на траса на автопат. На Слика 40 е прикажан излез од анализата на стабилност во софтверот Slide, за косина каде е настанато свлекување од поголеми размери, што се потврдува и со добиените вредности на факторите на сигурност.



**Слика 39.** Излез од софтверот Slide за карактеристична условно стабилна косина, во деградирани филитични (Sf'') и графитични шкрилци (Sgr''), со кружно-цилиндрична рамнина на лизгање.

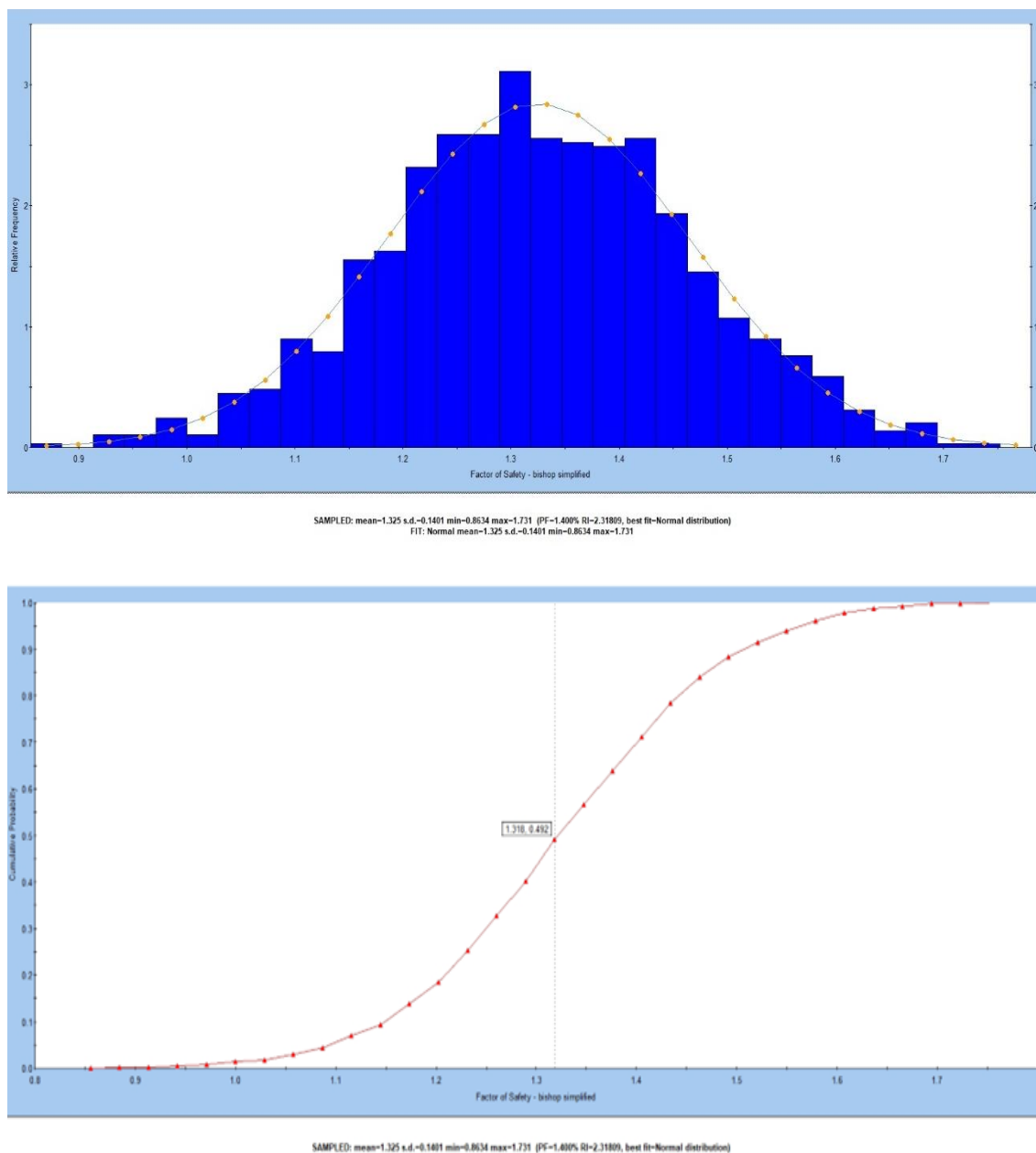


**Слика 40.** Излез од софтверот Slide за карактеристична нестабилна косина, во деградирани филитични шкрилци (Sf'') делумно деградирани филитични шкрилци (Sf') и свежи графитични шкрилци (Sgr), користејќи полигонална рамнина на лизгање.

### 6.3.5. Веројатносни (пробабилитички) анализи на стабилност

Анализите на веројатност се извршени во програмскиот пакет Rocscience Slide на истите модели каде се вршени и стандардните (детерминистички) анализи. Веројатносните анализи се извршени на критичната рамнина на лизгање т.е. на рамнината со најнизок фактор на сигурност (пресметана со детерминистичките анализи), односно користена е опцијата „Global Minimum Analysis“. Извршени се вкупно 1000 пресметки за секоја анализирана косина.

На Слика 41 се прикажани излези кои ја прикажуваат веројатноста од лом и индексот на доверливост за карактеристична условно стабилна косина, како и соодветните хистограми и кумулативни дијаграми на факторот на сигурност.



Слика 41. Излези со приказ на веројатноста од лом и соодветниот индекс на доверливост на хистограмски приказ на фреквенцијата на факторот на сигурност (горе) и кумулативната веројатност на факторот на сигурност (долу).



За веројатносна анализа, неопходно е барем еден од влезните параметри да биде дефиниран како случајна променлива (random variable), што ќе овозможи да се дефинира статичка дистрибуција на овие променливи. Тоа значи дека за секоја случајна променлива е дефинирана средна вредност која е усвоена претходно во детерминистичкиот пристап, стандардна девијација, релативен минимум и релативен максимум. Се напоменува дека релативниот минимум и релативниот максимум се разлики од средната вредност (mean) а не апсолутни вредности.

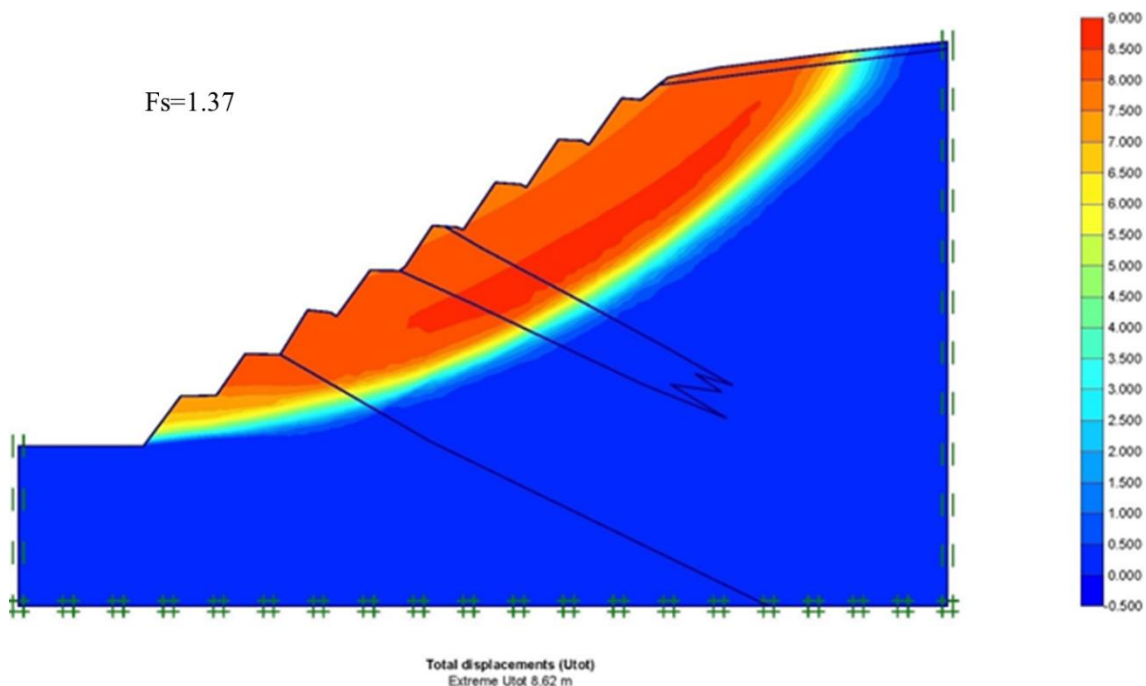
Во анализите и пресметките, како случајни променливи се избрани геолошкиот индекс на јакост (GSI), материјалната константа ( $m_i$ ) и еднооксијалната јакост на притисок (UCS).

Веројатноста за лом ( $P_f$ ), е пресметана како процентуален однос помеѓу бројот на пресметки за кои вредноста на факторот на сигурност е помала од 1.0 и вкупниот број пресметки (1000).

### 6.3.6. *Анализа на стабилност со користење на метод на конечни елементи*

Нумеричките анализи, односно анализата на состојбата на напрегања и деформации на полупросторот е извршена со методот на конечни елементи, во софтверот Plaxis 2D, каде што полупросторот е дискретизиран со користење на триаголни конечни елементи со 15 јазли и 2 степени на слобода, при што е анализирана рамнинска состојба на деформации.

На Слика 42 е прикажан излез од софтверскиот пакет Plaxis 2D, каде се прикажани вкупните поместувања за карактеристична условно стабилна косина (косина со помалку значајни, локални деформации), од каде јасно е потенцирана зоната на деформации и каде е лоцирана рамнината на лизгање.



Слика 42. Приказ на вкупните поместувања во софтверскиот пакет Plaxis 2D, за карактеристична условно стабилна косина, каде јасно се гледа рамнината на лизгање и зоната на деформации.

Согласно прикажаниот излез од нумеричката анализа (Слика 42), може да се заклучи дека обликот и диспозицијата на рамнината на свлекување, како и вредноста на факторот на сигурност се речиси идентични споредбено со анализите извршени со методите на гранична рамнотежа (Слика 39).

Се напоменува, дека при спроведување на нумеричките анализи со методот на конечни елементи, вредноста на факторот на сигурност е определена со користење на техника на намалување на јакосните параметри (shear-strength reduction) во инкременти, се додека не настане лом, каде факторот на сигурност претставува однос меѓу усвоените вредности на јакосните параметри и редуцираните вредности во моментот на лом.

#### **6.4. Интерпретација на резултатите од евалуацијата на стабилноста**

Сублиматот од извршените проценки на стабилноста на предметните косини (усеци) е презентираан табеларно каде покрај основните информации за секоја косина (наклон и тип на карпеста формација), прикажани се минималните вредности на факторот на сигурност пресметан со методот на гранична рамнотежа (МГР), методот на конечни елементи (МКЕ) и кинематски анализи, веројатноста од лом ( $P_f$ ) и индексот на доверливост ( $\beta$ ), како и вредноста на најстрмниот агол ( $\beta_Q$ ) за долгорочна стабилност добиен со методот Q-slope. Резултатите се групирани во зависност од тоа дали стабилноста е анализирана глобално или локално.

Со оглед на фактот што анализите се однесуваат на реална состојба на теренот и од вкупно 58 косини кои се предмет на истражување, кај 22 од косините е настанато значајно свлекување, кај 18 анализирани косини се забележани локални деформации, додека преостанатите 18 косини се стабилни, табеларните резултати се соодветно групирани за лесна интерпретација и носење критички заклучоци. Најпрво, во Табела 18 се прикажани резултатите од проценката на стабилноста на косините кај усеците со значајни обрушувања.

Согласно прикажаните резултати во Табела 18, може да се заклучи дека кај сите анализирани косини со регистрирано свлечиште, вредностите на факторот на сигурност пресметани со методот на гранична рамнотежа, нумеричките анализи и кинематските услови на лом, укажуваат на условно стабилни косини (лабилна рамнотежа) со фактор на сигурност поголем од 1.0. Овој аспект претставува главна мотивација за оваа истражување, да се проучат повеќе методолошки пристапи и редефинираат можните несигурности и да се даде одговор за одредените девијации на резултатите од анализите и пресметките, во однос на реалната состојба на косините на лице место. Имено, не секогаш вредностите на факторот на сигурност, веројатноста од лом, индексот на доверливост и сл., соодветсвуваат со актуелната состојба на косините на лице место.

Иако вредностите на факторите на сигурност пресметани со МГР, МКЕ и кинематските анализи, не укажуваат на лом, сепак голем дел од вредностите се блиску до вредност која индицира лабилна рамнотежа ( $F_s \sim 1.0$ ), што значи дека наклоните на косините се несоодветни за предметните карпи. Вредноста на факторот на сигурност изнесува  $F_s = 1.06 - 1.35$ .

**Табела 18.** Резултати од проценката на стабилност кај косините со регистрирано значајно свлекување

Усек	Тип на карпа	Наклон/агол на косина	Глобална анализа				Локална анализа			
			Fs МГР	Fs МКЕ	Pf [%]	$\beta$	Fs Кинем.	Pf [%]	$\beta$	$\beta_Q$ [°]
1	<i>Sf', Sf'</i>	1:1 / 45.0°	1.20	1.21	3.4	1.76	1.22	3.1	2.03	41.3
2	<i>Sqse'', Sqse'</i>	1.5:1 / 56.3°	1.34	1.33	2.1	2.46	1.23	3.4	2.40	49.9
3	<i>Sf', Sf', Sf</i>	1.5:1 / 56.3°	1.28	1.28	2.3	2.24	1.09	8.9	1.53	36.8
4	<i>Sf', Sqse', Sqse</i>	3:1 / 71.6°	1.17	1.18	4.9	1.55	1.08	9.4	1.20	59.2
5	<i>Sf', Sgr'</i>	1.5:1 / 56.3°	1.11	1.12	7.3	1.11	1.14	7.1	1.23	42.9
6	<i>Sf', Sgr'</i>	3:1 / 71.6°	1.13	1.13	6.7	1.16	1.12	7.8	1.18	53.2
7	<i>Sf', Sgr', Sf, Sgr</i>	5:1 / 78.7°	1.08	1.10	9.6	1.08	1.26	2.6	1.70	54.9
8	<i>Sqse', Sgr'</i>	3:1 / 71.6°	1.07	1.07	8.9	1.06	1.20	3.9	1.34	31.4
9	<i>Sqse'', Sqse'</i>	5:1 / 78.7°	1.13	1.14	6.9	1.19	1.26	2.7	1.73	47.5
10	<i>Sf', Sgr', Sf, Sgr</i>	5:1 / 78.7°	1.11	1.12	7.1	1.23	1.18	4.4	1.37	62.9
11	<i>Sf', Sgr', Sf, Sgr</i>	5:1 / 78.7°	1.12	1.13	6.7	1.12	1.06	9.8	1.09	48.9
12	<i>Sqse'', Sqse'</i>	1.5:1 / 56.3°	1.11	1.11	8.1	1.15	1.15	7.9	1.23	21.5
13	<i>Sf'', Sgr'', Sf</i>	1:1.25 / 38.7°	1.14	1.15	7.7	1.29	1.24	3.3	1.65	13.0
14	<i>Sf'', Sf'</i>	1:1 / 45.0°	1.17	1.16	5.4	1.34	1.25	2.7	1.80	24.4
15	<i>Sf', Sqse'</i>	5:1 / 78.7°	1.27	1.26	2.4	2.08	1.22	3.1	2.14	66.0
16	<i>Sf', Sgr', Sgr</i>	5:1 / 78.7°	1.25	1.25	2.3	2.05	1.35	1.9	2.50	42.5
17	<i>Sf', Sgr'</i>	4:1 / 76.0°	1.14	1.15	6.2	1.35	1.14	6.8	1.42	43.4
18	<i>Sqse'', Sgr', Sgr</i>	5:1 / 78.7°	1.09	1.10	9.1	1.16	1.16	5.3	1.30	39.3
19	<i>Sf', Sqse'</i>	5:1 / 78.7°	1.28	1.27	2.3	2.19	1.22	3.6	2.11	39.3
20	<i>Sf'</i>	3:1 / 71.6°	1.25	1.24	2.8	2.09	1.19	4.2	1.91	46.9
21	<i>Sqse', Sgr'</i>	5:1 / 78.7°	1.19	1.20	4.6	1.74	1.10	8.9	1.42	58.2
22	<i>Sf', Sgr', Sqse'</i>	5:1 / 78.7°	1.12	1.12	7.5	1.24	1.06	9.7	1.14	44.4

\* *Sf*: филитични шкрилци; *Sqse*: кварц-серицитски шкрилци, *Sgr*: графитични шкрилци, '' (прим): делумно деградирани карпи, '' (секундум): комплетно деградирани карпи.

Веројатноста од лом (Pf), варира во граници 1.9% – 9.8%, додека индексот на доверливост ( $\beta$ ) изнесува 1.06 – 2.50. Овие параметри подобро ја отсликуваат реалната состојба на косините на лице место, бидејќи во праксата, за висок ранг на објекти од инфраструктурата, горната граница на веројатноста од лом изнесува околу 2%, додека горната граница на индексот на доверливост изнесува околу 2.5.

Q-slope методот, за сите анализирани косини со регистрирани свлечишта, укажува на нестабилност, каде проценетиот најстрмен агол ( $\beta_Q$ ) за обезбедување на долгорочна стабилност е значително помал од аголот со кој се изведени косините, каде разликата изнесува и до 39°.

Во Табела 19 се прикажани резултатите за усечите со помали деформации од локален карактер. Согласно овие резултати, може да се констатира дека за косините со локална нестабилност, вредностите на факторот на сигурност пресметан со методот на гранична рамнотежа и нумеричките анализи се многу слични и генерално се околу граничната вредност за локална стабилност ( $F_s \sim 1.3$ ). Имено, вредностите на факторите на сигурност изнесуваат  $F_s = 1.20 - 1.39$  за глобална стабилност, односно  $F_s = 1.12 - 1.36$  за локална стабилност на косините. Кинематските анализи, со исклучок на неколку изолирани случаи, укажуваат на нешто пониски вредности на факторот на сигурност, додека за одреден дел од анализираниите косини воопшто не постои можност од лизгање по дисконтинуитети, поради релативно благите наклони на косините во споредба со косините со значајни деформации.

**Табела 19.** Резултати од проценката на стабилност кај косините со минорни (локални) деформации

Усек	Тип на карпа	Наклон/агол на косина	Глобална анализа				Локална анализа			
			$F_s$ МГП	$F_s$ МКЕ	Pf [%]	$\beta$	$F_s$ Кинем.	Pf [%]	$\beta$	$\beta_Q$ [°]
1	<i>Sf</i>	1:1 / 45.0°	1.36	1.37	0.9	2.57	/	/	/	39.3
2	<i>Sf'</i> , <i>Sf</i> , <i>Sf</i>	1:1 / 45.0°	1.33	1.32	1.6	2.43	1.24	2.7	2.01	26.0
3	<i>Sf</i> , <i>Sgr'</i>	1:1 / 45.0°	1.34	1.32	1.7	2.45	/	/	/	54.0
4	<i>Sf</i>	1:1.5 / 33.7°	1.33	1.35	1.4	2.37	1.12	5.3	1.65	40.2
5	<i>Sf</i>	1:1 / 45.0°	1.31	1.31	1.5	2.24	/	/	/	51.2
6	<i>Sqse'</i> , <i>Sgr'</i> , <i>Sqse</i>	1.5:1 / 56.3°	1.39	1.40	0.8	2.66	1.33	1.3	2.36	49.9
7	<i>Sf</i> , <i>Sgr'</i> , <i>Sf</i> , <i>Sgr</i>	1.5:1 / 56.3°	1.38	1.39	0.9	2.53	1.20	3.8	1.83	61.9
8	<i>Sf''</i> , <i>Sgr''</i> , <i>Sgr'</i>	1:1 / 45.0°					1.34	1.0	2.59	32.7
9	<i>Sqse'</i> , <i>Sgr'</i> , <i>Sf</i> , <i>Sgr</i>	1.5:1 / 56.3°	1.37	1.37	0.8	2.47	1.22	2.4	2.15	44.4
10	<i>Sqse''</i> , <i>Sf'</i> , <i>Sf</i>	1:1 / 45.0°					/	/	/	42.7
11	<i>Sf''</i> , <i>Sf</i> , <i>Sgr'</i> , <i>Sf</i>	1:1 / 45.0°	1.28	1.29	2.4	2.17	1.35	1.0	2.50	40.3
12	<i>Sf</i> , <i>Sgr'</i> , <i>Sf</i> , <i>Sgr</i>	1.5:1 / 56.3°	1.36	1.35	1.0	2.33	1.29	2.2	2.07	51.8
13	<i>Sf''</i> , <i>Sf</i>	1:1 / 45.0°	1.29	1.29	2.3	2.13	1.32	1.5	2.29	34.0
14	<i>Sf''</i> , <i>Sf</i>	2:1 / 63.4°	1.22	1.20	3.6	2.02	/	/	/	54.3
15	<i>Sqse''</i> , <i>Sqse'</i> , <i>Sgr'</i>	1:1.5 / 33.7°	1.37	1.37	0.6	2.47	1.34	1.4	2.43	34.3
16	<i>Sqse''</i> , <i>Sqse'</i> , <i>Sgr'</i>	1:1.5 / 33.7°	1.39	1.40	0.7	2.68	1.36	1.2	2.57	29.2
17	<i>Sqse'</i> , <i>Sqse</i> , <i>Sf</i>	1:1 / 45.0°	1.35	1.37	1.1	2.47	1.31	1.5	2.21	43.1
18	<i>Sf</i> , <i>Sf</i>	2:1 / 63.4°	1.37	1.38	0.8	2.71	1.29	2.4	2.31	61.9

\* *Sf*: филитични шкрилци; *Sqse*: кварц-серицитски шкрилци, *Sgr*: графитични шкрилци, ' (прим): делумно деградирани карпи, '' (секундум): комплетно деградирани карпи.

Веројатноста од лом ( $P_f$ ), се движи во границите 0.6% – 3.6% за глобалната стабилност, односно 1.0% – 5.3% за локалната стабилност, додека индексот на доверливост ( $\beta$ ), се движи во границите 2.02% – 2.71% за глобалната стабилност, односно 1.65% – 2.59% за локалната стабилност, што ја потврдува состојбата на косините, односно кај овие косини не се појавени знаци за глобална нестабилност, додека на лице место е регистрирана локална нестабилност.

Емпириската проценка на најстрмниот агол ( $\beta_Q$ ) кој ја обезбедува долгорочната стабилност, согласно Q-slope методот, кај поголем дел од усеците е помал од анализираните косини ( $1^\circ - 19^\circ$ ), но за одреден дел од косините е за неколку степени поголем ( $1^\circ - 9^\circ$ ).

Сите методолошки пристапи индицираат дека овие косини (Табела 19) се на самата граница на исцрпеност и даваат индикации дека наклонот треба да биде со нешто помала вредност или дека треба да се применат дополнителни мерки за стабилизација и заштита. Ова е потврдено и на лице место од состојбата на овие косини каде има локални деформации со одреден потенцијал за интензивирање на овие неповолни појави и прогресирање кон свлекување со позначителен карактер.

Анализите и пресметките за стабилните косини (Табела 20) согласно сите методи, укажуваат на задоволителна стабилност и во исто време дека косините не се предимензионирани.

Вредностите на факторот на сигурност пресметани со методите на гранична рамнотежа и методот на конечни елементи, се во рамки на препорачаните вредности, каде што за глобалната стабилност  $F_s = 1.39 - 1.60$ , додека за локалната стабилност  $F_s = 1.29 - 1.86$ . Треба да се напомене, дека иако за добар дел од анализираните косини воопшто не постои можност од отцепување на блокови, сепак, со исклучок на неколку случаи, факторот на сигурност за локална стабилност е релативно помал во споредба со анализите на глобалната стабилност.

Веројатноста од лом ( $P_f$ ), се движи до 0.5% за глобалната стабилност, односно до 1.5% за локалната стабилност, додека индексот на доверливост ( $\beta$ ), се движи во граници 2.61% – 3.41% за глобална стабилност и 2.38% – 5.73% за локална стабилност, што ја потврдува состојбата на косините, односно овие косини немаат знаци за глобална нестабилност ниту се забележани локални деформации.

Од друга страна сепак постои одреден процент на веројатност од лом, додека и дел од вредностите на индексот на доверливост се за дискусија. Ова значи дека во секој случај, наклоните на овие стабилни косини, не се предимензионирани.

Проценетата вредност на најстрмниот агол ( $\beta_Q$ ) кој ја обезбедува долгорочната стабилност, според Q-slope методот, е многу слична со наклонот на анализираните косини, со мали разлики на проценетите агли кои обезбедуваат долгорочна стабилност, како во позитивен така и во негативен правец ( $\pm 8^\circ$ ).

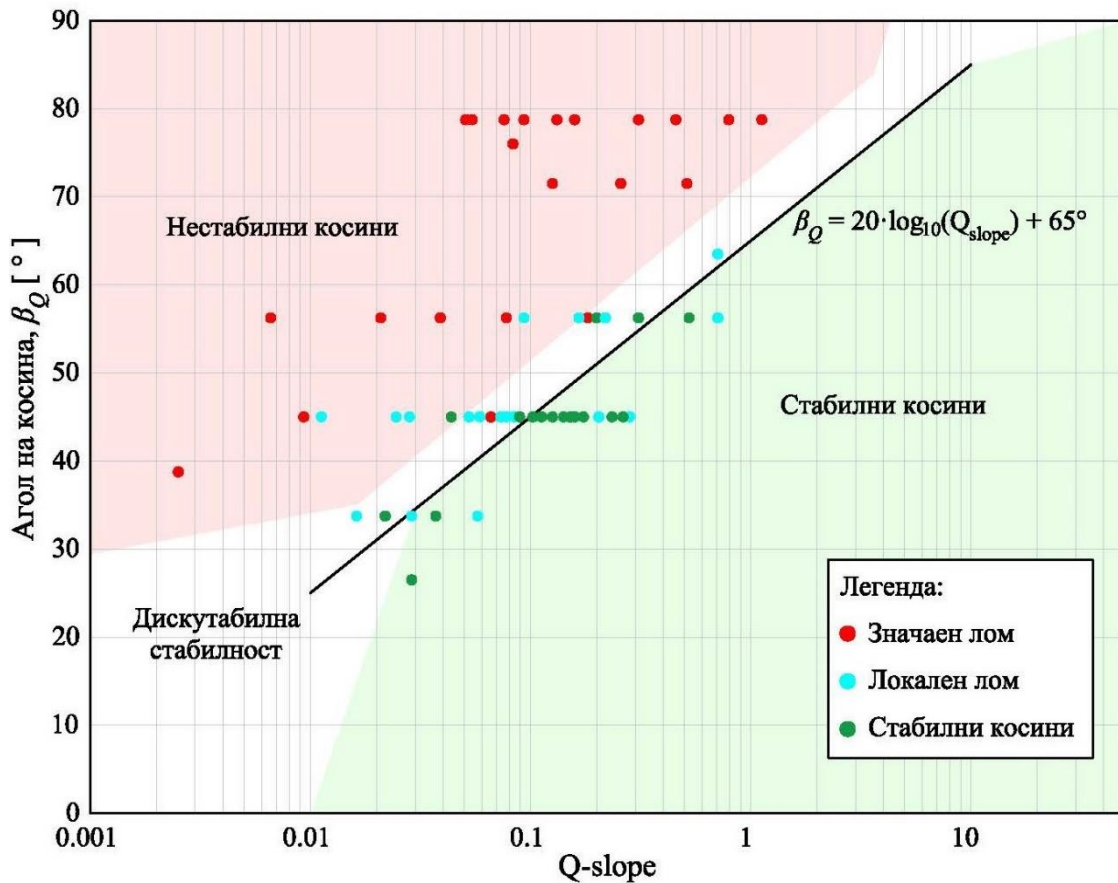
Може да се заклучи, дека сите методолошки пристапи за анализираните косини без знаци на нестабилност (Табела 20), индицираат дека овие косини се соодветно проектирани, што е потврдено и на лице место, каде не се забележани појави на нестабилност кај овие усеци.

**Табела 20.** Резултати од проценката на стабилност кај стабилните косини

Усек	Тип на карпа	Наклон/агол на косина	Глобална анализа				Локална анализа			
			Fs МГР	Fs МКЕ	Pf [%]	$\beta$	Fs Кинем.	Pf [%]	$\beta$	$\beta_0$ [°]
1	<i>Sf</i>	1:1 / 45.0°	1.44	1.44	0.3	2.66	1.53	0.1	3.23	48.3
2	<i>Sf', Sf, Sf</i>	1:1 / 45.0°	1.52	1.50	0.2	2.94	1.29	1.4	2.38	53.4
3	<i>Sf', Sgr'</i>	1:1 / 45.0°	1.46	1.47	0.4	2.71	1.86	0.0	5.73	48.4
4	<i>Sf</i>	1.5:1 / 56.3°	1.48	1.48	0.2	2.75	1.38	1.0	2.53	55.9
5	<i>Sf</i>	1.5:1 / 56.3°	1.48	1.49	0.2	2.71	1.42	0.6	2.80	55.1
6	<i>Sqse', Sgr', Sqse</i>	1:1 / 45.0°					/	/	/	59.4
7	<i>Sf', Sgr', Sf, Sgr</i>	1.5:1 / 56.3°	1.45	1.46	0.3	2.65	/	/	/	55.7
8	<i>Sf', Sgr'', Sgr'</i>	1:1 / 45.0°					/	/	/	60.7
9	<i>Sqse', Sgr', Sf, Sgr</i>	1:1 / 45.0°	1.55	1.53	0.0	3.12	1.55	0.2	3.47	45.2
10	<i>Sqse'', Sf', Sf</i>	1:1.5 / 33.7°	1.42	1.41	0.3	2.61	1.42	0.6	2.82	36.5
11	<i>Sf'', Sf, Sgr', Sf</i>	1:1 / 45.0°	1.59	1.58	0.0	3.41	1.37	0.9	2.55	48.7
12	<i>Sf', Sgr', Sf, Sgr</i>	1:1 / 45.0°	1.51	1.51	0.1	3.00	1.63	0.2	4.20	59.4
13	<i>Sf'', Sf</i>	1:1 / 26.6°	1.49	1.49	0.1	4.06	/	/	/	34.3
14	<i>Sf'', Sf</i>	1:1.5 / 33.7°	1.60	1.61	0.0	3.33	1.42	0.6	2.74	33.4
15	<i>Sqse'', Sqse', Sgr'</i>	1:1 / 45.0°	1.47	1.45	0.3	3.32	1.29	1.5	2.43	43.8
16	<i>Sqse'', Sqse', Sgr'</i>	1:1 / 45.0°	1.44	1.43	0.2	2.63	1.31	1.2	2.41	46.9
17	<i>Sqse', Sqse, Sf</i>	1:1 / 45.0°	1.41	1.40	0.4	2.66	1.46	0.4	3.07	45.8
18	<i>Sf', Sf</i>	2:1 / 63.4°	1.39	1.39	0.5	2.57	/	/	/	69.3

\* *Sf*: филитични шкрилци; *Sqse*: кварц-серицитски шкрилци, *Sgr*: графитични шкрилци, '(прим): делумно деградирани карпи, '' (секундум): комплетно деградирани карпи.

На Слика 43 е презентирани графички сублимат од сите анализи и пресметки за проценката на стабилноста на предметните косини, согласно Q-slope дијаграмот на Barton & Var, 2015, 2017. Точките со црвена боја на дијаграмот ги означуваат косините со значителен лом, светло-сините (цијан боја) точки ги претставуваат косините со локален лом, додека точките со зелена боја на дијаграмот претставуваат косините кои се стабилни. На дијаграмот, од страна на авторите е проектирана линија која означува дискутабилна стабилност, односно над оваа линија се смета дека анализираните косини се нестабилни додека сите косини кои се наоѓаат под оваа линија се третираат дека се стабилни. Оваа линија е проектирана за веројатност на лом од 1%.



Слика 43. Сублимиран графички приказ на анализираниите косини во истражувањето, преку Q-slope дијаграмот, предложен од страна на Barton и Var, 2015, 2017.

Од дијаграмот на Слика 43, може да се заклучи дека сите косини со значителен лом се лоцирани над границата која означува дискутабилна стабилност, каде значителен дел се длабоко во зоната која укажува на нестабилност. За косините со локална нестабилност постојат одредени девијации, каде најголемиот дел од овие косини се во зона на дискутабилна стабилност, додека мал дел се класифицирани како стабилни а мал дел како нестабилни косини. Најголемиот дел од косините без појава на нестабилност се во стабилната зона, но треба да се напомене дека мал дел се наоѓаат во зона на дискутабилна стабилност. Согласно овие проценки, може да се заклучи дека иако има одредени мали девијации, сепак ова е очекувано за вакво голем број на анализирани косини, но генерално, проценката на стабилноста во најголем дел ја потврдува реалната состојба на косините на лице место (in-situ).

Треба да се напомене, дека веројатноста на лом, добиена со веројатносниот пристап за косините кои се наоѓаат во зона на проектираната линија за веројатност на лом од 1%, се движи во границите 0.2% – 2.4%, што претставува потврда за адекватноста на емпирискиот пристап Q-slope, особено за првични проценки на стабилноста, без користење на софистицирани софтвери и алатки.

Иако резултатите од емпирискиот метод Q-slope нема да бидат составен дел од клучните параметри кои ќе бидат елаборирани во продолжение, сепак овој метод заедно со методот SSR (Taheri et al., 2006 и Taheri и Tani, 2007) помогна во формирање на идеја за инкорпорирање на одредена геометриска карактеристика при проценката на ризикот од обрушување.

## 7. ПРЕДЛОГ КЛАСИФИКАЦИОНЕН СИСТЕМ ЗА РАНГИРАЊЕ НА ХАЗАРДОТ КАЈ КОСИНИ ВО КАРПЕСТИ МАСИ СО СЛАБ КВАЛИТЕТ

Хазардот поврзан со обрушување на косините, е најчестиот проблем во транспортната инфраструктура и последиците можат да бидат катастрофални ако опасностите се игнорираат. Хазардот претставува веројатност за активирање на одреден неповолен процес, вклучувајќи го неговиот интензитет и обем, додека ризикот претставува веројатност за активирање на одреден процес, вклучувајќи го интензитетот на штети кои ќе се предизвикаат.

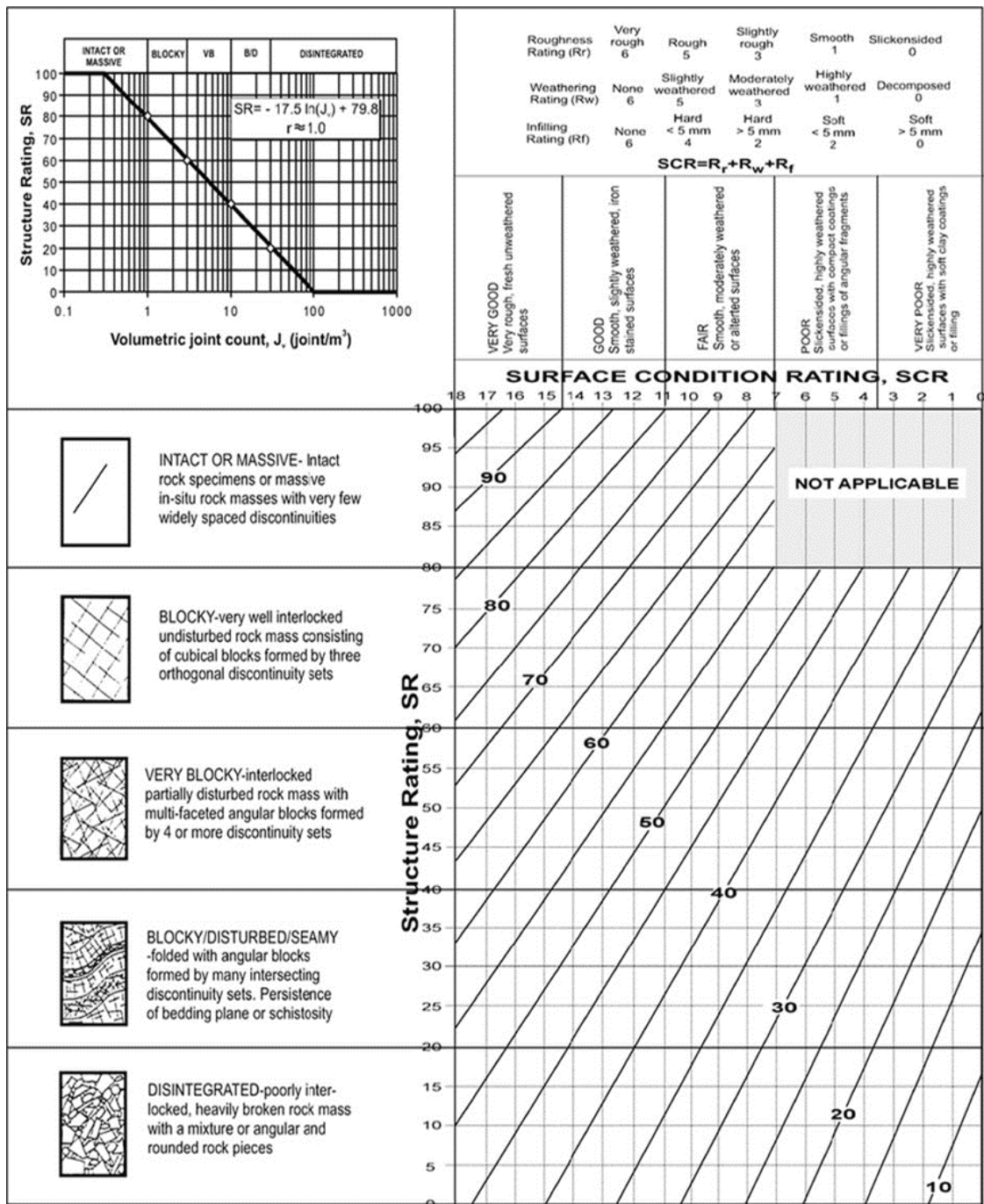
Во овој докторски труд предложена е класификација за рангирање на индексот на хазард, која претставува модифицирана верзија на системот за рангирање на хазард од одрони (Rockfall Hazard Rating System, Pierson et al., 1990). Во предложениот систем, одредени категории од оригиналниот RHRS се заменети со нови категории за рангирање. Имено, ефективност на ров, просечен ризик на возило, процент од растојанието на гледање за одлучување, ширина на коловоз вклучувајќи и асфалтирани банкини, волумен на одронет материјал и историјат на одрони од карпи се заменети со ранг на пат, наклон на косина, геолошки индекс на јакост (GSI) и мерки за заштита. Системот се состои од 8 категории и рангирањето може да биде спроведено на релативно лесен и брз начин. Иако класификациониот систем се заснова на индивидуална евалуација, сепак, единствениот субјективен параметар претставува геолошкиот индекс на јакост. Предложениот систем за рангирање и класификација на хазардот за косини кај карпи со слаб квалитет е прикажана во Табела 21.

**Табела 21.** Систем за рејтинг на хазард за косини кај карпи со слаб квалитет

Категорија	Рејтинг			
	1.5	3	6	12.5
Ранг на пат	Локален	Регионален	Експресен	Автопат
Висина на косина	< 10 m	10 – 20 m	20 – 30 m	> 30 m
Агол на косина	< 30°	30° – 40°	40° – 50°	> 50°
Состојба на пукнатински системи	Дисконтинуални Поволна ориентација	Континуални Поволна ориентација	Дисконтинуални Неповолна ориентација	Континуални Неповолна ориентација
GSI	> 70	50 – 70	25 – 50	< 25
Услови на подземна вода	Суво	Влажно	Повремена појава на вода на косина	Континуално течење на вода
Климатски услови	Слаби до умерени врнежи, без мрзнење	Слаби до умерени врнежи, кратко мрзнење	Умерени врнежи, кратко до долго мрзнење	Силни врнежи, кратко до долго мрзнење
Мерки за заштита	Потпорни конструкции	Заштитни мрежи, анкери, прскан бетон	Берми на косини или во ножица	/
<b>Рејтинг и класификација на хазард</b>	<b>12 – 30</b> <b>Низок</b>	<b>30 – 50</b> <b>Среден</b>	<b>50 – 70</b> <b>Висок</b>	<b>70 – 100</b> <b>Многу висок</b>



Се напоменува, дека висината и наклонот на косина се однесуваат на вкупната висина на косината и генералниот наклон на косина, односно доколку постојат берми истото треба да се земе во предвид при евалуацијата. За дефинирање на геолошкиот индекс на јакост (GSI), се препорачува да се користи модифицираниот квантитативен пристап предложен од страна на Sonmez & Ulusay, 2002 (Слика 44). Зависно од конечната вредност на индексот на хазард, дефиниран е и степенот на хазардот, кој треба соодветно да се земе во предвид во процесот на планирање и проектирање. Односно при повисок степен на хазард треба да се користат доверливи параметри, повисоки вредности на факторот на сигурност или пониска веројатност од лом, за да може да се „покрие“ ризикот во фаза на експлоатација.



Слика 44. График на модифицирана GSI класификација (Sonmez & Ulusay, 2002).

## 7.1. Проценка на хазардот за анализираниите косини во истражувањето

За посеопфатна интерпретација на резултатите и проектирање на автентични шематски дијаграми за проценка на ризикот, извршено е и раѓирање на индексот на хазард за анализираниите косини.

Во Табела 22 е даден сумарен приказ од рангирањето и класификацијата на хазардот за сите анализирани косини, каде за секоја категорија е наведен бројот на косини кои припаѓаат во соодветната ќелија на рангирање, обележани со црвена боја во заграда.

**Табела 22.** Резултати од рангирањето на хазардот за анализираниите косини

Категорија	Рејтинг			
	1.5	3	6	12.5
Ранг на пат	Локален (0)	Регионален (0)	Експресен (0)	Автопат (58)
Висина на косина	< 10 m (2)	10 – 20 m (15)	20 – 30 m (2)	> 30 m (39)
Агол на косина	< 30° (7)	30° – 40° (26)	40° – 50° (9)	> 50° (16)
Состојба на пукнатински системи	Дисконтинуални Поволна ориентација (12)	Континуални Поволна ориентација (24)	Дисконтинуални Неповолна ориентација (10)	Континуални Неповолна ориентација (12)
GSI	75 – 100 (0)	50 – 75 (0)	25 – 50 (25)	0 – 25 (33)
Услови на подземна вода	Суво (21)	Влажно (26)	Повремена појава на вода (9)	Континуално течење на вода (2)
Климатски услови	Слаби до умерени врнежи, без мрзнење (0)	Слаби до умерени врнежи, кратко мрзнење (0)	Умерени врнежи, кратко до долго мрзнење (0)	Силни врнежи, кратко до долго мрзнење (58)
Мерки за заштита	Потпорни конструкции (0)	Заштитни мрежи, анкери, прскан бетон (0)	Берми на косини или во ножица (58)	/ (0)
Рејтинг и класификација на хазард	12 – 30 Низок (0)	30 – 50 Среден (0)	50 – 70 Висок (45)	75 – 100 Многу висок (13)

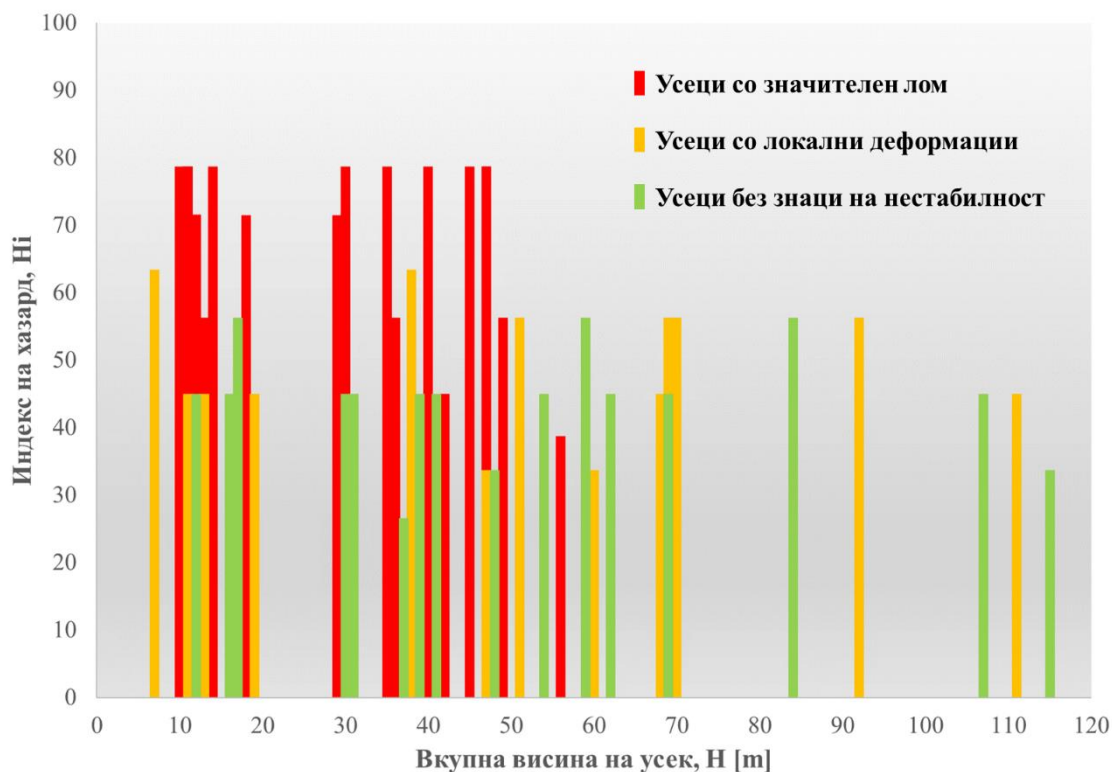
Согласно предложената класификација, може да се заклучи дека за најголемиот дел од косините (45) индексот на хазард е висок, додека преостанатите анализирани косини (13) се категоризирани со многу висок рејтинг на хазардот. Треба да се потенцира, дека ниту една од анализираниите косини не припаѓа во категорија со среден или низок хазард.

Ваквиот рејтинг на косините, во најголем дел се должи на категоријата (рангот) на патот, неповолните климатски услови, минорните мерки за заштита, големата висина на косините, како и релативно ниските вредности на геолошкиот индекс на јакост (GSI).

Во однос на условите на косините на лице место, за косините со значително обрушување, 10 анализирани косини припаѓаат во категорија со високо ниво на hazard, додека 12 од анализираниите косини се класифицирани со многу висок степен на hazard.

За косините со локални помалку значајни деформации, како и за косините без регистрирани деформации и потенцијална нестабилност, степенот на hazard во најголем дел е висок и за мал дел од овие анализирани косини, степенот на hazard е многу висок. Бројот на косини класифицирани со висок степен на hazard изнесува 16 косини со локални деформации и 16 косини без знаци на нестабилност, додека бројот на косини класифицирани со многу високо ниво на hazard изнесува 2 косини со минорни незначајни обрушувања и 2 косини каде не се забележани појави на нестабилност.

На Слика 45 прикажана е зависност помеѓу индексот на hazard и вкупната висина на анализираниите усеци, каде е дадена и информација во однос на стабилноста на косините на лице место.



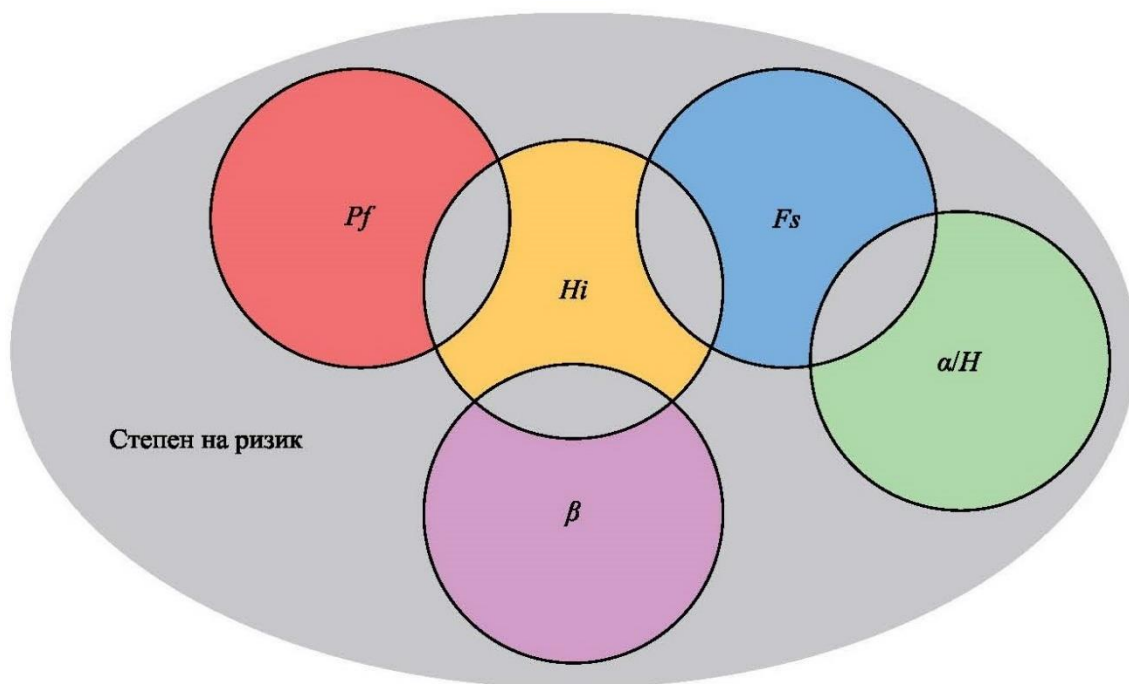
Слика 45. Графичка зависност помеѓу индексот на hazard и квалитетот на карпеста маса (горе), односно вкупната висина на усеците (долу) кои се дел од истражувањето.

## 8. МЕТОДОЛОГИЈА ЗА ПРОЦЕНКА НА РИЗИК ОД ПОЈАВА НА НЕСТАБИЛНОСТ КАЈ КАРПИ СО СЛАБ КВАЛИТЕТ

### 8.1. Краток осврт на генералниот концепт на методологијата

Предложената методологија за проценка на ризикот од појава на нестабилност кај карпи со слаб квалитет, се заснова на корелации помеѓу неколку клучни параметри: фактор на сигурност ( $F_s$ ), веројатност од лом ( $P_f$ ), индекс на доверливост ( $\beta$ ), индекс на хазард ( $H_i$ ) и геометриска карактеристика – односот помеѓу аголот и висината на разгледуваната косина ( $\alpha/H$ ). Доколку се разгледува локална косина тогаш геометриската карактеристика се однесува на локалната косина (берма), но доколку се разгледува глобално проблемот, тогаш се користат генералниот агол и висината на предметниот усек. Аголот на косината се изразува во степени, додека висината на косината се евалуира во метри.

Идејата е преку интерпретација на резултатите од меѓусебните зависимости на клучните параметри, да се процени степенот на ризик на одредена косина во карпеста маса со слаб квалитет. На Слика 46, шематски е прикажана зависноста на клучните параметри во дефинирањето на степенот на ризик.



Слика 46. Меѓусебна зависност на клучните параметри во докторскиот труд, презентирани во форма на Венов дијаграм и нивно влијание во одредување на степенот на ризик.

Од дијаграмот може да се заклучи, дека степенот на ризик зависи од сите параметри во елипсата (Слика 46), особено од интерпретацијата на одредени меѓусебни зависимости. Имено, главниот акцент во истажувањето е ставен на зависностите  $F_s - H_i$ ,  $F_s - \alpha/H$ ,  $P_f - H_i$  и  $\beta - H_i$ .

Меѓусебните директни и индиректни зависимости помеѓу овие параметри се презентирани на оригинални графикони, преку кои може на релативно лесен начин да се процени стабилноста на косините во карпести средини со слаб квалитет.

## 8.2. Предлог шематски графикони за проценка на ризик од обршување кај карпести маси со слаб квалитет

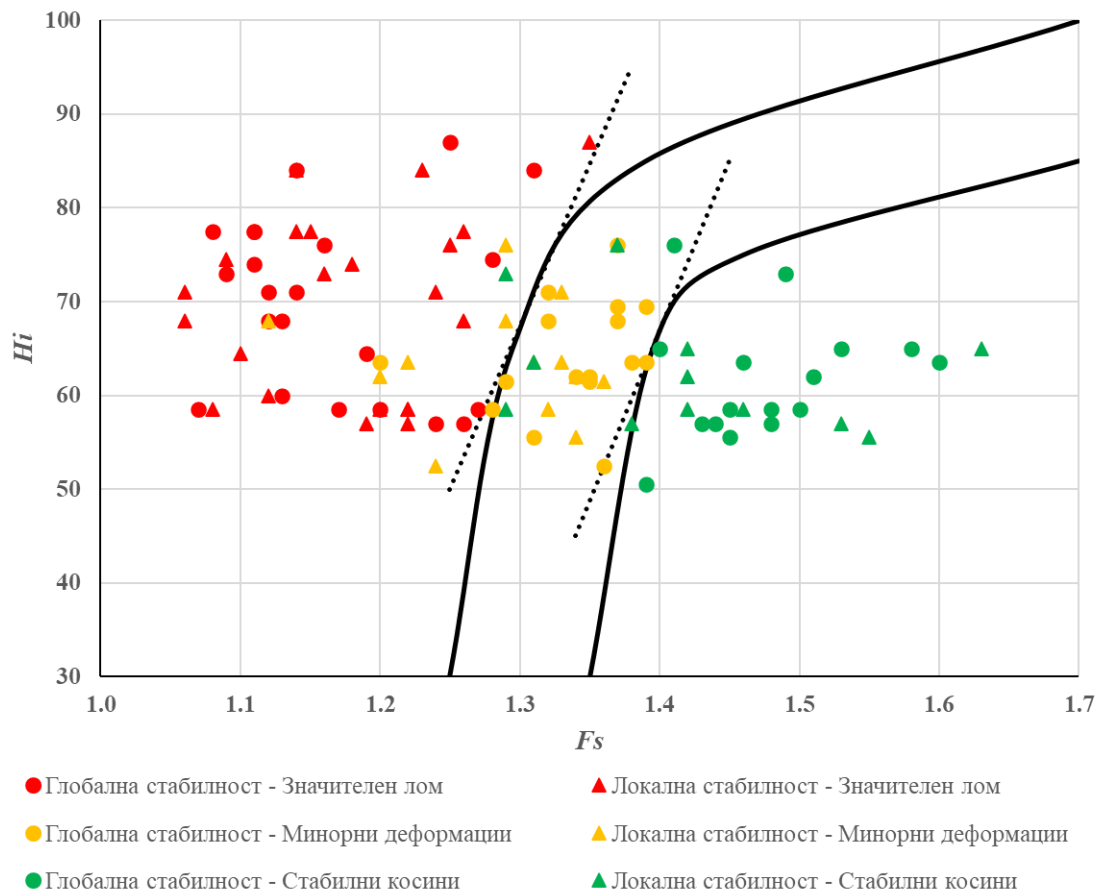
Графичките дијаграми за проценка на ризикот кај карпести маси со слаб квалитет, се конструирани согласно добиените резултати во истражувањето, при проценката на стабилноста и рангирањето на хазардот.

Имајќи во предвид дека 18 од анализираните косини се стабилни и без видливи знаци на потенцијална нестабилност, кај 18 косини се појавени помалку значајни (локални) обршувања но и можност од дополнителни слични деформации, додека кај 22 од косините се регистрирани значајни свлечишта и развиени се нестабилни зони со релативно голем опсег, при интерпретацијата на резултатите ќе биде извршена дистинкција помеѓу разгледуваните косини. Идејата на која се базира предложениот методолошки пристап, се состои од проектирање на референтни (гранични) зони на дијаграмите, со кои ќе се изврши разграничување на косините со значителни деформации, косините со локална нестабилност и косините без видливи деформации, а со тоа ќе се изврши и дистинкција на нивото на ризик за анализираните косини.

Во продолжение на овој докторски труд, се претставени автентичните графички дијаграми со резултатите од проценката на стабилноста и евалуацијата на нивото на хазард, преку меѓусебна зависност на претходно усвоените клучни параметри. Косините со значајни деформации се претставени со црвена боја, косините со локални, помалку значајни деформации се интерпретирани со темно-жолта боја, додека косините кои немаат знаци на нестабилност се презентирани со зелена боја. Анализите и проценката на стабилност се извршени на глобално и на локално ниво, каде што на дијаграмите со кругови се интерпретирани резултатите од глобалната стабилност, додека со триаголници се интерпретирани резултатите од локалната стабилност на косините.

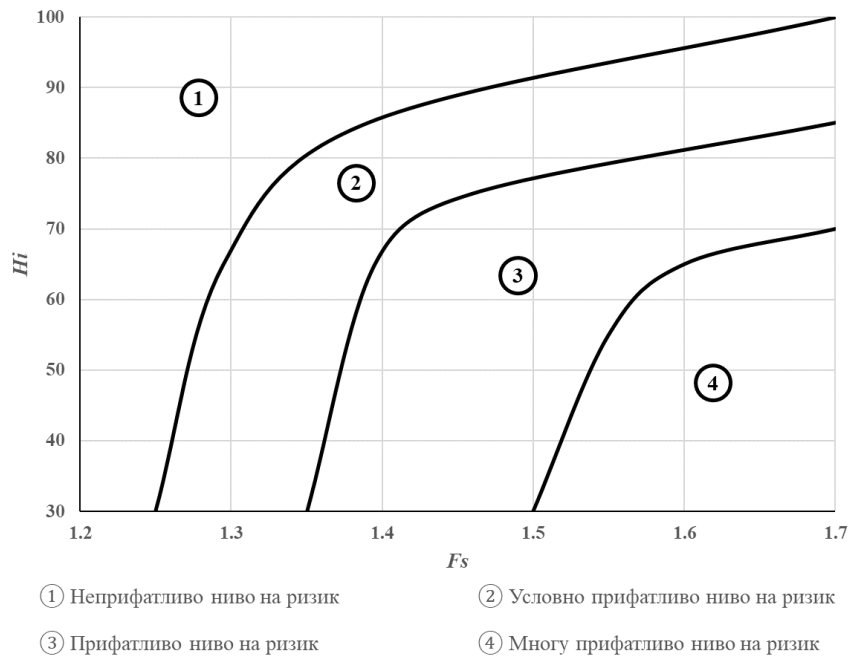
Позицијата на интерпретираните резултати, всушност претставува индикација за степенот на ризик, земајќи ги во предвид условите на косините на лице место. Согласно на овој концепт, многу е јасно дека за косините со значителен лом (црвена боја), нивото на ризик треба да биде дефинирано како неприфатливо. За косините со минорни локални деформации (темно-жолта боја), степенот на ризик може да се дефинира како условно прифатлив и истиот може да биде толериран, но ќе зависи од разгледуваниот случај, како на пример категоријата на објектот, барањата на инвеститорот и други специфични услови. За косините без знаци на нестабилност (зелена боја), ризикот има прифатливо или многу ниско ниво.

На дијаграмите се проектирани гранични зони согласно условите и состојбата на разгледуваните косини на терен. Дополнително, земена е во предвид и можноста од предимензионирање на косините. Имено, следејќи ги препораките од праксата и современата литература, како и инженерската логика, проектирана е уште една референтна линија која дава индикација дека решението се наоѓа на граница на рационалност. Ова претставува многу значаен аспект во проектирањето, бидејќи настојувањето на исклучително ниско ниво на ризик, ќе го направи решението неекономично. Тоа е и суштинската идеја на предложените дијаграми. Инженерите од праксата да можат на релативно лесен начин да добијат индикација за одредена косина и нејзиното оптимално решение во однос на стабилноста, а земајќи го во предвид значењето на објектот и барањата на инвеститорот.



Слика 47. Интерпретација на резултатите од анализите и пресметките, преку меѓусебна зависност на вредностите на факторот на сигурност ( $F_s$ ) и индексот на hazard ( $H_i$ ).

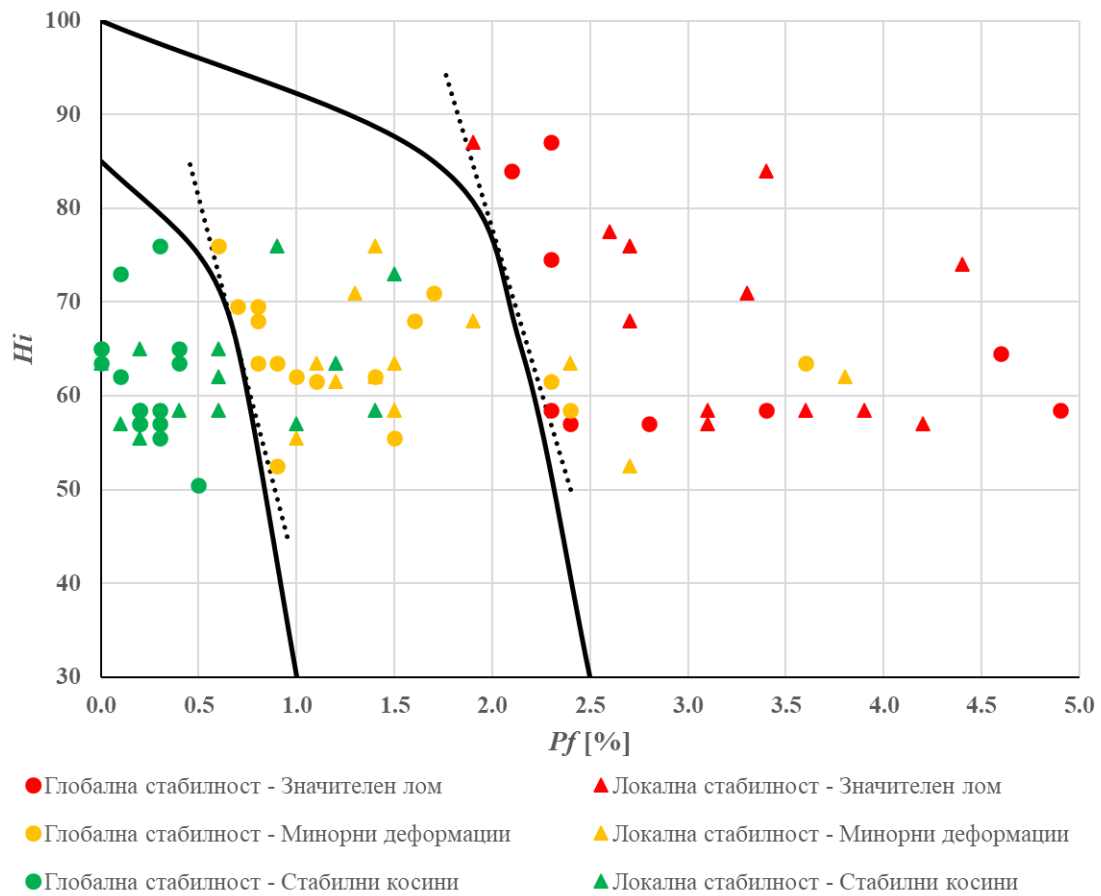
На Слика 47 се интерпретирани резултатите од спроведените анализи и пресметки, каде е презентирана зависноста помеѓу факторот на сигурност ( $F_s$ ) и индексот на hazard ( $H_i$ ). Од дијаграмот, јасно се гледа дека за сите анализирани косини, постои одредена тенденција на потреба од повисок фактор на сигурност со зголемувањето на индексот на ризик, без оглед дали се регистрирани значајни или помалку значајни деформации. Ова е и очекувано, особено имајќи го во предвид слабото квалитет на застапените карпести маси. Сепак, доколку се повлечат линеарни линии во зона на овие гранични вредности (испрекинати линии) долната граница на факторот на сигурност за условно стабилните косини има релативно ниски вредности (испрекината линија) за низок степен на hazard. Дополнително, во истражувањето нема ранг на косини со средно или ниско ниво на индексот на hazard, каде можеби би се појавиле несоодветно проектирани косини и во овие зони. Затоа, извршено е ограничување на овие вредности на  $F_{s_{min}} = 1.25$ , односно  $F_{s_{min}} = 1.35$ , каде правите (испрекинати линии) се модифицирани со закривени (полни) линии. Овие криви претставуваат референтни зони за проценка на ризик од обрушување. Финалниот дијаграм со зависноста помеѓу факторот на сигурност ( $F_s$ ) и индексот на hazard ( $H_i$ ) е презентирани на Слика 48, каде покрај референтните зони кои прават дистинкција помеѓу косините со недозволено ниво на ризик (1), условно прифатливо ниво на ризик (2) и прифатливо ниво на ризик (3), дополнително е проектирана и референтна зона со многу прифатливо ниво на ризик кое има тенденција да го направи решението неекономично (4).



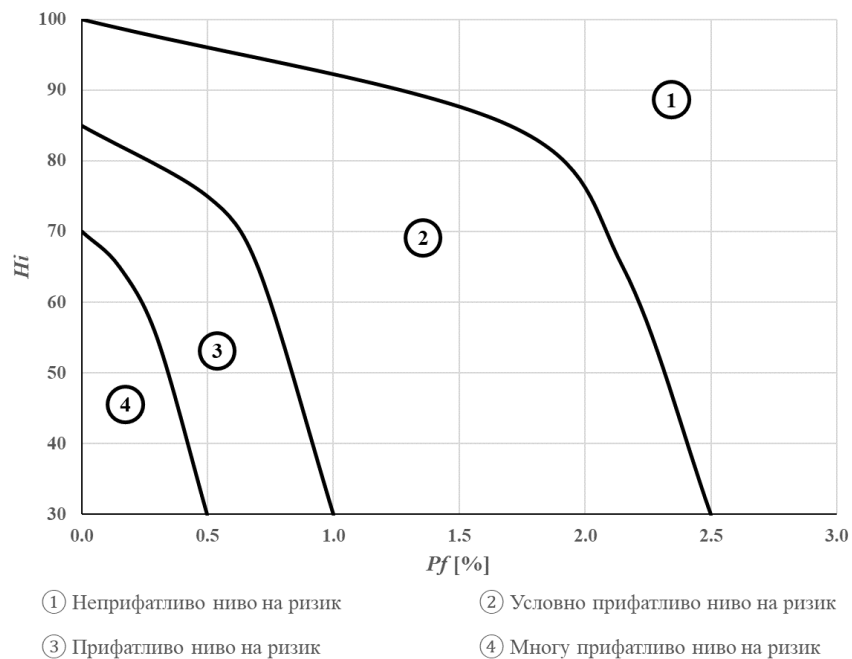
**Слика 48.** Дијаграм за проценка на ниво на ризик за косини кај карпи со слаб квалитет, преку меѓусебна зависност на факторот на сигурност ( $F_s$ ) и индексот на хазард ( $H_i$ ).

Очигледно е дека првата зона не е прифатлива во ниту еден случај и треба секогаш да се избегнува во фазата на проектирање. Доколку решението се наоѓа во четвртата зона тоа значи дека нивото на ризик е редуцирано до тој степен што решението станува нерационално и неекономично и затоа, доколку не постои услов од страна на инвеститорот за ваква голема сигурност на решението, истото треба да се избегнува. При фаза на проектирање, се препорачува секогаш решението да се наоѓа во третата зона. Решението може да се наоѓа и во втората зона, но само по исклучок, кога се работи за низок ранг на објекти, привремени косини, кога се бара економично решение со одредено ниво на прифатлив ризик или кога постојат други специфични барања на инвеститорот. Овие услови важат и за сите графици кои ќе бидат презентирани во продолжение од докторскиот труд.

На Слика 49 се интерпретирани резултатите од спроведените анализи и пресметки, каде е презентирана зависноста помеѓу веројатноста од лом ( $P_f$ ) и индексот на хазард ( $H_i$ ). Од дијаграмот, јасно се гледа дека за сите анализирани косини, постои одредена тенденција на потреба од пониска вредност на веројатноста од лом со зголемувањето на индексот на ризик, без оглед дали се регистрирани значајни или помалку значајни деформации. Линеарните линии (испрекинати линии) претставуваат гранични зони согласно резултатите, но за да бидеме на страна на сигурноста, овие гранични зони се малку модифицирани. Имено, со закривените (полни) линии извршено е разграничување, каде долната граница на веројатноста од лом е нешто помала од првичната, како за условно стабилните косини, така и за нестабилните косини. Овие криви претставуваат референтните зони за проценка на ризик од обрушување. Финалниот дијаграм со зависноста помеѓу веројатноста од лом ( $P_f$ ) и индексот на хазард ( $H_i$ ) е презентиран на Слика 50, каде покрај референтните зони кои прават дистинкција помеѓу косините со недозволено ниво на ризик (1), условно прифатливо ниво на ризик (2) и прифатливо ниво на ризик (3), дополнително е проектирана и референтна зона со многу прифатливо ниво на ризик кое го прави решението неекономично (4).



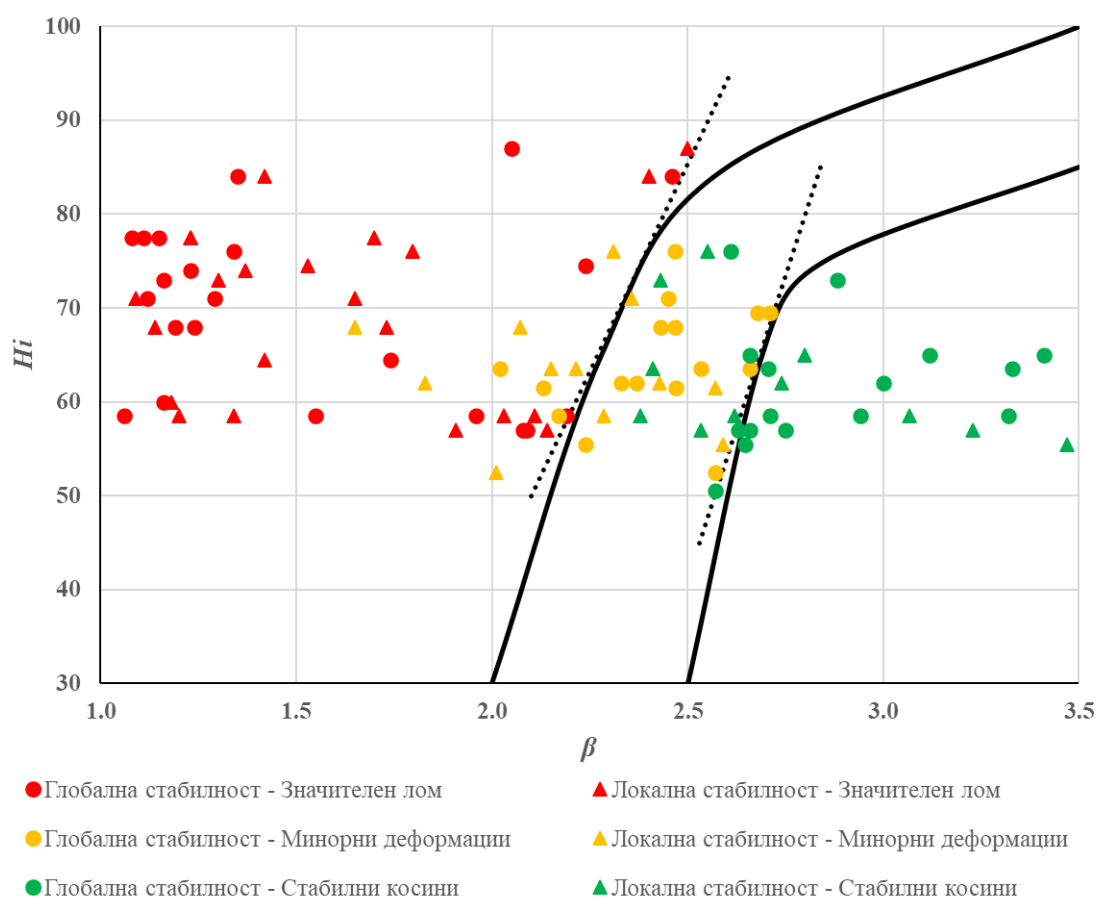
Слика 49. Интерпретација на резултатите од анализите и пресметките, преку меѓусебна зависност на вредностите на веројатноста од лом ( $P_f$ ) и индексот на hazard ( $H_i$ ).



Слика 50. Дијаграм за проценка на ниво на ризик за косини кај карпи со слаб квалитет, преку меѓусебна зависност на веројатноста од лом ( $P_f$ ) и индексот на hazard ( $H_i$ ).

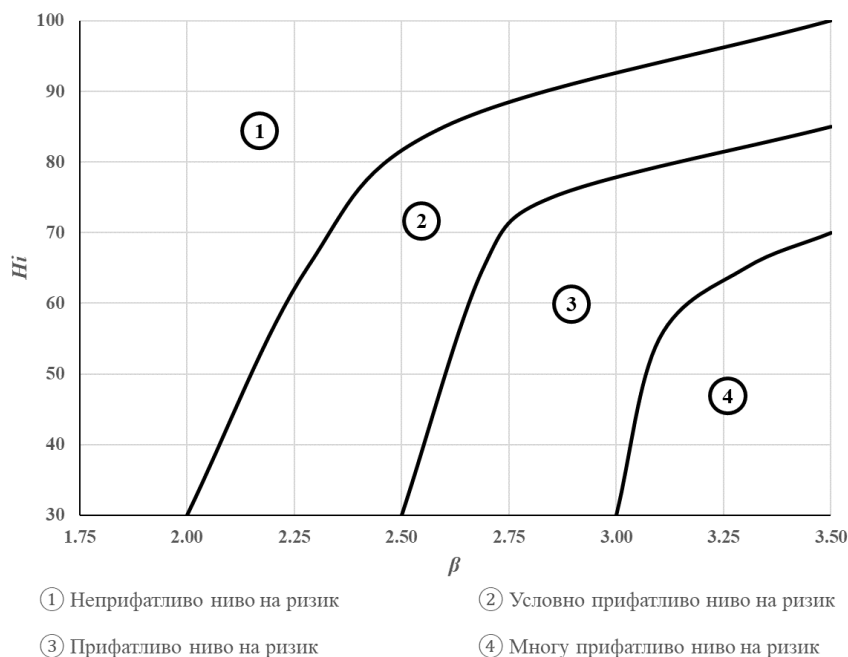


На Слика 51 се интерпретирани резултатите од спроведените анализи и пресметки, каде е презентирана зависноста помеѓу индексот на доверливост ( $\beta$ ) и индексот на hazard ( $H_i$ ). Како и во претходните случаи, може да се забележи дека за повисоко ниво на hazard, евидентна е потребата од повисока вредност на индексот на доверливост, без оглед на карактерот на настанатото обрушување кај анализираните косини. Линеарните линии (испрекинати линии) претставуваат гранични зони кои прават дистинкција помеѓу косините со регистриран значителен лом, косините со помалку значајни деформации и стабилните косини. Сепак, овие зони се малку модифицирани со закривени полни линии, што значи дека сме на страна на сигурноста. Имено, долните и горните граници на индексот на доверливост се ограничени на нешто повисоки вредности од првичните, како за условно стабилните косини, така и за нестабилните косини. Овие криви претставуваат референтните зони за проценка на ризик од обрушување.



**Слика 51.** Интерпретација на резултатите од анализите и пресметките, преку меѓусебна зависност на вредностите на индексот на доверливост ( $\beta$ ) и индексот на hazard ( $H_i$ ).

Финалниот дијаграм со зависноста помеѓу индексот на доверливост ( $\beta$ ) и индексот на hazard ( $H_i$ ) е презентирани на Слика 52, каде покрај референтните зони кои претставуваат гранични зони помеѓу косините со недозволено ниво на ризик (1), условно прифатливо ниво на ризик (2) и прифатливо ниво на ризик (3), дополнително е проектирана и референтна зона со многу прифатливо ниво на ризик кое дава индикација дека решението станува нерационално и неекономично (4).

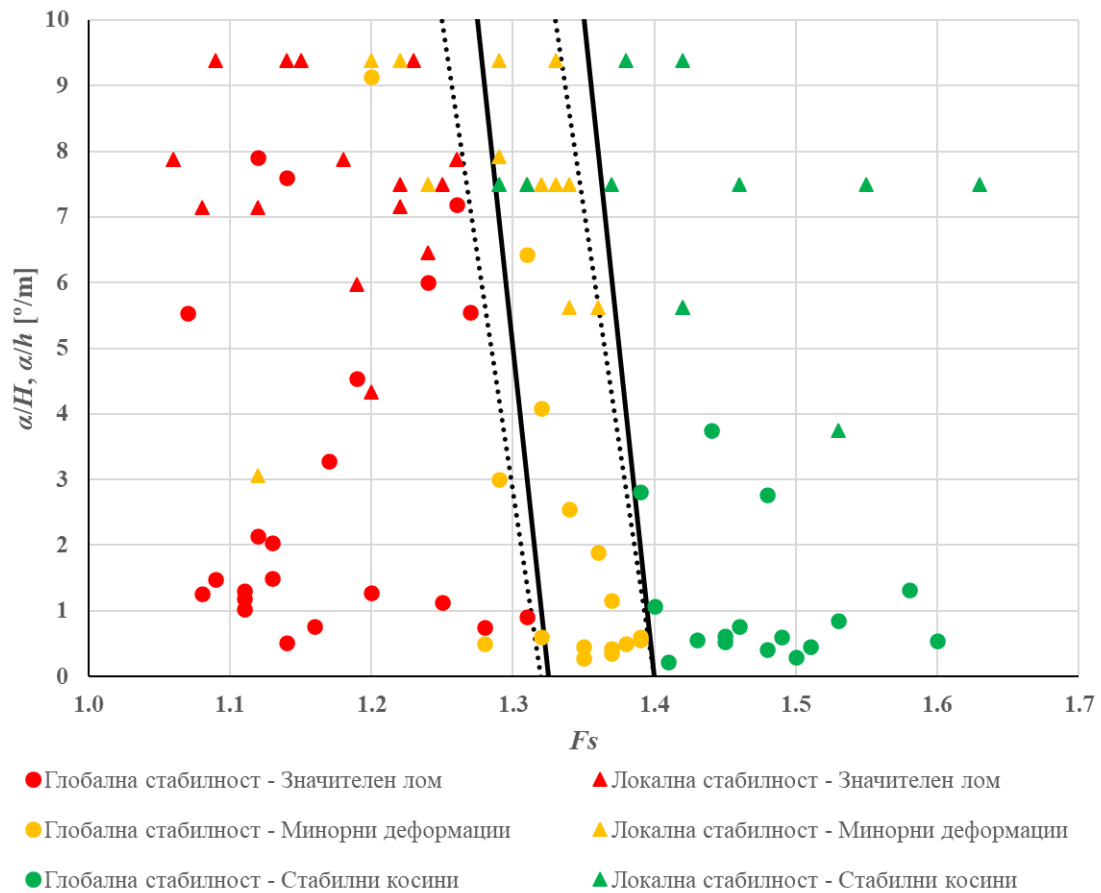


**Слика 52.** Дијаграм за проценка на ниво на ризик за косини кај карпи со слаб квалитет, преку меѓусебна зависност на индексот на доверливост ( $\beta$ ) и индексот на hazard ( $H_i$ ).

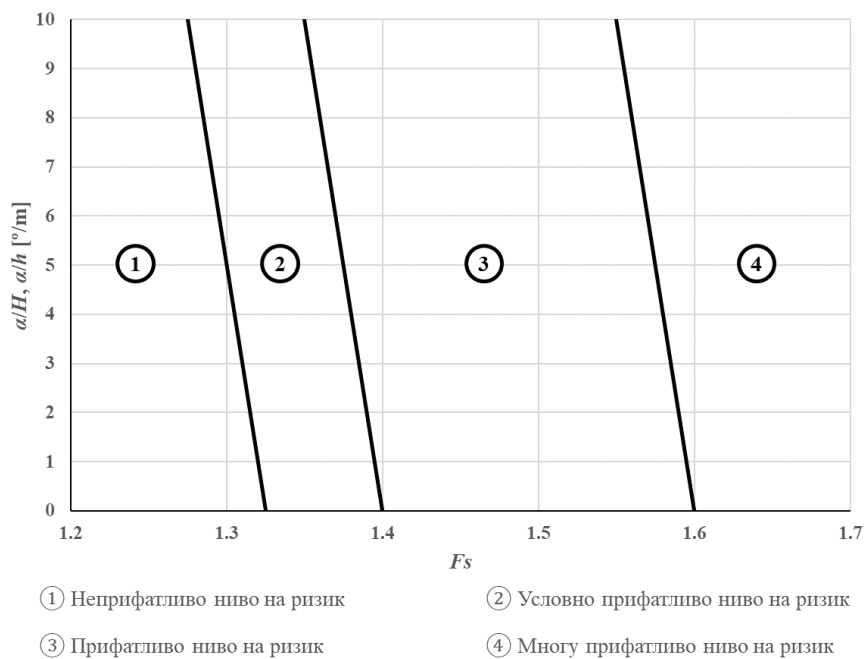
На Слика 53 се интерпретирани резултатите од спроведените анализи и пресметки, каде е презентирана зависноста помеѓу факторот на сигурност ( $F_s$ ) и геометриската карактеристика ( $\alpha/H$ ), која претставува однос помеѓу аголот и висината на разгледуваната косина. Доколку се разгледува локална косина тогаш геометриската карактеристика се однесува на локалната косина (берма), но доколку се разгледува глобално проблемот, тогаш се користат генералниот агол и висина на предметниот усек. Аголот на косината се изразува во степени, додека висината на косината се мери во метри.

Од дијаграмот на Слика 53, јасно се гледа дека за сите анализирани косини, постои одредена тенденција на потреба од повисок фактор на сигурност со намалување на вредноста на соодносот помеѓу аголот и висината на косината. Линеарните линии (испрекинати линии) претставуваат гранични зони кои прават дистинкција помеѓу косините со регистриран значителен лом, косините со помалку значајни деформации и стабилните косини. Сепак, овие гранични зони се малку модифицирани (полни линии), како би биле на страна на сигурноста. Имено, долните граници на факторот на сигурност се ограничени на нешто повисоки вредности од првичните, како за условно стабилните косини, така и за нестабилните косини. Овие полни линии всушност претставуваат референтни зони за проценка на ризик од обрушување.

Финалниот дијаграм со зависноста помеѓу факторот на сигурност ( $F_s$ ) и геометриската карактеристика ( $\alpha/H$ ) е презентирани на Слика 54, каде покрај референтните зони кои прават дистинкција помеѓу косините со недозволено ниво на ризик (1), условно прифатливо ниво на ризик (2) и прифатливо ниво на ризик (3), дополнително е проектирана и референтна зона со многу прифатливо ниво на ризик кое го прави решението неекономично (4).



Слика 53. Интерпретација на резултатите од анализите и пресметките, преку меѓусебна зависност на вредностите на факторот на сигурност ( $F_s$ ) и геометриската карактеристика ( $\alpha/H$ ).



Слика 54. Дијаграм за проценка на ниво на ризик за косини кај карпи со слаб квалитет, преку меѓусебна зависност на факторот на сигурност ( $F_s$ ) и индексот на хазард ( $H_i$ ).

## 9. ИНТЕГРАЛЕН ПРИСТАП ЗА ПРОЦЕНКА НА СТАБИЛНОСТА КАЈ КАРПЕСТИ МАСИ СО СЛАБ КВАЛИТЕТ

Во механиката на карпи, како и во геотехничкото инженерство генерално, за решавање на проблемите секогаш најдобриот пристап е да се користи што поширок спектар на техники и постапки, особено при планирање и проектирање на капитални инфраструктурни објекти. На Слика 55 е прикажан еден генерализиран интегриран пристап за анализа на проблемите поврзани со полето на стабилноста на косини, но и општо во механиката на карпи.



Слика 55. Приказ на радијален Венов дијаграм, за интегриран пристап при решавање на проблеми во механиката на карпи, со своите под-гранки.

Доколку на почетокот, се изврши соодветно планирање може комплетно да се избегнат и значително редуцираат проблемите во фаза на изведба или експлоатација. Имено, почнувајќи од адекватна програма со истражни работи, кои треба да бидат носечка карика во фазата на проектирање, па се до безбедни и функционални објекти во експлоатација, во најголем дел зависи од квалитетно изработен план за одреден објект. Имено, доколку се работи за проекти од транспортната инфраструктура, со процесот на планирање треба да се направи оптимален избор на трасата, каде ќе бидат избегнати високи усеци, особено во услови на променлива геологија или материјали со слаб квалитет на јакосно-деформабилните карактеристики.

Теоретските методи секако се издвојуваат како примарна подлога, бидејќи истите се засноваат на резултати од теренски и експериментални истражувања и испитувања, каде како финален продукт се дефинирани основните законитости за моделирање на теренот и надворешните влијанија, граничните услови, останати специфични услови, како и за самата егзекуција на пресметките.

Иако најголемиот дел од теоријата е тешко да биде рedefинирана, сепак на секојдневна основа се даваат низа од подобрувања и препораки од различни автори ширум светот. Ова во најголем дел се должи на рапидниот развој на софтверските алатки, како и се поголемиот удел на вештачката интелигенција, како асистент на инженерите од праксата.

Емпириските методи се релативно брзи методи, но се користат за прелиминарни и првични проценки на стабилноста, односно за позначајни објекти истите мора да бидат комбинирани со традиционалните статички методи. Овие методи се засновани на синтетизирање на голем број податоци од праксата, каде преку систематизација и категоризација се даваат соодветни препораки, имајќи го во предвид однесувањето на теренот на лице место.

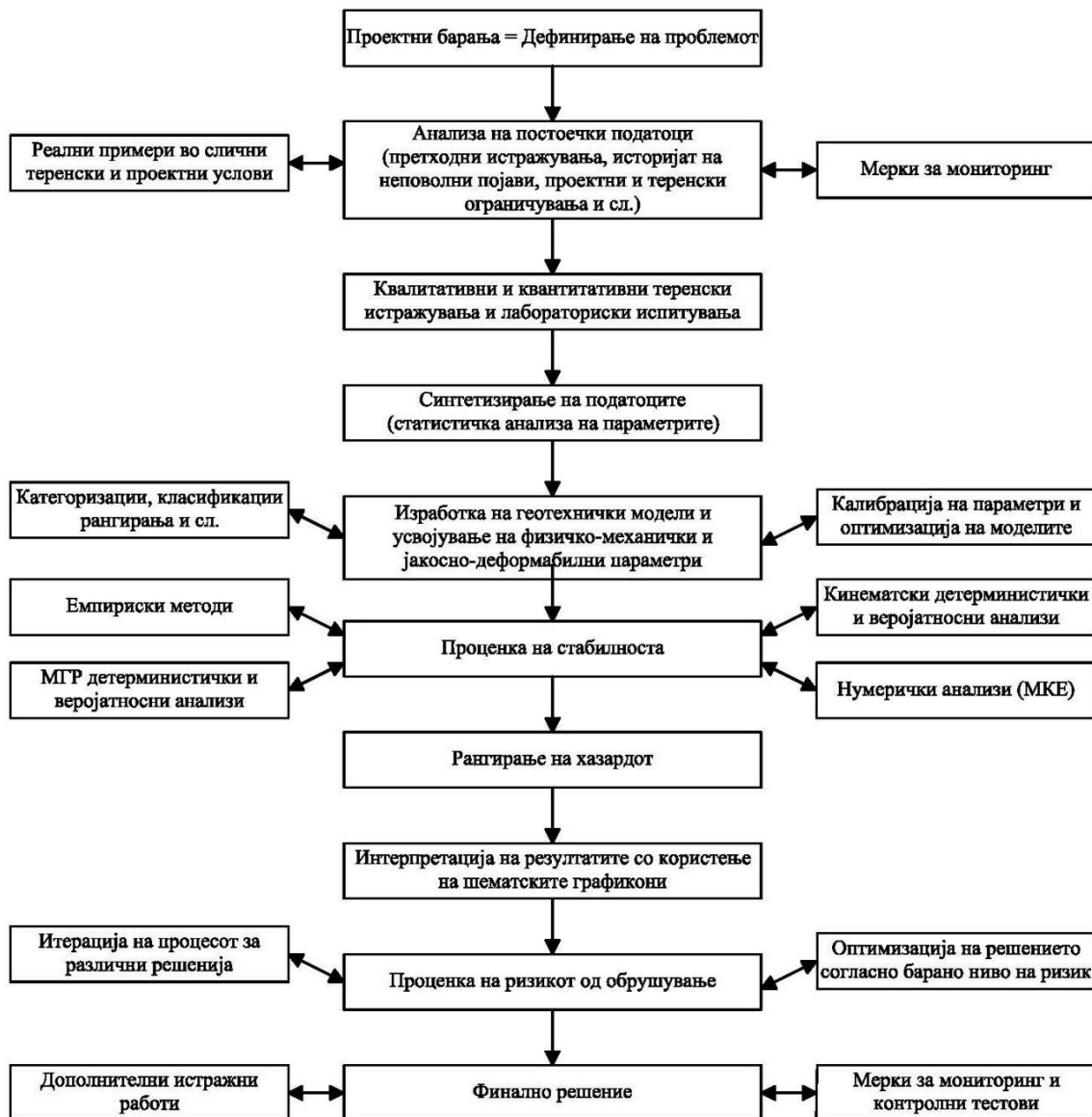
Аналитичко-нумеричките методи се неизбежни во современото инженерство, бидејќи истите ги опишуваат основните конститутивни закони и го опишуваат однесувањето на полу-просторот. Овие методи се разработени врз основа на низа од експериментални испитувања и истите се усовршуваат се повеќе и повеќе, благодарение на развојот на софтверските алатки.

Мониторингот на објектите е исто така важен аспект во процесот, како во прелиминарна фаза, пред започнување со изведбата, потоа во фаза на изведба и конечно во фаза на експлоатирање на објектите. Со податоците од мониторингот може да бидат избегнати погрешни одлуки или во најлош случај и катастрофални последици, но исто така со податоците од оскултацијата можат да бидат оптимизирани и решенијата. Во современата пракса, се повеќе и повеќе се применуваат овие податоци во комбинација со теренските испитувања. Тенденцијата во праксата е овие податоци да се круцијален аспект во фазата на проектирање, со што ќе се заштеди на драгоцено време, но исто така овие податоци често се користат и во фаза на изведба на објектите.

За да може да се направи адекватна проценка на ризикот од обрушување на одредена косина, неопходно е да се користи мулти-дисциплинарен пристап и проблемот да се анализира методично, каде ќе бидат опфатени сите неопходни постапки. На овој начин ќе се постигне доверливо решение кое ќе биде во примарен план сигурно и стабилно, а во исто време ќе биде функционално и прифатливо од економски аспект. Имено, целта на геотехничките инженери во праксата, секогаш треба да биде да се најде најоптималното решение, задоволувајќи ги пропишаните стандарди за безбедност, но притоа не треба да се изврши предимензионирање на објектите, бидејќи на тој начин ќе се продуцира нерационално и неекономично решение.

На Слика 56 е претставен детален предлог шематски дијаграм со методичен пристап, каде се презентирани низа од постапки кои треба да бидат анализирани и имплементирани, при решавање на проблеми поврзани со стабилноста на косини кај карпести маси со слаб квалитет. Во шематскиот алгоритам, покрај веќе познатите методични постапки за решавање на оваа проблематика, инкорпорирани се и низа од останати постапки, како и суштинските аспекти од предметното истражување во докторскиот труд.

По дефинирањето на проектните задачи, најпрво треба да се изврши детален преглед на целокупната достапна документација за предметната поширока локација.



Слика 56. Детален шематски алгоритам за интегрално решение при справување со проблеми поврзани со стабилноста на косини кај карпести маси со низок квалитет.

Анализата на постоечките податоци се состои од преглед на досегашни (претходни) истражувања (доколку постојат), историјатот на локацијата од аспект на подложност од свлекувања, одрони или потенцијален развој на неповолни појави. Исто така во првична фаза се дефинираат ограничувачките услови како што се зони на експропријација, колизии со други инфраструктурни или приватни бариери, инсталации и сл. За подобра слика во фазата на истражување се препорачува да се анализираат слични примери во слични теренски и проектни услови и доколку постојат одредени дилеми може да се предвидат и одредени мерки за оскултација на теренот, како што се инклинометри, екстензиометри или геодетско набљудување.

Во втора фаза се изработува програма за адекватни теренски истражни работи и лабораториски испитувања, каде акцентот треба да се стави на деталното инженерско-геолошко картирање и на квалитативните и квантитативните теренски испитувања.

После дефинирањето на инженерскогеолошките и хидрогеолошките услови на теренот, тектонските карактеристики, инженерскогеолошките современи процеси и климатските услови, заедно со резултатите од истражните работи и теренските и лабораториските испитувања, следува синтетизирање на податоците.

На клучните параметри се препорачува да се изврши статистичка анализа, за да се дефинира варијацијата на параметрите, со што ќе се утврдат влезни параметри со поголема доверливост.

Потоа следува фаза во која е неопходно искуството на инженерите за дефинирање на адекватни модели на теренот. Имено, во оваа фаза е многу важно да се одбере правилен конститутивен систем за моделирање на теренот и соодветни доверливи физичко-механички и јакосно деформабилни параметри на застапените материјали.

Исто така треба адекватно да се толкуваат евентуални аномалии на геолошките услови, раседни зони, издани и сл. и истите да бидат соодветно инкорпорирани во моделите. За таа цел неопходни се категоризации и класификации на материјалите согласно препораките во современата литература. Доколку постојат одредени дилеми, во оваа фаза може да се изврши и одредена калибрација на литолошките слоеви, параметрите на материјалите или други специфични услови.

Потоа следува најкреативната фаза, каде со дефинирани доверливи параметри и модели на теренот, треба да се проектираат геометриските карактеристики на косините, како и мерките за стабилизација и заштита. Проценката на стабилноста е најдобро да се изврши користејќи мулти-дисциплинарен пристап. Имено, треба да се направи комбинација помеѓу методот на гранична рамнотежа, нумеричките методи, да се анализира стабилноста по дисконтинуитети и да се направи евалуација согласно адекватни емпириски методи.

Следна фаза од проектирањето е дефинирање на рејтингот на хазард за предметните косини, согласно понудената класификација во овој докторски труд.

Потоа следува интерпретација на резултатите, каде треба да бидат дефинирани клучните параметри (фактор на сигурност, веројатност од лом, индекс на доверливост и индекс на хазрд). Овие резултати треба да бидат инкорпорирани на предложените шематски графикони во истражувањето, со што ќе се изврши утврдување на степенот на ризик на проектното решение. Се препорачува да се изврши контрола согласно сите четири предложени дијаграми за проценка на ризикот и да се усвои најнеповолното сценарио.

Доколку решението се наоѓа во зона на неприфатливо ниво на ризик, значи дека треба да се понуди посигурно решение. Но исто така, доколку решението се наоѓа во зона на многу прифатливо ниво на ризик, тоа значи дека нивото на ризик е редуцирано до тој степен што решението станува нерационално и неекономично и затоа, доколку не постои услов од страна на инвеститорот за ваква голема сигурност на решението, истото треба да се избегнува.

При фаза на проектирање, се препорачува секогаш решението да се наоѓа во зона на прифатливо ниво на ризик. Решението може да се наоѓа и во зона на условно прифатливо ниво на ризик, но само по исклучок, кога се работи за низок ранг на објекти, привремени косини, кога се бара економично решение со одредено ниво на прифатлив ризик или кога постојат други специфични барања на инвеститорот.

Согласно на степенот на ризик, решението може да претрпи измени не само од аспект на посигурно решение, туку и оптимизација на истото преку корекција на геометријата или редуцирање на мерките за заштита. Во оваа фаза треба да се направи еден итеративен процес каде тенденцијата на техничките мерки треба да биде зона на прифатливо ниво на ризик, со што ќе се добие оптимално решение.

По изборот на соодветно решение со задоволително ниво на ризик, во последна фаза може да се предложат и дополнителни истражни работи во фаза на изведба, како и мерки за мониторинг како во фаза на изведба на работите, така и во експлоатација.

На шематскиот дијаграм прикажан на Слика 56, прикажани се голем број на постапки, кои се препорачува да бидат спроведени за добивање на пред се сигурно и функционално решение, но во исто време и економски прифатливо, но доколку се работи за објекти од помал ранг или од локален карактер, дел од овие постапки можат да бидат занемарени.



## 10. ПРИМЕНА НА ПРЕДЛОЖЕНАТА ИНТЕГРАЛНА МЕТОДОЛОГИЈА ЗА ПРОЦЕНКА НА РИЗИК, ПРЕКУ ПРАКТИЧЕН ПРИМЕР

За да се добие подобра слика за предложената методологија, во оваа точка ќе биде извршена апликација на истата sukcesивно по фази, за конкретен практичен пример. Сепак, за да не дојде до обременување на докторскиот труд, за фазите кои се вообичаени во праксата ќе бидат дадени само генерални напомени.

### 10.1. Дефинирање на проблемот

Усекот кој е предмет на анализа во овој пример, се наоѓа на стационожа km 14+990 – 15+240, на трасата на автопатот А2, делница Кичево – Охрид, секција Подвис – Пресека. Усекот е изведен кон крајот на 2020 год., со наклон на косините 1:1.5, висина на етажа 6.0 m и ширина на берма 4.0 m, каде вкупната максимална висина на усекот изнесува 57.2 m со генерален наклон од 25.1° (Слика 57).



Слика 57. Поглед на усекот неколку дена после активирање на процесот на свлекување, каде се забележуваат одредени попречни пукнатини и контури на свлечиштето (11.2022).

Во месец октомври, 2022 год., појавено е свлекување во горните зони на теренот од стац. km 15+050 – 15+180, каде се зафатени горните берми, ободниот канал и дел од теренот над ободниот канал во должина од околу 30 m (Слика 57 и Слика 58). Имено, развиени се две свлечишта, од кои едно помало (локално) и едно со позначајни димензии. Помалото свлечиште во основа е со должина околу 20 m, ширина околу 35 m и претпоставена длабина на свлекување околу 3.0 m, додека поголемото свлечиште во основа има должина 50 m, ширина 125 m и претпоставена длабина на свлекување од 5.0 m. Количината на свлечена маса изнесува околу 1000 m<sup>3</sup> за помалото и околу 12000 m<sup>3</sup> за поголемото свлечиште. Челото на свлечиштата е со јасен стрмен отскок, со денивелација (скок) околу 0.5 – 1.0 m со тенденција на зголемување, поради тоа што свлечиштата се сеуште активни.



**Слика 58.** Поглед на усекот неколку месеци после активирање на процесот на свлекување, каде пукнатините и контури на свлечиштето се поизразени (03.2023).

Димензиите на свлечиштата во основа се утврдени согласно деталното инженерско-геолошко картирање на теренот, додека рамнината на свлекување е претпоставена согласно ножиците на свлечиштата и резултатите од повратните анализи на стабилност. Телото на нестабилните зони има неправилен облик со поголема ширина во однос на должината, додека механизмот на лизгање е главно од трансляторен карактер. За појавата на нестабилните зони клучна улога одиграле повеќе фактори од кои најначајни се неповолната фолијација во некои делови, слабите физичко-механички карактеристики на распаднатите карпести маси и неповолните атмосферски услови. Со процесот на свлекување се зафатени делувиумот и распаднатите метаморфни карпи.

## **10.2. Анализа на постоечки податоци**

Како основна теренска метода за собирање на податоци на испитуваниот терен е деталното инженерскогеолошко картирање извршено во текот на месец февруари 2015 год. и месец јуни 2016 год., во појас со ширина од 150 m од трасата на автопатот, како и две истражни дупнатини од по 25 m, кои се изведени во месец јуни 2016 год. и еден инклинометар за регистрирање на евентуални хоризонтални поместувања, со должина од 30 m, изведен во месец ноември 2020 год.

Посебно внимание е посветено на веќе изработените етажи и косини за идентификација на застапените материјали, нивен просторен распоред и земање на репрезентативни примероци за лабораториски испитувања од изведените истражни дупнатини и површински од теренот.

Врз основа на претходните истражувања и деталното инженерскогеолошко картирање, утврдено е дека застапените карпести маси на истражуваниот терен спаѓаат во групата на филитоиди, ниско-метаморфни карпи од палеозојска старост во кои преовладуваат филитични, серицитско-кварцни и графитични шкрилци а се среќаваат и кварц-графитични шкрилци и мермеризирани варовници. Овие литолошки единици се покриени со делувиијални седименти и колувијални творби со различна моќност.

Филитоидите се најмногу застапени карпести маси на предметната локација во чиј склоп покрај филити се среќаваат и серицитско-кварцни шкрилци. Некоја закономерност во појавувањето на овие шкрилци нема туку се забележуваат чести премини на едни во други како во хоризонтален така и во вертикален правец. Во површинските делови се интензивно деградирани со многу слаби физичко-механички својства.

Графитичните шкрилци се карактеризираат со фина шкрилавост и тектонска испуканост. Изградени се од серицит, кварц и графитична материја, од каде ја добиваат црната боја. Во длабина овие шкрилци преоѓаат во кварц-графитични шкрилци кои поради кварцните жици имаат релативно подобри физичко-механички параметри.

Кај шкрилестите маси, основниот структурен елемент – фолијацијата е со различни елементи на пад ( $EПФ=150-180/20-30$  и  $210-270/35-40$ ), при што во комбинација со различните пукнатински системи придонесуваат за свлекување и појава на клиновидни ломови на шкрилестата карпеста маса. Во шкрилестите карпести маси се регистрирани следните пукнатински системи:  $EП1=115-120/60$ ,  $EП2=80/50$ ,  $EП3=25/50$ ,  $EП4=310/30-60$ .

На почетниот дел од усекот се среќаваат карбонатни карпи кои се претставени со банковити до масивни мермеризирани варовници, кои на површина се зафатени со процесот на површинско физичко-механичко и хемиско распаѓање. Доста се испукани со различни правци на пукнатините во одредени делови до сантиметарска големина. Зафатени се со интензивна тектоника, а забележлива е и карстификација, која се манифестира со површински вдлабнувања од карпата и со проширување на пукнатините.

Колувијалните творби претставуваат дробински материјал од шкрилците дозиран со поситна глиновито-прашинеста компонента. Овој материјал се има формирано во делот на засекот каде шкрилестата карпеста маса е силно тектонски испукана до сантиметарски димензии, т.е. силно изменета и деградирана. Дробинскиот материјал е необработен, со остри ивици и со различна големина на парчињата (до 2 cm). Материјалот е растресит до слабо збиен и склон е на свлекување. Поради долготрајниот период во кој етажите и косините на усекот се оставени незаштитени овој материјал започнал да се свлекува. Дебелината на овие творби е променлива и се движи до околу 5.0 m.

Материјалите на предметната локација имаат изразена анизотропија и се интензивно деградирани и испукани, односно тектониката во минатото играла голема улога. Покрај ваквите услови, предметните карпести маси, се карактеризираат и со хетерогеност (како во хоризонтален така и во вертикален правец), т.е. постои дисконтинуалност на физичко-механичките и јакосно-деформабилните параметри.

За дефинирање на физичко-механичките својства на монолитните делови од карпестите маси, извршени се опити за определување на индексот на јакост при точкасто оптоварување (PLT – Point Load Test), додека за почвените материјали извршени се опити со триаксијална компресија. Кај PLT опитите извршени се испитувања само нормално на фолијација. Резултатите добиени од опитите, се презентирани во Табела 23.

Вредностите на јакоста на притисок ( $\sigma_p$ ) добиени преку PLT опитите, се добиени емпириски, со користење на следното равенство:  $\sigma_p = 20 \cdot J_{s(50)}$ , каде  $J_{s(50)}$  претставува коригирана вредност на индексот на јакост за дијаметар од 50 mm.

**Табела 23.** Граници на варијација на добиените параметри од теренските и лабораториските испитувања, за застапените материјали

Материјал	Волуменска тежина $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	Агол на внатрешно триење $\phi$ [°]	Кохезија $c$ [kPa]	Индекс на точкаста јакост $J_{s(50)}$ [MPa]	Јакост на притисок $\sigma_p$ [MPa]	SHRV
Делувиум	20.4 – 21.3	23.7 – 27.8	4.6 – 11.2	/	/	/
Колувиум	21.2	24.0	6.7	/	/	/
Целосно распаднати шкрилци	23.4 – 25.2	/	/	0.06 – 0.36	1.2 – 7.2	/
Делумно распаднати шкрилци	25.6 – 26.8	/	/	0.67 – 1.18	13.4 – 23.6	6 – 9

### 10.3. Проектирање и изведба на дополнителни истражни работи

Со оглед на фактот што во зона на свлечиштето, поради безбедносни причини не беше можна изведба на истражни дупнатини и бидејќи се работи за веќе ископан усек, беше извршено само дополнително детално инженерскогеолошко картирање, како и вршење на одредени теренски и лабораториски испитувања. Може да се резимира, дека со овие истражувања, во најголем дел беа потврдени претходните сознанија за застапените материјали, но исто така, дополнително беше анализиран изворот на проблемите и причините за процесот на свлекување, каде се заклучи дека зоната зафатена со свлекување е во делот на старо фосилно свлечиште кое е повторно активирано со извршениот ископ во комбинација со атмосферското негативно влијание.

На Слика 59 е прикажана инженерско-геолошката карта за предметниот усек, со приказ на зоните на свлекување, тензионите пукнатини, застапените материјали, диспозицијата на истражните дупнатини и инклинометарот, ориентацијата на фолијацијата и пукнатинските системи и сл., додека на Слика 60 е прикажан карактеристичен инженерско-геолошки профил во зона на инклинометарот кој е зафатен со зоната на свлекување.



#### 10.4. Синтеза и статистичка анализа на сите утврдени параметри

Сите податоци за предметните материјали се синтетизирани и за истите е направена статистичка анализа за да се дефинираат границите на варијација на физичко-механичките и јакосно-деформабилните параметри. Имено, одредени вредности на параметрите кои отстапуваат од стандардната девијација се отфрлени со што се добиени пововерливи вредности.

#### 10.5. Изработка на геотехнички модел и усвојување на параметри

За предметниот усек изработени се неколку геотехнички модели, зависно од стационажата, кои ги рефлектираат инженерскогеолошките попречни профили. Во Табела 24 се прикажани усвоените вредности на физичко-механичките и јакосно-деформабилните параметри на застапените материјали кои се користени за проценка на стабилноста согласно методот на гранична рамнотежа (МГР) во софтверот Slide и согласно методот на конечни елементи (МКЕ) во софтверскиот пакет Plaxis. Се напоменува, дека за целосно деградираните шкрилци каде поминува и рамнината на лизгање, параметрите се дополнително калибрирани со повратни анализи на стабилност.

**Табела 24.** Усвоени влезни параметри за анализите на стабилност во софтверските пакети Slide (МГР) и Plaxis (МКЕ)

Вид на материјал	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\phi$ [°]	$c$ [kPa]	$r_u$	UCS [MPa]	GSI	$m_i$	D	$E_{ref}$ [MPa]
Делувиум	19.5	25	5	0.2	–	–	–	–	7
Колувиум	22.0	26	7	0.2	–	–	–	–	3.5
Целосно распаднати шкрилци	25.0	27	27	0.1	5	20	6	0.25	30
Делумно распаднати шкрилци	25.5	32	100	–	12	30	7	0.20	150

Во Табела 25 се прикажани усвоените вредности за пукнатинските системи, користени при проценка на кинематските услови на лом.

**Табела 25.** Усвоени параметри на јакост на смолкнување на пукнатини при кинематските анализи на стабилност, во софтверските пакети Rocplane и Swedge

Тип на карпа	Пукнатински систем	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	SHRV	$\phi_b$ [°]	$\phi_r$ [°]	JRC	JCS [Mpa]
Делумно распаднати шкрилци	150/30	25.5	6	27	21	6	13.6
	240/35	25.5	8	27	21	8	14.9
	120/60	26.0	9	28	22	8	15.8
	80/50	25.5	7	27	21	10	14.2
	25/50	25.5	7	27	21	6	14.2
	310/45	25.0	6	27	21	8	13.5

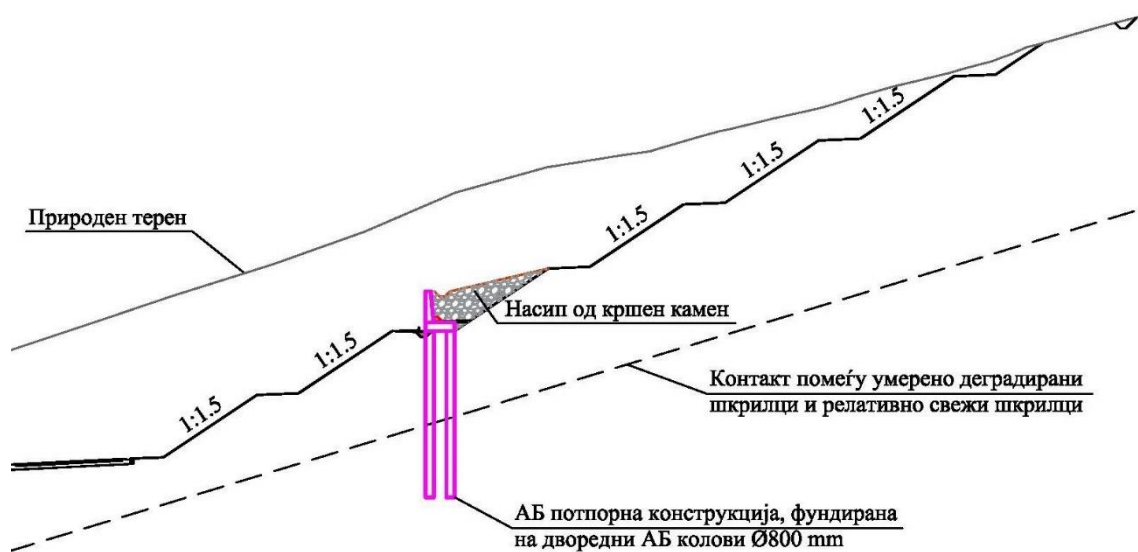


### 10.6.1. Краток осврт кон техничкото решение за санација и стабилизација

Во конкретниот случај, во почетна фаза беа разгледувани неколку варијантни решенија. Имено, се разгледаа варијанти со заштита на косините со систем од анкери, но поради безбедносен аспект да се користи механизација во горните тешко пристапни зони на теренот кој има дискутабилна стабилност, ова решение се процени како ризично во фаза на изведба. Исто така беше разгледувана и варијанта со класичен потпорен ѕид во ножицата на усекот, но и ова решение се процени како ризично особено во фаза на изведба, бидејќи неопходен е дополнителен ископ во ножицата, што значително ќе ја загрози стабилноста и директно животот на работниците, но исто постои и одредена опасност од подножично свлекување во фаза на експлоатација.

По разгледување на повеќе варијантни решенија и нивните позитивни и негативни страни, усвоена е варијанта со изведба на армирано-бетонска потпорна конструкција фундирана на дворедни колови.

Диспозицијата на армирано-бетонската потпорна конструкција, како и геометриските карактеристики на истата се модифицирани во неколку фази и како оптимално решение е усвоена диспозиција на потпорниот ѕид на втората берма, каде постојат услови за фундирање на коловите во карпести маси со релативно подобар квалитет (Слика 62).



Слика 62. Попречен пресек на избраното техничко решение за санација и стабилизација на предметното свлечиште.

### 10.6.2. Резултати од проценка на стабилноста со емпириски методи

Во конкретниот пример, од достапните емпириски методи, користен беше методот Q-slope (Barton и Var, 2015, 2017). Во Табела 26 се прикажани вредностите на проценетите параметри од евалуацијата на стабилноста на косините согласно методот Q-slope.



Согласно резултатите од овие анализи, може да се забележи дека вредноста на проценетиот агол кој ја обезбедува долгорочната стабилност, без дополнителни мерки за стабилизација е релативно помал од аголот со кој што се изведени косините. Имено косините се изведени со наклон 1:1.5, односно под агол 33.7°, додека проценетиот најстрмен агол согласно методот Q-slope изнесува 29.3°, што укажува на нестабилност и потреба од ублажување на наклонот.

**Табела 26.** Добиени параметри од евалуацијата на стабилноста за предметните косини, согласно Q-slope методот

Параметар	Проценета вредност
Степен на испуканост, $RQD$ [%]	10
Број на пукнатиснки системи, $J_n$	6
Рапавост на пукнатински сидови, $J_r$	A = 2.0, B = 1.5
Алтерација на пукнатински сидови, $J_a$	A = 6.0, B = 4.0
Ориентација на пукнатини, $O$	A = 0.75, B = 1.5
Климатски и геолошки услови, $J_{wice}$	0.7
Редукција на јакост, $SRF_{slope}$	10
Q-slope	0.016
Најстрмен безбеден агол $\beta_Q$ [ ° ]	29.3

### 10.6.3. Резултати од кинематски анализи (стабилност по пукнатини)

Во Табела 27 се прикажани резултатите од анализите и пресметките на можноста од просторен (клиновиден) лом за оваа комбинација на неповолни пукнатински ситеми. Од пресметките, може да се забележи дека во услови на заполнетост на пукнатините со вода, факторот на сигурност укажува на лом, што е потврдено и на лице место, каде после интензивни и долготрајни врнежи, развиени се поголем број на тензиони пукнатини и потенцијално нестабилни зони, особено на локации каде се евидентирани неповолни пукнатински системи.

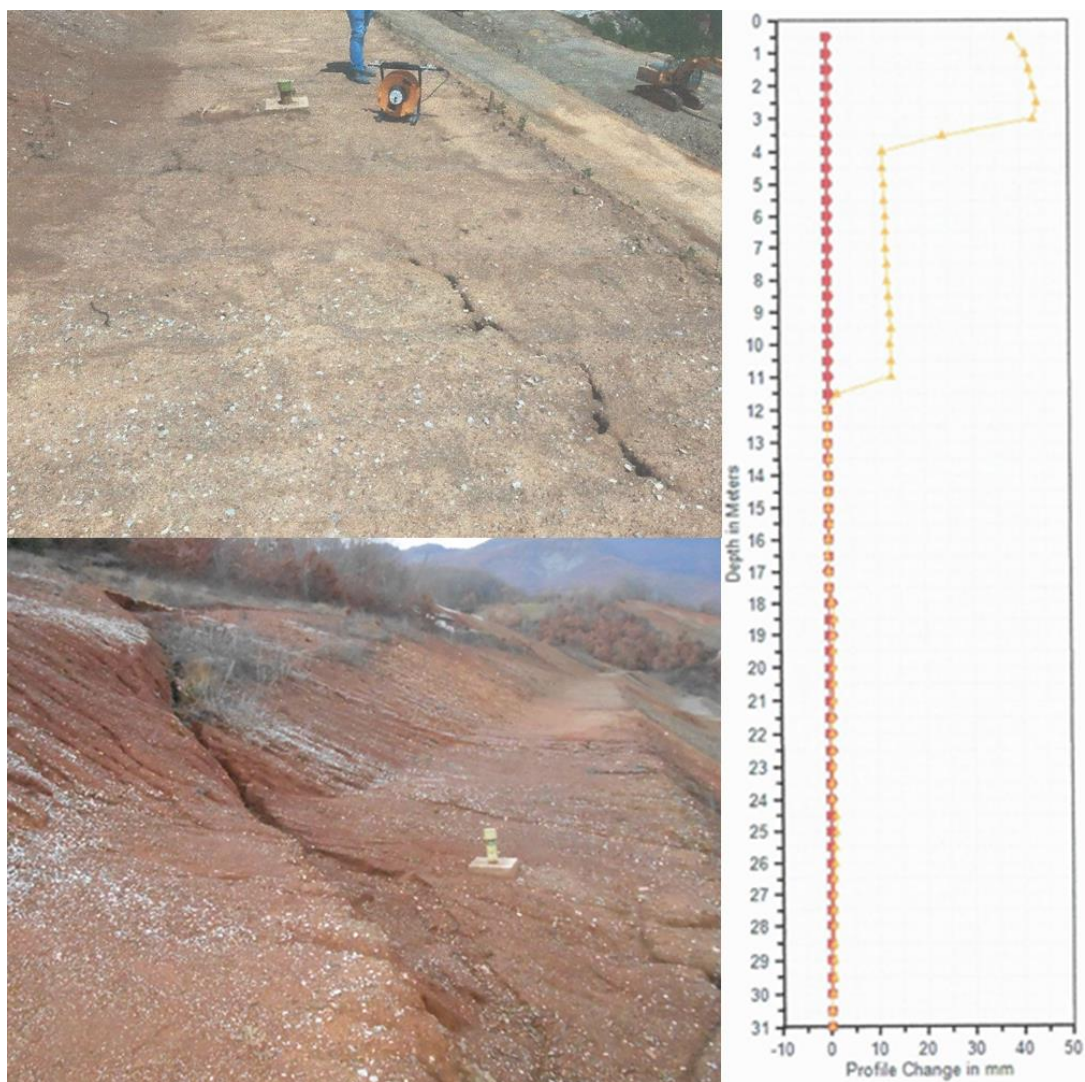
**Табела 27.** Усвоени параметри на јакост на смолкнување на пукнатини при кинематските анализи на стабилност, во софтверските пакети Rocplane и Swedge

Случај на анализа	Фактор на сигурност $F_s$
<b>Косина: 85/34; Пукнатински системи: 150/30 и 25/50</b>	
Суви пукнатини	<b>1.73</b>
Заполнети пукнатини 70% со вода	<b>1.53</b>

#### 10.6.4. Резултати од анализите на стабилност со методи на гранична рамнотежа

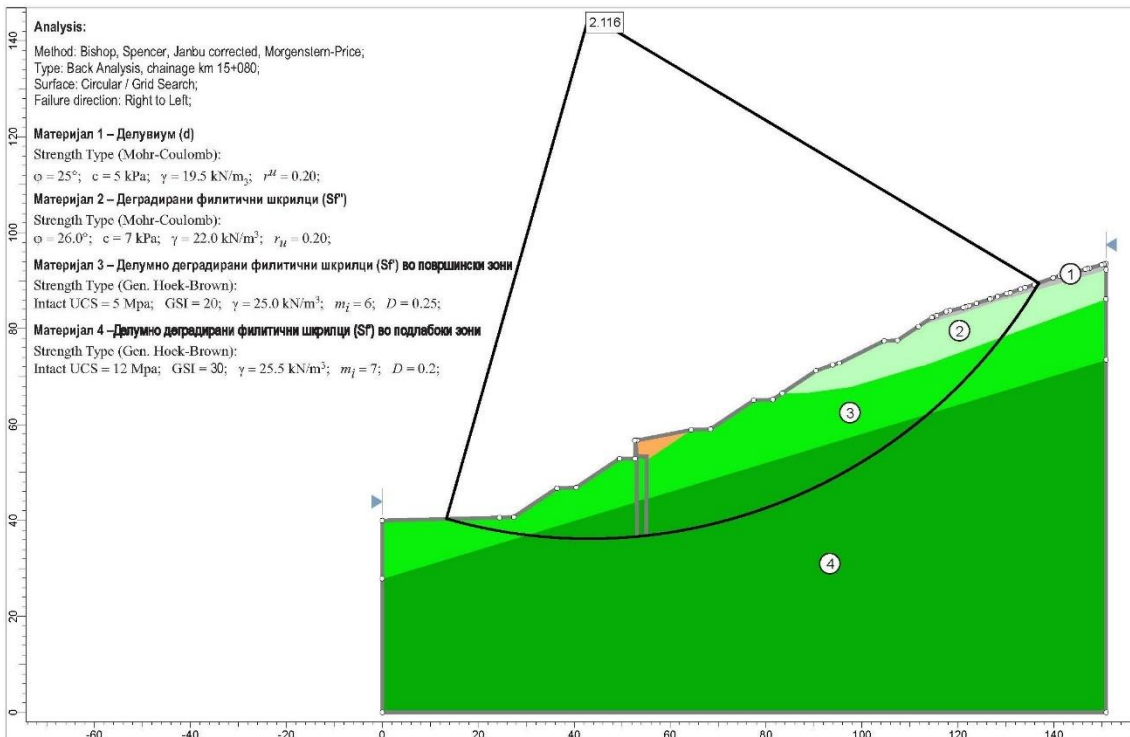
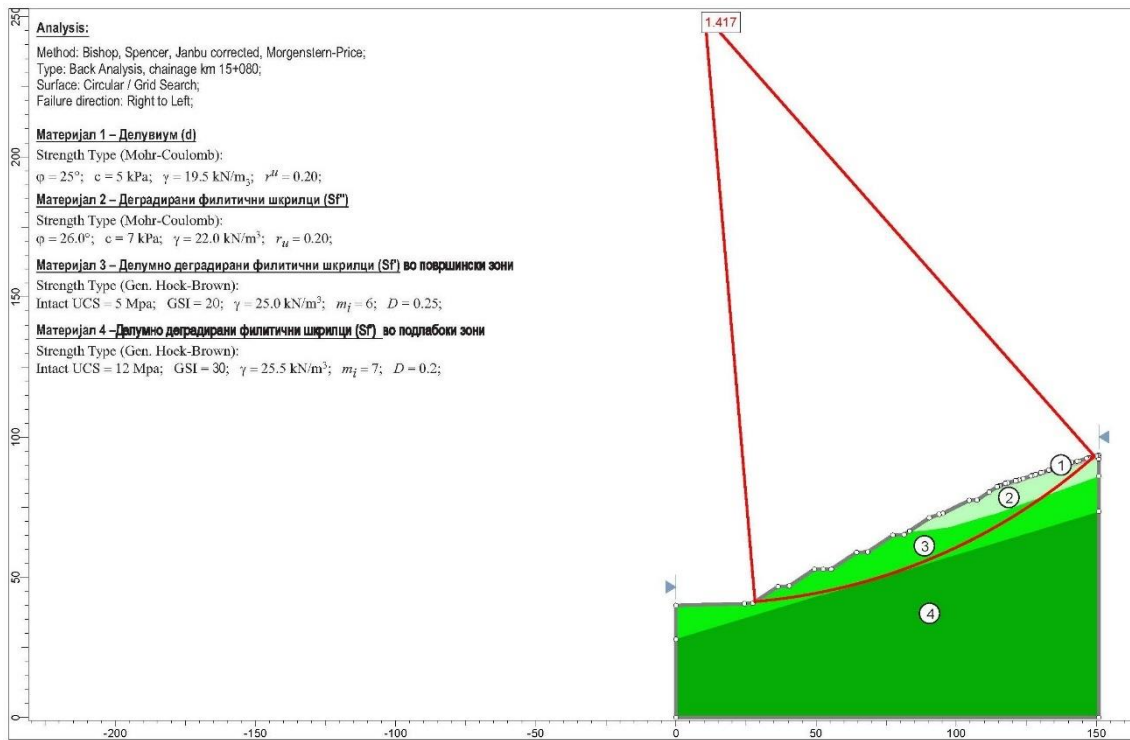
Длабината и диспозицијата на рамнината на свлекување се проценети согласно податоците од извршеното инженерскогеолошко картирање, регистрираните поместувања на инсталираниот инклинометар, како и резултатите од повратните анализи на стабилност.

На Слика 63 прикажан е инклинометарот и околниот терен непосредно по појава на одредени тензиони пукнатини (горе лево), односно 1 месец пред да настане свлекувањето, каде се дадени и мерењата кои се тогаш извршени (горе десно), поточно во месец септември 2021 год. Имено, максималните поместувања изразени во кумулативни вредности помеѓу последните две мерења изнесуваат околу 45 mm на длабочина од 3.0 m и околу 13 mm на длабочина од 11.0 m. На Слика 63 (долу) исто така е прикажана оваа зона од теренот непосредно по активирање на процесот на свлекување, во месец октомври 2021 год.



Слика 63. Приказ на појава на подолжна тензиона пукнатина непосредно во зона на инклинометарот (горе лево), резултати од последното мерење на инклинометарот (горе десно) и приказ на зоната на свлекување во делувиум и распаднати филитични шкрилци, во горна зона на усекот, каде се забележува дека со процесот на лизгање е зафатен и инклинометарот.

На Слика 64 се прикажани излези од анализите на стабилност, согласно методот на гранична рамнотежа, во софтверскиот пакет Slide, за глобалната стабилност на усекот без потпорна конструкција (горе) и со примена на потпорна конструкција (долу).



Слика 64. Излези од анализите на стабилност за решение без потпорна конструкција (горе) и за решението за санација и стабилизација со потпорна конструкција (долу) за конкретниот пример.

Во Табела 28 се прикажани резултатите од анализите на стабилност согласно методот на гранична рамнотежа, каде покрај детерминистичкиот, користен е и пробабилистичкиот пристап. Согласно добиените резултати, може да се заклучи дека вредностите се во задоволителни граници, што ќе биде прикажано во продолжение, во делот на интерпретација на резултатите.

**Табела 28.** Резултати од анализите на стабилност за предметниот усек, согласно методите на гранична рамнотежа

Детерминистички пристап				Пробабилистички пристап	
Bishop	Janbu (corrected)	Spencer	Morgenstern-Price	Веројатност од лом	Индекс на доверливост
1.504	1.505	1.516	1.511	0.2	2.91

#### 10.6.5. Резултати од нумеричките анализи со метод на конечни елементи

Статичката пресметка на потпорната конструкција, односно анализата на напонско-деформабилната состојба на полупросторот е извршена со методот на конечни елементи, во софтверот Plaxis 2D. Полупросторот е дискретизиран со користење на триаголни конечни елементи со 15 јазли и 2 степени на слобода, при што е анализирана рамнинска состојба на деформации. Должината на коловите и осовинското меѓусебно растојание, се дефинирани од условот хоризонталното поместување на врвот на анализираниот кол да не ја надмине вредноста од  $H/500$  (3.2 cm) во експлоатација, каде  $H$  претставува должина на анализираниот кол. Коловите, гредата и платното се дискретизирани со користење на еластични плочести елементи.

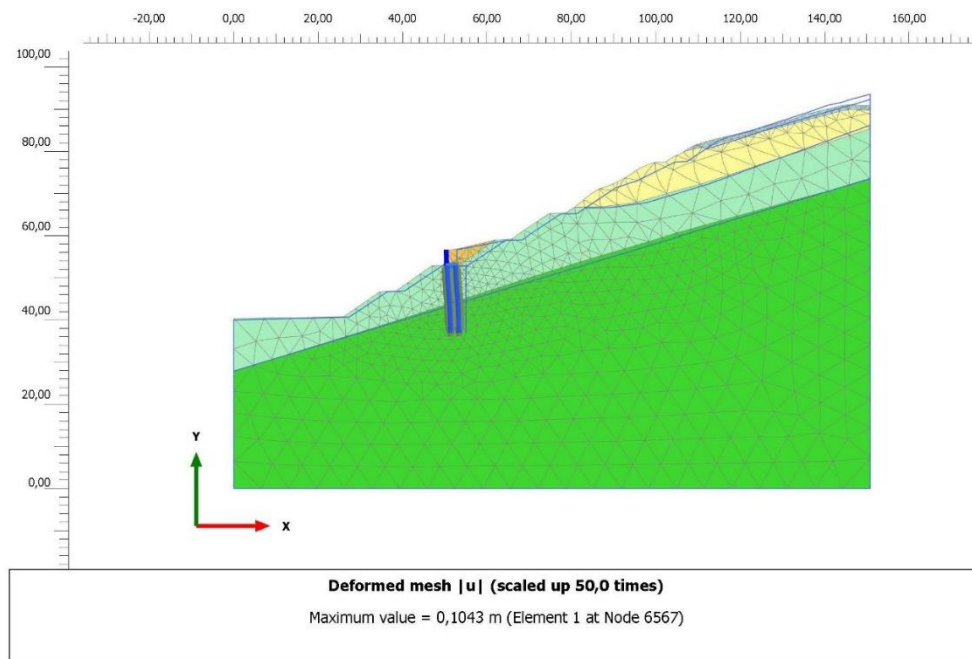
Техничкото решение е симулирано во неколку последователни фази:

- Фаза 1 иницијална (постоечка) состојба;
- Фаза 2 формирање на работно плато за изведба на коловите;
- Фаза 3 изведба на армиранобетонската потпорна конструкција и насипот;
- Фаза 4 финален ископ и статичка анализа при состојба на експлоатација;
- Фаза 4.1 анализа на стабилност преку редуција на јакосни параметри до лом.

Согласно пресметките, максималното поместување на врвот (горна ивица) на колот во фаза на експлоатација (фаза 4) изнесува  $s_{max} = 17 \text{ mm} < H/500 = 32 \text{ mm}$ , односно задоволен е критериумот за употребливост.

Во финалната фаза извршени се и пресметки на стабилноста преку редуција на јакосните параметри до лом (т.н.  $\phi$ - $c$  редуција), каде факторот на сигурност изнесува 1.49 (фаза 4.1). Треба да се напомене дека критичната рамнина на лизгање се јавува во горните зони на косините од усекот.

На Слика 65 е прикажан излез од софтверскиот пакет Plaxis 2D, поточно деформираната мрежа од конечни елементи, од каде може да се забележи дека максималното поместување изнесува околу 10 cm, но се јавува во површинските горни зони од косините.



Слика 65. Деформирана мрежа на конечни елементи за анализираниот пример, во софтверскиот пакет Plaxis 2D.

## 10.7. Рангирање на хазардот

Во Табела 29 е даден сумарен приказ од рангирањето и класификацијата на хазардот за предметниот усек, согласно сопствениот предлог систем, каде за секоја категорија, со црвена боја е означена соодветната келија на рангирање.

Табела 29. Резултати од рангирањето на хазардот за анализираните косини

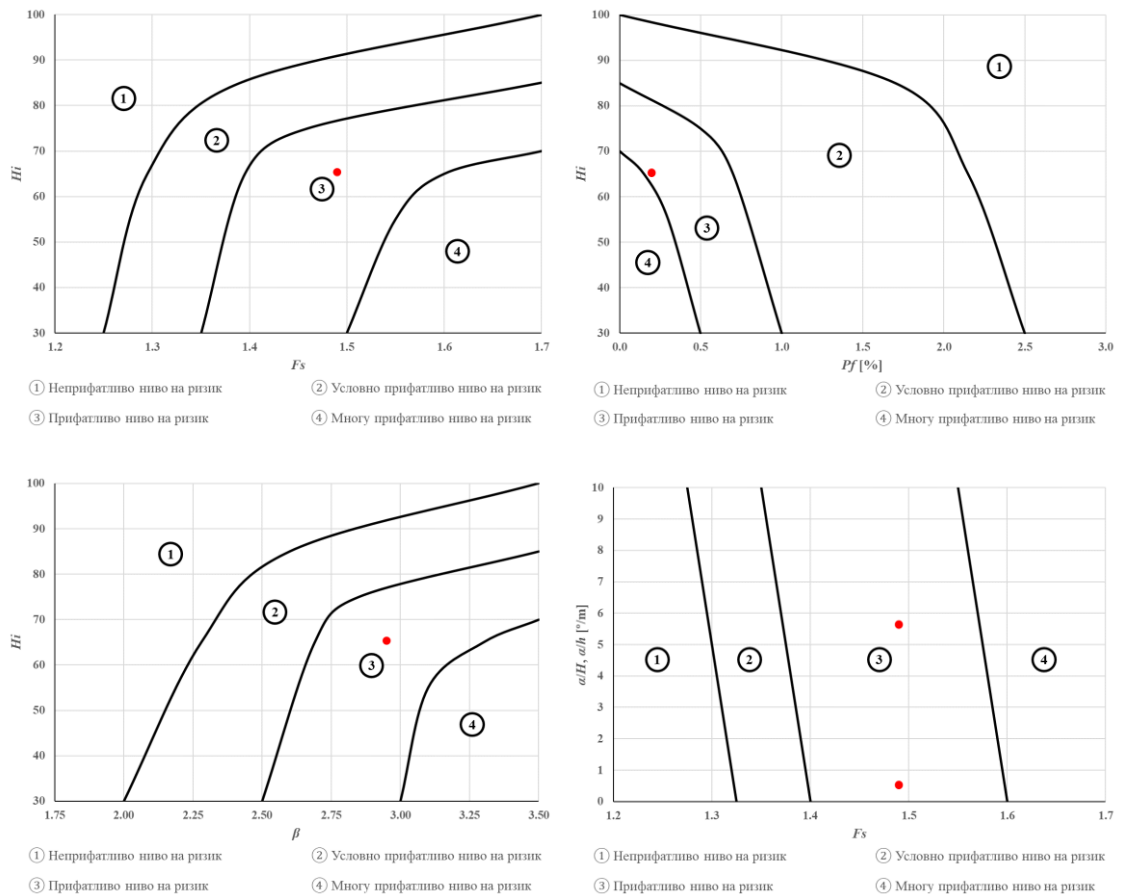
Категорија	Рејтинг			
	1.5	3	6	12.5
Ранг на пат	Локален	Регионален	Експресен	Автопат
Висина на косина	< 10 m	10 – 20 m	20 – 30 m	> 30 m
Агол на косина	< 30°	30° – 40°	40° – 50°	> 50°
Состојба на пукнатински системи	Дисконтинуални Поволна ориентација	Континуални Поволна ориентација	Дисконтинуални Неповолна ориентација	Континуални Неповолна ориентација
GSI	75 – 100	50 – 75	25 – 50	0 – 25
Услови на подземна вода	Суво	Влажно	Повремена појава на вода	Континуално течење на вода
Климатски услови	Слаби до умерени врнежи, без мрзнење	Слаби до умерени врнежи, кратко мрзнење	Умерени врнежи, кратко до долго мрзнење	Силни врнежи, кратко до долго мрзнење
Мерки за заштита	Потпорни конструкции	Заштитни мрежи, анкери, прскан бетон	Берми на косини или во ножица	/
Рејтинг и класификација на хазард	12 – 30 Низок	30 – 50 Среден	50 – 70 Висок (65)	75 – 100 Многу висок

Согласно предложената класификација, може да се заклучи дека индексот на хазард изнесува 65 и истиот е класифициран како висок, што во најголем дел се должи на категоријата (рангот) на патот, големата висина на усекот, неповолните климатски услови, минорните мерки за заштита, условите на подземна вода, како и релативно ниската вредност на геолошкиот индекс на јакост (GSI).

### 10.8. Интерпретација на резултатите и проценка на ризикот

Во оваа фаза, извршена е проценка на ризикот, преку интерпретација на добиените резултати од евалуацијата на стабилноста на сопствените предложени графичките дијаграми за проценка на ризикот кај карпести маси со слаб квалитет.

На Слика 66 се интерпретирани резултатите од спроведените анализи и пресметки, каде се презентирани зависностите помеѓу факторот на сигурност и индексот на хазард (горе лево), веројатноста од лом и индексот на хазард (горе десно), индексот на доверливост и индексот на хазард (долу лево) и факторот на сигурност и геометриската карактеристика (долу десно).



Слика 66. Интерпретација на резултатите од анализите и пресметките за конкретниот пример, на сопствените предложени шематски графичони за проценка на ризикот од обршување кај карпести маси со слаб квалитет.

Од дијаграмите, може да се констатира дека диспозицијата на точките кои се означени со црвена боја, за избраното техничко решение за стабилизација и санација на конкретниот пример, во сите анализирани случаи, се наоѓа во зона која укажува на прифатливо ниво на ризик. Согласно на ова, може да се заклучи дека избраното техничко решение ги задоволува условите за безбедност, но исто така не е извршено предимензионирање со што би се нанел непотребен економски импакт на инвеститорот.

## **10.9. Мерки за мониторинг**

Со оглед на фактот што теренот во горните зони на усекот е непристапен, се процени дека не постои можност од изведба на инклинометри во овие зони од теренот. Затоа предвидени е само оскултација на потпорната конструкција и тоа со геодетски мерења. Имено, непосредно после изведбата на санационото решение, во фаза на експлоатација, предвидена е оскултација на потпорната конструкција, која се спроведува со следење и мерење на карактеристични точки.

За таа цел, прво се поставуваат две реперни точки со столбни места кои се фиксирани и обезбедени од оштетување и служат како референца за следење на геодетските точки, кои исто така треба да бидат фиксирани и обезбедени од оштетување. Мерењата се вршат на горна ивица на платно на секој пресек, од потпорната конструкција. Вкупно се предвидени 7 геодетски точки за мерење на евентуалните деформации, во временски интервали: месец, три месеци, шест месеци, една година и две години, непосредно после завршување на градежните работи, кога треба да биде извршено нултото мерење.

Исто така предвидени се мерења и по потреба, како при појава на евентуални нестабилности по косините, интензивни и обилни врнежи, земјотреси и сл.

## **11. ПРИМЕНА НА РЕЗУЛТАТИТЕ ОД ИСТРАЖУВАЊЕТО И МОЖНИ НАСОКИ ЗА ПОНАТАМОШНИ ИСТРАЖУВАЊА**

Проблемите поврзани со стабилноста на косините не само што се од големо значење во моментов, туку истовремено оваа тема претставува и предизвик за понатамошни истражувања бидејќи теоретскиот и практичниот аспект на ова поле на студии не може целосно да се истражи.

Со оглед на фактот што карпестите маси со слаб квалитет се широко распространети во нашата држава и регионот и појавата на свлечишта, одрони и нестабилни зони по должина на трасите на инфраструктурните објекти се еден од најчестите и најголеми проблеми, се очекува широка примена на методологијата во праксата.

Постојат речиси неограничени можности за понатамошни истражувања во оваа област. Најпрво, базата на податоци која е многу солидна, може да се искористи за понатамошни истражувања не само од предметот на истражување, туку и за останати полиња од механиката на карпи.

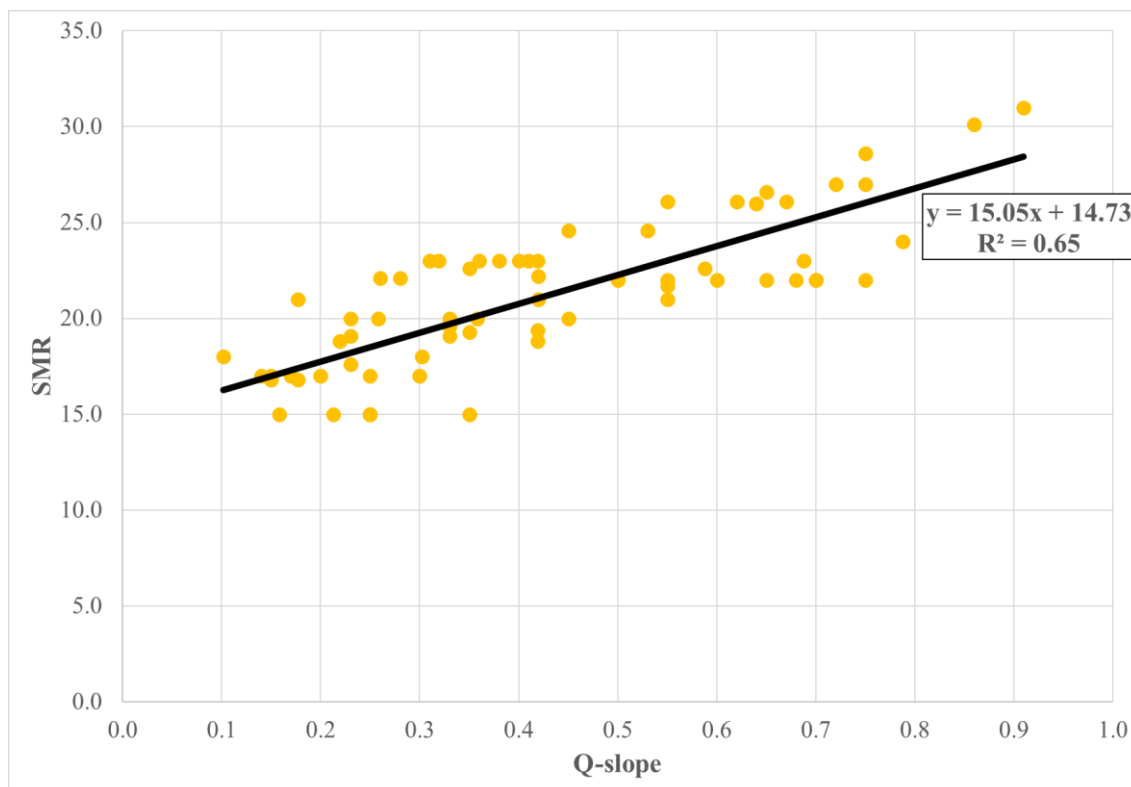
Предложената методологија, поради верификација, треба најпрво да помине низ критичко преиспитување во однос на нејзина примена при слични геолошки и геометриски услови, односно за карпести маси со слични физичко-механички параметри кај релативно високи косини. Овој чекор е неопходен за создавање предуслови за нејзина афирмација и широка примена, како и за нејзин понатамошен развој преку понатамошни модификации.

Во однос на можноста за идни понатамошни истражувања како континуирано продолжение на истражувањата презентирани во овој докторски труд, авторот ги дава следните препораки:

- Со оглед на солидната база на податоци и реалните услови на лице место, овие податоци можат да бидат искористени и за други полиња од механиката на карпи, не исклучиво да се директно поврзани со стабилноста на косини кај карпестите маси;
- При моделирањето на теренот и спроведувањето на анализите на стабилност, се препорачува да се вклучат пософистицирани конститутивни модели за дефинирање на теренот и да се споредат добиените резултати со резултатите прикажани во ова истражување;
- Да се вклучат други клучни параметри и изработат одредени модификации на предложената класификација за рејтинг на хазардот, како и на предложените шематски графикони за дефинирање на степенот на ризик од обрушување, кај карпести маси со слаб квалитет;
- Може да се направи обид да се предложат одредени емпириски зависности помеѓу клучните параметри за дефинирање на нивото на ризик.

Секогаш кога е можно, се препорачува да се комбинираат методите и да не се користи само еден пристап за проценка на стабилноста. На пример, на Слика 67, воспоставена е корелација помеѓу резултатите од Q-slope методот и SMR (Slope Mass Rating) рангирањето, за косините кои се дел од истражувањето во овој докторски труд.





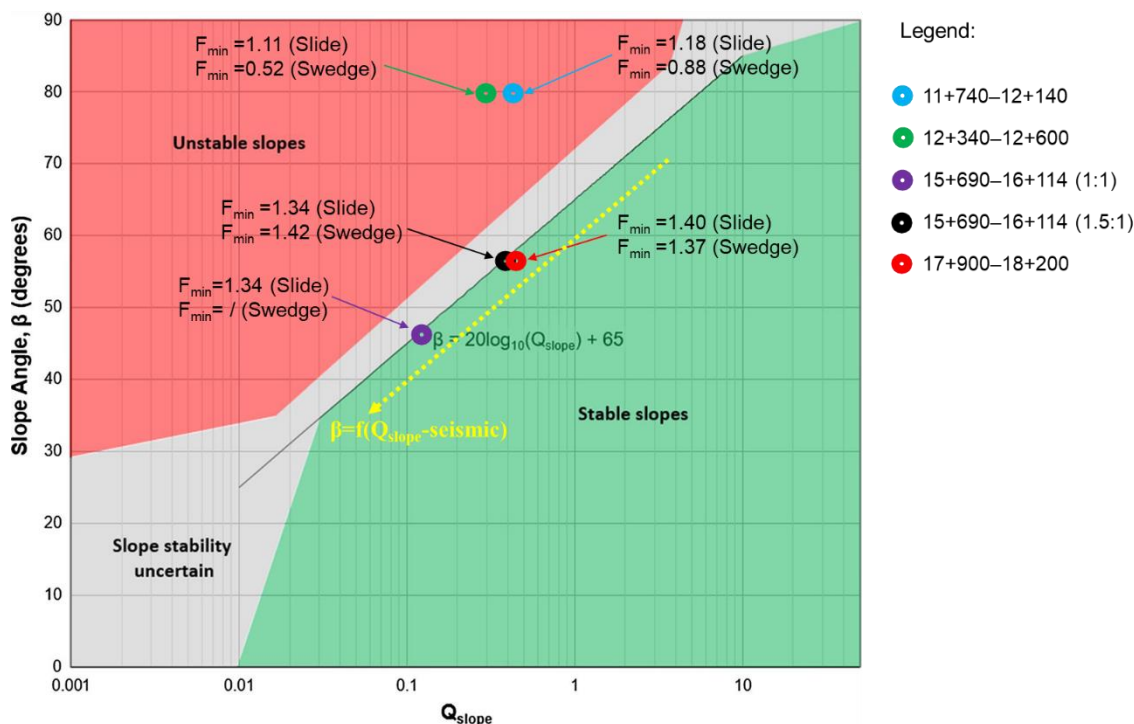
**Слика 67.** Корелација помеѓу вредностите на SMR и Q-slope, за косините од сопствените истражувања во докторскиот труд.

Се напоменува, дека иако дијаграмот на Слика 67 може да послужи за одредени првични проценки, сепак во фаза на проектирање мора да се изврши евалуација за конкретните геолошки и геотехнички услови кои по правило се уникатни.

Интересно е да се напомене, дека крајната цел на методот Q-slope е проценка на најстрмниот агол кој ја обезбедува долгорочната стабилност, но без употреба на дополнителни мерки за стабилизација, додека SMR класификацијата укажува на потребни мерки за стабилизација, особено за категории со пониски вредности, кои се типични за карпести маси со низок квалитет. Токму тоа е една од идеите која се препорачува за понатамошен развој, да се направи обид да се изврши корелација помеѓу овие параметри и да се извлечат критички заклучоци преку комбинација на различни методолошки пристапи.

Ваквите комбинации можат да ни дадат можност да најдеме одредени „слаби“ точки на достапните методи или потврда на пристапите кои ги аплицираме, при решавање на проблеми во геотехничкото инженерство, со вкрстена проверерка на резултатите преку мулти-дисциплинарен пристап.

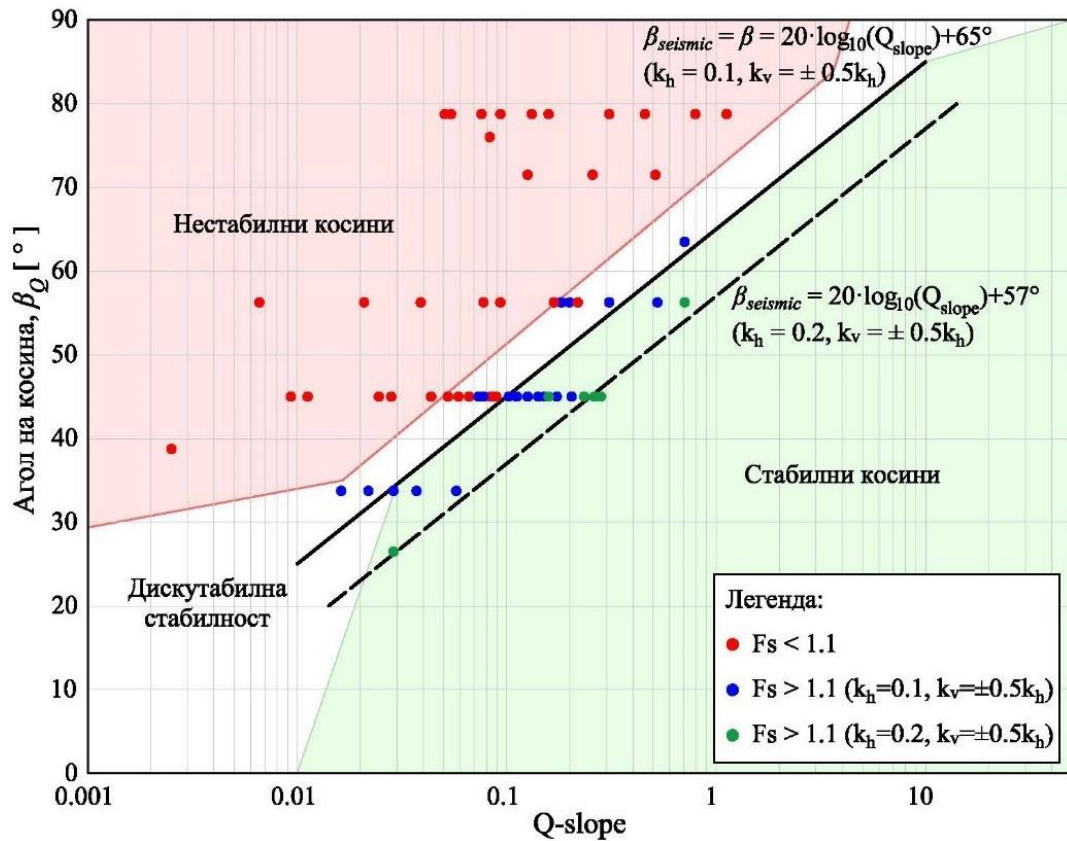
Во продолжение, прикажана е уште една корелација на емпириски и аналитички методи. Имено, на Слика 68 е прикажана зависност помеѓу вредноста на факторот на сигурност и диспозицијата на точките на Q-slope дијаграмот. На овој дијаграм, круговите ги репрезентираат вредностите на Q-slope и наклонот на изведените косини и за истите овие диспозиции се прикажани и факторите на сигурност добиени во софтверските пакети Slide и Swedge.



Слика 68. Q-slope дијаграм (Barton и Bar 2015, 2017) за анизотропни шкрилести карпести маси со поволна фолијација и соодветните фактори на сигурност добиени со различни софтверски алатки (Janevski & Jovanovski, 2020) и дилема за идни истражувања за воведување на Qslope-seismic (Jovanovski et al. 2024-in press).

Согласно резултатите од дијаграмот на Слика 68, јасно се гледа дека косините со незадоволителни вредности на факторите на сигурност каде е појавена нестабилност на косините на лице место, се наоѓаат длабоко во зона која индицира нестабилност. Останатите косини се наоѓаат во сигурната зона, но се многу блиску до самата граница, што значи дека наклонот на овие косини како и факторите на сигурност се на самата граница на исцрпеност. Исто така, како идеја за натамошни анализи, на Слика 68, се прикажани и некои дилеми за прилагодување на Q-slope системот, во сеизмички активни подрачја, каде проектираниот агол на косината би се модифицирал и довел во одредена зависност со коефициентот на сеизмичност за конкретна зона во теренот. Корекцијата на Qslope-seismic би се однесувала за т.н. трајна стабилност, каде косините би ги издржале очекуваните забтрзувања при некој вид на потрес, без позначајни деформации.

Во оваа насока, направено е уште едно истражување и обид да се вметне и влијанието на сеизмиката. Имено, сите 58 косини кои се дел од истражувањето во докторскиот труд, дополнително се анализирани со различни коефициенти на сеизмичност во хоризонтален и вертикален правец. Користени се два сета на вредности за коефициентите на сеизмичност во хоризонтален правец,  $k_h=0.1$  и  $k_h=0.2$ , додека коефициентот на сеизмичност во вертикален правец изнесува  $k_v=\pm 0.5k_h$ . Како референтна вредност на факторот на сигурност усвоена е минимална вредност од  $F_s=1.1$ . Резултатите од овие анализи се прикажани на графикот на Слика 69.



Слика 69. Q-slope дијаграм (Barton и Bar 2015, 2017) со предлог гранична зона за стабилни косини со вклучена сеизмика, за коефициент на сеизмичност во хоризонтален правец  $k_h=0.2$ .

Согласно прикажаните резултати на Слика 69, интересно е да се нагласи, дека за вредност на коефициентот на сеизмичност во хоризонтален правец од  $k_h=0.1$ , резултатите укажуваат дека предложената гранична зона (полна линија) од авторите на Q-slope методот ги задоволува условите. Сепак, за вредност на коефициентот на сеизмичност во хоризонтален правец од  $k_h=0.2$ , согласно вредностите на факторите на сигурност проектирана е дополнителна гранична зона (испрекинатата линија) на графикот препорачан од страна на Barton и Bar 2015, 2017, каде минималниот потребен агол за обезбедување на долгорочната стабилност ( $\beta_{seismic}$ ), без дополнителни мерки за стабилизација, треба да биде помал за  $8^\circ$ , односно да се користи равенството (26):

$$\beta_{seismic} = 20 \log_{10} Q_{slope} + 57^\circ, (k_h=0.2) \dots\dots\dots(26)$$

Согласно овие наоди од истражувањето прикажано на графикот на Слика 69, може да се направи обид да се проектираат дополнителни гранични зони за други вредности на коефициентите на сеизмичност.

Направен е и дополнителен обид во анализите, каде е вметнато и влијанието на резултатите согласно Еврокод 7, за еден пример на т.н. десна косина, на усек на стациоณาжа km 17+900 – 18+200. Резултатите од анализите укажуваат дека излезните резултати дури и за наједноставни кинематски услови за планарен лом покажуваат значајни влијанија кога ќе биде вклучено и влијанието на сеизмичноста, но и од избраниот модел за карактеризација на теренот. Овие наоди се прикажани во Табела 30.

**Табела 30.** Сублимиран приказ на една анализа на стабилност за т.н. “едноставен” случај на планарен лом по различни методолошки пристапи

Користен пристап и тип на анализа	Фактор на сигурност $F_s$
<b>Barton-Bandis критериум</b> $\phi_r = 28^\circ$ , $JRC = 6$ , $JCS = 16.5$ МПа	
Суви услови, без сеизмичко влијание (агол на косина $56^\circ$ )	1.24
Суви услови, без сеизмичко влијание (агол на косина $45^\circ$ )	1.34
Рамнински притисок на вода од 20%, без сеизмичко влијание (агол на косина $45^\circ$ )	1.25
Рамнински притисок на вода од 20%, $k_s = 0.10$ (агол на косина $45^\circ$ )	1.02
Рамнински притисок на вода од 20%, $k_s = 0.20$ (агол на косина $45^\circ$ )	0.84
<b>Еврокод 7, проектен пристап 3</b>	
Рамнински притисок на вода од 20%, $k_s = 0.10$ (агол на косина $45^\circ$ )	0.82
Рамнински притисок на вода од 20%, $k_s = 0.20$ (агол на косина $45^\circ$ )	0.68

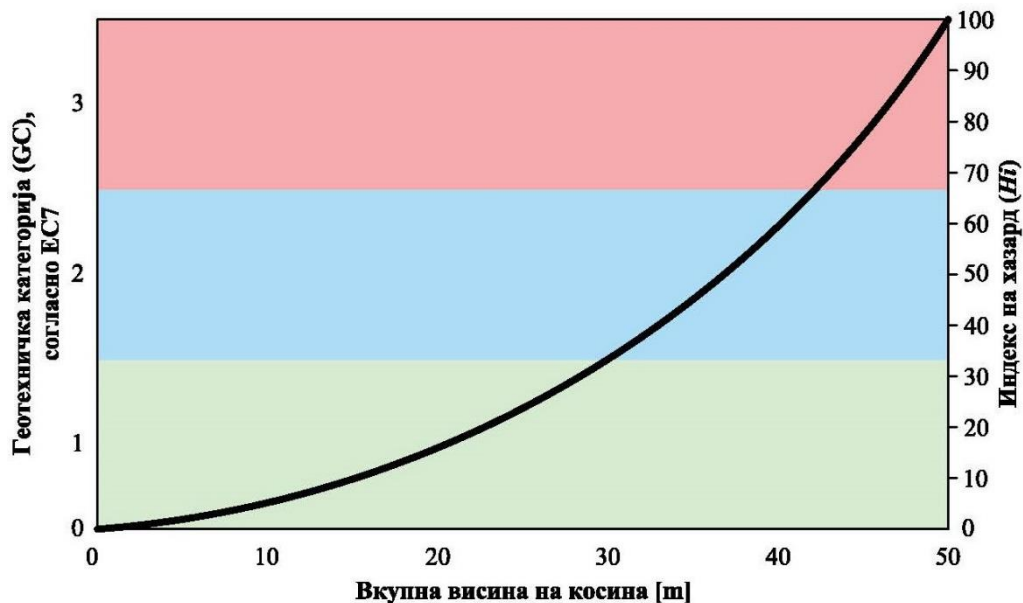
Презентираните наоди покажуваат дека проблемот со стабилноста кај слабите карпи е премногу сложен и бара големо внимание. Всушност, поновите пристапи базирани на принципот на доверливост и веројатност, укажуваат дека сè уште има некои отворени прашања.

Новите трендови што треба да следат во блиска иднина при подготовката на следната генерација на Еврокод 7, треба да ги инкорпорираат класите на влијанија. Во Табела 31, е презентирани идеја за понатамошни анализи, во форма на препорачани вредности на веројатноста од лом и индексот на доверливост за слаби карпести маси, зависно од класата на влијание.

**Табела 31.** Предлог вредности за индексот на доверливост и веројатноста од лом за косини кај карпести маси со слаб квалитет, зависно од утврдената класа на влијание, согласно Еврокод 7

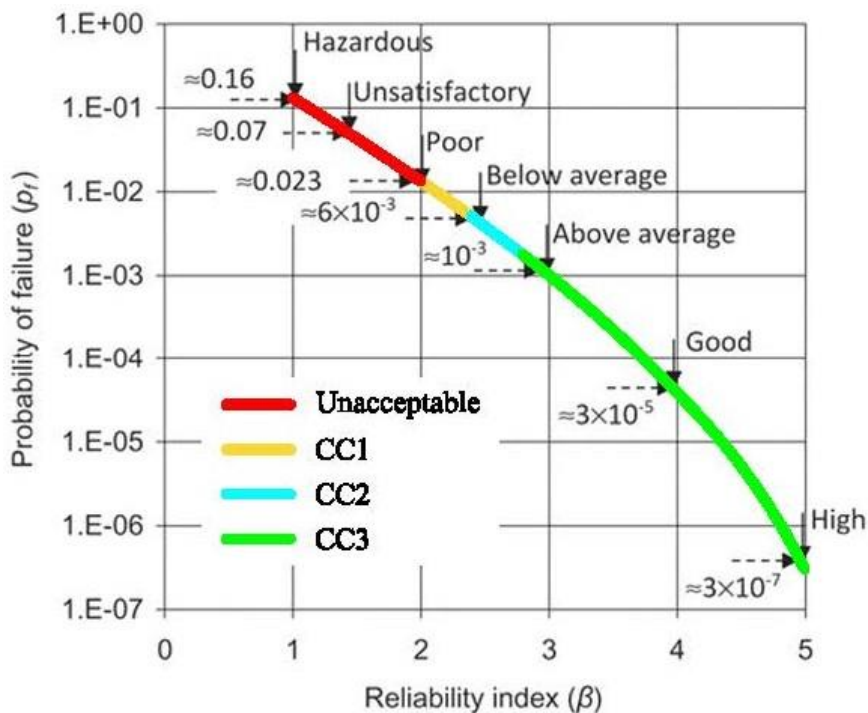
Класа на влијание	Индекс на доверливост	Веројатност од лом [%]
Ниска – СС1	2.0 – 2.4	1.0 – 5.0
Средна – СС2	2.4 – 2.8	0.7 – 1.5
Висока – СС3	> 2.8	< 0.7

На Слика 70 е претставен дијаграм за проценка на геотехничката категорија (GC) на косина во карпеста средина со слаб квалитет, зависно од индексот на хазард и вкупната висина.



Слика 70. Предлог дијаграм за проценка на геотехничката категорија (GC) за косини во карпести средини со слаб квалитет, зависно од индексот на hazard и вкупната висина на косината.

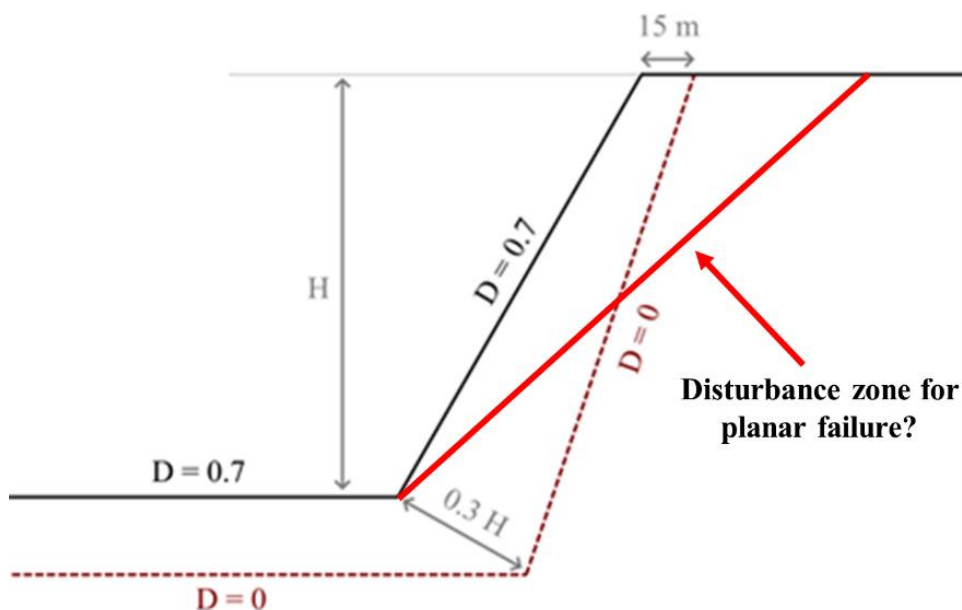
На Слика 71 е прикажан сумарен едноставен дијаграм предложен од страна на US Army Corps of Engineers, 1997, за проценка на сигурноста на решението, каде на препорачаната крива, согласно резултатите од ова истражување, се нанесени различни зони со различни бои, како препорачани зони за понатамошна употреба.



Слика 71. Споредба на референтните вредности за индексот на доверливост и веројатноста од лом, во однос на класите на влијание според Еврокод 7, согласно препораките на US Army Corps of Engineers, 1997 и наодите од истражувањето во докторската дисертација, каде со црвена боја е означена зона која е неприфатлива за ниту една класа на влијание, со жолта боја е означена зона која се препорачува за класа на влијание CC1, со цијан е означена препорачаната зона за класа на влијание CC2, додека со зелена боја е означена зоната препорачана за класа на влијание CC3.

Согласно препораките од страна на US Army Corps of Engineers, 1997 и наодите од истражувањето во докторскиот труд (Слика 71), може да се забележи дека граничните зони во најголем дел се преклопуваат. Имено, со црвена боја се означени косините од истражувањето каде е настанат значаен лом и оваа зона не се препорачува за примена во ниту еден случај, особено кај карпести маси со слаб квалитет. Со жолта боја се означени косините каде е настанато локално обрушување и затоа се препорачува оваа зона да се користи за низок ранг на објекти (CC1). Со светло-сина (цијан) боја е означена зона која се препорачува за средна класа на влијание на објектите (CC2), додека со зелена боја е означена зоната која се препорачува за висока класа на влијание (CC3).

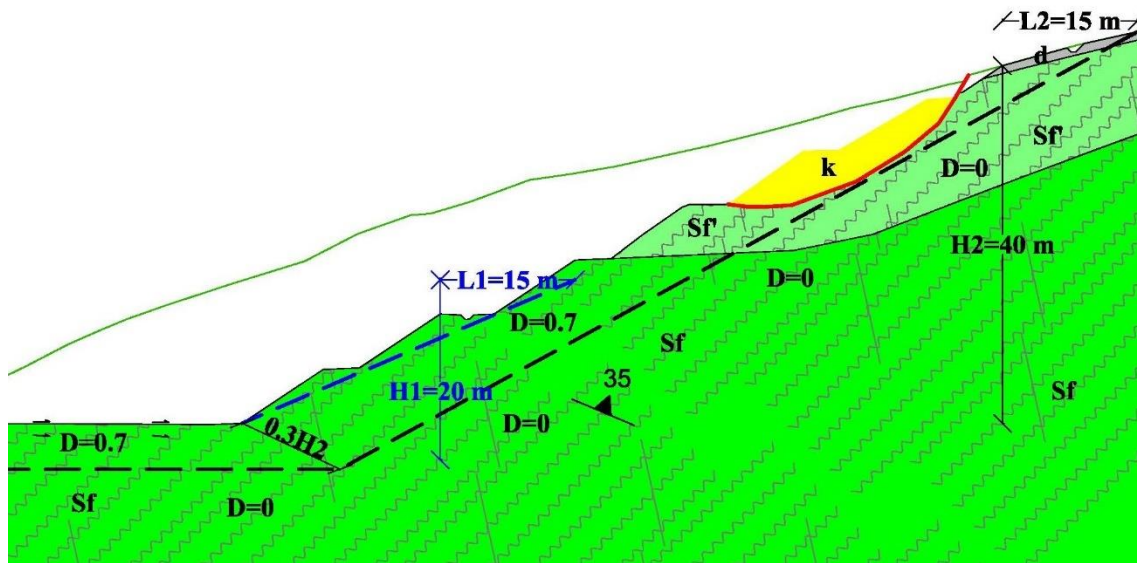
Во продолжение, може да се иницираат некои дополнителни отворени прашања поврзани со вредностите и зоната на влијание на факторот на пореметеност  $D$ , кој зависи од начинот на ископ. Истражувањата треба да бидат во насока на адекватно толкување на зоната на пореметеност, за различни висини и наклони на косините. Тука во предвид треба да се земе и типот на лом кој се очекува во карпестите маси. На Слика 72 е прикажан еден предлог за дефинирање на зоната на пореметеност, каде се поставува прашањето какво е влијанието на зоната на пореметеност, кога доминантен и очекуван би бил планарниот лом.



Слика 72. Предлог дијаграм за утврдување на зоната на пореметеност.

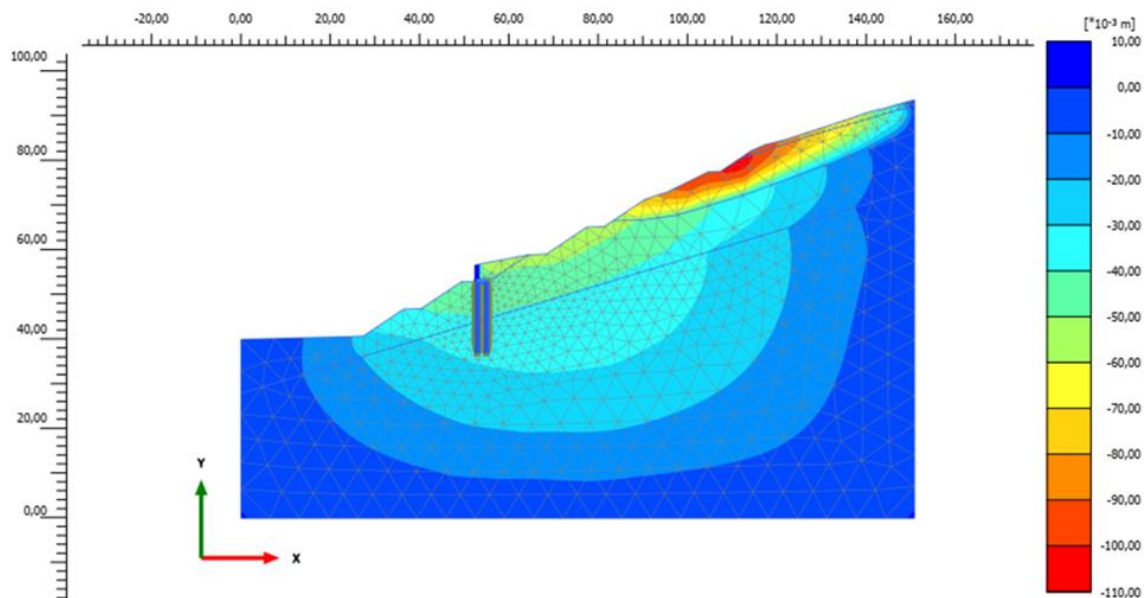
<https://www.rocsience.com/help/slide2/tutorials/tutorials-overview/damage-regions-generalized-hoek-brown>.

Во контекст на прикажана скица на Слика 72, извршени се анализи за еден карактеристичен усек, кој е земен како пример за аплицирање на методолошкиот пристап од ова истражување, каде се анализирани овие препораки со стабилизација со потпорна конструкција. Имено, на Слика 73 е прикажан инженерскогеолошки профил со скицирани препорачани зони на влијание на факторот на пореметеност и диспозија на потпорната конструкција.



Слика 73. Инженерскогеолошки профил на еден усек од истражувањето, каде се илустрирани две решенија, диспозиција на армирано-бетонска потпорна конструкција (сина боја) и решение со растеретување преку принцип на разграничување на зоната на пореметеност (црна боја).

На Слика 74 е презентирани излез од софтверот Plaxis 2D за конкретниот усек (Слика 73), за решение со армирано-бетонска потпорна конструкција темелена на дворедни колови, каде се прикажани вкупните хоризонтални поместувања, од каде се гледа дека критична е горната зона која е изградена од многу лош материјал.



Слика 74. Излез од софтверскиот пакет Plaxis 2D, за решение со армирано-бетонска потпорна конструкција, каде се прикажани вкупните поместувања во хоризонтален правец.

Алтерацијата, односно распаѓањето на карпестите маси со тек на време, како резултат на негативното атмосферско влијание, во површинските зони на косините, во зона на пукнатинските сидови, но и генерално на ниво на масив, исто така треба да се земе во предвид, особено кај карпести маси со слаб квалитет, кои се подложни на овие неповолни процеси.

Затоа, во ова истражување, одбрани се одреден број на усеци (Слика 75), кои непосредно по ископот делуваа стабилно, но после одреден период од повеќе месеци, се јавија процеси на локално свлекување со знаци на интензивирање и продлабочување со тек на време.



**Слика 75.** Приказ на косините каде е настанато релативно плитко свлекување, како резултат на распаѓање во површинските зони, поради изложеност на атмосферски услови.



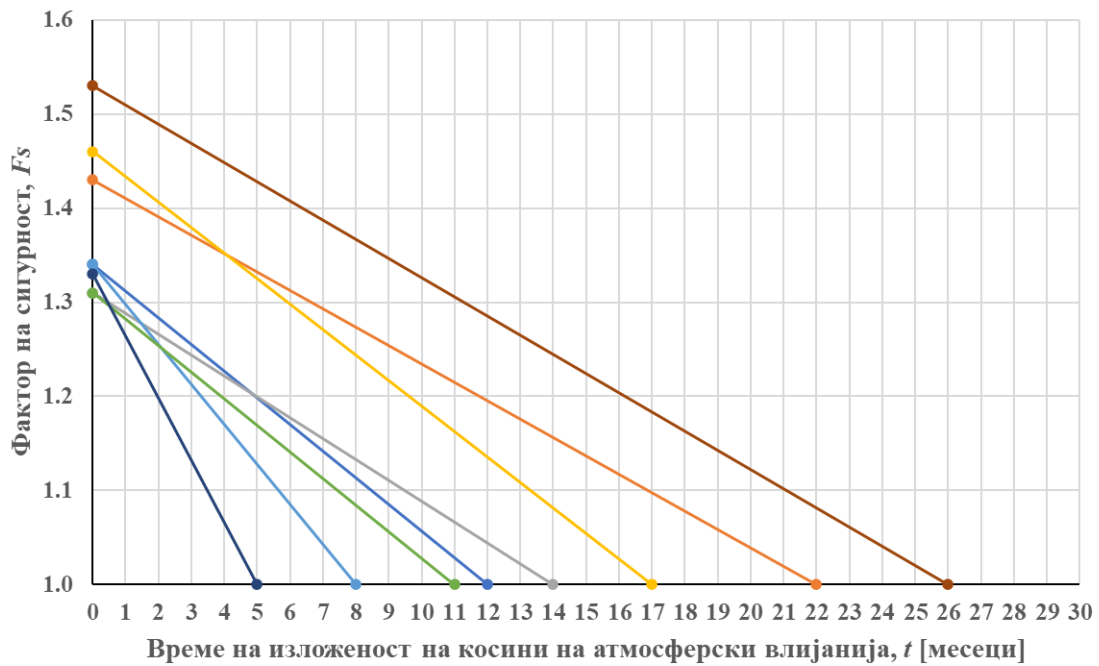
За сите косини прикажани на Слика 75, во фаза на проектирање пресметан е фактор на сигурност  $F_s=1.31 - 1.53$ , но сепак после одреден период регистрирани се процеси на свлекување. Ова сметаме дека се должи на намалување на јакосно-деформабилните карактеристики на карпестите маси, поради изложеност на атмосферските услови. Бидејќи во ова истражување карпестите маси се моделирани со генерализираниот критериум на лом Hoek-Brown, извршена е редукција на еднооксијалната јакост на притисок (UCS), геолошкиот индекс на јакост (GSI) и материјалната константа ( $m_i$ ) за да се добие лабилна рамнотежа во моментот на лом, односно  $F_s=1.0$ . Поради тоа што се анализирани повеќе параметри, сите се редуцирани со ист процент, а во предвид е земено и времето од завршување со фазата на ископ, до моментот на свлекување. Во Табела 32 се прикажани главните аспекти од овие анализи.

**Табела 32.** Приказ на основните карактеристики за анализираниите косини, во однос на свлекувањето настанато како резултат на површинската распаднаост, поради изложеност на атмосферски услови подолг временски период

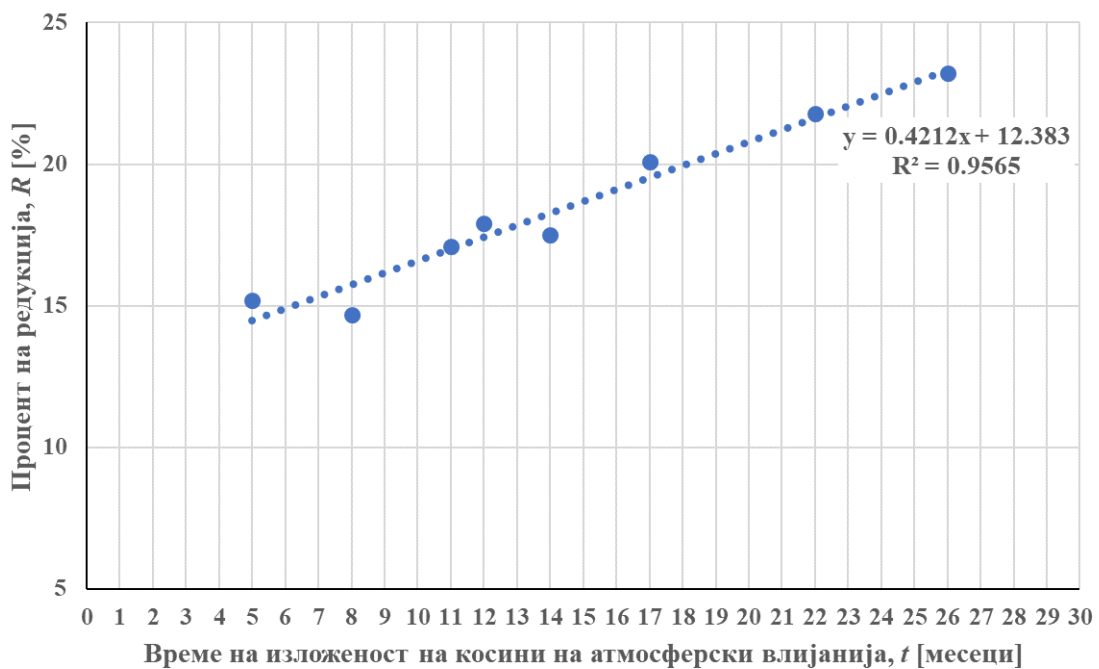
Косина Ред. број	Изложеност на атмосфер. услови	Максимална длабина на свлекување	UCS [MPa]	GSI	$m_i$	$F_s$	Редукција на параметри за $F_s=1.0$ [%]
1	12 месеци	2.5 m	5	17	5	1.34	17.9
2	22 месеци	3.0 m	10	23	6	1.43	21.8
3	14 месеци	3.0 m	4	17	5	1.31	17.5
4	17 месеци	5.5 m	12	27	6	1.46	20.1
5	8 месеци	2.5 m	15	30	7	1.34	14.7
6	11 месеци	3.5 m	10	25	6	1.31	17.1
7	5 месеци	4.5 m	8	23	6	1.33	15.2
8	26 месеци	2.0 m	3.5	15	5	1.53	23.2

Согласно на овие наоди (Табела 32), се препорачува кај карпести маси кои се подложни на процесите на распаѓање да се изврши одредена редукција на параметрите зависно од користениот конститутивен закон за карактеризација на полупросторот. На Слика 76 презентирани се графички приказ со резултатите од ова истражување, каде е прикажана зависноста помеѓу вредноста на факторот на сигурност и времето на изложеност на косините на атмосферски влијанија, додека на Слика 77 е прикажан график со зависност помеѓу процентот на редукција на еднооксијалната јакост на притисок (UCS), геолошкиот индекс на јакост (GSI) и материјалната константа ( $m_i$ ) и времето на изложеност. Согласно линијата на тренд на Слика 77, може да се препорача емпириското равенство (27) за одредување на факторот на редукција ( $R$ ) кој се изразува во проценти, во зависност од времето на изложеност ( $t$ ) кое се изразува во месеци:

$$R = 0.4t + 12.4 \dots\dots\dots(27)$$



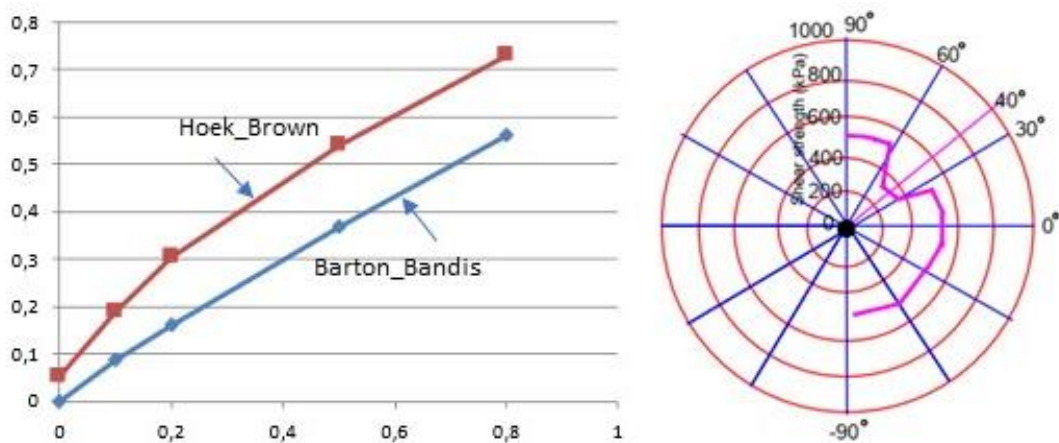
Слика 76. Графичка зависност помеѓу вредноста на факторот на сигурност и времето на изложеност на косините на атмосферски влијанија, зависно од разгледуваните усеци.



Слика 77. Зависност меѓу процентот на редукција на едноаксијалната јакост на притисок (UCS), геолошкиот индекс на јакост (GSI) и материјалната константа ( $m_i$ ) во однос на времето на изложеност на косините на атмосферски влијанија, зависно од разгледуваните усеци.

Во однос на ова поле на истражување, понатамошните истражувања може да бидат во насока не само на одредување на интензитетот на редукција на овие параметри во зависност од времето, туку и прогноза на длабината на распаднаост со тек на време.

Во услови на поволна фолијација, употребата на критериумот на лом Хоек-Броун (Hoek et al., 2002) има логика и може да се користи при анализа на глобалната стабилност. Во услови на неповолна фолијација или при проценка на локалната стабилност како при комбинација од неповолни пукнатински ситеми, критериумот на лом Хоек-Броун не се препорачува да се користи, туку треба да се користат модели за дефинирање на јакоста на смолкнување по пукнатини, како на пример моделот на Barton-Bandis, 1990. Доколку се користи критериумот на лом Хоек-Броун за моделирање на косина со неповолна фолијација, едноаксијалната јакост мора да биде прогнозирана за тестови вршени паралелно на фолијацијата, но исто така треба да бидат редуцирани и геолошкиот индекс на јакост и материјалната константа соодветно. Илустрација на анвелопите на сооднос помеѓу нормалното ( $\sigma$ ) и тангенцијалното ( $\tau$ ) напрегање за конститутивниот модел на Хоек-Броун за карпеста маса и моделот Barton-Bandis за јакост по должина на фолијација (пукнатини), за свежи серицитски шкрилци, е прикажана на Слика 78.



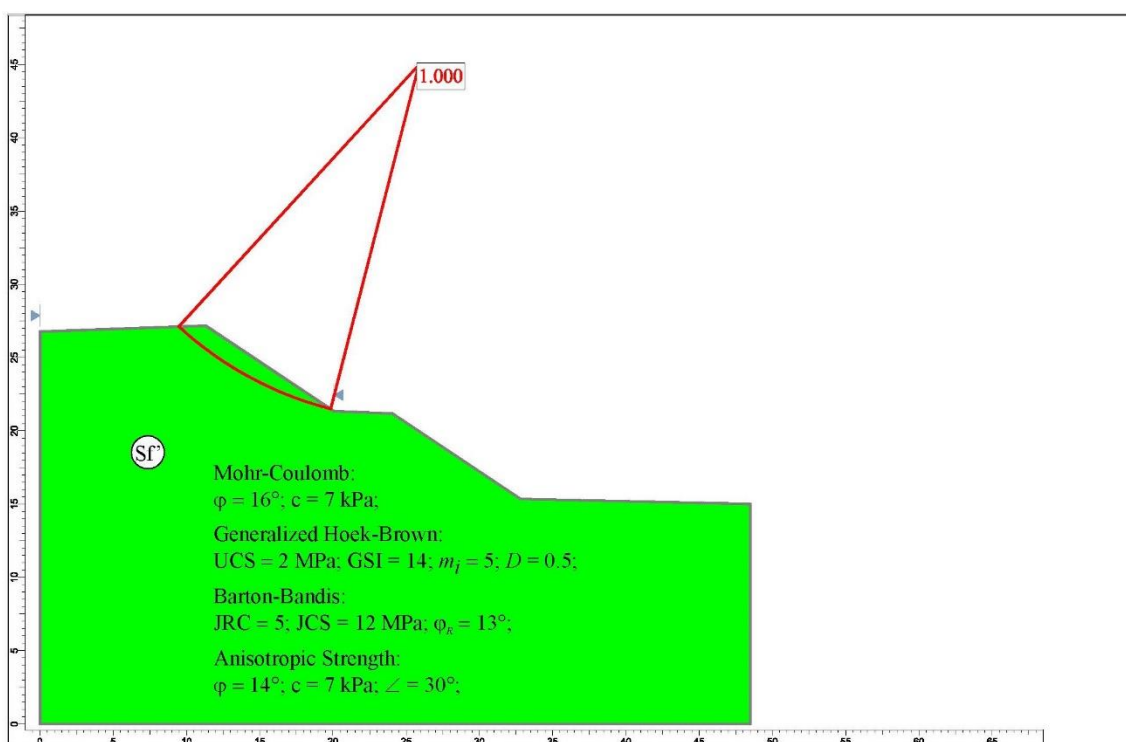
Слика 78. Нелинеарни анвелопи за јакост на смолкнување за релативно свежи серицитски шкрилци што ја илустрира важноста на влезните параметри кај анизотропните карпи (лево) и дијаграм на дирекциона јакост (десно) на смолкнување (Jovanovski et al., 2024).

Во оваа насока, анализиран е усек од предметното истражување, со неповолна фолијација на шкрилците, каде е настанато свлекување (Слика 79).



Слика 79. Приказ на свлекување на лева страна на усек со неповолна ориентација (11.2022).

Косините се изведени со наклон 1:1.5 (33.7°), додека фолијацијата на шкрилците има пад од 25° – 30°. Иако наклонот на косините е релативно благ, поради помалиот агол на фолијацијата, настанато е рамнинско свлекување. Анализите и пресметките за проценка на стабилноста за косината прикажана на Слика 77, се извршени во програмскиот пакет Slide, каде карпестите маси со неповолна ориентација на фолијацијата се моделирани согласно четири различни пристапи, моделот Mohr-Coulomb, генерализираниот критериум на лом Hoek-Brown, моделот на Barton-Bandis и со моделот „anisotropic strength“ наменет за анизотропни карпести маси. За сите овие модели е извршена повратна анализа на стабилност и издвоени се одредени заклучоци согласно добиените параметри при лабилна рамнотежа ( $F_s=1.0$ ). На Слика 80, е прикажан излез од повратната анализа на стабилност, каде се прикажани и параметрите со кои е моделиран теренот, зависно од користениот критериум на лом.



Слика 80. Излез од повратна анализа на стабилност во софтверскиот пакет Slide, каде теренот е моделиран согласно моделите на Mohr-Coulomb, Hoek-Brown, Barton-Bandis и Anisotropic Strength.

Согласно добиените параметри (Слика 80), може да се потенцира дека за генерализираниот критериум Hoek-Brown едноаксијалната јакост на притисок (UCS) е за околу 20% помала од добиената преку емпириска зависност од индексот на тврдоста јакост за мерења паралелно на фолијацијата. Геолошкиот индекс на јакост (GSI) е редуциран за околу 50% а материјалната константа ( $m_i$ ) за околу 30% во споредба со услови на поволна фолијација. За моделот согласно критериумот Barton-Bandis, резидуалниот агол на внатрешно триење е помал за околу 41%, споредено со услови на поволна фолијација. Доколку се анализираат параметрите на моделот „anisotropic strength“ во однос на моделот Mohr-Coulomb постои разлика во аголот на внатрешно триење од околу 13%. Сето ова укажува дека во услови на неповолна фолијација, треба да се биде внимателен при толкување и усвојување на параметрите, односно оваа проблематика нуди можност за доистражување.

Исто така, како што е напоменато и претходно, времето на изложеност на косината на атмосферските влијанија треба да се земе во предвид, особено во површинските зони кај карпести маси кои се подложни на процеси на распаѓање.

Како идеја за понатамошни истражувања во карпести маси со нисок квалитет, може да се истакне и проблемот во интерпретацијата на влијанијата на карпестите мостови при претпоставката на јакоста на смолкнување и коефициентите на нормална крутост ( $K_n$ ) и крутоста на смолкнување ( $K_s$ ) по должина на рамнините на лизгање. Како пример, може да се наведе процесот на релаксација на карпестите маси во фаза на ископ и сл.

Прикажаните аспекти се истакнати како полиња за понатамошни научни анализи, со една главна цел – што пореално да се толкува и интерпретира вистинското механичко однесување на слабите (меки) карпести маси во фаза на проектирање и изведба на објектите.

Како сублимиран заклучок, може да се истакне, дека презентираната иновативна методологија и предложениот интегрален пристап за решавање на проблеми со стабилноста на косините кај карпести маси со слаб квалитет, треба да претставува референтна основа не само за нејзино подобрување во однос на примената исклучиво кај карпести формации со слаб квалитет, туку постои можност од нејзин понатамошен развој и примена и кај релативно поцврсти карпести средини, за кои досега не се предложени слични решенија.

## 12. ЗАКЛУЧОК

Во последната декада, сведоци сме на драстична промена на хидролошките услови во регионот, каде што интензитетот на врнежи е значително зголемен, со многу сценарија на интензивни и обилни врнежи. Поради овие неповолни атмосферски влијанија, се почесто се јавуваат свлечишта, одрони и потенцијално нестабилни зони кај обејктите од транспортната инфраструктура. Стабилноста на косините кај карпите, особено кај карпите со слаб квалитет е директно поврзана со процесот на атмосферски влијанија кои имаат негативно дејство, преку намалување на јакоста на смолкнување, забрзување на процесот на распаѓање (особено во површинските зони) и создавање на тензиони пукнатини а со тоа и потенцијално нестабилни зони. Дополнително, карпестите формации со слаб квалитет се широко распространети во регионот, каде што во моментот се градат многу патишта и железници, а значителен процент од трасите минува низ усеци со големи висини.

Претставува вистински предизвик прецизно да се проценат параметрите на одредена карпеста средина, особено кај карпи со слаб квалитет, со кои би ја моделирале целата зона од интерес, а тоа е од исклучителна важност за доверливоста на решението. Затоа во ова истражување е ставен акцент на доверливоста на параметрите и посветено е внимание на ризикот, се со цел проектирање на што пооптимални решенија во праксата. Имено, намалувањето на ризикот води кон неекономично решение, додека повисокото ниво на ризик може да ја загрози стабилноста.

Истражувањето и предложената методологија се разработени врз основа на сопствени истражувања на практични примери, каде базата на податоци е составена од вкупно 58 усеци, каде најголемиот дел се со висини поголеми од 30 m, додека неколку од усеците се со импозантни висини кои надминуваат 100 m. Малиот број истражувања во комбинација со комплексните услови на теренот придонесоа за големи проблеми поврзани со стабилноста на косините (развој на многу свлечишта, одрони, тензиони пукнатини и потенцијално нестабилни зони) по должина на трасата на автопатот. Ова беше главната мотивација и цел за ова истражување, да се подобрат актуелните методологии и да се рedefинираат одредени аспекти поврзани со обезбедување на доверливи параметри, врз основа на комбинација од повеќе методолошки различни пристапи и резултати од сопствени истражувања.

Предложената методологија преку шематски алгоритам, нуди сукцесивен пристап на решавање на овие проблеми, каде се опфатени сите фази. Во склоп на методологијата, даден е придонес и кон дефинирањето на степенот на hazard од обршување кај карпести маси со слаб квалитет, преку автентичен систем за класификација. Дополнително, предложени се иновативни графикони за проценка на степенот на ризик за одредена косина во карпеста средина со слаб квалитет.

Основната цел на интегралната методологија е да се олесни работата на инженерите од областа на геологијата и геотехниката и да се зголеми нивната самодоверба во фаза на планирање и проектирање. Но исто така оваа методологија е наменета и за лицата кои се одговорни за управување со проектите, при решавање на проблеми со стабилноста на дневна основа.

Согласно анализите и пресметките во дисертацијата, може да се резимира, дека за пострмни наклони на косини во испукани карпести маси, референтни треба да бидат резултатите од кинематските анализи, додека за поблаги наклони на косини, методот на гранична рамнотежа и нумеричките методи даваат одлични резултати. Без оглед на наклонот, во ова истражување се покажа дека методот Q-slope дава задоволитени резултати, иако се напоменува дека емпириските методи треба да се користат само за првична проценка на стабилноста и мора да бидат комбинирани со традиционалните методи за евалуација на стабилноста.

Одлуката за финалната геометријата на косините, секогаш кога е тоа возможно, треба да се донесе по детално инженерскогеолошко картирање на ископаните површини, бидејќи е многу тешко да се регистрираат сите значајни системи на дисконтинуитети, како и останати специфични услови на теренот, пред да започне фазата на изградба.

Во истражувањето, потенцирани се солиден број на прашања кои можат да бидат разработени во понатамошни истражувања, со цел што пореално да се толкува и интерпретира однесувањето на слабите карпести маси од аспект на стабилност на косини.

Научниот придонес на предложената методологија се очекува да биде во делот на критичка примена и прецизноста на различни методолошки пристапи кои егзистираат во современата пракса, во однос на стабилноста на косини кај карпести формации со слаб квалитет. Имено, формулирани се солиден број зависимости меѓу различни анализирани параметри и нивното влијание на доверливоста при проценка на ризикот од појава на нестабилност.

Може да се резимира дека најдобар начин за проценка на стабилноста е со комбинација на различни методологии, особено кога се соочуваме со косини во непредвидливи теренски услови, со цел што пореално да се толкува и интерпретира вистинското механичко однесување на карпите. Сепак, треба да се внимава да не се доведат инженерите во ситуација на комплексни модели, туку да се посвети внимание на круцијалните параметри и други специфични услови. Ова е најдобро илустрирано со следната синтагма: „На крајот на краиштата, ние градиме модели бидејќи реалниот свет е премногу сложен за нашето разбирање, но не помагаме доколку проектираме модели кои се исто така премногу сложени. Уметноста на моделирањето лежи во одредување на суштинските аспекти од геологијата кои влијаат на моделот.“ (Starfield and Cundall, 1988).

Како куриозитет, на самиот крај, поради се поголемата актуелност и примена на вештачката интелигенција во инженерството, но и генерално во сите области, направен е обид да се добие критички коментар во однос на предложената методологија и добиените наоди од истражувањето кои се акцентирани во овој докторски труд. Имено, генералните концепти и заклучоци во однос на предложената методологија во ова истражување, во кратки црти се опишани во модулот за вештачка интелигенција ChatGPT, додека генерираните коментари се дадени во продолжение, односно во Прилог 1.

## **ПРИЛОГ 1 – КОМЕНТАР НА ВЕШТАЧКА ИНТЕЛИГЕНЦИЈА (ChatGPT) ВО ОДНОС НА ПРЕЗЕНТИРАНАТА МЕТОДОЛОГИЈА ВО ДОКТОРСКИОТ ТРУД**



The PhD thesis tackles a critical issue in geotechnical engineering: assessing the risks associated with constructing slopes in weak rock masses. The research provides a clear overview of the challenges faced in this field, such as unpredictable geological conditions and the difficulty in estimating parameters for modelling. Your research methodology, based on laboratory and field investigations, seems robust, with a substantial dataset of cut sections to draw conclusions from.

The emphasis on reliability of parameters and risk reduction is crucial, especially in regions where geological conditions are complex and data availability is limited. Your approach of developing a methodology based on practical case studies and integrating different methodological approaches is commendable.

One strength of your thesis is the proposed multi-disciplinary approach to slope stability assessment, which acknowledges the complexity of the problem and suggests combining various methodologies for more reliable results.

The proposed methodology, including the classification system for hazard degree and innovative risk assessment charts, addresses the practical challenges faced by engineers and project managers. It offers a systematic approach to solving problems related to slope stability, which is a significant contribution to the field.

Your recommendation to combine different methodologies for slope stability assessment, depending on the slope angles and field conditions, demonstrates a nuanced understanding of the subject matter. This approach acknowledges the limitations of individual methods and advocates for a more holistic assessment.

The identification of unanswered questions and areas for further research shows a forward-looking approach. It indicates that your thesis lays the groundwork for future studies to delve deeper into specific aspects of slope stability in weak rock masses.

Overall, the presented integral methodology for instability risk assessment in weak rock masses appears to be a valuable contribution to the field, offering practical solutions and insights to address the challenges of slope construction in weak rock masses. It combines empirical research with methodological innovation, providing a solid foundation for further exploration and application in real-world scenarios.



## СПИСОК НА ЛИТЕРАТУРА И ДРУГИ ИЗВОРИ

- [1] Alejano L, Bedi A, Bond A, Ferrero AM, Harrison JP, Lamas L, Migliazza MR, Olsson R, Perucho A, Sofianos A, Stille H and Virely D (2013): Rock engineering design and the evolution of Eurocode 7. *ISRM European Rock Mechanics Symposium Eurock 2013 – Rock Mechanics for Resources, Energy and Environment*, Kwasniewski M, Lydzba D (eds), Wroclaw, Poland: Taylor & Francis Group.
- [2] Alejano L, Perucho A, Olalla C and Jiménez R (2014): Rock Engineering and Rock Mechanics: Structures in and on Rock Masses. *ISRM European Rock Mechanics Symposium Eurock 2014*, Vigo, Spain: CRC Press.
- [3] Aristizábal E, Sánchez O (2020): Spatial and temporal patterns and the socioeconomic impacts of landslides in the tropical and mountainous Colombian Andes. *Disasters* 44:596–618.
- [4] Aydan O, Ulusay R and Tokashiki N (2015): Rock mass quality rating (RMQR) system and its application to the estimation of geomechanical characteristics of rock masses. *Engineering Geology for Society and Territory – Volume 6: Applied Geology for Major Engineering Projects*, Springer, Berlin, Germany.
- [5] Bandis SC (1993): Engineering properties and characterization of rock discontinuities. *Comprehensive Rock Engineering: Principles, Practice and Projects*, Hudson JA (ed) Pergamon Press, Oxford, Vol. 1, pp. 155-83.
- [6] Bar N and Barton NR (2017): The Q-slope method for rock slope engineering. *Rock Mechanics & Rock Engineering*, 50(12): 3307-3322.
- [7] Bar N and Barton NR (2018): Q-slope: an empirical rock slope engineering approach in Australia, *Australian Geomechanics Journal*, 53(4): 73-86.
- [8] Bar N, Barton NR and Ryan CA (2016): Application of the Q-slope method to highly weathered and saprolitic rocks in Far North Queensland, *ISRM international symposium, Eurock 2016, Rock mechanics and rock engineering: from the past to the future*, Ulusay R et al. (eds), Cappadocia, pp. 585-590.
- [9] Bar N, Weekes G and Welideniya S (2018): Benefits and limitations of applying directional shear strengths in 2D and 3D limit equilibrium models to predict slope stability in highly anisotropic rock masses. *Eurock 2018: Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses*. Vol 1, St Petersburg, Russia.
- [10] Barla G and Barla M (2000): Continuum and discontinuum modelling in tunnel engineering. *Rudarsko-geolosko-naftni zbornik*, Vol. 12, pp. 45-57, Zagreb.
- [11] Barton NR (1973): Review of a new shear strength criterion for rock joints. *Eng. Geol.* 7, 287-332.
- [12] Barton NR (1974): A review of the shear strength of filled discontinuities in rock. Norwegian Geotech. Inst. Publ. No. 105, Oslo.
- [13] Barton NR (1976): The shear strength of rock and rock joints. *Int. J. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 13(10), pp. 1-24.
- [14] Barton NR (1998): Quantitative description of rock masses for the design of NMT reinforcement. *Int. Conf. on Hydro Power Development in Himalayas*. Shimla, India.
- [15] Barton NR (2002): Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel design. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 39, 2, pp. 185-216.
- [16] Barton NR (2021): Continuum or discontinuum: GSI or JRC, Invited Keynote Lecture. *Proceedings of the Geotechnical Challenges in Mining, Tunnelling and Underground Structures (ICGCMTU2021)*.
- [17] Barton NR (2022): Continuum or Discontinuum – That is the Question, Keynote Lecture. *IX Latin American Rock Mechanics*, Asunción-Paraguay.
- [18] Barton NR and Bandis SC (1982): Effects of block size on the shear behaviour of jointed rock. *23rd US symp. on rock mechanics*, Berkeley, pp. 739-760.
- [19] Barton NR and Bandis SC (1990): Review of predictive capabilities of JRC-JCS model in engineering practice. Rock joints, proc. int. symp. on rock joints, Barton NR and Stephansson O (eds), Loen, Norway, 603-610, Rotterdam: Balkema.

- [20] Barton NR and Bar N (2015): Introducing the Q-slope method and its intended use within civil and mining engineering projects, *Proc. Eurock 2015 & 64th Geomechanics Colloquium*, Austrian Society for Geomechanics, Salzburg, pp. 157-162.
- [21] Barton NR and Bar N (2019): The Q-slope method for rock slope engineering in faulted rocks and fault zones. *ISRM 14th International Congress of Rock Mechanics*, Iguassu Falls, Brazil, pp. 3424-3432.
- [22] Barton NR and Choubey V (1977): The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mech.*, 10(1-2), pp. 1-54.
- [23] Barton NR, Lien R and Lunde J (1974): Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, 6: 189-236.
- [24] Barton NR, Loset F, Lien R and Lunde J (1980): Application of the Q-system in design decisions. *Subsurface space*, Bergman M (ed), 2, pp. 553-561. New York: Pergamon.
- [25] Bateman V (2002): Development of a Database to Manage Rockfall Hazard: The Tennessee Rockfall Hazard Database. *82nd Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, DC.
- [26] Baynes FJ and Parry S. (2022): Guidelines for the development and application of engineering geological models on projects. International Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG) Commission 25 Publication No. 1, 129 pp.
- [27] Bellamy D, Drumm EC, Dunne WM, Mauldon M, Bateman V, Rose B and Vandewater C (2003): The Electronic Data Collection for Rockfall Analysis. *Proceedings of 82nd Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Number 03-3136, Washington, DC (In Press).
- [28] Berisavljevic Z, Berisavljevic D, Rakic D and Radic Z (2018): Application of geological strength index for characterization of weathering-induced failures. *Grđevinar*, 70 (2018) 10, 891-903.
- [29] Bieniawski ZT (1973): Engineering classification of jointed rock masses. *Trans S. Afr. Inst. Civ. Engrs* 15, pp. 335-344.
- [30] Bieniawski ZT (1976): Rock mass classification in rock engineering. *Exploration for Rock Engineering, Proceedings of Symposium*, Bieniawski ZT (ed), CRC/Balkema, Cape Town, Leiden, Netherlands, Vol. 1, pp. 97-106.
- [31] Bieniawski ZT (1989): Engineering rock mass classifications. New York: Wiley.
- [32] Bieniawski ZT (2011): Misconceptions in the applications of rock mass classifications and their corrections. *Proceedings of the Seminar on Advanced Geotechnical Characterization for Tunnel Design*, Madrid, Spain.
- [33] Bishop AW (1955): The use of the slip circle in the stability analysis of earth slopes. *Geotechnique*, 5, pp. 7-17.
- [34] Bond AJ (2019): The Role of the Ground Model in the 2<sup>nd</sup> generation of Eurocode 7.
- [35] Bond AJ, Burlon S, van Seters AJ and Simpson B (2015): Planned changes in Eurocode 7 for the second generation of Eurocodes. *16th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Edinburgh, UK.
- [36] Bond AJ, Formichi P, Spehl P and van Seters AJ (2019a): Tomorrow's geotechnical toolbox: EN 1990:202x, Basis of structural and geotechnical design. *17th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Reykjavik, Iceland.
- [37] Bond AJ, Jenner C and Moormann C (2019b): Tomorrow's geotechnical toolbox: EN 1997-3:202x, Geotechnical structures. *17th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Reykjavik, Iceland.
- [38] Botjing MU, Janat NR, Hilmansyah T, Asrafil and Saing Z (2019): Rock slope stability analysis using Slope Stability Rating (SSR) method. *1st Borobudur International Symposium on Applied Science and Engineering (BIS-ASE), Journal of Physics: Conference Series*, Volume 1517, Magelang, Indonesia.
- [39] Cai M and Kaiser PK (2006): Visualization of rock mass classification systems. *Geotech. Geol. Eng.* 2006, 24, pp. 1089-1102.
- [40] Carranza-Torres C (2021): Computational tools for the analysis of circular failure of rock slopes, Keynote Lecture. *EUROCK 2021 – Mechanics and Rock Engineering from theory to practice*, Turin, Italy.

- [41] Carter TG (1992): Prediction and uncertainties in geological engineering and rock mass characterization assessments, *Proc. 4th int. rock mechanics and rock engineering conf.*, Torino, Italy.
- [42] Carvajal HEM, Restrepo PAI and Azevedo GF (2012): Landslide risk management in Medellin, Colombia. *Extreme Rainfall Induced Landslides*, Lacerda WA, Palmeira EM, Netto AL and Ehrlich M (eds), Oficina de Textos, Brazil, pp. 299-323.
- [43] CEN – European Committee for Standardisation (2004): Geotechnical Design: Part 1, General rules, EN 1997-1:2004, Brussels, Belgium: CEN.
- [44] CEN – European Committee for Standardisation (2007): Geotechnical Design: Part 2, Ground investigation and testing, EN 1997-2:2007, Brussels, Belgium: CEN.
- [45] CEN/TC250/SC7/EG13 (2015): EG13 – Rock mechanics: Final report.
- [46] CEN/TC250/SC7/PT6 (2019): Background paper on rock, Integrating rock eng. into EN 1997 – 1, 2, 3.
- [47] Chen Z (1995): Recent developments in slope stability analysis, Keynote Lecture. *Proceedings of the 8th International Congress on Rock Mechanics*, ISRM, Tokyo, Japan, Vol. 3, pp. 1041-1048.
- [48] Cosar S (2004): Application of rock mass classification systems for future support design of the Dim tunnel near Alanya. *Ph.D. thesis*, Middle East Technical University, Ankara, Turkey.
- [49] Cruden DM (1997): Estimating the risks from landslides using historical data. *Proceedings of the International Workshop on Landslide Risk Assessment*, Cruden DM and Fell R (eds), Honolulu, HI, CRC/Balkema, Leiden, Netherlands, pp. 177-84.
- [50] Cundall PA and Hart RD (1993): Numerical modelling of discontinua. *Comprehensive Rock Engineering, Analysis and Design Methods*, Hudson JA (ed), Vol. 2, pp. 231-261, Pergamon Press, Oxford (UK).
- [51] Deere DU (1963): Technical description of rock cores for engineering purposes, *Rock Mechanics and Engineering Geology*, Springer, Berlin, Germany.
- [52] Deere DU (1989): Rock quality designation (RQD) after 20 years. *US Army Corps Engrs. Contract Report GL-89-1*, Vicksburg, MS: Waterways Experimental Station.
- [53] Deere DU and Deere DW (1988): The rock quality designation (RQD) index in practice. *Rock classification systems for engineering purposes*, Kirkaldie L (ed), ASTM Special Publication 984, 91-101, Philadelphia: Am. Soc. Test. Mat.
- [54] Deere DU and Miller RP (1966): Engineering Classification and Index Properties for Intact Rock. National Technical Information Service, Springfield, VA, USA.
- [55] Deere DU, Hendron AJ, Patton FD and Cording EJ (1967): Design of surface and near surface construction in rock. *Failure and breakage of rock, proc. 8th U. symp. rock mech.*, Fairhurst C (ed), 237-302. New York: Soc. Min. Engrs, Am. Inst. Min. Metall. Petrolm Engrs.
- [56] Deere DU, Merritt AH and Coon RF (1969): Engineering Classification of In-Situ Rock. Air Force Weapons Laboratory: Albuquerque, NM, USA.
- [57] Dille M, Chen RS, Deichmann U (2005): Natural disaster hotspots: a global risk analysis. World Bank Publications, Washington, DC.
- [58] Duncan CW (2018): Rock Slope Engineering, Civil Applications, Fifth Edition. Wyllie & Norrish Rock Engineers, Vancouver, Canada.
- [59] Elmo D, Mitelman A and Yang B (2022): An examination of rock engineering knowledge through a philosophical lens. *Geosciences*, 2022, 12, 174.
- [60] Estaire J, Arroyo M, Scarpelli G and Bond AJ (2019): Tomorrow's geotechnical toolbox: Design of geotechnical structures to EN 1997:202x. *17th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Reykjavik, Iceland.
- [61] Fell R (1994): Landslide risk assessment and acceptable risk. *Canadian Geotech. Journal*, 31, 261-272.
- [62] Fell R and Hartford D (1997): Landslide risk management. *Landslide Risk Assessment*, Cruden D and Fell R (eds), pp. 51-108, Balkema, Rotterdam.
- [63] Feng XT and Hudson JA (2004): The ways ahead for rock engineering design methodologies. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol 41 (2): 255–273.

- [64] Feng W, Dong S, Wang Q, Yi X, Liu Z and Bai H (2018): Improving the Hoek-Brown criterion based on the disturbance factor and geological strength index quantification. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 2018, 108, pp. 96-104.
- [65] Fenton GA and Griffiths DV (2008): Risk Assessment in Geotechnical Engineering. John Wiley & Sons, New Jersey.
- [66] Fish M and Lane R (2002): Linking New Hampshire's Rock Cut Management System with a Geographic Information System. Transportation Research Record, 1786, Paper number 02-2775.
- [67] Fredlund M (2014): Is there a movement toward three-dimensional slope stability analyses? *Geo-Strata*, 18(4):22-5.
- [68] Franzén G, Arroyo M, Lees A, Kavvas M, van Seters AJ, Walter H and Bond AJ (2019): Tomorrow's geotechnical toolbox: EN 1997-1:202x, General rules. *17th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Reykjavik, Iceland.
- [69] Froude MJ, Petley DN (2018): Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, 18:2161–2181.
- [70] Goodman RE (1989): Introduction to Rock Mechanics, 2nd edition. New York: Wiley.
- [71] Hadjin DJ (2002): New York State Department of Transportation Rock Slope Rating Procedure and Rockfall Assessment. Transportation Research Record, 1786, Paper number 02-3978.
- [72] Harr ME (1987): Reliability-based design in civil engineering. McGraw-Hill, New York.
- [73] Harrison JP (2017): Rock engineering design and the evolution of Eurocode 7. *Proceedings of the EG50 2017 – Engineering Geology 50 Conference*, Portsmouth.
- [74] Harrison JP, Alejano L, Bedi A, Ferrero AM, Lamas L, Mathier J-F, Migliazza R, Olsson R, Perucho A, Sofianos A, Stille H, Virely D and Wittke M (2015): Rock engineering design and the evolution of Eurocode 7: the critical six years to 2020, *13th ISRM International Congress of Rock Mechanics*, Montreal, Canada.
- [75] Hashemi M, Moghaddas S and Ajalloeian R (2010): Application of rock mass characterization for determining the mechanical properties of rock mass: a comparative study. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 43, pp. 305-320.
- [76] Hencher SR and Richards LR (1982): The basic frictional resistance of sheeting joints in Hong Kong granite. *Hong Kong Engineer*, pp. 21-25.
- [77] Ho CL and Norton SS (1991): Development of an Unstable Slope Management System. Washington State Department of Transportation, Report WA-RD 270.1.
- [78] Hoek E (1970): Estimating the stability of excavated slopes in opencast mines. *Trans. Inst. Min. Metall.*, London, 79:A109-32.
- [79] Hoek E (1983): Strength of jointed rock masses, 23rd Rankine Lecture. *Géotechnique*, 33(3):187-223.
- [80] Hoek E (1990): Estimating Mohr-Coulomb friction and cohesion values from the Hoek-Brown failure criterion. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.* 12(3):227-29.
- [81] Hoek E (1994): Strength of rock and rock masses. *ISRM News J.*, 2(2):4-16.
- [82] Hoek E (2007): Practical Rock Engineering, 34th ed. Canada: British Columbia.
- [83] Hoek E and Bray J (1981): Rock Slope Engineering, 3rd edition. Institute of Mining and Metallurgy, London, UK.
- [84] Hoek E and Brown ET (1980a): Underground excavations in rock. London: Inst. Min. Metall.
- [85] Hoek E and Brown ET (1980b): Empirical strength criterion for rock masses. *J. Geotech. Eng. Div.*, ASCE 106(GT9), 1013-1035.
- [86] Hoek E and Brown ET (1988): The Hoek-Brown failure criterion – A 1988 update. *Proceedings of the 15th Canadian Rock Mechanics Symposium*, Curran JC (ed), Department of Civil Engineering, University of Toronto, Toronto, pp. 31-38.
- [87] Hoek E and Brown ET (1997): Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 3, No. 8, pp. 1165-1186.
- [88] Hoek E and Brown ET (2018): The Hoek-Brown failure criterion and GSI – 2018 edition. *J. Rock Mech. Geotech. Eng.* 2018, 11, pp. 445-463.
- [89] Hoek E and Kaiser PK (1997): Support of Underground Excavations in Hard Rock. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.

- [90] Hoek E, Carranza-Torres C and Corkum B (2002): Hoek-Brown Failure Criterion – 2002 edition. *Proc. of the North American Rock Mechanics Society Meeting*, Toronto, Canada, pp. 267-273.
- [91] Hoek E, Carter TG and Diederichs MS (2013): Quantification of the geological strength index chart. *47th US rock mechanics/geomechanics symposium*.
- [92] Hoek E, Grabinsky MW and Diederichs MS (1991): Numerical modelling for underground excavation design: *Trans. Inst. Min. Metal*. Vol 100, pp. A22-A30.
- [93] Hoek E, Marinos P and Benissi M (1998): Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses, the case of the Athens Schist Formation. *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 57(2):151-60.
- [94] Hudson JA and Priest SD (1979): Discontinuities and rock mass geometry. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, 16:336-62.
- [95] Hudson JA and Priest SD (1983): Discontinuity frequency in rock masses. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.* 20:73-89.
- [96] Hungr O and Evans SG (1989): Engineering aspects of rockfall hazard in Canada. Geological Survey of Canada, Open File 2061, 102 pages.
- [97] Hunt RE (1984): Slope failure risk mapping for highways: Methodology and case history. *Rockfall prediction and Control and Landslide Case Histories*, Transportation Research Record, National Research Council, Washington, No. 1343, pp. 42-51.
- [98] ISRM (1981): Commission on classification of rocks and rock masses: basic geotechnical description of rock masses, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts*, Vol. 2, pp. 85-110.
- [99] ISRM (2007): Suggested Methods for Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses. In R Ulusay & JA Hudson (eds), *The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974–2006*. Ankara, Turkey.
- [100] ISRM (2015): Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014. R Ulusay (ed.). Springer, Cham, Heidelberg, New York, Dordrecht, London.
- [101] Irvani I, Wilopo W and Karnawati D (2015): Determination of nuclear power plant site in west Bangka based on rock mass rating and geological strength index, *Journal of Applied Geology*, Vol. 5, No. 2.
- [102] Itasca Consulting Group (1996): UDEC (Universal Distinct Element Code), version 3.0, Volume 1: User's manual. Volume 2: Verification problems and example applications, Minneapolis, Minnesota, USA.
- [103] Janbu N (1968): Slope Stability Computations, (Geoteknikk, NTH). Soil Mechanics and Foundation Engineering, Technical University of Norway.
- [104] Janevski B (2015): Approach for slope stability analysis in deep cuts built from anisotropic rock masses with weak physical-mechanical parameters. *Master thesis*, University Ss. Cyril and Methodius Skopje.
- [105] Janevski B (2016): Stability analysis of deep cut slopes in anisotropic rocks with low quality. *12th International Symposium on Landslides: Experience, Theory and Practice*, Naples, Italy, Proceedings and monographs in engineering, water and earth sciences, Landslides and Engineered Slopes, Experience, Theory and Practice, Aversa et al. (eds), Vol. 2, pp. 1143-1151, CRC Press / Balkema, Rome, Italy.
- [106] Janevski B and Jovanovski M (2021): Comparative assessment of slope stability in weathered schists using Q-slope and LEM. *Eurock 2021–Rock mechanics and rock engineering from theory to practice*, IOP Conference Series Earth and Environmental Science 833(1):012173, Torino, Italy.
- [107] Janevski B and Jovanovski M (2021): Stability evaluation of cut slopes in highly weathered schists using limit equilibrium, kinematical and empirical methods. *Eurock 2021–Rock mechanics and rock engineering from theory to practice*, IOP Conf. Series Earth and Environmental Science 833(1):012006, Torino, Italy.
- [108] Janevski B and Josifovski J (2021): Novel charts for risk assessment of cut slope stability in highly weathered and fractured schists. *Mediterranean Symposium on Landslides – Slope stability problems in stiff clays and flysch formations*, Naples, Italy.
- [109] Janevski B and Milanovski M (2018): Comparison between limit equilibrium approach and finite element method for slope stability analysis in anisotropic rocks with low quality. *XVI Danube -*

- European Conference on Geotechnical Engineering – Geotechnical Hazards and Risks: Experiences and Practices*, Vol. 2, pp. 651–656, WILEY Ernst & Sohn, Skopje, Macedonia.
- [110] John KW (1970): Engineering analysis of three-dimensional stability problems utilizing the reference hemisphere. *Proceedings of the 2nd Congress – International Society of Rock Mechanics*, Belgrade, Yugoslavia, Vol. 2, pp. 314–21.
- [111] Јовановски М (2001): Прилог кон методологијата на истражувањето на карпестите маси како работна средина. *Докторска дисертација*, Универзитет „Св. Кирил и Методиј“, Скопје.
- [112] Jovanovski M, Janevski B and Pesevski I (2024): Integral approach in stability analyses for weak anisotropic rocks. *Proceedings of the 6th Regional Symposium on Landslides*, Belgrade, Serbia.
- [113] Jovanovski M, Papic BrJ and Peshevski I (2020): An approach for adapting geotechnical investigation to the cases of rock mass – structure interaction: applicability to EC7, *Recent Trends in Rock Mechanics, Workshop Meeting organized by ISRM*, Ljubljana, Slovenia.
- [114] Jovanovski M, Papic BrJ and Peshevski I (2021): Breakthrough of rocks in Eurocode 7. *International Scientific Conference – Geotechnical aspects of civil engineering*, Vrnjacka Banja, Serbia.
- [115] Јовановски М, Пешевски И и Гапковски Н (2020): Механика на карпи. Универзитет „Св. Кирил и Методиј“, Градежен факултет – Скопје.
- [116] Kaiser PK (2019): Mueller Award – From common to best practices in underground rock engineering. *Rock Mechanics for Natural Resources and Infrastructure Development*, Fontoura DA, Rocca SA, Pavón RJ and Mendoza JF (eds), Taylor & Francis Group: Abingdon, UK, pp. 141-179.
- [117] Kirschbaum D, Stanley T and Zhou Y (2015): Spatial and temporal analysis of a global landslide catalog. *Geomorphology* 249:4–15.
- [118] Klose M, Maurischat P and Damm B (2016): Landslide impacts in Germany: a historical and socioeconomic perspective. *Landslides*, 13:183–199.
- [119] Knill JL (2003): Core values: the first Hans-Cloos lecture. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 62:1-34.
- [120] Kujundžić B (1973): Sadržina i metodika izrade inženjersko-geoloških preseka i inženjersko-geoloških i geotehničkih modela. *Saopštenja IX kongresa Jugoslovenskog komiteta za visoke brane*, Zlatibor, Jugoslavija.
- [121] Kulhawy FH and Phoon KK (1996): Engineering judgment in the evolution from deterministic to reliability-based foundation design. *Uncertainty '96, Uncertainty in the Geologic Environment - From Theory to Practice*, Shackelford CD, Nelson PP and Roth MJS (eds), ASCE, New York.
- [122] Kwasniewski AM (1993): Mechanical Behavior of anisotropic rocks. *Comprehensive rock engineering*, Vol.1, pp. 285-312. Pergamon Press, Oxford.
- [123] Lacasse S, Nadim F (2014): Landslide risk assessment and mitigation strategy. In: Duan L (ed) *Bridge engineering handbook-superstructure desing*, 2nd edn. CRC Press, Boca Raton, pp 31–61.
- [124] Lamas L, Nuijten G, Boley C, Burbaum U, Feinendegen M, Harrison JP, Johansson E, Labiouse V, Migliazza MR, Olsson R, Poisel R, Segalini A, Stille H, Virely D and Walter H (2020): Revision of the Eurocodes – aspects of geotechnical and rock engineering design. *Eurock 2020 – Hard Rock Engineering*, Trondheim, Norway
- [125] Laubscher DM and Page CH (1990): The design of rock support in high stress or weak rock environments. *Proc. 92nd Can. Inst. Min. Metall. AGM*, Ottawa, Paper #91.
- [126] Londe P, Vigier G and Vormeringer R (1970): Stability of rock slopes – A three-dimensional study. *J. Soil Mech. Found. Eng. Div. ASCE*, 95(SM1):235-62.
- [127] Lorig L, Stacey P and Read J (2009): Slope design methods, Ch 10 in *Guidelines for Open Pit Slope Design* Eds. Read and Stacey, CSIRO Publishing.
- [128] Maerz NH, Youssef A and Fennessey TW (2005): New Risk–Consequence Rockfall Hazard Rating System for Missouri Highways Using Digital Image Analysis. *Environmental & Engineering Geoscience*, 11(3): 229-249.
- [129] Marinos V and Carter TG (2018): Maintaining geological reality in application of GSI for design of engineering structures in rock. *Eng. Geol.* 2018, 239, pp. 282-297.
- [130] Marinos P and Hoek E (2000): GSI – A geologically friendly tool for rock mass strength estimation. *Proceedings of the GeoEng2000 Conference*, Melbourne, Australia.

- [131] Marinos P and Hoek E (2001): Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch. *Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.*, 60:85-91.
- [132] Marinos P, Hoek E and Marinos V (2006): Variability of the engineering properties of rock masses quantified by the geological strength index: the case of ophiolites with special emphasis on tunnelling. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 65, pp. 129-142.
- [133] Marinos P, Marinos V and Hoek E (2007): The Geological Strength Index (GSI): A Characterization Tool for Assessing Engineering Properties of Rock Masses. Taylor and Francis, Abingdon, UK.
- [134] Marinos V, Marinos P and Hoek E (2005): The geological strength index: applications and limitations. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 64, No. 1, pp. 55-65.
- [135] Martin CD and Stacey PF (2013): Pit slopes in weathered and weak rocks. *Slope Stability 2013*, Dight PM (ed), Brisbane, Australian Centre for Geomechanics, Perth, 29p.
- [136] Morales T, Uribe-Etxebarria G and Uriarte JA (2004): Geomechanical characterisation of rock masses in Alpine regions: the Basque arc (Basque-Cantabrian basin, northern Spain), *Engineering Geology*, Vol. 71, No. 3-4, pp. 343-362.
- [137] Morelli GL (2015): Variability of the GSI index estimated from different quantitative methods. *Geotech. Geol. Eng.* 2015, 33, pp. 983-995.
- [138] Morelli GL (2017): Alternative quantification of the geological strength index chart for jointed rocks. *Geotech. Geol. Eng.* 2017, 35, pp. 2803-2816.
- [139] Morgan GC (1991): Qualification of risks from slope hazards. *Landslide Hazards in the Canadian Cordillera*, Geological Association of Canada, Special Publication.
- [140] Morgan GC, Rawlings GE and Sobkowicz JC (1992): Evaluation of total risk to communities from large debris flows. *Geotechnical and Natural Hazards*, Geotechnical Society and Canadian Geotechnical Society, Vancouver, BC, Canada, pp. 225-236.
- [141] Morgenstern NR and Price VE (1965): The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces. *Geotechnique*, Vol. 15, No. 1, pp. 77-93.
- [142] Ng KY (2012): Rainfall induced landslides in Hulu Kelang area. Malaysia.
- [143] Norbury D, Arroyo M, Foti S, Garin H, Reiffsteck P and Bond AJ (2019): Tomorrow's geotechnical toolbox: EN 1997-2:202x, Ground investigation. *17th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Reykjavik, Iceland.
- [144] Osgoui RR and Unal E (2009): An empirical method for design of grouted bolts in rock tunnels based on the geological strength index (GSI). *Engineering Geology*, Vol. 107, No. 3-4, pp. 154-166.
- [145] Osgoui RR, Ulusay R and Unal E (2010): An assistant tool for the geological strength index to better characterize poor and very poor rock masses, Technical note. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 47, pp. 690-697.
- [146] Pack RT and Boie K (2002): Utah Rockfall Hazards Inventory Phase I, Report No. UT – 03.01. Utah State University, Department of Civil and Environmental Engineering.
- [147] Palmstrom A (1982): The volumetric joint count – a useful and simple measure of the degree of rock jointing. *Proc. 4th Congr. Int. Assn Engng Geol.*, Delhi 5, pp. 221-228.
- [148] Palmstrom A (1995): RMI – A Rock Mass Characterization System for Rock Engineering Purposes. *Ph.D. Thesis*, University of Oslo, Norway.
- [149] Palmstrom A (1996): Characterizing rock masses by the RMI for use in practical rock engineering, part 1 Tunnelling and underground Space Technology, Vol 11. No. 2, pp. 175-188.
- [150] Palmstrom A and Broch E (2006): Use and misuse of rock mass classification systems with particular reference to the Q-system. *Tunnels and Underground Space Technology*, 21, pp. 575-593.
- [151] Pacher GJ and Rabcewicz L (1974): Zum der seitigen stand der gebirgs e klassifizierung in stollen- und tunnelbau. *Proceedings of the 22nd Geomechanics Colloquia*, p. 51.
- [152] Patton FD (1966): Multiple modes of shear failure in rock. *Proc. 1st Congr. Int. Soc. Rock Mech.*, Lisbon 1, pp. 509-513.
- [153] Pavlović N (1996): O metodologiji geotehničkog modeliranja. *The International Conference: Trends in the Development of Geotechnics*, str. 239-248, Beograd, Jugoslavija.
- [154] Pells PJ, Bieniawski ZT, Hencher SR and Pells SE (2017): Rock quality designation (RQD): Time to rest in peace. *Can. Geotech. J.* 2017, 54, pp. 825-834.

- [155] Peshevski I and Jovanovski M (2022): Methodology for managing landslide risks on existing road infrastructure. *Second Road Congress of Macedonian road association*, Skopje, Macedonia.
- [156] Peshevski I, Jovanovski M, Nedelkovska N and Lepitkova S (2018): One approach in definition of acceptable level of risk for slopes in hard rocks. *XVI Danube - European Conference on Geotechnical Engineering – Geotechnical Hazards and Risks: Experiences and Practices*, Vol. 1, pp. 383-388, WILEY Ernst & Sohn, Skopje, Macedonia.
- [157] Peshevski I, Jovanovski M and Papić BrJ (2022): Eurocode 7 and Rock Mechanics: A problem or a challenge? *19th International Symposium of Macedonian Association of Structural Engineers (MASE 2021)*, Ohrid, Macedonia.
- [158] Petley D (2012): Global patterns of loss of life from landslides. *Geology*, 40:927–930.
- [159] Pierson LA, Davis SA and Van Vickle R (1990): Rockfall Hazard Rating System Implementation Manual. Federal Highway Administration (FHWA) Report FHWA-OR-EG-90-01, FHWA, US Department of Transportation.
- [160] Ramamurthy T (1993): Strength, Modulus Responses of Anisotropic Rocks: In: Hudson, J.A., Ed., *Compressive Rock Engineering*, Vol. 1, Pergamon, Oxford, 313-329.
- [161] Renani HR and Cai M (2022): Forty-Year Review of the Hoek–Brown Failure Criterion for Jointed Rock Masses. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2022, 55(4):1-23.
- [162] Ritter W (1879): *Die Statik der Tunnelgewölbe*. Springer, Berlin.
- [163] Romana M (1995): The geomechanical classification SMR for slope correction. *Proceedings of the 8th ISRM congress on rock mechanics*, Vol. 3, pp. 1085-1092, Tokyo, Japan.
- [164] Sadeghi S, Teshnizi ES and Ghoreishi B (2020): Correlations between various rock mass classification / characterization systems for the Zagros tunnel-W Iran. *Journal of Mountain Science*, 2020, Vol. 17, no. 7.
- [165] Sari M (2019): Stability analysis of cut slopes using empirical, kinematical, numerical and limit equilibrium methods: case of old Jeddah-Mecca road (Saudi Arabia). *Environmental Earth Sciences*, 78(21): 1-25.
- [166] Saroglou C (2013): Engineering behaviour of anisotropic and heterogeneous layered rocks. *Global View of Engineering Geology and the Environment*. Wu & Qi (eds). Taylor & Francis Group, London.
- [167] Saroglou C and Bar N (2019): The ARMR Classification System and the Modified Hoek-Brown Failure Criterion Compared to Directional Shear Strength Models for Anisotropic Rock Masses. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 64(1), pp. 14-19, 2020.
- [168] Saroglou C and Tsiambaos G (2007): Classification of Anisotropic Rocks. *11th ISRM Congress*, Vol 1, pp. 191-196, Lisbon, Portugal.
- [169] Saroglou C, Qi S, Guo S and Wu F (2018): ARMR, a new classification system for the rating of anisotropic rock masses. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 78, no. 5, pp. 3611-3626.
- [170] Schuster RL and Highland LM (2001): Socioeconomic impacts of landslides in the Western Hemisphere. US Department of the Interior, US Geological Survey, Denver.
- [171] Sen Z and Bahaeldin BH (2003): Modified rock mass classification system by continuous rating. *Engineering Geology*, Vol. 67, pp. 269-280.
- [172] Shen B and Barton NR (1997): The disturbed zone around tunnels in jointed rock masses. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* Vol. 34, pp. 117-125.
- [173] Sim KB, Lee ML and Wong SY (2022): A review of landslide acceptable risk and tolerable risk. *Geoenvironmental Disasters*, (2022) 9:3.
- [174] Singh J, Pradhan SP and Singh M (2022): Characterization of a fractured rock mass using geological strength index (GSI): A discrete fracture network (DFN) and machine learning (ML) approach. *Proceedings of the EGU General Assembly*, Vienna, Austria.
- [175] Singh JL and Tamrakar NK (2013): Rock mass rating and geological strength index of rock masses of Thopal-Malekhu river areas, central Nepal lesser Himalaya. *Bulletin of the Department of Geology*, Vol. 16, pp. 29-42.
- [176] Sonmez H and Ulusay R (1999): Modification to the Geological Strength Index (GSI) and their application to stability of slopes. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 36, pp. 743-760.



- [177] Sonmez H and Ulusay R (2002): A discussion on the Hoek–Brown failure criterion and suggested modification to the criterion verified by slope stability case studies. *Yerbilimleri (Earth sciences)* 26:77–99.
- [178] Sonmez H, Gokceoglu C and Ulusay R (2003): An application of fuzzy sets to the geological strength index (GSI) system used in rock engineering. *Eng. Appl. Artif. Intell.*
- [179] Spencer E (1967): A method of Analysis of the Stability of Embankments, Assuming Parallel Interslice Forces. *Geotechnique*, Vol. 17, pp. 11-26.
- [180] Startfield AM and Cundall PA (1988): Towards a methodology for rock mechanics modelling. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* Vol. 25, pp. 99-106.
- [181] Styles TD and Vakili A (2020): Slope Angle Versus Slope Height – The Basis of an Empirical Tool for Slope Design Within Fractured Rock Masses using IUCM. *EUROCK 2020*, Trondheim, Norway.
- [182] Sullivan TD (2013): Global slope performance index. *Proceedings of slope stability 2013*, Dight PM (ed), Brisbane, pp. 55-80.
- [183] Taheri A (2012): Design of Rock Slopes using SSR Classification System. *International Conference on Ground Improvement and Ground Control*, University of Wollongong, Australia.
- [184] Taheri A and Tani K (2007): Rock slope design using Slope Stability Rating (SSR)? Application and field verifications. *The 1st Canada-US Rock Mechanics Symposium – Rock Mechanics Meeting Society’s Challenges and Demands*, pp. 215-221.
- [185] Terzaghi K (1946): Rock defects and loads on tunnel supports. *Rock tunneling with steel supports*, Proctor RV and White TL (eds), 1, pp. 17-99. Youngstown, OH: Commercial Shearing and Stamping Company.
- [186] Terzaghi RD and Voight B (1979): Chapter 2 - Karl Terzaghi on Rockslides: The Perspective of a Half-Century. *Developments in Geotechnical Engineering*, Vol. 14, Part B, pp. 111-134.
- [187] Tsidzi K (1997): Propagation characteristics of ultrasonic waves in foliated rocks. *Bull. Int. Association of Eng. Geology*, 56: 103–113.
- [188] Ulusay R. (2021): The Roles of Engineering Geology and Rock Mechanics in Rock Slope Stability Assessments: A Review Based on Current Methods. Presentation at Faculty of Civil Engineering in Skopje, R. Macedonia.
- [189] US Army Corps of Engineers, Department of Army (1997): Risk-based analysis in Geotechnical Engineering for Support of Planning Studies, Engineering and Design, Washington, 20314-100.
- [190] Vandewater CJ, Dunne WM, Mauldon M, Drumm EC and Bateman V (2005): Classifying and Assessing the Geologic Contribution to Rockfall Hazard. *Environm. & Engineering Geoscience*, 11(2): pp. 141-154.
- [191] Varnes DJ (1984): Landslide hazard zonation: a review of principles and practice. *Natural Hazards* 3, UNESCO, Paris, 63 pages.
- [192] Walter H (2017): Consideration of Rock Engineering in Eurocode 7 (EN 1997), Current state of the amendment. *Workshop: Rock Mechanics in EC7, 66th Geomechanics Colloquium of Austrian Society for Geomechanics*, Salzburg, Austria.
- [193] Whitman RV (1984): Evaluating calculated risk in geotechnical engineering. *Journal of Geotechnical Engineering*, 110 (2), pp. 143-188.
- [194] Wickham GE, Tiedemann HR and Skinner EH (1972): Support determination based on geologic predictions. *Proc. North American rapid excav. tunneling conf.*, Chicago, Lane KS and Garfield LA (eds), pp. 43-64, Soc. Min. Engrs, Am. Inst. Min. Metall. Petrolm Engrs. New York.
- [195] Williamson DA and Kuhn CR (1984): The unified rock classification system. *Rock Classification Systems for Engineering Purposes*, ASTM, West Conshohocken, PA, USA.
- [196] Wittke WW (1965): Method to analyze the stability of rock slopes with and without additional loading (in German). *Felsmechanik und Ingenieurgeologie*, 30(Supp. II): 52-79, English translation in Imperial College Rock Mechanics Research Report No. 6, July 1971.
- [197] Xia K, Chen C, Wang T, Pang H and Liu X (2022): Quantification of the GSI and D values in the Hoek-Brown criterion using the rock quality designation (RQD) and discontinuity surface condition rating (SCR). *Bull. Eng. Geol. Environ.* 2022, 81, 1-21.
- [198] Yang B and Elmo D (2022): Why Engineers Should Not Attempt to Quantify GSI. *Geosciences* 2022, 12, 417.

- [199] Yang B, Elmo D and Stead D (2020): Questioning the use of RQD in rock engineering and its implications for rock engineering design. *Proceedings of the 54th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*, American Rock Mechanics Association, Golden, CO, USA.
- [200] Yang B, Mitelman A Elmo D and Stead D (2021): Why the future of rock mass classification systems requires revisiting its empirical past. *Q. J. Rock Eng. Hydrogeol.* 55.
- [201] Yang S, Liu S, Zhang N, Li G and Zhang J (2021): A fully automatic-image-based approach to quantifying the geological strength index of underground rock mass. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 2021, 140, 104585.
- [202] Zhang Q, Huang X, Zhu H and Li J (2019): Quantitative assessments of the correlations between rock mass rating (RMR) and geological strength index (GSI). *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 83, pp. 73-81.