

# Избор рачунски вредности својстава стенског материјала за потребе пројектовања косина површинских копова

Александар Милијановић



Дигитални репозиторијум Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду

[ДР РГФ]

Избор рачунски вредности својстава стенског материјала за потребе пројектовања косина површинских копова | Александар Милијановић | | 2022 | |

<http://dr.rgf.bg.ac.rs/s/repo/item/0006585>

**Универзитет у Београду  
Рударско-геолошки факултет**



**Завршни рад**

**Мастер академске студије**

**Назив завршног рада:**

**ИЗБОР РАЧУНСКИ ВРЕДНОСТИ  
СВОЈСТАВА СТЕНСКОГ МАТЕРИЈАЛА  
ЗА ПОТРЕБЕ ПРОЈЕКТОВАЊА КОСИНА  
ПОВРШИНСКИХ КОПОВА**

**Кандидат:**  
**Александар Милијановић**  
**Број индекса: P510/21**

**Ментор:**  
**Проф. др Владимир Чебашек**

**Београд, септембар 2022.**

---



**Комисија:**

1. Проф. др Владимир Чебашек, Редовни професор, ментор

---

Рударско-геолошки факултет, Београд

2. Проф. др Небојша Гојковић, Редовни професор, члан

---

Рударско-геолошки факултет, Београд

3. Проф. др Дејан Стевановић, Ванредни професор, члан

---

Рударско-геолошки факултет, Београд

Датум одбране: \_\_\_\_\_

---



## РЕЗИМЕ

Геомеханичко пројектовање рударских објеката представља веома комплексан инжењерски подухват, којим је обухваћен и избор вредности на основу којих ће бити анализирани утицаји геомеханичких карактеристика на рударске објекте. За потребе дефинисања вредности геомеханичких својстава потребно је укључити низ утицајних фактора који директно и индиректно делују на рударске објекте. При томе, треба бити врло обазрив и на свеобухватан начин сагледати проблем који се ставља пред инжењере приликом пројектовања у геомеханици. Комплексност овог проблема се огледа у томе што је за потребе инжењера из области геомеханике неопходно обухватити утицајне факторе са површинског копа и исте укључити у критеријуме лома кроз класификације стенског материјала и одређивање чврстоће стенског материјала. Све претходно наведене активности имају за циљ да се формира одговарјући геомеханички модел. Кроз овај рад је приказан поступак избора рачунских вредности својстава стенског материјала за потребе пројектовања косина површинских копова и тиме се обезбеђују сви улазни подаци за геомеханичку проверу стабилности рударских објеката.

***Кључне речи:*** *Пројектовање у геомеханици, утицајни фактори, геомеханички модел, избор рачунски вредности и геомеханичка провера стабилности рударских објеката*

---



## **САДРЖАЈ**

<b>1. УВОД</b> .....	1
<b>2. КРИТЕРИЈУМИ ЛОМА ЗА СТЕНСКЕ МАТЕРИЈАЛЕ</b> .....	8
<b>2.1. Класични критеријуми лома стенског материјала</b> .....	10
<b>2.2. Coulomb-ов критеријум лома</b> .....	10
<b>2.3. Mohr-ов критеријум лома</b> .....	11
<b>2.4. Mohr-Coulomb-ов критеријум лома</b> .....	14
<b>2.5. Емпиријски критеријуми лома за непоремећени стенски масив</b> .	16
<b>2.6. Ноек-Brown-ов критеријум лома</b> .....	19
<b>2.6.1. Изворни Ноек-Brown-ов критеријум лома за непоремећени</b> <b>стенски материјал</b> .....	22
<b>2.6.2. Допуњени Ноек-Brown-ов критеријум лома за непоремећени</b> <b>стенски материјал</b> .....	30
<b>2.7. Критеријуми лома за крте стенске материјале</b> .....	34
<b>2.7.1. Примена Ноек-Brown-овог критеријума лома на крт лом</b> <b>стенског материјала</b> .....	35
<b>2.8. Емпиријски критеријуми лома за стенски масив</b> .....	36
<b>2.9. Ноек-Brown-ов критеријум лома за стенски масив</b> .....	38
<b>2.9.1. Изворни Ноек-Brown-ов критеријум лома за стенски масив</b> <b>(1980. година)</b> .....	38
<b>2.9.2. Допуне Ноек-Brown-овог критеријум лома за стенски масив</b> <b>(1983. година)</b> .....	39
<b>2.9.3. Допуне Ноек-Brown-овог критеријума лома за стенски масив</b> <b>(1988. година)</b> .....	41
<b>2.9.4. Допуне Ноек-Brown-овог критеријума лома за стенски масив</b> <b>(1990. година)</b> .....	43
<b>2.9.5. Допуне Ноек-Brown-овог критеријума лома за стенски масив</b> <b>(1992. година)</b> .....	43
<b>2.9.6. Допуне Ноек-Brown-овог критеријума лома за стенски масив</b> <b>(1994. и 1995. година)</b> .....	44
<b>2.9.7. Измене и допуне Ноек-Brown-овог критеријума лома за</b> <b>стенски масив (1997. година)</b> .....	46
<b>2.9.8. Допуне Ноек-Brown-овог критеријума лома за стенски масив</b> <b>(1998. година)</b> .....	47
<b>2.9.9. Допуне Ноек-Brown-овог критеријума лома за стенски масив</b> <b>(2000. година)</b> .....	47

---



2.9.10.	Допуне Ноек-Вроун-овог критеријума лома за стенски масив (2002. година) .....	48
2.9.11.	Допуне Ноек-Вроун-овог критеријума лома за стенски масив (2004. година) .....	50
2.9.12.	Допуне Ноек-Вроун-овог критеријума лома за стенски масив (2005. година) .....	51
2.9.13.	Допуне Ноек-Вроун-овог критеријума лома за стенски масив (2006. година) .....	51
2.9.14.	Допуне Ноек-Вроун-овог критеријума лома за стенски масив (2018. година) .....	53
2.10.	Закључна разматрања дефинисања еперијског критеријума лома за стенски масив.....	54
3.	ОДРЕЂИВАЊЕ ЧВРСТОЋЕ ВЕЗАНОГ СТЕНСКОГ МАТЕРИЈАЛА... ..	55
3.1.	Триаксијална испитивања за чврсте стенске материјале .....	55
3.2.	Потребна опрема за извођење триаксијалног опита .....	57
3.3.	Опрема за контролу и остваривање вертикалног оптерећења .....	58
4.	КЛАСИФИКАЦИЈА ВЕЗАНОГ СТЕНСКОГ МАТЕРИЈАЛА .....	68
4.1.	Опште о класификационим системима и индикаторима .....	72
4.2.	Класификациони системи стенског масива .....	74
4.2.1.	Показатељ квалитета стенског масива (RQD) класификација .....	76
4.2.2.	Директна метода одређивања показатеља квалитета стњнског масива (RQD) .....	76
4.2.3.	Индиректна метода одређивања показатеља квалитета стенског масива (RQD).....	78
4.2.4.	Недостаци показатеља квалитета стенског масива (RQD)..	82
4.2.5.	Препоручена класификација стена за потребе механике стена .....	83
4.2.6.	Геомеханичка класификација испуцале стенске масе (RMR) .....	84
4.2.7.	Класификација Норвешког Геотехничког Института – Q систем класификације .....	90
4.2.8.	Међусобна веза између RMR и Q класификационих система. ....	98
4.2.9.	Модификована геомеханичка класификација за испуцале стенске масе за потребе рударства (MRMR) .....	99

---



4.2.10. Класификациони систем геолошког индекса чврстоће (ГСИ)	103
5. ИЗБОР РАЧУНСКИ ВРЕДНОСТИ СВОЈСТАВА СТЕНСКОГ МАТЕРИЈАЛА	109
5.1. Запреминска тежина стенског материјала	109
5.2. Чврстоћа на притисак	111
5.3. Чврстоћа на затезање	113
5.4. Чврстоћа на смицање	115
6. ЗАКЉУЧАК	118
7. ЛИТЕРАТУРА	120

---



## **СПИСАК СЛИКА**

Слика 1.1 - Методе пројектовања у геомеханици .....	1
Слика 1.2 - Алгоритам избора рачунски вредности својстава стенског материјала.....	7
Слика 2.1 - Правци деловања напона .....	11
Слика 2.2 - Mohr-ов круг напона.....	12
Слика 2.3 - Mohr-ова обвојница .....	13
Слика 2.4 - Mohr-Coulomb-ов критеријум изражен преко: а) главних напона и б) нормалног и смичућег напона.....	15
Слика 3.1 - Ноек-ов тип тријаксијалне ћелије за тестирање стена, са металним клиповима као притискивачима и флексибилне кошуљице [1] .....	56
Слика 3.2 - Изглед попречног пресека триаксијалне ћелије за тестирање узорака стене .....	58
Слика 3.3 - Изглед хидрауличне пумпе за наношење бочног притиска са манометром за праћење притиска.....	59
Слика 3.4 - Обрада и припрема пробног тела на завршни облик .....	60
Слика 3.5 - Изглед припремљеног пробног тела са залепљеним електроотпорним мерним тракама [26].....	61
Слика 3.6 - Поступак стављања флексибилне кошуљице у триаксијалну ћелију .....	62
Слика 3.7 - Поступак стављања пробног тела у триаксијалну ћелију [1].....	63
Слика 3.8 - Поступак пуњења триаксијалне ћелије и изглед постављених челичних клипова са додатим малим притиском [1] .....	64
Слика 3.9 - Припремљена триаксијална ћелија стављена под пресу [1] .....	64
Слика 3.10 - Графичка интерпретација односа главних напона при лому .....	66
Слика 3.11 - Графичка интерпретација Mohr-ове обвојнице лома.....	66
Слика 3.12 - Конструкција Mohr-ових кругова напона .....	67
Слика 4.1- Интерпретација набушеног језгра истражне бушотине [28] .....	77
Слика 4.2- Поступак индиректног мерења и прорачуна показатеља квалитета стенског масива (RQD) за .....	81
а) пресек између пукотина и израђене бушотине .....	81
б) пресек између пукотина и посматране површине .....	81
Слика 4.3- Дијаграм за пројектовање подграде од прсканог бетона.....	96
Слика 4.4- Поступак бодовања за вишепукотинске системе .....	101
Слика 5.1- Изглед облика пробних тела за испитивање чврстоће на притисак .....	111

---





Слика 5.2- Шема кртог лома и пластичног лома [33] .....	112
Слика 5.3- Држачи за испитивање, чврстоће на истезање [33].....	114
Слика 5.4- Испитивање чврстоће на затезање [33] .....	115
Слика 5.5- Шематски приказ једностраног и двостраног смицања [33].....	116



## СПИСАК ТАБЕЛА

Табела 2.1– Главни класификациони системи [1].....	18
Табела 2.2- Вредност материјалне константе $m_i$ за непоремећени стенски материјал, за магматске стене (Ноек и сарадници 1992. године).....	23
Табела 2.3- Вредност материјалне константе $m_i$ за непоремећени стенски материјал, за седиментне стене (Ноек и сарадници 1992. године).....	23
Табела 2.4- Вредност материјалне константе $m_i$ за непоремећени стенски материјал, за метаморфне стене (Ноек и сарадници 1992. године) .....	24
Табела 2.5- Вредност материјалне константе $m_i$ за непоремећени стенски материјал, за магматске стене – где вредности дате у заградама представљају процењене вредности (Ноек, Kaiser и Bawden, 1995. године) .....	24
Табела 2.6- Вредност материјалне константе $m_i$ за непоремећени стенски материјал, за седиментне стене – где вредности дате у заградама представљају процењене вредности (Ноек, Kaiser и Bawden, 1995. године) .....	25
Табела 2.7- Вредност материјалне константе $m_i$ за непоремећени стенски материјал, за метаморфне стене – где вредности дате у заградама представљају процењене вредности (Ноек, Kaiser и Bawden, 1995. године) .....	25
Табела 2.8- Вредности материјалне константе $m_i$ за непоремећени стенски материјал за магматске стене (Ноек и Karzulovic, 2001. године) .....	26
Табела 2.9- Вредности материјалне константе $m_i$ за непоремећени стенски материјал за метаморфне стене (Ноек и Karzulovic, 2001. године).....	27
Табела 2.10- Вредности материјалне константе $m_i$ за непоремећени стенски материјал за седиментне стене (Ноек и Karzulovic, 2001. године).....	27
Табела 2.11- Вредности материјалне константе $m_i$ за непоремећени стенски материјал за магматске стене, према програмском пакету „RocLab“ (Ноек, 2002. године) .....	28
Табела 2.12- Вредности материјалне константе $m_i$ за непоремећени стенски материјал за седиментне стене, према програмском пакету „RocLab“ (Ноек, 2002. године) .....	29
Табела 2.13- Вредности материјалне константе $m_i$ за непоремећени стенски материјал за метаморфне стене, према програмском пакету „RocLab“ (Ноек, 2002. године) .....	29
Табела 2.14- Процењене вредности једноосне чврстоће на притисак $\sigma_c$ непоремећеног стенског материјала – (Препоруке ISRM, Brown 1981. године) .....	31
Табела 2.15- Вредности критичног повећања деформације (Stacey, 1981. год) .....	35
Табела 2.16- Вредности критичног повећања деформације (Stacey 1981.године) .....	37

---



Табела 2.17- Приказ једначина за поремећени и непоремећени стенски масив [1].....	42
Табла 4.1- Веза између вредности RQD и квалитета стенског масива (Deere, 1968. godine ) .....	78
Табела 4.2- Вредност RQD одређена на основу индекса брзина.....	81
Табела 4.3- Описни појмови које су користили Coates i Patching (1968).....	84
Табела 4.4- Класификација и рангирање стена Bieniawski-ог (1973).....	85
Табела 4.5- RMR систем (Bieniawski,1976. година).....	86
Табела 4.6- RMR систем (Bieniawski,1989. година) – приказ А параметра.....	87
Табела 4.7- RMR систем (Bieniawski,1989. година) - Наставак.....	88
Табела 4.8- Утицај броја пукотинских система.....	92
Табела 4.9- Утицај храпавости зидова пукотина.....	93
Табела 4.10- Утицај промене зидова пукотине и пукотинске испуне.....	93
Табела 4.11- Утицај пукотинске воде.....	94
Табела 4.12- Утицај смањења напона.....	94
Табела 4.13- Класификовање стенског масива на основу вредности Q параметара (Barton и други, 1974. године) .....	95
Табела 4.14- Вредности коефицијената подграђивања ископа (ESR) за различите врсте ископа .....	96
Табела 4.15- Класификовање различитих испуцалих стенских масива (Laubscher, 1984. година).....	100
Табела 4.16- Основни поступци бодовања код MRMR класификације (Barton и Laubscher, 1984. године) – први део .....	100
Табела 4.16- Основни поступци бодовања код MRMR класификације (Barton и Laubscher, 1984. године) – други део.....	100
Табела 4.17- Поступак редуковања бодовања на основу орјентације пукотина (Laubscher, 1984. године).....	102
Табела 4.18- Поступак редуковања бодовања на основу утицаја минирања (Laubscher, 1984. године).....	102
Табела 4.19- Укупно редуковање бодовања (Laubscher, 1984. године) .....	102
Табела 4.20- Вредности фактора оштећења стенског масива (D) .....	105
Табела 4.21- Одређивање константи за непоремећени стенски масив (Hoek, Kaiser и Bawden, 1995. године) .....	106
Табела 4.22- Одређивање уопштеног Геолошког индекса чврстоће (GSI) према програмском пакету „RosLab“ (Hoek 2002. године) [19] .....	107
Табела 4.23- Одређивање Геолошког индекса чврстоће () за флишеве према програмском пакету „“ (Hoek, 2002. године) [19] .....	107

---

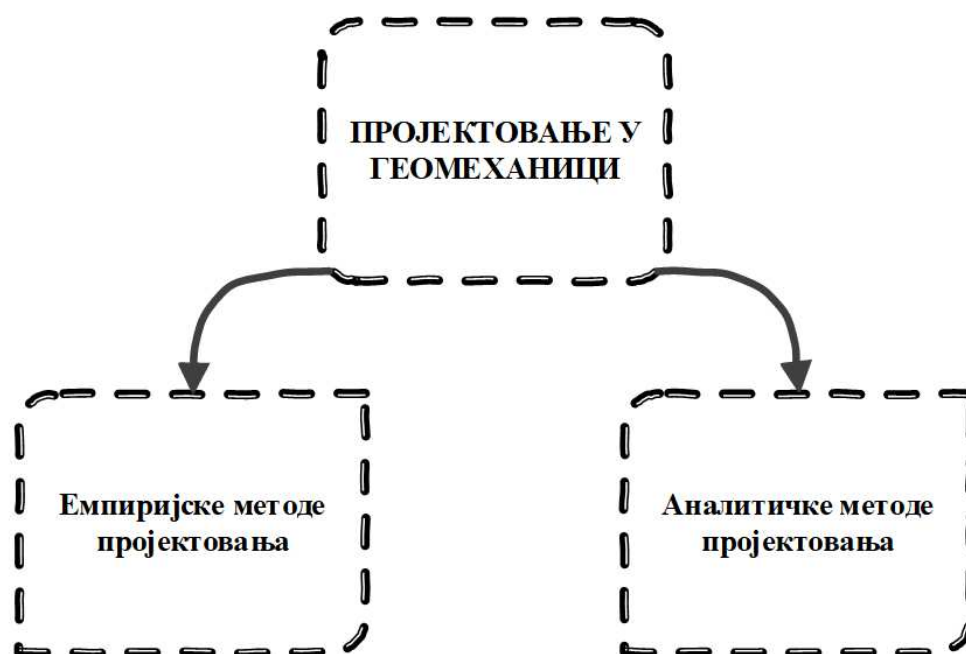


Табела 5.1- Класификација стена по коефицијенту чврстоће [33] ..... 113



## 1. УВОД

Пројектовање у геомеханици представља процес који зависи од испитиваног материјала и примењених метода. Методе пројектовања у геомеханици могу се поделити на емпиријске методе пројектовања и аналитичке методе пројектовања у геомеханици. [1]



*Слика 1.1 - Методе пројектовања у геомеханици*

Емпиријске методе пројектовања у геомеханици представљају практично искуство које је стечено кроз израду пројеката и повезују га са стањем које је затечено на конкретној локацији. Онсову емпиријског приступа у пројектовању представљају класификациони системи који имају веома широку примену у геомеханичком пројектовању. У реалним условима, у већини пројеката примена класификационих система није изостала, јер представља једину практичну подлогу за пројектовање сложених рударских конструкција.

Аналитичке методе пројектовања у геомеханици обухватају и примену дефинисаних концептуалних модела за потребе пројектовања. Основни циљ



ових метода пројектовања је да се симулира понашање и реаговање природне стенске структуре.

Аналитичке методе због своје примењивости код геомеханичког пројектовања могу да обухвате следеће приступе:

- Концептуално моделовање, које представља полазницу за истраживања
- Физичке моделе
- Математичко моделовање (систем хомогених једначина)
- Нумеричко моделовање (технике коначних елемената)

Понекад математичке и нумеричке методе могу бити дефинисане као „аналитичка или теоретска истраживања“, прихватљивије је математички приступ одредити као онај који обухвата систем хомогених једначина, док под нумеричким методама се могу обухватити технике као што су примена коначних елемената, коначне разлике, гранични елементи итд. Технике нумеричког моделовања имају посебну важност зато што је у геомеханици извођење неопходног система хомогених једначина у већини случајева веома сложено или пак немогуће за извести.

На основу дефинисаних метода пројектовања у геомеханици наредни корак је утврђивање и анализа утицајних фактора за утврђивање вредности геомеханичких параметара који су сврстани у следеће групе:

- Структурно геолошке карактеристике
- Хидрогеолошке карактеристике
- Тектонске карактеристике
- Сеизмичке карактеристике
- Технолошке карактеристике

По подели утицајних фактора на следеће групе добија се перцепција о потребним подацима на основу којих ће бити дефинисани геомеханички параметри. Због утицаја сваке групе на избор геомеханичких карактеристика у даљем делу рада биће дат детаљнији опис по групама.



▪ ***Структурно геолошке карактеристике***

Структурно геолошке карактеристике обухватају групу податка везаних за врсту стенског материјала, структурну грађу средине, дебљину и број слојева по висини косине као и стања контактне површине.

Стенски материјал карактерише минерални састав, структура, текстура итд. и на основу њих могу се дефинисати геолошка својства стенског материјала или тла а која имају директан утицај на дефинисање геомеханичких параметара.

▪ ***Хидрогеолошке карактеристике***

Хидрогеолошке карактеристике обухватају групу података везаних за оводњеност анализирне средине и присуство површинских и подземних вода. Дефинисање оводњености се може одредити преко коефицијента порног притиска или пијезометарске линије нивоа подземних вода. У случају када немамо прецизне податке о оводњености средине рударских објеката, преко коефицијента порног притиска дефинишемо оводњеност дате зоне избором вредности коефицијента порног притиска  $r_u$ . Вредност коефицијента се може кретати од 0-0,5. Када на подручју рударских објеката имамо дефинисане бунаре, то јест пијезометре за праћење нивоа подземних вода, на основу редовних мерења може се дефинисати ниво подземних вода и на тај начин прецизно одредити пијезометарска линија која ће одредити оводњеност дате средине. У том случају вредност коефицијента порног притиска  $r_u$  се не користи при геомеханичким проверама стабилности рударских објеката, већ утврђени ниво воде.

▪ ***Тектонске карактеристике***

Тектонске карактеристике обухватају интеракцију две геосфере: литосфере и астеносфере. Литосфера се састоји од низа чврстих плоча, које „плутају“ на пластичној астеносфери у којој постоје услови за настанак конвенцијских струјања материјала. Плоче су хетерогеног састава, то јест састоје се од континенталне и океанске коре, где приликом конвенцијских



струјања долази до хоризонталних померања плоча, што доводи до изражених геодинамичких активности. При кретању тектонских плоча долази до стварања услова за појаву нестабилности рударских објеката која се може интерпретирати на различите начине, од стварања раседа, набора, пукотинских система па све до појаве плитких земљотреса. То директно утиче на стабилност рударских објеката као и избор рачунски вредности са којима се приступа геомеханичкој провери стабилности. У зони утицаја тектонских карактеристика, потребно је водити рачуна о правилном дефинисању средине, класификацији стенског материјала, одређивању чврстоће стенског материјала и критеријуму лома који су у директном утицају на избор рачунски вредности. Вредности поменутих чинилаца могу бити умањене у зони тектонских карактеристика .

#### ▪ *Сеизмичке карактеристике*

Сеизмичке карактеристике терена обухватају групу података који дефинишу динамичко понашање радне средине и обухватају, укупни сеизмички коефицијент за хоризонтални правац ( $k$ ), коефицијент сеизмичког интензитета ( $k_s$ ), коефицијент динамичности ( $k_d$ ), брзина осциловања лонгитудиналних и трансферзалних таласа, карактеристична таласна дужина материјала итд које се односе на зону подручја терена на ком се налазе рударски објекти. За потребе утврђивања геомеханичке стабилности рударских објеката, у зависности од рељефа терена и утицајних фактора дефинише се и сеизмички коефицијент. Сеизмички коефицијент  $C_s$  представља вредност која се додељује одређеном подручју. У зависности од интензитета сеизмичких активности, вредност сеизмичког коефицијента може се кретати у границама од 0,1-0,3. Подаци везани за сеизмички коефицијент могу се наћи у хазардима сеизмичких активности за различите повратне периоде. По параметру убрзања карте које се користе при избору сеизмичког коефицијента су најчешће за повратни период од 475. година. Поред тога, вредност сеизмичког коефицијента може бити и прецизно израчуната за конкретно подручје и тиме прецизније представити





утицај сеизмичких активности. За потребе израчунавања вредности сеизмичког коефицијента за дато подручје може се користити следећа једначина:

$$C_s = \frac{\log^{-1}[0,267 + (MM - 1) \cdot 0,308]}{980}, \quad (1.1)$$

где је:

- ММ – Интезитет земљотреса по модификованој Меркалијевој скали.

#### ▪ *Технолошке карактеристике*

Технолошке карактеристике обухватају групу утицаја на основу којих вршимо избор технолошких операција при експлоатацији стенског материјала. У зависности од типа материјала, релативног положаја косина етажа у односу на равни слојевитости, висине и нагиба косина, правца напредовања фронта радова и блока у односу на правац и пад слојева, пукотинских система и праваца пружања и пада раседа дефинисаће се технолошки параметри система експлоатације. У зависности од поменутих фактора усваја се технологија експлоатације. У случају примене бушачко-минерски радова значајан је фактор ремећења радне средине D, који зависи од интезитета радова на минирању и њихове учестаности.

Приликом планирања развоја радова релативни положај косина етажа, у технолошком погледу, се одређује у односу на слојевитост, правац пружања слојева, присуство пукотина и пукотинских система, правац пружања пукотина и раседа то јест дефинише се правац напредовања фронта и блока радова у односу на поменуте параметре тако да се реализују повољнији услови стабилности косина. Приликом извођења радова треба тежити да фронт радова односно формиране косине буду са нагибом који је супротно усмерен од пада слојева или падова раседа и пукотина, чиме се остварују бољи услови стабилности формираних косина. Ово омогућава усвајање вредности физичко-механичких параметара радне средине у нешто ширим границама у односу на



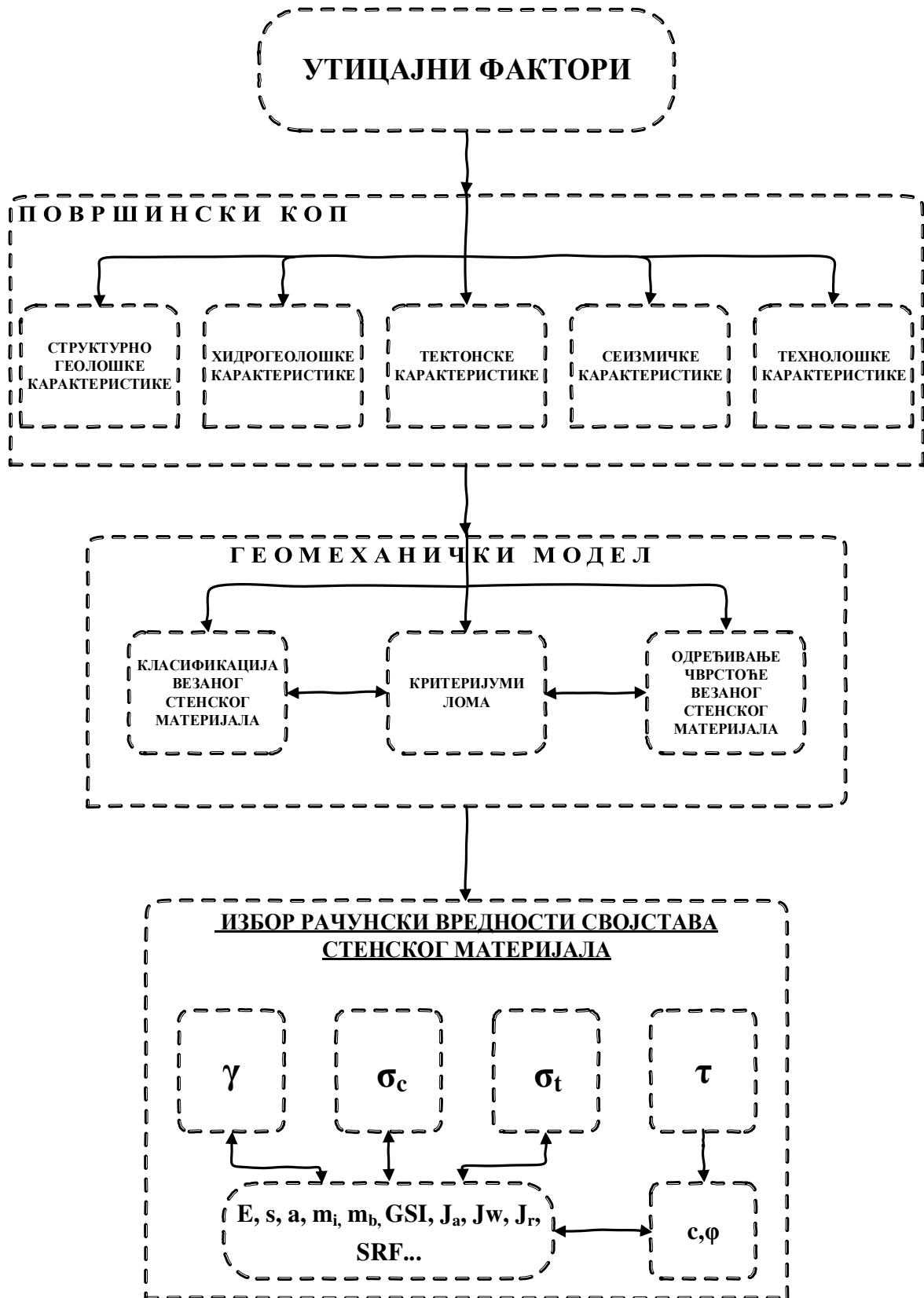
случај када постоји предиспозиција клизања косине ка отвореном, откопаном простору.

На основу дефинисаних карактеристика рударских објеката стиче се могућност за формирање геомеханичког модела. Формирањем геомеханичког модела стварају се сви потребни услови за избор и дефинисање одређених вредности везаних за:

- Критеријуме лома стенског материјала
- Класификацију стенског материјала
- Одређивање чврстоће стенског материјала

Кроз геомеханички модел биће обрађени поменути параметри на основу којих добијамо вредности података и тиме се стичу услови избора рачунски вредности својстава стенског материјала за потребе пројектовања косина површинских копова, а што представља тему овог рада.

Алгоритам за избор рачунских вредности својстава стенског материјала са свим потребним параметрима који имају директног утицаја на избор рачунски вредности који ће кроз овај рад бити детаљно описани дат је на слици 1.2.



Слика 1.2 - Алгоритам избора рачунски вредности својстава стенског материјала



## **2. КРИТЕРИЈУМИ ЛОМА ЗА СТЕНСКЕ МАТЕРИЈАЛЕ**

Теорија лоба се гради већ више од 200 година, где се ниво теорије лоба и ниво корисности тек треба достићи и заузети ниво који има механика континуума. Теорија лоба представља науку која испред себе има циљ да дефинише услове под којима чврсти материјали губе чврстоћу под деловањем околног оптерећења. Са математичке старне теорију лоба је могуће дефинисати као разне критеријуме лоба који зависе од испитиваног материјала. Лом материјала обично се може дефинисати као крти лом (где долази до прелома) или као пластичан лом (пластичност). У односу од услова под којима се могу наћи материјали (а то је утицај промене темературе, стања напона материјала брзине прираштаја оптерећења) већина материјала има ту особину да се под поменутиим условима и утицајима понашају као крти или пластични или пак као крти и као пластични. То најпре зависи од особина материјала који се испитује и његових основних физичко-механиких карактеристика. Наиме, у већини практичних ситуација материјал може бити дефинисан или као пластичан или као крт Критеријум лоба представља функције у пољу напона или релативне функције које презентују границу између стања лоба и стања када нема лоба. Прецизну физичку дефиницију стања лоба није лако одредити, тако да постоји неколико радних дефиниција које се могу применити у инжењерској пракси. Врло често се феноменолошки критеријуми лоба истог облика користе за одређивање кртог лоба и појаве плстификације. [1]

Лом материјала може се дефинисати као губитак чврстоће јединичног материјалног елемента и то се представља у науци о материјалима. Ова дефиниција представља чињеницу да лом материјала може бити испитиван у различитим оквирима, почевши од микроскопских па све до макроскопских испитивања. Код структурних проблема пре почетка нелинеарног понашања потребно је одредити понашање структуре па самим тим лом материјала је од великог значаја за утврђивање интегритета структуре. Интезивно истраживање



оштећења структуре, услед лома материјала је и даље примењено због изостанка опште усвојеног критеријума лома.

Критеријум лома у геомеханици се може окарактерисати као алгебарски израз механичких услова услед којих се јавља појава лома у материјалу распуцавањем или деформисањем преко дефинисане границе. Критеријум може бити исказан преко оптерећења, деформације, напона, релативне деформације или неких других параметара.

Опште је прихваћено да је лом у одређеном стању напона, одређен функцијом стања напона:

$$F(\sigma_{ij}) = 0, \quad (2.1)$$

где су:  $\sigma_{ij}$  – компоненте тензора напона

Ако су у питању изотропни материјали, овај услов би требао бити скаларна функција стања напона, која је независна од ротација координата. Одређивањем  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  као главних напона, претходно наведени услов онда можемо разложити на следећи начин:

$$F(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = 0, \quad (2.2)$$

такође је могуће разлагање извршити и на један од следећа два облика:

$$F_1(I_1, I_2, I_3) = 0, \quad (2.3)$$

$$F_2(J_1, J_2, J_3) = 0, \quad (2.4)$$

где су:

$I_1, I_2, I_3$  – инваријанте тензора напона,

$J_1, J_2, J_3$  – инваријанте девијатора напона.

Претходном једначином се одређује извесна раван у простору главних напона, која се често назива и гранична раван. Гранична раван мора садржати почетне координате и требало би да буде конвексна, из чега се може закључити



да треба да задовољи услов да сваки сегмент који спаја две тачке унутар или на самој њеној граници, самим тим и буде у оквиру унутрашњости или границе.

Критеријум лома који описује дату граничну површ у простору главних напона значи да стање напона, које је дефинисано тачкама које се налазе унутар ње, не изазивају лом, док стање напона које је одређено помоћу координата тачака које се налазе на самој површи, доводи до лома стене.

Приликом дефинисања критеријума лома за стене, требало би узети у обзир и следеће захтеве:

- Услов треба да задовољи резултате испитивања,
- Треба да садржи релативно мали број параметара који се лако могу измерити или израчунати,
- Треба да дефинише конвексну површ у простору напона.

## **2.1. Класични критеријуми лома стенског материјала**

У класичне критеријуме лома спадају опште прихваћени критеријуми лома стенског материјала који су засновани различитим истраживањима и применом различитих метода. Класични критеријуми лома представљају критеријуме који су одређени истраживањима лома стакла услед смицања, детаљном графичком методом за одређивање стања напона у једној тачки и критеријум у функцији напона. У наставку ће бити приказани критеријуми лом као и њихова открића, примене и резултати.

## **2.2. Coulomb-ов критеријум лома**

Coulomb-ов критеријум лома спада у класичне критеријуме лома стенског материјала. Предлог Coulomb-а за критеријум лома који је заснован на истраживањима лома стакла услед смицања уследио је 1773. године. При истраживањима уочио је да чврстоћа на смицање зависи од кохезије самог материјала који се испитује и производа одређене константе и нормалног напона који делује на посматрану раван. На основу детаљнијих истраживања и



резултата до којих је дошао 1776. године Coulomb је предложио да се чврстоћа на смицање грађевинских материјала и тла одређује помоћу следећег израза: [1]

$$S = c \cdot a + \frac{1}{n} \cdot N, \quad (2.5)$$

где су:  $c$  - кохезија  
 $a$  - површина дуж које долази до смицања,  
 $N$  - нормална сила која делује на површину смицања,  
 $1/n$  - коефицијент унутрашњег трења

### 2.3. Mohr-ов критеријум лома

1882. године представљена је детаљна графичка метода за одређивање стања напона у једној тачки. Ову детаљну графичку методу је представио Otto Mohr.

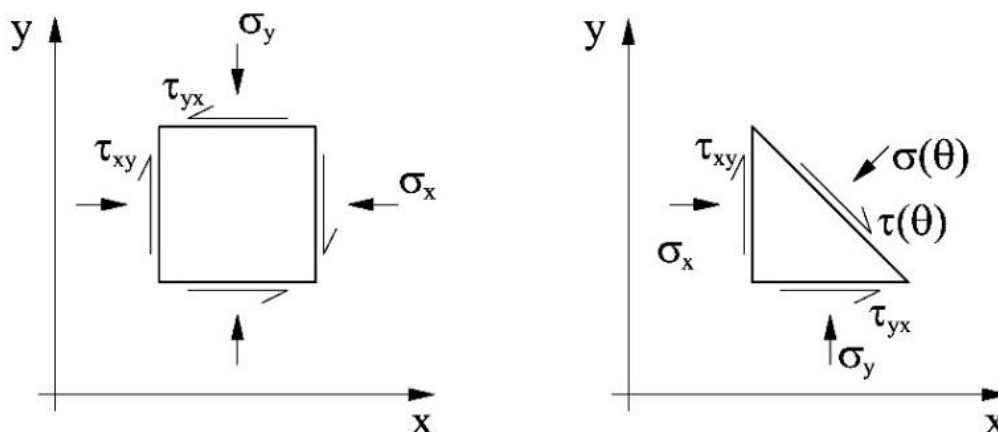
Стање напона у једној тачки може се одредити помоћу израза: [1], [2]

$$\sigma(\theta) = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cdot \cos 2\theta + \tau_{xy} \cdot \sin 2\theta, \quad (2.6)$$

$$\tau(\theta) = -\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cdot \sin 2\theta + \tau_{xy} \cdot \cos 2\theta, \quad (2.7)$$

где је:

$\theta$  - нагиб равни у којој делују  $\sigma_y$  и  $\tau_y$ , што се може видети из приложеног на следећој слици.



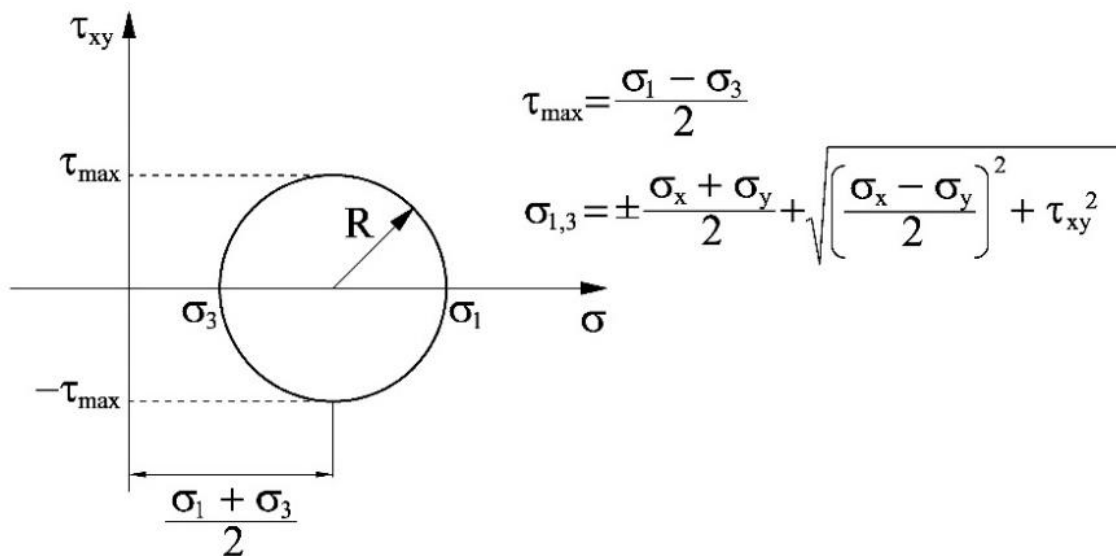
Слика 2.1 - Правци деловања напона



Елиминисањем  $\theta$  из претходне једначине, добија се једначина круга који има следећи облик:

$$\left(\sigma(\theta) - \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y)\right)^2 + \tau(\theta) = \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2 = R, \quad (2.8)$$

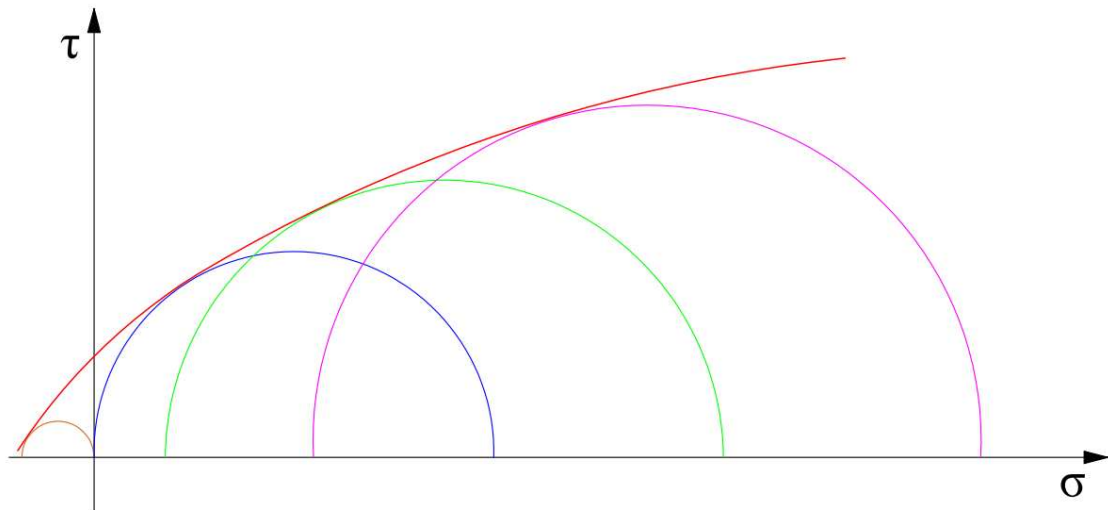
Овај добијени круг се назива Mohr-ов круга и његову примену и кориснос је нашао за графичко приказивање различитих величина стања напона у једној тачки, што се може из приложеног видети на следећој слици.



Слика 2.2 - Mohr-ов круг напона

У тренутку лома, Mohr-ови кругови се одређују експериментално помоћу опита троосне чврстоће на притисак, где при испитивању имамо могућност наношења различитих вредности бочног притиска. Извођењем више опита за различите вредности напона долазимо до одређивања Mohr-ове обвојнице. У тренутку лома сваки пар вредности  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  одређује круг. Величина кругова се разликује у односу задатих вредности напона. При тако експериментално одређеним Mohr-овим круговима повлачи се крива која је потребно да тангира Mohr-ове кругове и она се назива Mohr-ова обвојница. Изфлед Mohr-ове обвојнице дат је на следећој слици. Mohr је дефинисао теорију по којој до лома долази када Mohr-ов круг у једној тачки тела превазилази обвојницу лома.





Слика 2.3 - Mohr-ова обвојница

Као и код Coulomb-овог критеријума утицај средњег главног напона  $\sigma_2$  у потпуности је занемарен. При томе формира се раван лома која ће бити паралелна  $\sigma_2$ . При повећању вредности минималног главног напона  $\sigma_3$  смањује се угао између максималног главног напона  $\sigma_1$  и равни лома.

Walmer је 1952. године предложио решење за проблем одређивања тачне једначине Mohr-ове обвојнице преко главних напона. Његов предлог се огледао у једноставној методи за одређивање нормалног  $\sigma_n$  и смичућег  $\tau$  напона преко било којих вредности главних напона  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$ , што се може видети у следећем изразу:

$$\left(\sigma_n - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\right)^2 + \tau^2 = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\right)^2, \quad (2.9)$$

Парцијалним диференцирањем  $\sigma_1$  у односу на  $\sigma_3$  и даљим поједностављењем добија се:

$$\sigma_n = \sigma_3 + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{1 + \frac{\partial \sigma_1}{\partial \sigma_3}}, \quad (2.10)$$

Заменом претходне једначине у Walmer-ову добија се израз за  $\tau$  који има следећи облик:



$$\tau = (\sigma_n - \sigma_3) \cdot \sqrt{\frac{\partial \sigma_1}{\partial \sigma_3}}, \quad (2.11)$$

По израчунаним вредностима ( $\sigma_n$  и  $\tau$ ), угао унутрашњег трења ( $\varphi$ ) и средња вредност кохезије могу се одредити применом анализе линеарне регресије помоћу које се одређује једначина права која на најбољи начин апроксимира прорачунате вредности парова ( $\sigma_n, \tau$ ).

## 2.4. Mohr-Coulomb-ов критеријум лома

Критеријум као функција напона произашао је као коначан исход рада на одређивању критеријума лома када су у питању Mohr и Coulomb. И поред тога што су Mohr и Coulomb на потпуно различит начин и из потпуно других разлога вршили одређивање критеријума лома, као и да је одређивање критеријума лома било намењено потпуно различитим материјалима на крају су успели да заједничким напорима и из различитих полазних размишљањима дођу у исту тачу а то је критеријум који је био у функцији напона  $U$  новије време, Coulomb-ова једначина се најчешће пише у следећем облику:

$$\tau_f = c + \sigma \cdot \tan \varphi, \quad (2.12)$$

где су:

- $\tau_f$  - смичући напон дуж равни смицања у тренутку лома
- $c$  - кохезија
- $\sigma$  - нормални напон који делује на раван смицања
- $\varphi$  - угао трења равни смицања

Претходно наведена једначина се често назива Mohr-Coulomb-ов критеријум и своју примену је нашла у механици стена у случајевима приликом појаве смичућег лома код стенског материјала, пукотина, као и код стенског масива. До лома код Mohr-Coulomb-овог критеријума подразумева се да до



лома долази дуж равни без икаквих дилатација. Преко главних напона Mohr-Coulomb-ов критеријум се може изразити у следећем облику:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \frac{2 \cdot c \cdot \cos \varphi}{\sigma_3 \cdot (1 - \sin \varphi)} + \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}, \quad (2.13)$$

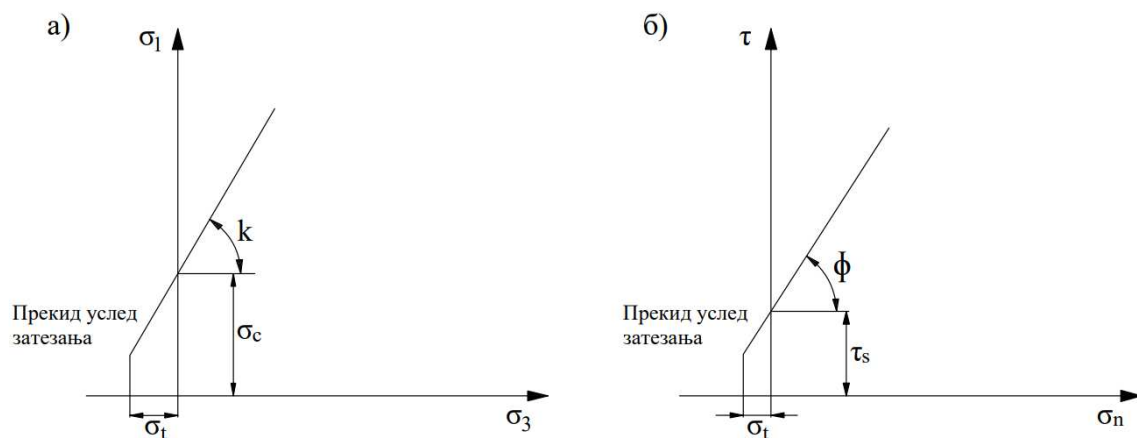
А чест је и следећи облик:

$$\sigma_1 = \sigma_c + k \cdot \sigma_3, \quad (2.14)$$

где су:

$k$  - коефицијент нагиба праве која представља везу између  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$ ,  
 $\sigma_c$  - једноосна чврстоћа на притисак.

Mohr-Coulomb-ов критеријум је линеарног облика, али због чињенице да стенски масив не може да издржи већа напрезања на затезање, укључен је прекид због чврстоће на затезање, такав пример је приказан на следећој слици.



Слика 2.4 - Mohr-Coulomb-ов критеријум изражен преко: а) главних напона и б) нормалног и смичућег напона

Вредност угла трења ( $\varphi$ ) и кохезије ( $c$ ) могу се израчунати помоћу следећих једначина:

$$\sin \varphi = \frac{k - 1}{k + 1}, \quad (2.15)$$



$$c = \frac{\sigma_c \cdot (1 - \sin \varphi)}{2 \cdot \cos \varphi}, \quad (2.16)$$

Изузетно у случају када је  $c=0$ :

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} = k, \quad (2.17)$$

Mohr-Coulomb-ов критеријум је нашао широку примену у механици стена и посто је један од најчешће коришћених критеријума. Разлози за широку примену и све чешћу употребу су пре свега у једноставном математичком изразу по коме је критеријум одређен. Поред тога веома је једноставан за разумевање као и за примену. Приликом примене Mohr-Coulomb-овог критеријума треба узети у обзир следеће чињенице:

- механизам лома мора бити смичући
- једначина међусобне везе смичућег и нормалног напона која је одређена експерименталним путем најчешће има нелинеаран облик, а не линеаран као што се то Mohr-Coulomb-овим критеријумом лома претпоставља.
- уколико је нормалан напон на затезање, претпоставити појаву унутрашњег трења је бесмислено, па се најчешће примењује граница у којој је  $\sigma_n = \sigma_t$ .

## **2.5. Емпиријски критеријуми лома за непоремећени стенски масив**

Повећањем истраживања и испитивања током 20. века дошло је до експанзије документованог материјала и броја података везаних за чврстоћу непоремећеног стенског материјала. То је директно утицало и на то да изученост непоремећеног стенског материјала достигне завидан ниво. Првенствено су значајни критеријуми лома који су одређени на основу емпиријских истраживања. Та истраживања се првенствено односе на лабораторијска испитивања пробних тела непоремећеног стенског материјала. Више о критеријумима лома стенског масива који су засновани одређеним



корекцијама помоћу индекса класификација биће речи у поглављу везаном за класификацију стенског материјала.

Један од критеријума лома који је нашао широку примену је Ноек-Вроун-ов критеријум лома. Због широке примене при одређивању критеријума лома Ноек-Вроун-ов критеријум је скоро стално допуњаван, чиме су отклоњани недостаци из претходних издања поменутог критеријума. Кориговање и допуњавање критеријума је засновано на основу практичног искуства, сталног напредовања и нових сазнања аутора. Поред овог постоје и други емпиријски критеријуми лома који су веома били занимљиви са теоријске тачке гледишта, али због мале примене која је била само у неколико случајева или чак није ни примењен допуне ових критеријума су изостале.

Тема овог рада је детаљније представљање критеријума лома који карактеришу чврсте стенске материјале. Па стога, кроз овај рад Ноек-Вроун-ов критеријум лома биће детаљније описан и представљен, јер дефинисањем овог критеријум лома стиче се један од услова за формирање геомеханичког модела и избор рачунски вредности својстава за чврсте стенске материјале. Поред Ноек-Вроун-овог критеријума лома биће представљене и неке од једначина епиријског критеријума лома за непоремећени стенски масив које су дате у табели. У табели се могу видети представљени критеријуми лома који су допринели развоју теорије везане за геомеханичка испитивања, али пошто поменути критеријуми лома нису тема овог истраживачког рада неће детаљније бити приказани. Објашњења за величине које означавају поједина својства а које су коришћене у појединим критеријумима биће приказане испод табеле са једначинама.



Табела 2.1– Главни класификациони системи [1]

Једначина критеријума лома	Намена коментар	Аутори и година објављивања
$(\sigma_1 - \sigma_3)^2 = a + b \cdot (\sigma_1 + \sigma_3)$	Емпиријско уопштавање Griffith–ове теорије за непоремећени стенски материјал.	Fairhurst (1964)
$\sigma_1 = \sigma_c + \sigma_3 + F \cdot \sigma_3^f$	Апроксимација емпиријских података одређених испитивањем непоремећеног стенског материјала.	Hobbs (1964)
$\sigma_1 = \sigma_c + a \cdot \sigma_3^b$	Није детаљно описано у овом раду.	Murrel (1965)
$\frac{\tau_m - \tau_o}{\sigma_1} = D \cdot \left  \frac{\sigma_m}{\sigma_c} \right ^C$	Апроксимација непоремећеног стенског материјала емпиријском кривом. Ова верзија није детаљније описана кроз овај рад.	Hoek (1968)
$\sigma_1 = \sigma_c + a \cdot \sigma_3$	Испитивања троосне чврстоће на притисак меког стенског материјала.	Bodonyi (1970)
$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c^{1-B} \cdot (\sigma_1 + \sigma_3)^B$	Апроксимација резултата испитивања 500 пробних тела емпиријском кривом.	Franklin (1971)
$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m \cdot \sigma_c \cdot \sigma_1 + s \cdot \sigma_c^2}$	Примена Griffith–ове теорије уз апроксимацију емпиријском кривом. Намењено и за непоремећени стенски материјал и врло испуцале стенске масиве.	Hoek и Brown (1980)
$\frac{\sigma_1}{\sigma_c} = a + b \cdot \left( \frac{\sigma_3}{\sigma_c} \right)^a$	Апроксимација резултата испитивања на 700 пробних тела емпиријском кривом. Намењено и за непоремећени стенски материјал и врло испуцале стенске масиве.	Bieniawski (1974), Yudhbir и други. (1983)
$\sigma_1 = \sigma_3 + a \cdot \sigma_3 \cdot \left( \frac{\sigma_c}{\sigma_3} \right)^b$	Примењен на 80 узорак	Ramamurthy и други (1985)
$\sigma_{1n}' = \left( \frac{M}{B} \cdot \sigma_{3n}' + 1 \right)^B$	Апроксимација резултата испитивања узорак тла и за чврсте стене емпиријском кривом	Johnston (1985)
$\sigma_1 = \sigma_c \cdot \left( 1 + \frac{\sigma_3}{\sigma_t} \right)^b$	Намењен за непоремећен стенски материјал и врло испуцале стенске масиве	Balmer (1952), Sheorey и други (1989)
$\sigma_1 = \sigma_3 + A \cdot \sigma_c \cdot \sqrt[3]{\frac{\sigma_3}{\sigma_c}} - S$	A, B и S представљају параметре чврстоће	Yoshida (1990)

где су:

$$\tau_m = (\sigma_1 - \sigma_3)/2 \text{ и } \sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$$

$\tau$  – смичући (тангенцијални) напон

$\sigma$  – нормални напон

$\sigma_c$  – једноосна чврстоћа на притисак  $\sigma_3$  – минимални главни напон

$\sigma_t$  – једноосна чврстоћа на затезање



$\sigma_1$  – максимални главни напон

$\sigma_3$  – минимални главни напон

$\sigma_1'_{n}$  – максимални нормализован ефективни главни напон

$\sigma_3'_{n}$  – минимални нормализован ефективни главни напон

$a, b, F, f, C, D, B, M$  и  $\alpha$  – константе

## **2.6. Ноек-Brown-ов критеријум лома**

У време када није постојала одговарајућа метода за процену чврстоће стенског масива, сви напори су били усресређени на развој и дефинисање бездимензионе једначине која ће зависити од употребе геолошких карактеристика односно употребе података утицајних фактора и на тај начин доћи до одређивања једначине критеријума лома. За потребе развоја и дефинисања једначине неопходно је било обезбедити одређене улазне податке за пројектовање у рударству, како би на што реалнији начин могли да сагледамо понашање стенског масива и уз инжењерске приступе одредити најбољи начин за управљање стенским масивом. У проналажењу најбољег решења за потребе пројектовања развијен је изворни критеријум лома 1980. године у току писања и израде књиге „Подземни ископи у стени“. Потреба за дефинисањем овог критеријума била је неопходна како би се обезбедили потребни улазни подаци за формирање геомеханичког модела. Тако формиран скуп података служио је за даље дефинисање потребних вредности са којим би се створили услови за пројектовање рударских објеката. Треба напоменути да једначина Ноек – Brown – овог критеријума лома није била ни нова, ни јединствена једначина, пошто је употреба идентичне једначине била примењена још давне 1936. године, при одређивању критеријума лома бетона . [1], [2]

При развоју Ноек-Brown-овог критеријума, научници су уочили да неће имати никакву практичну вредност за примену овог критеријума лома. Представљени критеријум не би имао примену при избору вредности за потребе формирања геомеханичког модела уколико не би било извршено дефинисање параметара једноставним геолошким теренским истраживањима.



За успех и примену овог критеријума размишљало се чак и о дефинисању нове класификације стенског материјала, али дефинисањем класификације коју је објавио Bieniawski, инжењери из области геомеханике и механике стена су одлучили да поменути класификацију примене у рударским подухватима и да представља основу за одређивање улазних геолошких података при геомеханичком пројектовању рударских објеката. Класификација која је узета као основ за дефинисање улазних података је RMR класификација коју је Bieniawski 1974. године објавио. Тиме су Hoek и Brown дали значајан допринос дефинисањем критеријума лома који се односио на то што су направили везу између једначине за критеријум лома и геолошких истраживања у облику класификације коју је предложио Bieniawski то јест, Rock Mass Rating (RMR).

Hoek и Brown су развили критеријум лома за праћење бочног притиска на рударским објектима и њиховој околини. Једначине критеријума лома су засноване на прикупљеним подацима при испитивању узорака стенског масива из рудника Boungainville у Папуа Новој Гвинеји. При анализи и испитивању прикупљених података у овом случају добијени подаци испитивања карактеришу зону стенског масива као андезит, и то чврсти андезит где су добијени резултати једноосне чврстоће на притисак која износи око 270 Мра. Поред тога на прикупљеним узорцима андезита могу се приметити и бројне, уочљиве, храпаве, неиспуњене пукотине. При овоме, једну од најважнијих група података су представљали резултати анализе троосне чврстоће на притисак које је извео професор John Jaeger на Аустралијском Националном Универзитету у Канбери. Пробна тела представљају веома испуцали андезити који су добијени бушењем трозидном дијамнтском круном у руднику Boungainville. На тако добијеним узорцима андезита формирана су пробна тела и том приликом извршена су следећа испитивања:

- Испитивања непоремећених комада су извршена на пробним телима пречника 25 mm и 50 mm.
- Испитивања непоремећеног језгра која су извршена на пробним телима пречника 152 mm за испуцали стенски материјал (где уобичајено





растојање између пукотина износи око 25 mm) који је добијен бушењем трозидном дијамантском круном.

- Испитивања преконсолидованих невезаних узорака која су извршена узимањем узорака и формирањем пробних тела са косина (невезани материјал), који су потом збијени на приближно природну запреминску тежину и испитани у ћелији за испитивање троосне чврстоће на притисак пречника 152 mm.
- Испитивање свежих до делимично распаднутих узорака који представљају узорке узете са површинског копа, који су збијени приближно на природну запреминску тежину и испитани у ћелији за испитивања троосне чврстоће на притисак пречника 571 mm.
- Испитивање средње распаднутих узорака који представљају узорке узете са површинског копа, који су потом збијени на приближно на природну запреминску тежину и након тога испитани у ћелији за испитивање троосне чврстоће на притисак пречника 571 mm.
- Испитивање веома распаднутих узорака који су збијени на приближно природну запреминску тежину а затим испитани у ћелији за испитивања троосне чврстоће на притисак пречника 152 mm.

Изворни критеријум лома, који је био намењен првенствено за чврст стенски материјал, заснован је на претпоставци да је лом стенског масива контролисан померањем и ротирањем појединих делова стенског материјала који су раздвојени бројним пукотинским равнима. Претпостављено је да лом непоремећеног стенског материјала нема значајног утицаја на целокупан процес развоја лома и, такође, је претпостављено да пукотине имају неправилан (хаотичан) распоред, тако да не постоји неки посебан предодређени правац, као и да се стенски материјал може посматрати као изотропан. [1]



### **2.6.1. Изворни Ноек-Вроун-ов критеријум лома за непоремећени стенски материјал**

Јендачина за непоремећени стенски материјал остала је скоро иста, непромењена иако је Ноек-Вроун-ов критеријум лома претрпео разне измене и допуне од представљања изворне једначине 1980. године. Оно што су Ноек и Вроун утврдили је да се највећа вредност троосне чврстоће на притисак непоремећеног стенског материјала може дефинисати помоћу следеће једначине: [4], [5]:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \cdot \sqrt{m_i \cdot \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + 1}, \quad (2.18)$$

где су:

$\sigma_{ci}$  - једноосна чврстоћа на притисак непоремећеног стенског материјала,

$m_i$  - материјална константа непоремећеног стенског материјала.

На основу резултата лабораторијских испитивања троосне чврстоће на притисак пробних тела добијених из језгра за различите вредности бочног притиска може се израчунати вредност материјалне константе непоремећеног стенског материјала  $m_i$ . Други начин за одређивање вредности материјалне константе за непоремећени стенски материјал  $m_i$  је извођење из већ постојећих резултата који су добијени претходним анализама и испитивањима. Оно што има директног утицаја на материјалну константу за непоремећени стенски материјал  $m_i$  је стенски материјал, то јест минералшки састав стенског материјала као и величина заступљених зрна у непоремећеном стенском материјалу. У делу који следи испод текста, биће дат приказ табела са вредностима материјалне константе  $m_i$  које су представљене од стране следећих научника:

- Ноек-а, (1983. године), Догук-а (1991. године) и Ноек-а и сарадника (1992, 1995, и 2001. године) [1]



Вредности поменуте материјалне константе  $m_i$  засноване су на резултатима добијеним испитивањем троосне чврстоће на притисак.

У табелама 2.2, 2.3 и 2.4 може дат је приказ вредности материјалне константе  $m_i$  за непоремећени стенски материјал за магматске, седиментне и метаморфне стене које су дали Ноек и сарадници 1992. године. Као напомену треба додати да вредности које су дате са \* представљају процењене вредности материјалне константе  $m_i$  за непоремећени стенски материјал. [1]

Табела 2.2- Вредност материјалне константе  $m_i$  за непоремећени стенски материјал, за магматске стене (Ноек и сарадници 1992. године)

Величина зрна	ВРСТА СТЕНЕ		
	Магматске стене		
	Фелдспатске	Мафитске	Мафитске
Крупна	Гранит – 32.7	Габро – 25.8	Норит – 21.7
Средња		Долерит - 15.2	
Фина	Риолит – 20*	Андезит - 18.9	Базалт – 17*
Врло фина			

Табела 2.3- Вредност материјалне константе  $m_i$  за непоремећени стенски материјал, за седиментне стене (Ноек и сарадници 1992. године)

Величина зрна	ВРСТА СТЕНЕ		
	Седиментне стене		
	Карбонатне	Детричне	Хемијске
Крупна	Гранит – 32.7	Габро – 25.8	Норит – 21.7
Средња		Долерит - 15.2	
Фина	Риолит – 20*	Андезит - 18.9	Базалт – 17*
Врло фина			



Табела 2.4- Вредност материјалне константе  $m_i$  за непоремећени стенски материјал, за метаморфне стене (Ноек и сарадници 1992. године)

Величина зрна	ВРСТА СТЕНЕ	
	Метаморфне стене	
	Карбонатне	Силикатне
Крупна	Мермер – 32.7	Гнајс – 29.2
Средња		Амфиболит – 31.2
Фина		Кварцит – 23.7
Врло фина		Шкриљац – 11.4

У табелама 2.5, 2.6, и 2.7 дат је приказ вредности материјалне константе  $m_i$  за непоремећени стенски материјал за магматске, седиментне и метаморфне стене где вредности које су дате у заградама представљају процењене вредности које су дали Ноек, Kaiser и Bawden, 1995. године . [1]

Табела 2.5- Вредност материјалне константе  $m_i$  за непоремећени стенски материјал, за магматске стене – где вредности дате у заградама представљају процењене вредности (Ноек, Kaiser и Bawden, 1995. године)

Врста стене	Класа	Група	Текстура			
			Крупнозрна	Средња	Фина	Врло фина
МАГМАТСКЕ	Светле	Гранит 33		Риолит (16)	Обсидијан (19)	
		Граанодиорит 29±3		Дацит (17)		
	Тамне	Диорит (28)		Андезит 19		
		Габро 27	Долерит (19)	Базалт (17)		
		Норит 22				
	Изливне пирокластичне	Агломерат (20)	Бреча (18)	Туф (15)		



Табела 2.6- Вредност материјалне константе  $m_i$  за непоремећени стенски материјал, за седиментне стене – где вредности дате у заградама представљају процењене вредности (Ноек, Kaiser и Bawden, 1995. године)

Врста стене	Класа	Група	Текстура			
			Крупнозрна	Средња	Фина	Врло фина
<b>СЕДИМЕНТНЕ</b>	Кластичне		Конгломерат (22)	Пешчар 19	Алевролит 9	Глинац 4
			← Граувака → 18			
	Некластичне	Органске	← Креда → 7			
			← Угаљ → (8 – 21)			
		Карбонатне	Бреча (20)	Спратик Кречњак (10)	Мимикритски кречњак 8	
		Хемијске		Гипс 16	Анхидрит 13	

Табела 2.7- Вредност материјалне константе  $m_i$  за непоремећени стенски материјал, за метаморфне стене – где вредности дате у заградама представљају процењене вредности (Ноек, Kaiser и Bawden, 1995. године)

Врста стене	Класа	Група	Текстура			
			Крупнозрна	Средња	Фина	Врло фина
<b>МЕТАМОРФНЕ</b>	Нефолиатисане		Мермер 9	Корнит (19)	Кварцит 24	
	Делимично фолиатисане		Мигматит (30)	Амфиболит 31	Милонит (6)	
	Фолиатисане *		Гнајс 33	Шкриљац (10)	Филити (10)	Аргилошист 9



Треба додати као напомену за табеле 2.5, 2.6 и 2.7 да вредности које су дате са звездицом се односе на пробна тела непоремећеног стенског материјала која су испитивана управно на фолиацију. [1]

На основу свега може се закључити да ће вредности материјалне константе  $m_i$  значајно да се разликују уколико до лома дође дуж равни фолиације, док вредности које су дате у заградама представљају процењене вредности за одређене стенске материјале.

У табелама 2.8, 2.9, и 2.10 дат је приказ вредности материјалне константе  $m_i$  за непоремећени стенски материјал за магматске, седиментне и метаморфне стене које су дали Ноек и Karzulovic 2001 године. [1]

Табела 2.8- Вредности материјалне константе  $m_i$  за непоремећени стенски материјал за магматске стене (Ноек и Karzulovic, 2001. године)

Врста стене	Класа	Група	Текстура			
			Крупнозрна	Средња	Фина	Врло фина
МАГМАТСКЕ	Плутонске	Светле	Гранит 32±3	Диорит 25±5		
			Гранодиорит (29±3)			
		Тамне	Габро 27±3	Долерит (16±5)		
			Норит 20±5			
	Хипобисалне		Профирит (20±5)		Дијабаз (15±5)	Перодитит (25±5)
	Вулканске	Карбонатне		Риолит (25±5)	Дацит (25±3)	Обсидијан (19±3)
			Андезит 25±5	Базалт (25±5)		
	Хемијске	Агломерат (19±3)	Бреча (19±5)	Туф (13±5)		



Табела 2.9- Вредности материјалне константе  $m_i$  за непоремећени стенски материјал за метаморфне стене (Ноек и Карзуловић, 2001. године)

Врста стене	Класа	Група	Текстура			
			Крупнозрна	Средња	Фина	Врло фина
СЕДИМЕНТНЕ	Кластичне		Конгломерат (21±3) Бреча 19±5	Пешчар 17±4	Алевролит 7±2 Граувака (18±3)	Глинац 4±2 Шкриљац (6±2) Лапорац 7±2
	Некластичне	Карбонатне	Кристалести кречњак (12±3)	Спратик Кречњак (10±2)	Мимикритски кречњак (9±2)	Доломит (9±3)
		Евапорати		Гипс 8±2	Анхидрит 12±2	
		Органске				Креда 7±2

Табела 2.10- Вредности материјалне константе  $m_i$  за непоремећени стенски материјал за седиментне стене (Ноек и Карзуловић, 2001. године)

Врста стене	Класа	Група	Текстура			
			Крупнозрна	Средња	Фина	Врло фина
МЕТАМОРФНЕ	Нефолиатисане		Мермер 9±3	Корнит (19±4) Метापешчар (19±3)	Кварцит 20±3	
	Делимично фолиатисане		Мигматит (29±3)	Амфиболит 26±6		
	Фолиатисане *		Гнајс 28±5	Шкриљац 12±3	Филити (7±3)	Аргилошист 7±4

Као напомену за табеле 2.8, 2.9, 2.10 треба додати да се вредности дате са \* односе на пробна тела непоремећеног стенског материјала која су



испитивана управно на слојевитост или фолиацију. На основу свега може се закључити да ће вредности материјалне константе  $m_i$  значајно да се разликују уколико до лома дође дуж равни ослабљења, док вредности које су дате у заградама представљају процењене вредности за одређене стенске материјале.

У табелама 2.11, 2.12 и 2.13 дат је приказ вредности материјалне константе  $m_i$  за непоремећени стенски материјал за магматске, седиментне и метаморфне стене где су добијене вредности представљене према програмском пакету „Roslab“ (Ноек, 2022. године) [1]

Табела 2.11- Вредности материјалне константе  $m_i$  за непоремећени стенски материјал за магматске стене, према програмском пакету „RosLab“ (Ноек, 2002. године)

Врста стене	Класа	Група	Текстура			
			Крупнозрна	Средња	Фина	Врло фина
<b>МАГМАТСКЕ</b>	Плутонске	Светле	Гранит 32±3	Диорит 25±5		
			Гранодиорит (29±3)			
		Тамне	Габро 27±3	Долерит (16±5)		
			Норит 25±5			
	Хипобисалне		Профирит (20±5)		Дијаба з (15±5)	Перодитит (25±5)
	Вулканске	Изливне		Риолит (25±5)	Дацит (25±3)	Обсидијан (19±3)
			Андезит 25±5	Базалт (25±5)		
	Пирокластичне	Агломерат (19±3)	Бреча (19±5)	Туф (13±5)		





Табела 2.12- Вредности материјалне констане  $m_i$  за непоремећени стенски материјал за седиментне стене, према програмском пакету „RocLab“ (Ноек, 2002. године)

Врста стене	Класа	Група	Текстура			
			Крупнозрна	Средња	Фина	Врло фина
СЕДИМЕНТНЕ	Кластичне		Конгломерат (21±3) Бреча (20±2)	Пешчар 17±4	Алевролит 7±2 Граувака (18±3)	Глинац 4±2 Шкриљац (6±2) Лапорац 7±2
	Некластичне	Карбонатне	Кристалести кречњак (12±3)	Спратик Кречњак (10±5)	Мимикритски кречњак (8±3)	Доломит (9±3)
		Евапорати		Гипс (10±2)	Анхидрит 12±2	
		Органске				Креда 7±2

Табела 2.13- Вредности материјалне констане  $m_i$  за непоремећени стенски материјал за метаморфне стене, према програмском пакету „RocLab“ (Ноек, 2002. године)

Врста стене	Класа	Група	Текстура			
			Крупнозрна	Средња	Фина	Врло фина
МЕТАМОРФНЕ	Нефолиатисане		Мермер 9±3	Корнит (19±4) Метапешчар (19±3)	Кварцит 20±3	
	Делимично фолиатисане		Мигматит (29±3)	Амфиболит 26±6		
	Фолиатисане *		Гнајс 28±5	Шкриљац (10±3)	Филити (7±3)	Аргилошист 7±4



Треба додати као напомену за табеле 2.11, 2.12 и 2.13 да вредности које су дате са звездицом се односе на пробна тела непоремећеног стенског материјала која су испитивана управно на слојевитост или фолиацију. На основу свега може се закључити да ће вредности материјалне константе  $m_i$  значајно да се разликују уколико до лома дође дуж равни ослабљења, док вредности које су дате у заградама представљају процењене вредности за одређене стенске материјале.

### **2.6.2. Допуњени Ноек-Вроун-ов критеријум лома за непоремећени стенски материјал**

Да би Ноек-Вроун-ов критеријум лома за непоремећени стенски материјал могао да обухвата ефективне напоне потребно је било допунити постојећи критеријум и написати га у следећем облику (Ноек и сарадници 1992. године):

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \cdot \sqrt{m_i \cdot \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + 1}, \quad (2.19)$$

где су:

- $\sigma'_1$  - максимални ефективни главни напон у тренутку лома,
- $\sigma'_3$  - минимални ефективни главни напон у тренутку лома.

Пошто су експерименталним истраживањима утврђене различите вредности чврстоће за засићене и незасићене узорке било је потребно увођење ефективних напона у тренутку лома како би било омогућено праћење стања испитиваног пробног тела у тренутку лома.

Према претходној једначини Ноек-Вроун-ов критеријум лома за непоремећени стенски материјал је недефинисан за вредности  $\sigma'_3$  мање од  $-\sigma_c/m_i$ . Једноосна чврстоћа на притисак непоремећеног стенског материјала код Ноек-Вроун-овог критеријума лома представља веома битан параметар који би требало одредити у лабораторији када год инжењерски услови то омогуће. Али пошто у неким од случајева не постоји могућност за добијање ни једног



лабораториског податка појавила се потреба за дефинисањем процене вредности једноосне чврстоће података. Због све веће потребе за дефинисањем процењене вредности Ноек и сарадници (1992. године) су предложили да, уколико не постоји ни један лабораторијски податак, вредност једноосне чврстоће на притисак се може проценити на основу података који су приказани у табели 2.14 [1]

Табела 2.14- Процењене вредности једноосне чврстоће на притисак  $\sigma_c$  непоремећеног стенског материјала – (Препоруке ISRM, Brown 1981. године)

Стање	Једноосна чврстоћа на притисак $\sigma_c$ (МПа)	Индекс чврстоће $I_s$ (МПа)	Процена чврстоће на терену	Примери
<b>Изузетно чврсто</b>	> 250	> 10	Стенски материјал се једино одлама при узастопним удрцима чекића.	Базалт, рожнац, дијабаз, гнајс, гранит, кварцит
<b>Врло чврсто</b>	100 – 250	4 – 10	Потребно је више удараца геолошким чекићем да би се сломио узорак непоремећеног стенског материјала.	Амфиболит, андезит, базалт, доломит, габро, гнајс, гранит, гранодиорит, кречњак, мермер, риолит, туф
<b>Чврсто</b>	50 – 100	2 – 4	Узорак се ломит једним ударцем геолошким чекићем.	Кречњак, мермер, филит, пешчар, шкриљац, аргилошист
<b>Средње чврсто</b>	25 – 50	1 – 2	Врх геолошког чекића оштрим ударцем усеца се усеца до 5 mm, а нож само гребе површину стенског материјала.	Глинац, угаљ, бетон, шкриљац, алевролит
<b>Слабо</b>	5 – 25	**	Нож засеца стенски материјал али је исувише тешко да би се обрадио одговарајуће пробно тело	Креда, камен, со, поташа
<b>Врло слабо</b>	1 – 5	**	Стенски материјал се дробит оштрим ударцем врха геолошког чекића, може се обликовати ножем	Врло измењене или распаднуте стене
<b>Изузетно слабо</b>	0,25 – 1	**	Ноктом је могуће усецати стенски материјал	Испуна од глине



Као напомену би требало додати да врсте стена које су у табели означене са (\*) представљају све врсте стена које показују веома широк интервал јеноосне чврстоће на притисак, што утиче на хетерогеност у саставу и анизотропију у структури. Чврсте стене су праћене добро сраслом кристалном основом и неколицином прелина. Док врсте стена које су у табели означене са (\*\*\*) представљају стене са једноосном чврстоћом на притисак мањом од 25 МПа обично дају веће резултате приликом испитивања индекса чврстоће.

Да би резултати анализе били поуздани и што прецизнији неопходно је обухватити одређени број изведених испитивања да би се постигла релевантност података. За анализу лабораторијских испитивања непоремећеног стенског материјала неопходно је обухватити најмање пет резултата изведених испитивања. Када по завршеном испитивању располажемо са најмање пет резултата испитивања троосне чврстоће на притисак, онда се добијени подаци могу анализирати применом претходне једначине изведене у следећем облику:

$$y = m_i \cdot \sigma_{ci} \cdot x + \sigma_{ci}, \quad (2.20)$$

где су:

$$x = \sigma'_3$$

$$y = (\sigma'_1 - \sigma'_3)^2$$

Уопштени облик Ноек-Вроун-овог критеријума лома за неоремећени стенски материјал није промењен од допуне из 1992. године. Вредности које су приказане у претходном делу текста представљају средње вредности материјалне константе  $m_i$  која је утврђена за сваку врсту стене. Са циљем за одређивање вредности материјалне константе  $m_i$  Ноек и Броун су написали упутство за извођење лабораторијских испитивања троосне чврстоће на притисак 1997. године. Према изворним препорукама из 1980. године препоручено је да се за испитивање троосне чврстоће на притисак користе вредности бочног притиска у интервалу од  $0 < \sigma_3 < 0.5\sigma_c$ . У ситуацијама када не располажемо резултатима троосне чврстоће на притисак, вредност материјалне



константе  $m_i$  потребно је проценити на основу вредности које су приказане у табелама изнад које су предложене од стране Ноека, Kaiser и Bawden, 1995. године. 1991. године Doguk је уочио да се подаци везани за материјалну константу  $m_i$  за сваку врсту стене значајно расипају. Ноек и Karzulovic су 2001. године допунили табелу са материјалном константом  $m_i$  са проценом од одступања вредности материјалне константе  $m_i$  од средње вредности. Такође, треба нагласити да су последње измене и допуне које су извршене 2002. године унете у програмски пакет „RocLab“ (Ноек 2002. године).

На основу свега, може се извести закључак да подаци за непоремећени стенски масив и резултати испитивања троосне чврстоће на притисак дају могућност за израчунавање вредности материјалне константе, као и могућност за усвајање вредности материјалне константе када није могуће израчунати поменути вредност, као и да вредност материјалне константе представља важан податак за дефинисање критеријума лома и геомеханичку проверу стабилности рударских објеката.

Поред дефинисања Ноек-Brown-овог критеријума лома кроз овај део рада, треба поменути да у емпиријске критеријуме лома за непоремећени стенски материјал спадају следећи критеријуми који неће подробније бити проучени кроз овај рад:

- Fairhurst-ов критеријум лома (1964. године),
- Hobbs-ов критеријум лома (1964. године),
- Murrel-ов критеријум лома (1965. године),
- Bodonyi-ев критеријум лома (1970. године),
- Franklin-ов критеријум лома (1971. године),
- Bieniawski (1974. године) и Yudhbir-ов критеријум лома (1983 године),
- Ramamurthy-јев критеријум лома (1985. године),
- Johnston-ов критеријум лома (1985. године),
- Balmer (1952. године) и Sheorey-ов критеријум лома (1989. године)
- Yoshida-ин критеријум лома (1990. година)



У табели 2.1 дат је преглед поменутих критеријума са изведеним једначинама за сваки критеријум лома, намена критеријума односно коментар на дефинисане критеријуме као и аутори и година објављивања сваког критеријума.

## **2.7. Критеријуми лома за крте стенске материјале**

Када се примењује критеријум лома за смицање долази до појаве на нивоу напона, који обично није критичан, али постоји могућност да проузрокује појаву лома код непоремећеног стенског материјала. При правцу деловања максималног главног напона у оваквим случајевима најчешће се јавља лом праћен пукотинама које су паралелне. По ставрању лома, овакав облик лома се може представити као распадање. Stacey је 1981. године развио критеријум лома при повећању деформације који заснован на претпоставци да у зависности од својства самог материјала крт лом може бити проузрокован када укупно повећање деформације у стенском материјалу превазиђе критичну вредност. У тренутку када су сва три главна напона оптерећена на притисак јавља се могућност за повећање деформације. Применом Hook-овог закона за идеално еластичне материјале све се ово може и потврдити, па се закључује да ће до повећана деформације доћи уколико је:

$$\nu \cdot (\sigma_1 + \sigma_2) > \sigma_3, \quad (2.21)$$

Повећање деформације зависи од минималног главног напона, који карактерише најмањи главни напон на притисак или највећи главни напон на истезање. До појаве пукотина ће доћи у равнима које су управне на правац повећања деформације. У табели 2.15 Stacey је навео вредности неких од деформација за ограничени број узорака стенског материјала. Stacey је дефинисао 1981. године да се на приближно двострукој вредности критичне деформације јављају се континуалне пукотине. Приликом пројектовања рударских објеката треба водити рачуна о избору вредности критичне деформације и усвојене вредности пражљиво примењивати како би



геомеханичким испитивањима добили што прецизније резултате. Приликом избора вредности критичне деформације треба водити рачуна о томе да вредности критичне деформације имају одређена ограничења која имају директна утицај при пројектовању рударских објеката. На основу свега изводи се закључак да овај критеријум лома је намењен првенствено за крти лома у условима појаве и наношења малих бочних притисака. Према критеријуму лома при повећању деформације до појаве пукотине долази када је:

$$\varepsilon_3 < \varepsilon_c < 0, \quad (2.22)$$

где је:

$\varepsilon_c$  - критична вредност деформације за одређени стенски материјал

Вредности критичног повећања деформације за ограничен број података дат је у табели 2.15. [1]

*Табела 2.15- Вредности критичног повећања деформације (Stacey, 1981. год)*

<i>Врста стенског материјала</i>	<i>Критично повећање деформације (<math>\mu St</math>)</i>
Дијабаз, Норит	173 - 175
Конгломерат	73 - 86
Лаваа	138 - 152
Кварцит	81 - 130
Шкриљац	95 - 150

### **2.7.1. Примена Ноек-Brown-овог критеријума лома на крт лом стенског материјала**

Појава кртог лома јавља се у условима када је индекс оштећења  $D_i$  већи од  $0,4 \pm 0,1$ . Индекс оштећења  $D_i$  представља однос максималног граничног тангенцијалног напона и једноосне чврстоће на притисак непоремећеног стенског материјала. Јављање кртог лома условљено оваквом појавом дефинисано је од стране Martina и сарадника 1999. године. Дубина око



рударског објекта до које ће се простирати крти лом зависи од стенског материјала. За средње испуцали стенски масив дубина око рударског објекта до које ће се простирати крти лом може бити одређена применом еластичне анализе за коју ће бити примењени Ноок-Вроун-ови параметри за крте стенске материјале. Вредности поменутих параметара износе за  $m=0$  и за  $s=0,11$ . Имплементацијом ових вредности у једначини еластичне анализе биће добијени подаци везани за дубину простирања кртог лома чиме ће примена овог критеријума на успешан начин бити завршена.

## **2.8. Емпиријски критеријуми лома за стенски масив**

Дефинисање критеријума лома се заснива на испитивањима великих пробних тела и „in-situ“ испитивањима, као и на лабораторијским испитивањима, искуству и/или анализама. Према томе, критеријуми лома за стенски материјал могу се представити као критеријуми који су најчешће везани за карактеризациони систем или класификацију стенског материјала. Према томе једначина критеријума лома која се дефинише је изражена преко величина  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  које представљају максималне главне и минималне главне напоне и не зависе од вредности средњег главног напона  $\sigma_2$ .

Критеријуми који су најчешће примењени у свету дати су у табели 2.16 [1]. Представљени критеријуми лома су засновани на испитивањима троосне чврстоће на притисак где су испитивања извршена на пробним телима стенског материјала малих димензија (*више о испитивању троосне чврстоће на притисак дато је у поглављу 3 овог рада*). Док се за један од представљених критеријума може рећи да је показао усаглашеност са стварним својствима стенског материјала. На основу свега тога након дефинисања критеријума лома који зависе од испитивања троосне чврстоће на притисак и класификације односно карактеризације система стенског материјала стичу се сви потребни услови за гормирање геомеханичког модела и могућност избора рачунски вредности за потребе пројектовања рударских објеката и геомеханичке провере стабилности по усвојеним вредностима.





Табела 2.16- Вредности критичног повећања деформације (Stacey 1981.године)

Једначина критеријума лома	Коментар	Аутор, година првог објављивања
$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \cdot \left( m_b \cdot \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$	Верзија из 2022. године	Hoek и Brown, 1980. године
$\sigma_1 = A \cdot \sigma_{ci} + B \cdot \sigma_{ci} \cdot \left( \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} \right)^\alpha$	A је бездимензиони параметар, B представља константу стенског материјала, док се за $\alpha$ се препоручује вредност од 0,65	Yudhbir и сарадници, 1983. године
$\sigma_1 = \sigma_{cm} \cdot \left( 1 + \frac{\sigma_3}{\sigma_{tm}} \right)^{b_m}$	Користи се вредност RMR <sub>76</sub>	Sheorey и сарадници, 1989. године
$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_3' \cdot B_j \cdot \left( \frac{\sigma_{cj}'}{\sigma_3'} \right)^{a_j}$	Верзија из 2001. године	Ramamurthy, 1995. године

На основу досадашњих сазнања и резултата прикупљених од инжењера из области геомеханике може се закључити да је најпознатији и најчешће употребљаван критеријум лома Hoek-Brown-ов критеријум који је након изворног дефинисања једначине критеријума лома кроз инжењерске приступе константно допуњаван и усавршаван за првобитне процене чврстоће стенског масива. Допуне којима је Hoek-Brown-ов критеријум усавршаван приказан је хронолошки кроз време (1980, 1983, 1988, 1995, 1997, 2001, 2002. и 2018. године). Као недостатак може се изнети то да још увек не постоје званично објављени подаци који би потврдили усаглашеност са стварним својствима стенског масива. При различитим условима који владају у стенском масиву може се закључити да овај критеријум представља једини могући приступ за перцепцију чврстоће стенског масива. Утицај параметара на чврстоћу који се користи за дефинисање критеријума лома потребно је да даје реалну слику и понашању стенског масива. Индекс стенске масе – RMi (Palmström, 1995. године) и Модификована геомеханичка класификација за потребе рударства –



MRMR (Laubscher, 1977. године). представљају методе које чине комбинацију критеријума лома и класификационог система. Поред ове комбинације, Q систем класификације (Barton 2002. године) је допуњен тако да при класификацији обухвата и процену чврстоће стенског масива (*детаљније о класификационим системима дато је у 4. поглављу овог рада*).

## **2.9. Ноек-Brown-ов критеријум лома за стенски масив**

Изворни Ноек-Brown-ов критеријум лома након дефинисања 1980. године неколико пута је допуњаван, усавршаван и измењиван. Критеријум лома за стенски масив је допуњен 1983, 1988, 1992, 1995, 1997, 2001, 2002. и 2018. године. Како би се утврдила својства стенског масива предложена је једначина везе између самог критеријума лома и класификационих параметара стенског масива. У изворној, допуњеним и измењеним верзијама критеријума лома примењен је RM класификациони систем, док се примена класификационог система геолошког индекса чврстоће (GSI) препоручује за употребу уопштеног Ноек-Brown-овог критеријума лома. У наставку текста који предстоји биће приказан кратак историјски развој Ноек-Brown-овог критеријума лома за стенски масив. [1]

### **2.9.1. Изворни Ноек-Brown-ов критеријум лома за стенски масив (1980. година)**

Подаци на основу којих су засноване основне једначине за дефинисање изворног критеријума лома за стенски масив прикупљени су при испитивању узорка из рудника Boungainville у Папуа Новој Гвинеји. На основу података узетих из рударских овјеката када се у њиховој околини јављају бочни притисци дефинисан је Изворни Ноек-Brown-ов критеријум лома за стенски масив. [4], [5] У дефинисању података из овог рудника, стенски масив је окарактерисан као веома чврсти андезит. Испитивањем је добијена вредност једноосне чврстоће на притисак од 270 МПа. При испитивању, уочене су бројне



храпаве, неиспуњене пукотине. Најважнији скуп података представљали су резултати добијених вредности испитивањем троосне чврстоће на притисак. Испитивања троосне чврстоће на притисак изведена су на пробним телима андезита са веома израженим пукотинама, пречника 150 mm.

▪ **Област примене Изворног Ноек-Броун-ов критеријум лома и коришћени параметри**

Област у којој је изворни критеријум лома нашао широку примену је за веома испуцалу стенску масу без детаља. По методи коју је објавио Walmer статичком криволинијском апроксимацијом парова вредности  $(\sigma_n', \tau)$  одређује се Mohr-ова обвојница. У дефинисаном изворном критеријуму лома  $\sigma_1'$  и  $\sigma_3'$  представљају максималне и минималне главне ефективне напоне у тренутку лома,  $\sigma_t$  представља затезну чврстоћу стенске масе,  $m, s$  представљају константе материјала и  $\sigma_n', \tau$  карактеришу ефективне нормалне и смичуће напоне.

Једначине дефинисаног изворног критеријума лома су: [4], [5]:

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \cdot \sqrt{m_b \cdot \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s}, \sigma_t = \frac{\sigma_{ci}}{2} \cdot (m - \sqrt{m^2 + 4s}), \tau' = A \cdot \sigma_{ci} \cdot \left( \frac{\sigma_n' - \sigma_t}{\sigma_{ci}} \right)^B, \quad (2.23)$$

$$\sigma_n' = \sigma_3' + \frac{\sigma_1' - \sigma_3'}{1 + \frac{\partial \sigma_1'}{\partial \sigma_3'}}, \tau = (\sigma_1' - \sigma_3') + \sqrt{\frac{\partial \sigma_1'}{\partial \sigma_3'}}, \frac{\partial \sigma_1'}{\partial \sigma_3'} = \frac{m \cdot \sigma_{ci}'}{2(\sigma_1' - \sigma_3')}, \quad (2.24)$$

**2.9.2. Допуне Ноек-Броун-овог критеријум лома за стенски масив (1983. година)**

Током развоја критеријума лома јавило се неколико проблематичних питања. Једно од питања које је било проблематично односило се на везу између нелинеарних параметара  $m$  и  $s$ , и Mohr–Coulomb–овог критеријума, са парематрима  $c$  и  $\phi$ , који су били у односу са Ноек-Броун-овим критеријумом лома. У пракси сви програмски пакети механике стена и тла који су били у примени за геомеханичку проверу стабилности били су развијени за Mohr-



Coulomb-ов критеријум лома. Да би се омогучила примена Ноек-Броун-овог критеријума лома било је неопходно одредити везу између параметара  $m$  и  $s$  и параметара  $c$  и  $\varphi$ . На тај начин, остварењем поменуте везе, створили би се услови за примену поменутог критеријума лома за одређивање улазних података за коришћене програмске пакете.

др John W. Bray развио је тачно теоретско решење овог проблема на Imperial College of Science and Technology и представљање опоменутог решења први пут је било 1983. године у склопу Rankine Lecture. Решење које је било представљено карактерише једно од најдетаљнијих разматрања изворног Ноек-Броун-овог критеријума лома. Добијеним решењем представљене су проширене основе које су Ноек и Броун имплементирали 1980. године.

▪ ***Област примене допуњеног Ноек-Броун-овог критеријума лома (1983) и коришћени параметри***

Област у којој је допуњени критеријум лома нашао широку примену је за веома испуцалу стенску масу без детаља и са разматрањем анизотропног лома са тачним решењем Mohr-ове обвојнице лома коју је предложио др J. W. Bray.

Једначине дефинисаног допуњеног критеријума лома су: [6]

$$a) \sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \cdot \sqrt{m_b \cdot \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s}, \quad б) \tau' = m \cdot \frac{\sigma_{ci}}{8} \cdot (\operatorname{ctg} \varphi_i' - \cos \varphi_i'), \quad (2.25)$$

$$a) \varphi_i' = \operatorname{arctg} \left( \frac{1}{\sqrt{4 \cdot h \cdot \cos^2 \theta - 1}} \right), \quad б) \theta = \frac{90 + \operatorname{arctg} \left( \frac{1}{\sqrt{h^3 - 1}} \right)}{3}, \quad (2.26)$$

$$h = 1 + \frac{16 \cdot (m \cdot \sigma_n' + s \cdot \sigma_{ci})}{3 \cdot m^2 \cdot \sigma_{ci}}, \quad (2.27)$$



### **2.9.3. Допуне Ноек-Brown-овог критеријума лома за стенски масив (1988. година)**

У области механике стена и тла, као и код геомеханичких провере стабилности косина површинских копова критеријум лома је до 1988. године пронашао широку примену. Првобитно дефинисање овог критеријума било је за рударске објекте под земљом, односно за подземне откопе и праћење деловања бочних притисака у свим правцима на рударске просторије. Касније, усвајањем и допунама изворног критеријума показало се успешним испитивањем рударских објеката и анализама стенског материјала на мањим дубинама који су представљали косине површинских копова.

Првенствено због тога, 1988. године дефинисани су појмови непоремећене и поремећене стенске масе. Дефинисањем поменутих појмова створени су услови за методу којом ће бити извршено умањење вредности својстава стенских маса на малој дубини и непосредно испод површине терена.

Овом допуном одређена је метода за процену улазних параметара применом RMR класификације коју је развио Bieniawski 1974. године. Код параметара ефективног напона у нумеричким анализама како би се избегло двоструко узимање у обзир подземних вода, предложено је бодовање стања подземних вода. Бодовање стања је окарактерисано на тај начин да се стање подземне воде бодује са 10 што представља потпуно сув стенски масив као и да се оријентација пукотина бодује са 0 што представља врло повољно оријентисане пукотине у односу на дефинисане геометријске параметре стенског масива. Овде би само требало наменути да је овакав начин бодовања у каснијој верзији RMR класификације промењен, (*деталније о томе биће представљено у поглављу 4 овог рада*).



▪ **Област примене допуњеног Ноек-Броун-овог критеријума лома (1988) и коришћени параметри**

Област у којој је допуњени критеријум лома нашао широку примену је исто као код Ноек-а из 1983. године уз додатак једначина које успостављају везу између константи  $m$  и  $s$  и модификованог облика RMR класификације (Bieniawski 1974. године) код којих су усвојене вредности бодовања за подземне воде и утицај оријентације пукотина. Поред тога оствареном везом створени су услови за примену овог критеријума у програмским пакетима при анализи и испитивању геомеханичких прорачуна. Треба напоменути и уведене појмове за поремећени и непоремећени стенски масив, као и поступак за одређивање модула деформације  $E$  (по Srefim–у и Pereira). [7]

Област у којој је допуњени критеријум лома нашао широку примену је исто као код Ноек-а из 1983. године уз додатак једначина које успостављају везу између константи  $m$  и  $s$  и модификованог облика RMR класификације (Bieniawski 1974. године) код којих су усвојене вредности бодовања за подземне воде и утицај оријентације пукотина. Поред тога оствареном везом створени су услови за примену овог критеријума у програмским пакетима при анализи и испитивању геомеханичких прорачуна. Треба напоменути и уведене појмове за поремећени и непоремећени стенски масив, као и поступак за одређивање модула деформације  $E$  (по Srefim–у и Pereira).

Једначине дефинисаног допуњеног критеријума лома су:

Табела 2.17- Приказ једначина за поремећени и непоремећени стенски масив [1]

Поремећени стенски масив	Непоремећени или укљештени стенски масив
$\frac{m_b}{m_i} = e^{\frac{RMR-100}{14}}, s = e^{\frac{RMR-100}{6}}$	$\frac{m_b}{m_i} = e^{\frac{RMR-100}{28}}, s = e^{\frac{RMR-100}{9}}, E = 10^{\frac{RMR-10}{40}}$



где су:

$m_b$  и  $m_i$  – одговарајуће вредности материјалне константе за испуцале и непоремећене стенске материјале

#### **2.9.4. Допуне Ноек-Brown-овог критеријума лома за стенски масив (1990. година)**

У овој допуни описана су и представљена три практична примера као и могућност примене Bray – овог решења у сва три примера. Стручни рад који представља допуну изворног критеријума се односи на вођену расправу између Ноек-Brown- овог и Mohr-Coulomb-овог критеријума лома. [8]

#### **2.9.5. Допуне Ноек-Brown-овог критеријума лома за стенски масив (1992. година)**

Због недостатка решења Ноек-Brown-ов критеријум лома коришћен је за стенски масив веома лошег квалитета. То је само био показатељ колико је Ноек-Brown-ов критеријум лома нашао пироку примену. Модел чврстих укљештених стенских масива који су коришћени за развој изворног критеријума у овој допуни је изостао зато што се овакви стенски масиви значајно разликују. Због већих вредности које су добијене при испитивању затезне чврстоће која се одређује изворним Ноек-Brown-овим критеријумом било је неопходно извршити његову исправку. Приказани измењени критеријум је заснован на истраживањима др Sandip Shah-а која су изведена при дефинисању и изради његове докторске тезе. Треба напоменути да је у изворни критеријум уведен нови параметар  $a$  који је омогућио промену закривљења првобитне обвојнице лома, посебно у интервалу врло малих вредности нормалног напона, што је био случај при испитивањима за стенски масив веома лошег квалитета. Као закључно разамтрање ове допуне може се извести следеће:

Са допуном изворног Ноек-Brown-овог критеријума лома омогућено је формирање обвојнице лома, беза затезне чврстоће, што значи да је затезна



чврстоћа једнака нули што а формирана обвојница лома при дефинисању Mohr-ових кругова напона неће имати негативну вредност која се додељује затезању већ ће први круг бити дефинисан из нуле и односиће се само на чврстоћу на притисак.

▪ **Област примене допуњеног Hoek-Brown-овог критеријума лома (1992) и коришћени параметри**

Допуна и измена овог критеријума заснована је на усвојеним вредностима затезне чврстоће која је једнака нули за веома испуцале стенске масе. За те потребе у допуни изворног критеријума лома примењена је Walmer-ова техника прорачуна смичућег и норманог оптерећења. [9]

Једначине дефинисаног допуњеног критеријума лома су:

$$\text{а) } \sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \cdot \left( m_b \cdot \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} \right)^a, \quad \text{б) } \sigma_n' = \sigma_3' + \frac{\sigma_1' - \sigma_3'}{1 + \frac{\partial \sigma_1'}{\partial \sigma_3'}}, \quad (2.28)$$

$$\text{а) } \tau' = (\sigma_1' - \sigma_3') \cdot \sqrt{\frac{\partial \sigma_1'}{\partial \sigma_3'}}, \quad \text{б) } \frac{\partial \sigma_1'}{\partial \sigma_3'} = a \cdot m_b^a \cdot \left( \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} \right)^{(a-1)}, \quad (2.29)$$

**2.9.6. Допуне Hoek-Brown-овог критеријума лома за стенски масив (1994. и 1995. година)**

Због исувише конзервативног критеријума лома након измена, при примени на стенском масиву бољег квалитета било је потребно дефинисање допуне и измене кроз радове 1994. и 1995. године [10], [11]. Овим радовима је представљен „уопштени“ критеријум лома. Уопштени критеријум лома обухватао је и изворне и измењене критеријуме са „прелазом“ ка приближној RMR вредности од 25. Разлика између примене изворног Hoek-Brown-овог критеријума лома и измењеног критеријума лома је у томе што је изворног критеријума била базирана на стенске масиве који су одличног до задовољавајућег квалитета, а измењени критеријум обухватао примену за





стенске материјале лошег до изузетно лошег квалитета, где је затезна чврстоћа била једнака нули.

Кроз поменуте радове дат је приказ концепта Геолошког Индекса Чврстоће (GSI), као потенцијална замена за RMR класификацију Bieniawski-ог. Примена RMR класификације је била веома тешка за стенске масиве изузетно лошег квалитета, при чему веза више није била линеарна између RMR класификације и вредности параметара  $m$  и  $s$ . За реалнији приказ стања стенског масива осетила се потреба за системом који је већим делом заснован на геолошким запажањима и праћењем стенског масива а мање на брјочаним вредностима које су им додељиване приликом бодовања стања стенског масива.

Инжењерима геомеханике је остављено да преко дефинисања вредности GSI-а одреди која ће вредност најбоље да опише различите врсте стена које се срећу на терену при пројектовању рударских објеката. Тиме су појмови за „непоремећене“ и „поремећене“ стенске масе изостављени. Умањењем чврстоће на мању вредност у суседном реду класификационе табеле одређују се изворни параметри за дефинисање поремећене стенске масе. Због ограничавајућих услова при примени овог поступка, дато је инжењеру да одлучи која врста поремећаја је заступљена у масиву и да се инжењеру омогући да на основу његових закључака и услед инжењерских активности сам изврши кориговање вредности GSI-а и на тај начин инжењерским приступом умањи вредност чврстоће.

- ***Област примене допуњеног Нок-Броун-овог критеријума лома (1994 и 1995) и коришћени параметри***

Допуном и изменом овог критеријума представљен је уопштени критеријум лома, који су обухваћени критеријуми за стенске масе са задовољавајућим до врло лошим квалитетом. Такође је представљен и измењени критеријум стенске врло лошег квалитета масе који се базира на додатној разради детаља при дефинисању параметара. Овом допуном је уведен геолошки индекс чврстоће како би били превазиђени недостаци RMR



класификације за стенске масиве лошег и врло лошег квалитета. Такође, одустало се од примене поделе стенске масе, јер се сматра да су сви поремећаји настали утицајем инжењерских активности и да се на основу инжењерских одлука изврши умањење вредности GSI-а.

Једначине дефинисаног допуњеног критеријума лома су:

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \cdot \left( m_b \cdot \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right)^a, \quad (2.30)$$

$$\text{За } GSI > 25: \text{ а) } \frac{m_b}{m_i} = e^{\frac{RMR-100}{28}}, \text{ б) } s = e^{\frac{RMR-100}{9}}, \text{ в) } a = 0.5, \quad (2.31)$$

$$\text{За } GSI < 25: \text{ а) } s = 0, \text{ б) } a = 0.65 - \frac{GSI}{200}, \quad (2.32)$$

### **2.9.7. Измене и допуне Ноек-Brown-овог критеријума лома за стенски масив (1997. година)**

Рад Ноек-а и Brown-а представља најобимнији рад који је до данас објављен у области геоемханичких истраживања, где су унете све измене и допуне које су приказане у претходним поглављима. По Mohr–Coulomb-овом критеријуму лома приказана је метода за одређивање одговарајућих вредности кохезије  $c$  и угла унутрашњег трења  $\varphi$ . Према овој методи Ноек-Brown–ов критеријум се користи за генерисање низа вредности које представљају везу између чврстоће и бочног притиска (или чврстоће на смицање и нормалног оптерећења) и ове вредности се анализирају као резултати хипотетичког „in situ“ испитивања троосне чврстоће на притисак или испитивања директним смицањем на узорцима великих размера. Применом линеарне регресије се одређује средњи угао нагиба и одсечак на  $u$  оси и ове вредности се задим претварају у кохезију  $c$  и угао унутрашњег трења  $\varphi$ . [1]



Најважнији део процеса апроксимације вредности одређеном кивом је одређивање интервала напона за који ће хипотетичка „in situ“ испитивања биси спроведена. Ово је одређено експериментално на изради великог броја студија у којима су спроведене упоредне анализе стабилности површинских копова и подземних откоп, применом параметара Ноек–Броун–овог и Мохр–Куломб–овог критеријума лома. [12]

### **2.9.8. Допуне Ноек-Броун-овог критеријума лома за стенски масив (1998. година)**

Интервал вредности Геолошког индекса чврстоће (GSI) је проширен до вредности 5, чиме су обухваћене стенске масе изузетно лошег квалитета као што су шкриљци у којима је изграђен метро у Атини и гранитни филити у којима је изграђено неколико тунела у Венецуели. Интервал вредности Геолошког индекса чврстоће (GSI) је проширен на основу опширних истраживања која је извео Mario Venissi за потребе изградње метроа у Атини. Овде треба напоменути да су у овом тренутку постојала два дијаграма Геолошког Индекса Чврстоће (GSI). Први дијаграм, још из 1994. године, је био намењен за стенске масе бољег квалитета, док је други нови дијаграм, приказан у овом раду, био намењен за стенске масе врло лошег квалитета. [1] [13]

### **2.9.9. Допуне Ноек-Броун-овог критеријума лома за стенски масив (2000. година)**

Приказана врло важна примена Ноек–Броун–овог критеријума у предвиђању стања притисака рударских објеката (у тунелу), уводећи концепт критичне деформације који предложио Sakurai 1983. године.

Такође, приказан је поступак којим се више користе геолошки подаци као улаз у Ноек–Броун–ов критеријум лома него што је то било раније. Посебно, по први пут су детаљно обрађена својства стена са врло малом



чврстоћом. У овом раду није приказана ни једна промена у математичкој интерпретацији овог критеријума.

Ноек и Karzulović су поново приказали већи део материјала из рада Ноек и Brown–а из 1997. године, али су додатно разматрана оштећења настала услед минирања.

У радовима Marinos–а и Ноек–а из 2000. и 2001. године ништа значајно није додато основама Ноек–Brown–овог критеријума али је у нијма приказано како се одређују одговарајући интервали GSI–а за различите врсте стенских маса. Посебно, у раду из 2001. године који се бави флишевима обрађени су тектонски поремећени материјали са малом чврстоћом, а све на основу искуства аутора из главних пројеката који су обрађивали овакве материјале из северног дела Грчке. [1]

### **2.9.10. Допуне Ноек-Brown-овог критеријума лома за стенски масив (2002. година)**

Приказано је детаљно преиспитивање целокупног Ноек–Brown–овог критеријума и обухваћена су новоизведене једначине везе између  $m$ ,  $s$ ,  $a$  и GSI–а. Уведен је нови параметар  $D$  којим се одређује оштећење услед минирања. Испитана је међусобна веза између Mohr–Coulomb–овог и Ноек–Brown–овог критеријума за косине и подземне откопе и приказане су нове једначине које повезују ова два критеријума.

Завршна једначина је изведена на основу поређења стотина анализа стабилности тунела и косина где су примењени и Ноек–Brown–ов и Mohr–Coulomb–ов критеријум и најбоље решење је изведено итерацијама. Развијен је програмски пакет „RocLab“ и „RocData“ за Windows оперативни систем и у који су укључени све новоизведене једначине приказане у овом раду.



▪ **Област примене допуњеног Ноек-Браун-овог критеријума лома (2002) и коришћени параметри**

Допуна и измена овог критеријума заснована је на приказу новоизведене једначине везе између GSI–а,  $m_b$ ,  $s$  и  $a$  којима је обезбеђено континуално одређивање за целокупни интервал вредности GSI –а. Уведен је критеријум оштећења стенске масе којим се умањује чврстоћа услед релаксације напона и оштећења услед минарања. Приказане су једначине за одређивање Mohr–Coulomb–ових параметара, кохезије  $c$  и угла унутрашњег трења  $\varphi$ , за одређене интервале бочних напона  $\sigma'_{3max}$  за тунеле и косине односно рударске објекте. Извршене су исправке изворних Валент–ових једначина. Све ове једначине су укључене у програмски пакет „RocLab“. [1] [19]

Једначине дефинисаног допуњеног критеријума лома су: [19]

$$\text{а) } \sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \cdot \left( m_b \cdot \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a, \text{ б) } m_b = m_i \cdot e^{\frac{RMR-100}{28-14D}}, \text{ в) } s = e^{\frac{RMR-100}{9-3D}} \quad (2.33)$$

$$\text{а) } a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \cdot \left( e^{\frac{GSI}{15}} - e^{\frac{20}{3}} \right), \text{ б) } \sigma_c = \sigma_{ci} \cdot s^a, \text{ в) } \sigma_t = -\frac{s \cdot \sigma_{ci}}{m_b} \quad (2.34)$$

$$\text{а) } \sigma'_n = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} - \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \cdot \frac{\frac{\partial \sigma'_1}{\partial \sigma'_3} - 1}{\frac{\partial \sigma'_1}{\partial \sigma'_3} + 1}, \text{ б) } \tau' = (\sigma'_1 - \sigma'_3) \cdot \frac{\sqrt{\frac{\partial \sigma'_1}{\partial \sigma'_3}}}{\frac{\partial \sigma'_1}{\partial \sigma'_3} + 1} \quad (2.35)$$

$$\frac{\partial \sigma'_1}{\partial \sigma'_3} = 1 + a \cdot m_b \cdot \left( m_b \cdot \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^{a-1}, \quad (2.36)$$

$$E_m = \left( 1 - \frac{D}{2} \right) \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} \cdot 10^{\frac{GSI-10}{40}} \text{ (GPa) за } (\sigma_{ci} \leq 100 \text{ MPa}), \quad (2.37)$$



$$E_m = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \cdot 10^{\frac{GSI-10}{40}} \text{ (GPa) за } (\sigma_{ci} > 100 \text{ MPa}), \quad (2.38)$$

$$\varphi' = \arcsin \left[ \frac{6 \cdot a \cdot m_b \cdot (s + m_b \cdot \sigma_{3n}')^{a-1}}{2 \cdot (1+a) \cdot (2+a) + 6 \cdot a \cdot m_b \cdot (s + m_b \cdot \sigma_{3n}')^{a-1}} \right], \quad (2.39)$$

$$c' = \frac{\sigma_{ci} [(1+2a) \cdot s + (1-a) \cdot m_b \cdot \sigma_{3n}'] \cdot (s + m_b \cdot \sigma_{3n}')^{a-1}}{(1+a) \cdot (2+a) \sqrt{1 + \frac{6 \cdot a \cdot m_b \cdot (s + m_b \cdot \sigma_{3n}')^{a-1}}{(1+a) \cdot (2+a)}}}, \quad (2.40)$$

$$\sigma_{3n} = \frac{\sigma_{3max}'}{\sigma_{ci}}, \quad (2.41)$$

$$\text{a) } \sigma_{cm}' = \frac{2 \cdot c' \cdot \cos \varphi'}{1 - \sin \varphi'}, \quad \text{б) } \sigma_{cm}' = \sigma_{ci} \cdot \frac{[m_b + 4s - a \cdot (m_b - 8s)] \cdot \left(\frac{m_b}{4} + s\right)^{a-1}}{2 \cdot (1+a) \cdot (2+a)}, \quad (2.42)$$

$$\text{a) } \frac{\sigma_{3max}'}{\sigma_{cm}'} = 0.47 \cdot \left(\frac{\sigma_{cm}'}{\gamma \cdot H}\right)^{-0.94} \text{ (за тунеле), б) } \frac{\sigma_{3max}'}{\sigma_{cm}'} = 0.72 \cdot \left(\frac{\sigma_{cm}'}{\gamma \cdot H}\right)^{-0.91} \text{ (за косине)} \quad (2.43)$$

### 2.9.11. Допуне Ноек-Броун-овог критеријума лома за стенски масив (2004. година)

Допуном критеријума лома овим радом прави се мали осврт и допуна Геолошког Индекса Чврстоће (GSI) у оквиру уопштеног рада о инжењерској геологији тла и стена. [1], [20]



### **2.9.12. Допуне Ноек-Brown-овог критеријума лома за стенски масив (2005. година)**

У раду Marinos–а, Marinos–а и Ноек–а је разматран интервал могуће примене и ограничења GSI–а. Такође, дате су опште смернице за примену GSI–а.

У раду Ноек –а, Marinos –а и Marinos –а је приказан нов GSI дијаграм за моласке стенске масе. Моласа се састоји од серије тектонски непоремећених седимената пешчара, конгломерата, глинаца и лапора, насталих ерозијом планинских делова након завршне орогене фазе. Они се понашају као континуалне стенске масе када су изложене бочним притисцима на дубини и, иако су литолошки хетерогени, равни слојења не представљају јасно одређене површине дисконтинуитета. У овом раду је обрађена разлика између оваквих стена и стена као што су флишеви који су значајно поремећени орогеним процесима. [21], [22]

### **2.9.13. Допуне Ноек-Brown-овог критеријума лома за стенски масив (2006. година)**

У раду Marinos–а, Ноек–а и Marinos–а је приказан геолошки модел којим је описан развој офиолитског комплекса, његових различитих петрографских типова и његових тектонских деформација, углавном као последица повећаних притисака. Структуре различитих стенских маса обухватају све типове од масивних чврстих до испуцалих слаби стенских масива, док стање дисконтинуитета у већини случајева од задовољавајућег до лошег, односно врло лошег, као последица чињенице да су ови дисконтинуитети били изложени дејству серпентинизације и смицања. Серпентинизација, такође, смањује вредност чврстоће непоремећеног стенског материјала. Поред тога обрађене су и пратеће пилоу лаве и стенски материјал добијен дејством тектонских поремећаја. Приказан је GSI дијаграм за офиолитске стенске масиве. [1] [23]



Модул деформације стенске масе је важан улазни параметар у свакој анализи понашања стенске масе код које су обухваћене и деформације, иако ова величина није директно обрађена Ноек–Brown–овим критеријумом лома. Теренска испитивања за директно одређивање овог параметра су дуготрајна, скупа и поузданост добијених резултата ових испитивања је понекад недовољна. Као последица тога, неколицина аутора је предложила емпиријске једначине за процену вредности модула деформације стенске масе на основу класификационих шема. [1]

Овде је дат преглед ових једначина и разматрана су њихова ограничења. Предложена је нова једначина везе између модула деформације и GSI–а која је заснована на резултатима бројних „in-situ“ мерења у Кини и Тајвану. Овом новом једначином су обухваћена својства непоремећене стене, као и утицај оштећења стенске масе услед минирања и/или ослобађања напонског стања.

- ***Област примене допуњеног Ноек–Brown–овог критеријума лома (2006) и коришћени параметри***

Предложена је нова једначина везе између модула деформације стенске масе и GSI–а која је заснована на анализи резултата бројних „in-situ“ мерења у Кини и Тајвану. У основи ово је сигмоидна функција, па су приказана два облика једначине. У поједностављеној једначини једине улазне величине су GSI и D и ову једначину треба примењивати једино када недостају подаци о непоремећеној стени. У другој сложенијој једначини потребна је још и величина модула непоремећене стене. Приказан је поступак за одређивање овог модула на основу чврстоће на притисак непоремећене стене  $\sigma_{ci}$  уз примену фактора редукције модула MR. [24]

Једначине дефинисаног допуњеног критеријума лома су:

***Сигмоидна функција:***

$$y = c + \frac{a}{1 + e^{-\left(\frac{x-x_0}{b}\right)}}, \quad (2.44)$$





**Поједностављена једначина Ноек-а и Diederichs-а:**

$$E_m = 100000 \left( \frac{1 - \frac{D}{2}}{1 + e^{\left( \frac{75 + 25D - GSI}{11} \right)}} \right) \text{ (MPa)}, \quad (2.45)$$

**Једначина Ноек-а и Diederichs-а:**

$$E_m = E_i \left( 0.02 + \frac{1 - \frac{D}{2}}{1 + e^{\left( \frac{60 + 15D - GSI}{11} \right)}} \right), \quad (2.46)$$

**Одређивање модула непоремећене стене:**

$$E_i = MR \cdot \sigma_{ci}, \quad (2.47)$$

#### **2.9.14. Допуне Ноек-Brown-овог критеријума лома за стенски масив (2018. година)**

Допуном критеријума из 2018. године осврт се прави ка примени кртог лома за непоремећене стенске материјале. Поред тога би требало поменути и проширење већ постојећих критеријума који су раније допуњавани. Допуном су обухваћене и процене резултата, испитивања механичких својстава непоремећеног масива, применом приступа за процену геомеханичке нестабилности, рударских објеката. Анализирање утицајних структурно геолошких карактеристика је од пресудног значаја и да се изврши квалитетна инжењерска процена у зависности од примењене класификације и фактора оштећења приликом минирања. Када се то изврши, створени су сви потребни услови да се анализа и процена параметара у критеријуму за непоремећену стенску масу изврши. [25]



## **2.10. Закључна разматрања дефинисања еперијског критеријума лома за стенски масив**

Кроз поглавље овог рада детаљније је обрађен Ноек-Brown-ов критеријум лома, као и све допуне и измене које су кроз радове научници и инжењери дефинисали. Поред Ноек-Brown-овог критеријума лома биће представљене и неке од једначина еперијског критеријума лома за стенски масив које су дате у табели. У табели 2.16 се могу видети представљени критеријуми лома који су допринели развоју теорије везане за геомеханичка испитивања, али пошто поменути критеријуми лома нису тема овог истраживачког рада неће детаљније бити приказани.



### **3. ОДРЕЂИВАЊЕ ЧВРСТОЋЕ ВЕЗАНОГ СТЕНСКОГ МАТЕРЈАЛА**

При дефинисању критеријума лома у зависности од степена истражености лежишта за потребе прорачуна геомеханичке провере стабилности објеката могу бити примењена два начина за дефинисање једначине критеријума лома:

- Емпиријски критеријуми лома
- Тријаксијални опит

Одређивање чврстоће везаног стенског материјала биће извршено испитивањем троосне чврстоће на притисак – тријаксијалним опитом.

#### **3.1. Триаксијална испитивања за чврсте стенске материјале**

У овом делу рада биће представљен лабораторијски поступак испитивања параметара чврстоће и деформабилних карактеристика радне средине тријаксијалном компресијом. Такође кроз овај део рада биће представљен и начин на који се опит врши.

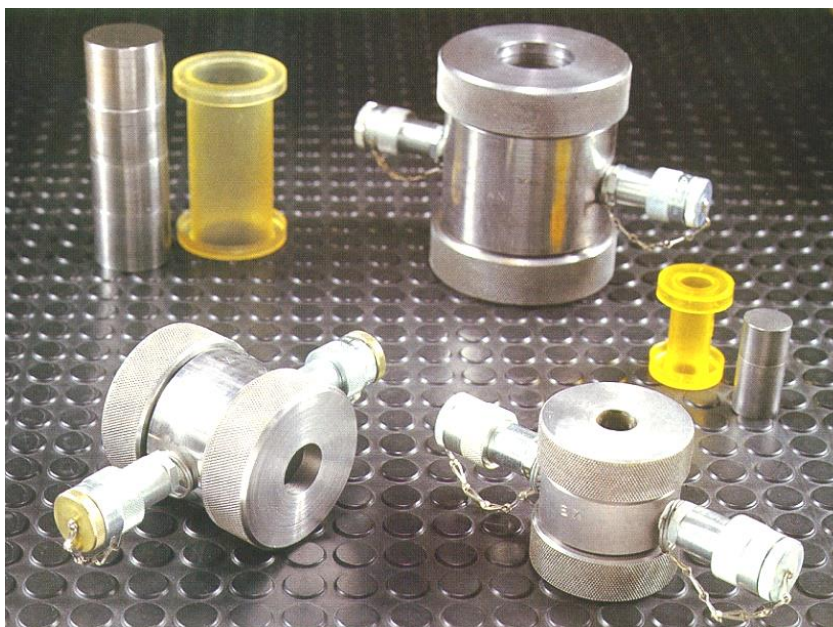
Циљ тријаксијалног опита је симулирање услова који се могу јавити у стенама, у околини објекта као и где би ти објекти могли бити изложени граничном притиску и смичућем напону.

Метода тријаксијалног опита, искључујући анализу резултата, дата је у „Suggested Methods of the ISRM“ [28], (Brown 1981. година) као и у важећим “ASTM [29], и Designation of British Standard”.

Тријаксијална испитивања стенских материјала изводе се у триаксијалним ћелијама које могу бити различитих конструкција. Изглед триаксијалне ћелије да је на слици 3.1. Оно што је заједничко за све триаксијалне ћелије је да морају обезбедити једноставно уградњу пробног тела у уређај као и да изложе пробна тела свестраном бочном притиску. Излагање тела бочном притиску најчешће се врши помоћу течног флуида. Након тога



потребно је вршити постепено повећање вертикалног притиска до лома, уз истовремено одржавање задате вредности бочног притиска.



*Слика 3.1 - Ноек-ов тип триаксијалне ћелије за тестирање стена, са металним клиповима као притискивачима и флексибилне кошуљице [1]*

Преса потребног капацитета поред триаксијалне ћелије представља основни део опреме. Преса би требала бити серво или ручно контролисана за брзину прираштаја оптерећења, као и хидраулична пумпа или неки други уређај којим би се одржавао констанан бочни притисак.

За испитивања која је потребно брзо извршити, велику примену има једноставна ћелија коју су развили Ноек и Franklin 1968. године. Ова ћелија је до данас претрпела незнатне промене а помоћу ње се на брз начин утврђује максимални напон за серије граничних притисака. Има широку примену, може бити коришћена како у лабораторијским тако и приликом теренских испитивања. Због широке примене прави се у разним величинама (мисли се на величину пробног тела). За ове ћелије је потребно нагласити да се приликом њихове примене користи флексибилна кошуљица у коју се ставља узорак а због своје флексибилности кошуљица се може користити више пута, све док кошуљица не претрпи трајне деформације или се поцепа.



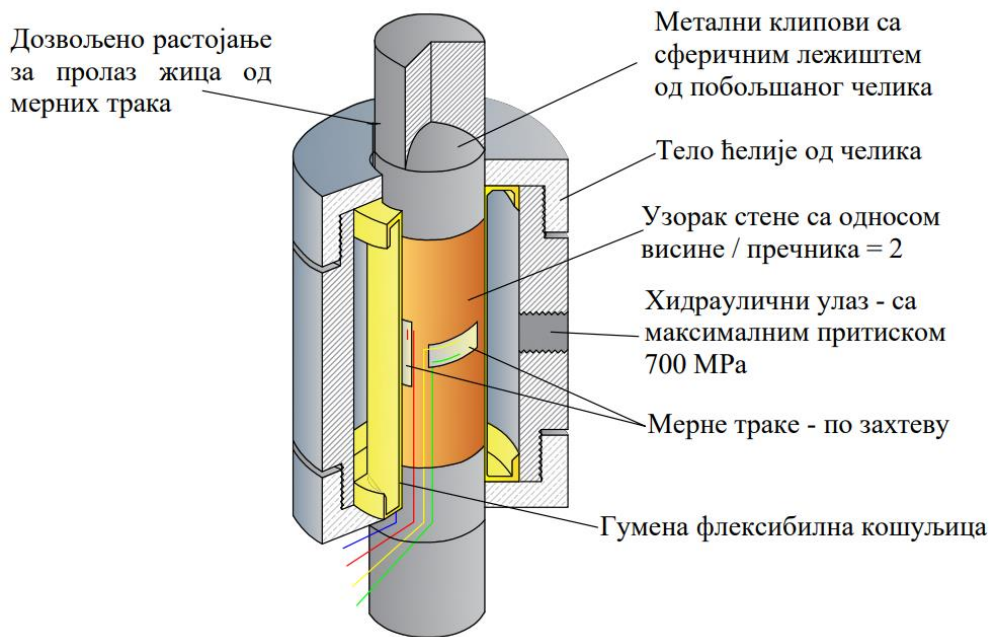
Предности кошуљице огледају се у томе да се њеном применом омогућава брзо тестирање, док је недостатак у деформацијама које су ограничене након максималног притиска.

### **3.2. Потребна опрема за извођење триаксијалног опита**

Потребна опрема за извођење триаксијалног опита која чини саставне делове триаксијалне ћелије представља:

- Тело триаксијалне ћелије – у тело триаксијалне ћелије се смешта пробно тело и оно омогућава наношење бочног притиска. Тело триаксијалне ћелије је изграђено тако да има отвор за испуштање ваздуха као и везу за хидрауличну пумпу.
- Флексибилне кошуљице – представљају делове од одговарајућег гуменог материјала којом се спречава продирање флуида у испитивани узорак и врши заптвање простора у коме се налази течни флуид за наношење бочног притиска. Флексибилне кошуљице се израђују од таквог материјала да је њихова употреба вишенаменска, све док се кошуљице не покида.
- Челични клипови – се израђују са сферичним ослонцима са обе стране. Морају имати чврстоћу по Rockwell-у већу од C<sub>30</sub> и постављају се на крајеве пробног тела. Захтевани пречник клипова треба бити између  $d$  и  $d + 2 \text{ mm}$ , где  $d$  представља пречник пробног тела. Минимална дебљина клипова требала би бити најмање 15 mm или  $d/3$ , а обрада површине би требала бити са прецизношћу од 0.005 mm.

Изглед попречног пресека триаксијалне ћелије дат је на следећој слици. [2], [27]



Слика 3.2 - Изглед попречног пресека триаксијалне ћелије за тестирање узорака стене

### 3.3. Опрема за контролу и остваривање вертикалног оптерећења

Да би се обезбедило потребно оптерећење, опрема са којом се врши остваривање мора бити довољно великог капацитета са могућношћу наношења прираштаја силе у одређеном временском интервалу а да при томе буде у складу са одређеним стандардима. Стандарди по којима је потребно ускладити горе поменуте кораке су DIN 51220, DIN 51223 и DIN 51300.

#### 1. Опрема за праћење и наношење бочног притиска

Опрема са којом се постиже наношење и праћење бочног притиска састоји се од механичке или ручне хидрауличне пумпе довољног капацитета да обезбеди и одржава захтевани бочни притисак. Одржавање бочног притиска потребно је оставрити са прецизношћу од 2 % Поред тога потребни су и прецизни индикатори (мерачи) уз помоћ којих ће бити омогућено визуелно праћење или аутоматско снимање бочног притиска. Један од једноставнијих начина за задавање бочног притиска који може ићи и до 700 бара то јест 70





$\text{MN/m}^2$  је помоћу хидрауличне пумпе чији се изглед може видети на следећој слици.



*Слика 3.3 - Изглед хидрауличне пумпе за наношење бочног притиска са манометром за праћење притиска*

При триаксијалном опиту за наношење бочног свестраног притиска на пробно тело користи се пумпа која је приказана на слици 3.3. Приликом наношења свестраног бочног притиска на испитивани узорак у ћелији је потребно извршити одржавање константног бочног притиска од 400 бара.

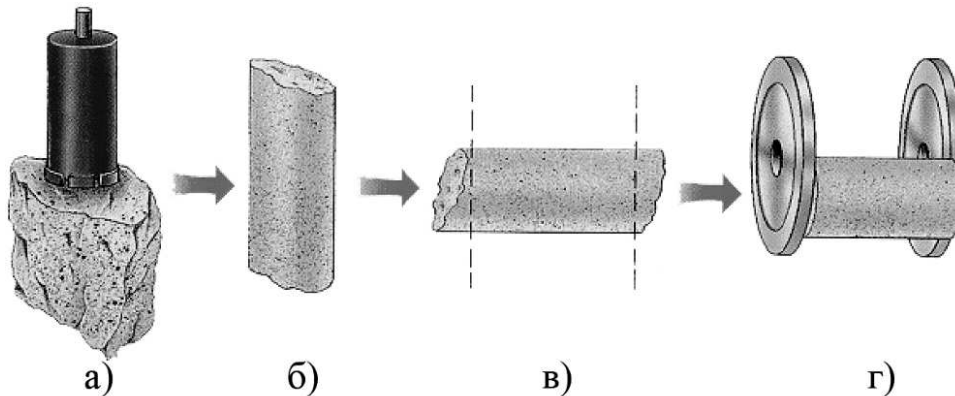
## **2. Припрема и обрада пробног тела за триаксијално испитивање**

При пристизању узорака у лабораторију, пре триаксијалног испитивања потребно је исти узорак претходно припремити. Процес припреме узорака обухвата бушење комада стене или бушење претходно набушеног језгра у зависности од пречника триаксијалне ћелије са којом располажемо. Тако пристигло пробно тело потребно је довести у ваљкасти облик при чему однос висине према пречнику мора бити од 2:1. Пожељно би било користити стандардне пречнике пробног тела од 54 mm или неке од већих пречника. [28] Приликом одређивања пречника битно улогу има највеће зрно у стени јер на основу тога се дефинише пречник пробног тела који је потребно да буде 10 пута већи од највећег зрна у стени. Да би се испитивање обавило на исправан начин потребно је обрадити чеоне странице пробног тела са тачношћу од 0.02 mm при



чему одступање од паралелности чеоних страница не сме бити веће од 0.001 радијана тј. 0.05 mm на 50 mm. Такође је потребно да стране пробних тела буду глатке при чему не смеју одступати од вертикале у односу на висину пробног тела више од 0.3 mm.

Фазе у припреми пробног тела за триаксијално испитивање дате су на следећој слици.



*Слика 3.4 - Обрада и припрема пробног тела на завршни облик*

Са приказане слике могу се уочити кораци при обради и припреми пробног тела, где је:

- а) Бушење комада стене – представља први корак у припреми пробног тела, где се бушењем добија језгро (потребан ваљкасти облик) за даљу обраду у коју се улази,
- б) Одвајање здравог језгра – врши се након завршеног процеса бушења при чему набушено језгро мора бити компактно да би се задовољио процес даље припреме узорка. Ако језгро није компактно, то јест има пукотине које га не чине компактним потребно је извршити поновно бушење као и одвајање здравог језгра како би опит био добар,
- в) Сечење језгра на одговарајућу меру – у зависности односа висине према пречнику који је по услову захтева потребно је извршити сечење (обрађивање) језгра на одговарајућу меру и тиме довести пробно тело у завршну фазу припреме и обраде пробног тела за триаксијални опит.
- г) Брушење и полирање пробног тела – представља последњу фазу припреме пробног тела за испитивање. При брушењу и полирању





потребно је извршити фину обраду пробног тела чиме се постиже квалитетно обрађено пробно тело са којим се може приступити процесу триаксијалног испитивања.

Мерење пречника пробног тела врши се као просек по два мерења на горњем, доњем и средњем делу. При томе просек мерења пречника је потребан да буде са тачношћу од 0.10 mm.

Приликом завршене обраде и припреме пробног тела за триаксијално испитивање, исто не би требало да стоји дуже од 30 дана. 5 до 6 дана пре опита потребно је пробна тела чувати у средини са температуром од  $20 \pm 2^\circ \text{C}$  и влажности од  $50\% \pm 5\%$ .

Последњи корак који чини и завршну припрему пробних тела за испитивање је лепљење електроотпорних мерних трака и лемљењем проводника који се касније прикључује на одговарајући мерни уређај. Изглед тако припремљеног пробног тела за стављање у триаксијалну ћелију приказано је на следећој слици.



*Слика 3.5 - Изглед припремљеног пробног тела са залепљеним електроотпорним мерним тракама [26]*

Мерење деформација помоћу мерних трака успешно се примењује са одабиром дужине траке. При одабиру дужине траке битна је и величина зрна пробног тела, на основу које може регистровати деформацију са што мањом



грешком. Без обзира на обрађеност пробног тела (прописана паралелност и избрушене чеоне стране) у циљу смањења и поништавања грешке потребно је поставити четири мерне траке. При томе се врши постављање по две мерне траке за мерење хоризонталних девормација, као и постављање две мерне траке за мерење вертикалних деформација. Угао између залепљених трака је  $90^\circ$ . Траке су постављене опозитно по хоризонталној то јест вертикалној оси пробног тела. При прописаном поступку потребно је специјалним цементним лепком извршити лепљење трака (на пример X-100). Прописан поступак обухвата одмашћивање узорка па све до самог лепљења и потребне заштите за време мерења. У зависности од броја опита потребно ускладити и број потребних пробних тела при чему број потребних пробних тела треба одговарати броју опита који ће се извести под различитим бочним притисцима, али не би требао бити мањи од 5.

### **3. Процедура триаксијалног опита**

Процедура триаксијалног опита може се описати кроз пар корака. Први корак при испитивању је да се у тello ћелије постави флексибилна кошуљица, након тога потребно је да се стави и заврне поклопац триаксијалне ћелије. Поступак стављања флексибилне кошуљице у триаксијалну ћелију приказан је на следећој слици.



*Слика 3.6 - Поступак стављања флексибилне кошуљице у триаксијалну ћелију*



Ако при припреми пробног тела лепимо и мерне траке, претходно је потребно подмазати флексибилну кошуљицу како би се пробно тело са лакоћом убацило у флексибилну кошуљицу. Овим поступком подмазивања флексибилне кошуљице постиже се смањење трења као и могућност оштећења крајева контакта мерних трака при убацивању пробног тела у ћелију. Након тога могуће је извршити стављање пробног тела у ћелију чији поступак је приказан на следећој слици.



*Слика 3.7 - Поступак стављања пробног тела у триаксијалну ћелију [1]*

Следећи корак који је потребно извршити је повезивање са хидрауличном пумпом. Ћелија се са једним својим бочним прикључком повезује са хидрауличном пумпом помоћу које се врши nanoшење бочног притиска. При nanoшењу бочног притиска потребно је вршити континуирано повећање притиска, при чему се из тела ћелије избацује ваздух. Ваздух се избацује кроз други бочни отвор који је регулисан кугличним вентилом. Овај поступак се обавља све док на другом бочном отвори излазе мехурићи ваздуха. Оног тренука када почне да излази уље без мехурића ваздуха, куглични вентил се затвара, ставља се поклопац на отвор и тиме је ћелија спремна за стављање под пресу. Са обе стране пробног тела поставе се челични клипови, након чега се изврши додавање малог притиска бочном преом како бисе клипови држали



у постављеном положају до стављања под пресу. Део овог поступка је приказан на слици.



*Слика 3.8 - Поступак пуњења триаксијалне ћелије и изглед постављених челичних клипова са додатим малим притиском [1]*

Тако припремљена ћелија се постави под пресу, при чему је потребно водити рачуна да ћелија и кружни ослонац буду у истој оси. Након тога потребно је подмазати кружне ослонце минералним уљем како би се трељњ између пресе и ћелије смањило при обављању опита. Постављена ћелија у преси са аксијалним оптерећењем приказана је на следећој слици.



*Слика 3.9 - Припремљена триаксијална ћелија стављена под пресу [1]*



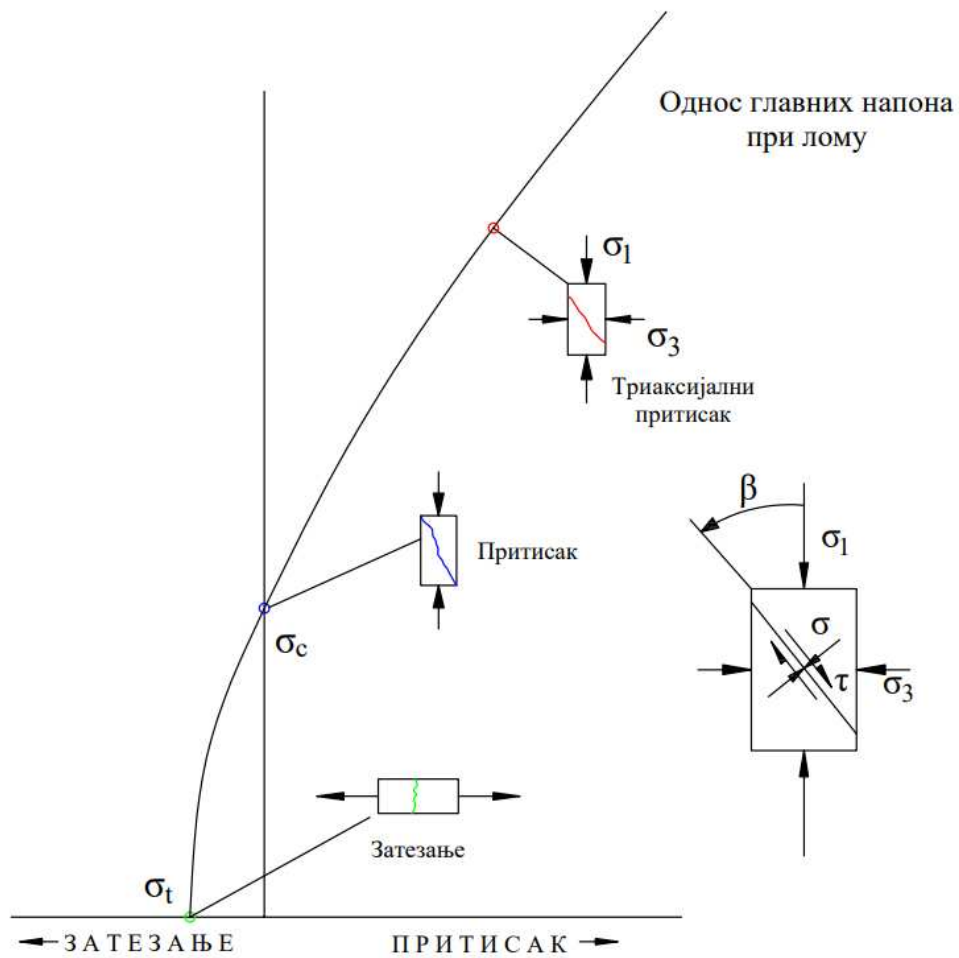


Раст аксијалног оптерећења и бочног притиска потребно је да буде континуалан, при чему би требало да аксијално оптерећење и бочни притисак буду приближно једнаки, све док се не достигне унапред дефинисани ниво бочног притиска. Повећање аксијалног притиска на пробно тело овабља се константно са прираштајем до лома пробног тела који се регулише у границама од 0.50 до 1.0 МПа/s. У тренутку лома пробног тела потребно је дефинисати максималну аксијалну силу и бочни притисак који су довели до лома, док преко мерних трака (ако су постављене) потребно је пратити испитивање деформабилних карактеристика где је регистрована деформација пробног тела.

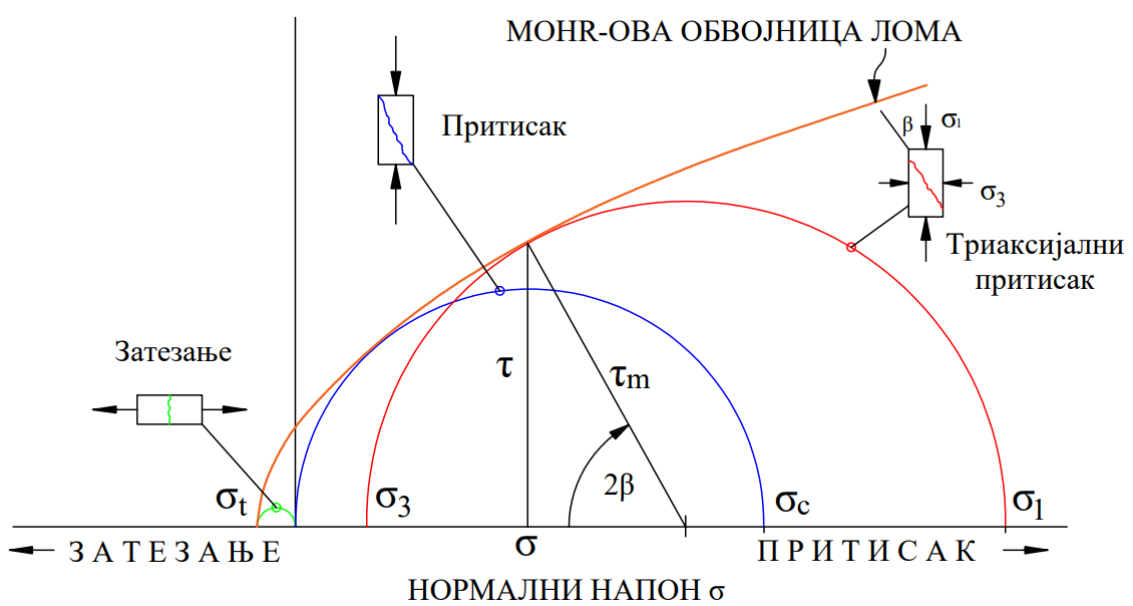
#### **4. Испитивање триаксијалне чврстоће**

У овом делу рада треба нагласити да се само мерење састоји у постављању пробног тела у триаксијални апарат за испитивање које се након тога доводи под дејство жељеног свестраног притиска. Пробно тело је потребно излагати дејству вертикалног оптерећења све до лома при чему је тенденција одржавати константан бочни притисак. Вредности хоризонталног и вертикалног напона се добијају на основу регистрованих вредности бочног и вертикалног притиска који су довели пробно тело до лома, а ти резултати се приказују на Mohr-овом кругу напона. Да би испитивање било релевантно потребно је извести најмање пет опита као што смо већ поменули. Испитивање поменутих опита се изводи са другим пробним телима из истог узорка на која се наносе различите вредности бочних притисака па се на тај начин на основу добијених вредности за сваки пар вертикалних и бочних напона црта одговарајући Mohr-ов круг. Са оваквим резултатима и нацртаним круговима напона потребно је повући обвојницу која мора да тангира кругове напона и тиме да обвојница кругова напона представља дијаграм чврстоће.

Приказ интерпретације односа главних напона и Mohr-ове обвојнице лома дат је на следећим сликама.



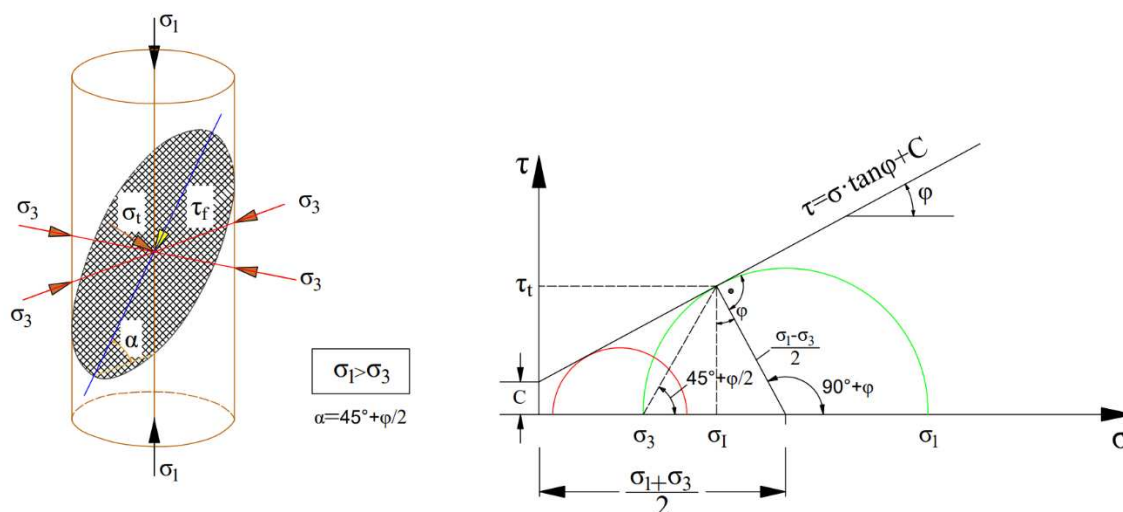
Слика 3.10 - Графичка интерпретација односа главних напона при лому



Слика 3.11 - Графичка интерпретација Mohr-ове обвојнице лому



Конструкција Mohr-ових кругова напона дата је на следећој слици.



Слика 3.12 - Конструкција Mohr-ових кругова напона

Манифестација подземних притисака на већим дубинама до скоро је била само у теоријским разматрањима. Модернизацијом геомеханичких инструмената и опреме за испитивање дошло се до тога да и испитивање притисака на већим дубинама данас буде могуће. Испитивање утицаја стања подземних притисака од сада је могуће симулирањем вертикалних и бочних притисака на пробном телу до његове граничне носивости, то јест до његове границе лома. Лабораторијска метода триаксијалне компресије заснована је на светским стандардима који су у примени у дужем времену, а карактеристична метода на којој се заснива је ISRM метода. Као закључно разматрање овог поглавља може се извести да у рударско-инжењерској пракси примена методе триаксијалног испитивања је постала једна од најкориснијих опита са широком применом при одређивању параметара чврстоће. Предности које је сам опит донео омогућиле су формирање добре подлоге на чијој се основи са тако добијеним подацима може извршити статистичка обрада података и креирати база са којом се може кренути у геомеханичке провере стабилности рударских објеката.



## **4. КЛАСИФИКАЦИЈА ВЕЗАНОГ СТЕНСКОГ МАТЕРИЈАЛА**

Стенски масив се може дефинисати као веома сложен природни објекат који је подложен различитим утицајима. Понашање стенског масива зависи од појединих природних и технолошких фактора. Праћењем природних и технолошких фактора ствара се могућност за правилно класификовање стенског материјала у датом односу пометуних фактора. У наставку ће бити приказани утицајни чиниоци којима се дефинише стање и понашање стенског масива.

У природне факторе који имају утицај на стање и понашање стенског масива спадају:

- Генеза,
- Минерални састав
- Структурне и текстурне својства,
- Физичке и механичке својства,
- Хидролошке својства,
- Склоп стенског масива,
- Тектоника,
- Испуцалост стенског масива и др..

У технолошки факторе који имају утицај на стање и понашање стенског масива могу се сврстати следећи елементи:

- Облик и величина рударских објеката,
- Дубина рударских објеката,
- Орјентација рударских објеката у односу на правац главних структурних карактеристика стенског масива
- Технологија (начин) израде
- Осигурање (стабилност) објеката и др..





Понашање и стање стенске масе пре свега зависи од узајамних односа природних и технолошких фактора. У зависности од одређеног утицаја природних и технолошких фактора понашање и стање стенске масе може бити различито. Најбољи показатељ понашања стенске масе је велика променљивост и однос поменутих фактора. У значајније чиниоце спада и простор који заузима рударски објекат у сагледаном стенском масиву. Да би разматрани стенски масив био што реалније представљен за даље анализе, потребно је дефинисати критеријум по ком би стенски масив био класификован односно окарактерисан у одговарајуће класе или групе. Класификацију стенског масива на одређене групе могуће је извршити на основу свих природних и технолошких чинилаца који утичу на стенску масу у рударско - инжењерској пракси. Дефинисањем оваквог критеријума ствара се могућност за поделу стенског масива у односу на одређена својства, зоне или етапе у којима ће понашање стенског масива бити приближно идентично.

За дефинисање својства стенског масива инжењери из области геомеханике су уврстили у примену два основна израза за „описивање“. Изрази који су у употреби при описивању својстава стенског материјала су класификација и карактеризација. Дефинисањем ових израза у пракси не постоји много разлике у процесу класификације и карактеризације стенског масива. На основу тога, класификација стенског материјала представља поступак груписања и упоређивања различитих својстава стенског материјала у различите класе или групе применом одређеног система или метода, док карактеризација се може представити као поступак описивања стенског материјала на основу његове обојености, облика, тежина, својстава итд.

По дефинисању основних израза за својстава стенског масива суштинска разлика између класификације и карактеризације је у томе што се класификација заснива на анализи различитих својстава стенског материјала на основу којих се врши њихово груписање и упоређивање док се карактеризација заснива на чисто описним изразима.



Да би стање стенског масива било представљено што приближније реалном стању, за те потребе у делу у који спада пројектовање површинских копова и других рударских објеката, потребно је применити различите системе класификације. У зависности од степена сложености одређеног система класификације, као и критеријума који су примењени, одређени системи класификације се заснивају на једном или више различитих параметара, који могу бити повезани и не морају. У току експлоатације и формирања рударских објеката до параметара који одређују класификациони систем се може доћи на више начина. Најчешће до дефинисања параметара се долази аналитички, где се врши осматрање формираног површинског копа или неког другог рударског објекта на терену или на основу емпиријских података који су прикупљени при експлоатацији и формирању површинских копова и рударских објеката у сличним условима у којима се тренутно врши експлоатација.

Када је скуп података у почетним фазама пројектовања површинских копова веома мали или нема детаљних и значајних доказа примена класификационих система стенског масива постаје веома корисна. У пракси је развијен велики број класификационих система који имају општу намену али има и оних који су намењени за посебне ситуације.

Генерално гледано, стабилност стенског масива спада у факторе које узима у обзир класификациони систем. На основу тога, улазни параметри класификационих система често обухватају податке који су везани за описивање стања дисконтинуитета. Чиниоци обухваћени класификационим системима за описивање стања дисконтинуитета су:

- Растојање између пукотина,
- Број пукотинских система,
- Распаднутост пукотина,
- Испуњеност пукотина,
- Храпавост површина пукотина,
- Присуство подземних вода,
- Интезитет напона,



- Чврстоћа непоремећеног стенског материјала.

Дефинисањем чинилаца за описивање стања дисконтиуитета долази се до свих потребних података за класификовање материјала у одређене системе. Сходно томе, класификација стенског масива представља индиректну методу којом се не могу директно одредити механичка својства попут модула деформације. Како би резултати примене класификационих система били представљени, потребно је дефинисати изразе са којим ће бити одређена субјективна процена стабилности рудаских објеката. Изрази ко што су врло добро, добро, прихватљиво и лоше представљају личне процене инжењера на основу којих се дефинише одређено стање.

На основу процене или прорачуна чврстоће стенског масива ствара се могућност за правилан избор критеријума лома који се дефинише класама одређеним појединим класификационим системима. На основу свега тога, изводи се закључак да се дефинисањем и применом класификационих система ствара могућност за процену стабилности одређених рударских објеката, као и који од система за санацију рударских објеката је неопходно применити у случају поремећене стабилности како би рударски објекти били, са геомеханичке тачке гледишта, стабилни.

Квантитативни класификациони системи стенског масива применјују се са успехом, на основу чега су Singh и други (1999. године) навели мноштво разлога за примену, а ти разлози су окарактерисани:

- Дефинисањем ових система ствара се могућност за бољу размену информација између геолога, пројектаната, инвеститора и инжењера. При томе оваквим класификационим системом се може извршити уклањање честих грешака до којих се долази при пројектовању чиме се смањује могућност грешака при извођењу пројектованог задатка на терену.
- Применом квантитативног класификационог система инжењерско запажање, искуство и расуђивање су много ефикасније повезани, што



олакшава доношење закључака о дефинисаном класификационом систему.

- Квантитативни класификациони системи имају значајну примену при одређивању општег квалитета стенског масива на основу тога што инжењери више употребљавају бројчане вредности за оцене у односу на описне оцене.
- На основу класификације долазимо до свих потребних података за организовање инжењерских сазнања.

Изграђени рударски објекти у многоме су допринели при зансивању већ постојећих система класификације на основу искуства инжењера стеченог са рударских објеката. Системи класификације најчешће су везани за имена истраживача који су их предложили или институција у којима су поменути истраживачи радили. Класификациони системи су засновани на анализирању стенског масива са више становишта:

- Разматрањем стенског масива са становишта стене као материјала
- По изградњи рударског објекта, са становишта геомеханичке провере стабилности објеката,
- Са становишта радних услова, који обухватају стање стенског масива при експлоатацији и формирању рударских објеката.

Овом поделом стварамо услове за раздвајање стенске масе у одговарајуће групе и у раздвајање одређених зона са приближно истим понашањем. Недостатак ове поделе је то што је веома суштинска и груба али оваквом поделом се касније стварају могућности за дефинисање рударских профила и припрему података за израду нумеричких модела.

#### **4.1. Опште о класификационим системима и индикаторима**

Да би инжењери из области геомеханике могли да изврше поделу стенског масива потребно је дефинисати показатеље и мноштво других начина



за адекватну поделу. Показатељи који утичу на поделу стенског масива могу бити веома егзактни али и уопштени, па се у зваисности од дефинисања показатеља могу односити само на једно својство стенског масива, или могу бити веома комплексни и у себи да садрже већи број параметара различитих по својој природи и јединицама. Процеса класификације представља веома сложен систем, а разлог за то што у стручној литератури постоји више предлога за класификовање једне исте појаве. Решења класификација која су оправдала своје постојање и чија је употреба у научној и стручној литератури нашча широку примену биће приказани у овом делу рада. Основа свих подела представљају различити показатељи, на којима су засновани сви класификациони системи, а они могу бити:

- Квалитативни,
- Квантитативни и
- Емпиријски

У зависности од расположивости података, нивоа поузданости, степена истражености стенског масива или разматране појаве зависи и примена одређених показатеља.

- Квалитативни показатељи су засновани на основу испитивања стенског материјала и конкретно добијеним подацима. Пројектовање и изградња рударских објеката нам зависи од квалитативних показатеља и података који ће бити на располагању за одређени стенски масив. По дефинисању локације рударског објекта, потребно је извршити детаљна рударска и друга истраживања на основу којих ће бити добијени сви неопходни подаци који утичу при дефинисању квалитативних показатеља. На основу свега, може се закључити да се овим показатељима ствара могућност за бољи приступ инжењера из области геомеханике и употреба добијених података којом се ствара могућност за геомеханичко пројектовање рударских објеката.
- Квантитативни показатељи дају већ знатно прецизније податке о квалитету и својствима стенског масива, не само за једну тачку већ по читавој површини и запремини рударских објеката. Тако, овим показатељима



обухваћене су и бројчане вредности основних својстава стенског масива, као што су: степен испуцалости, чврстоћа, деформабилност, отпори према резању, хидролошки параметри и друга својства. Одређивање ових података се врши на основу детаљних рударских и других истраживања на локацији будућег рударског објекта.

- Емпиријски показатељи представљају искуствене податке добијене у неким другим стенским масивима за које се процењује да су сличних или истих карактеристика и понашања као и стенски масив који анализирамо. У том смислу служимо се искуственим подацима добијеним у стенском масиву за који сматрамо да је по свом понашању веома близак посматраном стенском масиву, а за који практично немамо никаквих података осим основних сазнања као што су: која је врста стенског масива у питању, склоп масива и слична својства. [1]

## **4.2. Класификациони системи стенског масива**

У савременој пракси и инжењерским приступима најширу примену су нашла два система, геомеханичка класификација CSIR (RMR – Rock Mass Rating, Bieniawski 1974. године) као и NGI систем (Q – систем Barton и други 1974. године). Поменути системи класификације се заснивају на утврђивању показатеља квалитета стене (RQD) који је редложен од стране D. U. Deere 1964. године као индекса који се квантитативно одређује квалитет стенског масива. Поред RMR, RQD и Q система класификације стенског масива постоје и многи други системи који ће бити приказани у делу који следи испод:

- Препоручена класификација стене за потребе механике стена
- Обједињена класификација за тло и стене
- Типолошка класификација
- Обједињени систем класификације за стене (URCS)
- Основни геотехнички опис (BGD)
- Чврстоћа стенског масива RMS
- Измењени основни RMR (MBR)



- Упрошћена геомеханичка класификација испуцале стенске масе (SRMR)
- Оцена стенске масе N
- Индекс стенске масе Rmi

При овоме треба напоменути да приказани различити системи класификације анализирају различите параметре, па се приликом тога најчешће препоручује примена најчешће две методе класификације стенском масива. Ти параметри најчешће представљају податке везане за:

- Величину блока и орјентацију пукотина
- Број система пукотина
- Дужину пукотина
- Растојање између пукотина
- Чврстоћу пукотина
- Врсту стене
- Напонско стање
- Стање подземних вода
- Чврстоћу непоремећеног стенског материјала
- Оштећење услед минирања

Поменути параметри су додељени одређеним системима класификације и карактеришу класификациони систем у зависности од датог параметра. Пример је RQD класификација коју карактерише параметар везан за растојање између пукотина.

Тема овог рада биће представљање инжењерски најпримењенији системи класификације и њихова примена, а све у циљу формирања геомеханичког модела на основу којих ће бити извршен избор рачунски вредности својстава стенског материјала. У наставку рада биће представљен детаљан приказ развоја одређених класификационих система као и предности и недостаци сваког.



### **4.2.1. Показатељ квалитета стенског масива (RQD)**

#### **класификација**

Индекс којим се квантитативно одређује квалитет стенског масива предложио је 1964. године D. U. Deere. Предложени индекс познатији је као показатељ квалитета стенског масива (Rock Quality Designation – RQD). RQD представља процентулни износ добијеног језгра одређеног на основу прегледа језгра саме истражне бушотине, а који индиректно зависи од броја пукотина и присуства мекших делова стенског масива. Приликом одређивања RQD у обзир се узимају само непоремећени комади језгра дужи од 100 mm и њихова укупна дужина се дели са укупном дужином језгровања (Deer, 1968. године). Сходно претходном обрзац има следећи облик:

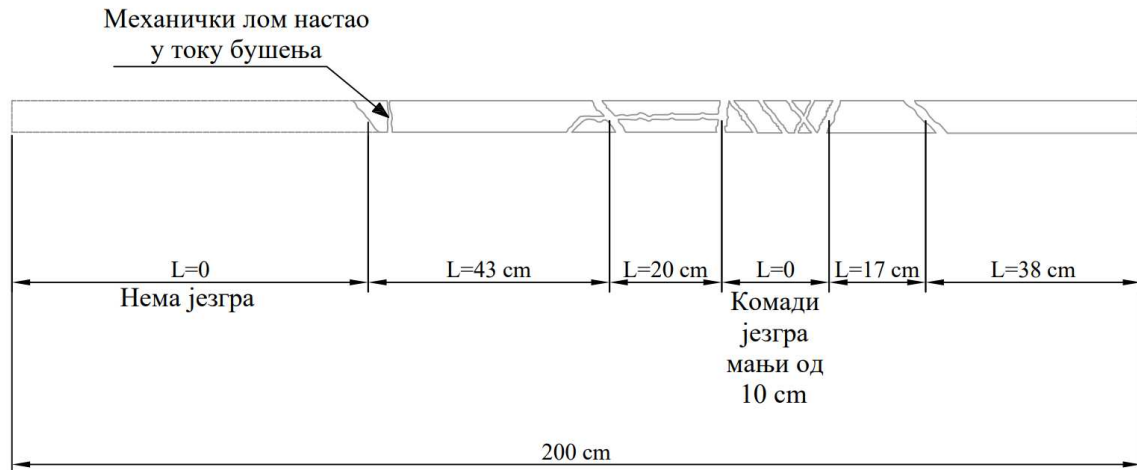
$$RQD = \frac{\sum \text{Дужина комада језгра } > 100 \text{ mm}}{\text{Укупна дужина језгра}} \cdot 100 (\%) \quad (4.1)$$

Овај показатељ представља стандардни параметар који се одређује приликом картирања језгра и његова највећа предност је у једносвном и брзом одређивању, као и у чињеници да за његово одређивање нема додатних трошкова. RQD суштински представља показатељ квалитета стенског масива где је анализирани стенски материјал веома распаднут, мекан, испуцао, са израженим равнима смицања и представља саставни део стенског масива (Deer D. U. и Deer D. W. 1988. године). У суштини, RQD представља удео „добрих“ комада стенског материјала у укупној дужини бушотине изражен у процентима.

### **4.2.2. Директна метода одређивања показатеља квалитета стенског масива (RQD)**

Директна метода одређивања показатеља RQD је могућа када је доступно језгро из истражних радова и када постоје записници о картирању истражних бушотина. Поступак за директно одређивање RQD је приказан на слици 4.1.





Слика 4.1- Интерпретација набушемог језгра истражне бушотине [28]

На основу приказане слике у следећем делу биће дат прорачун показатеља квалитета на основу измерених вредности са слике 4.1. [28]

$$RQD = \frac{118}{200} \cdot 100\% = 59\% \quad (4.2)$$

Према препоруци поступак одређивања дужине језгра се врши мерењем дуж осе језгра. Пукотине у језгру које се јављују као последица самог поступка бушења не треба узети у обзир, односно, комаде језгра треба спојити и посматрати као јединствен комад. У случају да постоји недоумица да ли је одређена пукотина природна или је настала приликом бушења, онда овакву пукотину треба посматрати као природну да би на тај начин били опрезни приликом прорачуна вредности RQD. Такође, приликом одређивања RQD треба занемарити све вештачке прелине у току мерења дужине језгра, као и све комаде језгра које је немогуће у потпуности разазнати по чврстоћи и стању иако задовољавају услов да им је дужина већа од 100 mm.

Међународно друштво за механику стена (ISRM) је за одређивање RQD препоручило да се анализе врше на језгру пречника не мањег од 54,7 mm (NX). На основу свог искуства Deere сматра да је одређивање RQD могуће вршити и на језгру другог пречника добијеног различитим технологијама бушења уколико примењена технологија бушења задовољава услов да не доводи до



појаве вештачких пукотина у језгру и не долази до губитака самог језгра. Сходно препорукама Deere D. U. и Deere D. W. укупна дужина језгра за прорачун RQD се одређује на основу регистроване дужине бушотине на самом терену и не би требало да буде мања од 1,50 m. Комисија ISRM за стандардизацију лабораторијских и теренских испитивања препоручује да се примењују различите укупне дужине језгра чиме се омогућује: издвајање појединих слојева, структурних целина, зона ослабљења и др., да се укаже на одређене битне промене и на тај начин да се створи што прецизнија слика о положају и ширини зона које имају мале вредности RQD. Deere (1968) је предложио одговарајућу класификација стенских масива којом је успоставио везу између бројчаних вредности RQD и инжењерског квалитета појединих стенских масива. Интерпретација предложених веза између бројчаних вредности дата је у табели 4.1. [28]

*Табла 4.1- Веза између вредности RQD и квалитета стенског масива (Deere, 1968. godine )*

<b>RQD (%)</b>	<b>Категорија стенског масива</b>
< 25	Врло слаба
25 – 50	Слаба
50 – 75	Задовољавајућа
75 – 90	Добра
90 – 100	Одлична

### **4.2.3. Индиректна метода одређивања показатеља квалитета стенског масива (RQD)**

Индиректне методе одређивања показатеља RQD се примењују када није доступно језгро из истражних бушотина, као ни записници о картирању. Afrouz је 1973. године предложио поступак за одређивање вредности RQD „in-situ“ применом следеће једначине:



$$RQD(\%) = A^x - B^y \cdot D_v \quad (4.3)$$

где је:

$D_v$  – укупан број дисконтинуитета по  $m^3$  стенског масива

Раван дисконтинуитета није управна на правац максималног главног напона. Константе  $A$ ,  $B$ ,  $x$ ,  $y$  су у вези са горе наведеним фактором, тако да вредност  $A^x$  се налази у интервалу од 105 до 120, а  $B^y$  у интервалу од 2 до 12.

Priest и Hudson су 1976. године предложили да се вредност RQD одређује на основу мерења растојања између пукотина ( $\lambda$  (пукотина/m)) које се изводи на доступном делу стенског масива применом следеће једначине:

$$RQD = 100 \cdot e^{-0.1 \cdot \lambda} \cdot (0.1 \cdot \lambda + 1) \quad (4.4)$$

Претходна једначина представља најједноставнији начин за одређивање RQD када нам није доступно језгро из истражних бушотина, као ни записници о картирању истражних радова.

Вредност RQD се може одредити на основу броја пукотина (дисконтинуитета) по јединичној запремини  $J_v$  на одређеној површини стенског масива. Palmström (1982) је за одређивање RQD вредности у стенском масиву у коме нема глинене запуне предложила следећу једначину:

$$RQD = 115 - 3.3 \cdot J_v \quad (4.5)$$

где је:

$J_v$  – запремински број пукотина и представља укупан број пукотина по јединичној дужини за све системе пукотина у стенском масиву у коме нема глинене запуне. За вредности  $J_v < 4,5$  је  $RQD = 100$ .

Palmström (1996) је предложила методу за прикупљање квалитетнијих података са површине стенског масива него из језгра бушотине, јер је вредност RQD зависи од оријентације саме бушотине. У суштини, ова метода је заснована на мерењу угла између сваке пукотине и посматране површине или



израђене бушотине. Измерена густина пукотина ( $wJ_d$ ) за случај мерења на површини стенског масива се одређује према обрасцу:

$$wJ_d = \frac{1}{\sqrt{A}} \sum \frac{1}{\sin \delta_1} \quad (4.6)$$

а за случај мерења дуж језгра бушотине се одређује према обрасцу:

$$wJ_d = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum \frac{1}{\sin \delta_1} \quad (4.7)$$

где је:

$\delta_1$  – угао пресецања, тј. угао између посматране површине или израђене бушотине и поједине пукотине,

$A$  – величина посматране површине ( $m^2$ ),

$L$  – дужина дела језгра дуж кога је вршено мерење (погледати и анализирати слику 4.2).

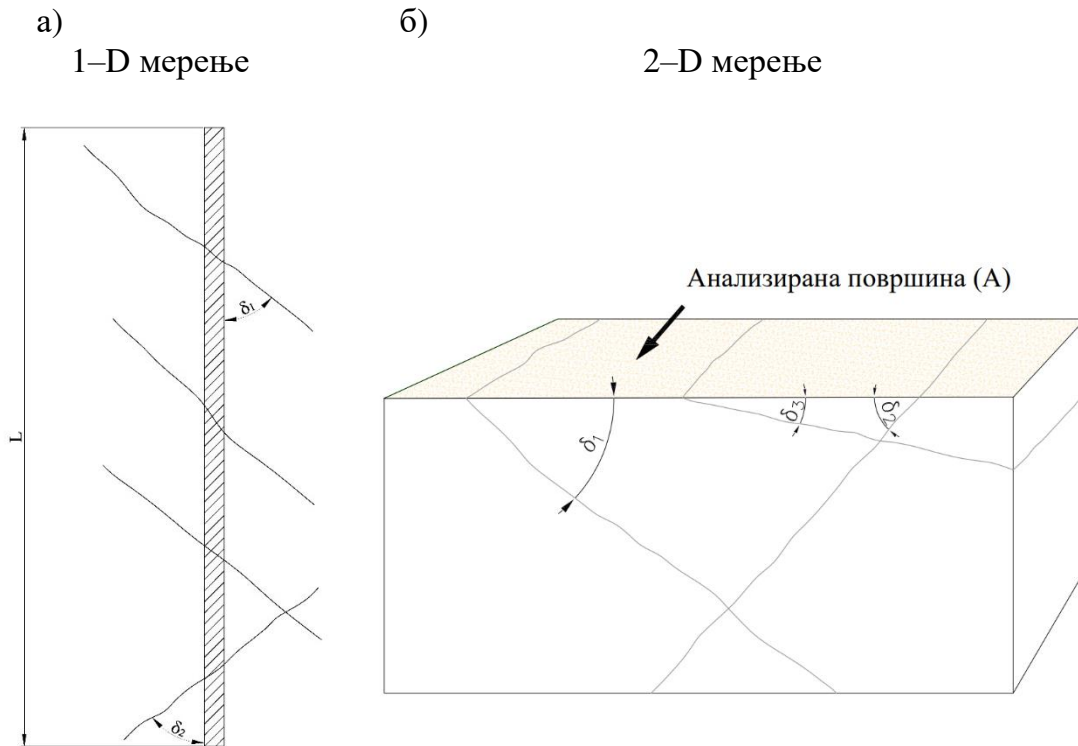
На откривеним стенским масама (подземне рударске просторије) метода одређивања вредности RQD састоји се у бројању пукотина заступљених на  $1m^3$  стенске масе. Број пукотина по метру кубном масива може се одредити као збир пукотина по метру за сваку фамилију пукотина. RQD се може одредити и на основу мерења средњег растојања између пукотина и једначине:

$$RQD = 100 \cdot e^{-0.1 \cdot \lambda} (0.1 \cdot \lambda + 1) \quad (4.8)$$

где је:

$\lambda = \frac{1}{\bar{X}}$  – просечан број пукотина на 1 m дужни,

$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$  – средња вредност растојања између пукотина.



Слика 4.2- Поступак индиректног мерења и прорачуна показатеља квалитета стенског масива (*RQD*) за

а) пресек између пукотина и израђене бушотине

б) пресек између пукотина и посматране површине

(*Palmström, 1996*) [1]

Вредност *RQD*, може бити одређена и помоћу такозваног индекса брзине, према табели 4.2. [1]

Табела 4.2- Вредност *RQD* одређена на основу индекса брзина

Индекс брзина ( $V_F/V_L$ ) <sup>2</sup>	<i>RQD</i>	Број пукотина на 1 m	Фактор масива
< 0,2	< 20	> 15	0,2
0,2 – 0,4	21 – 40	15 – 8	0,2
0,4 – 0,6	41 – 60	8 – 5	0,2 – 0,5
0,6 – 0,8	61 – 80	5 – 1	0,5 – 0,8
0,8 – 1,0	81 – 100	1	0,8 – 1,0



где су:

$V_F$  – брзина простирања лонгитудиналних таласа у масиву,

$V_L$  – брзина простирања лонгитудиналних таласа у узорку (динамичка вредност).

#### **4.2.4. Недојтаци показатеља квалитета стенског масива (RQD)**

Према закључцима Merritt-a (1972) RQD систем има одређена ограничења у примени код пукотина које имају глиновиту испуну. Глиновита испуна умањује треће зидова пукотина при чему је вредност RQD релативно висока, па је стенски масив упркос овако високим вредностима нестабилан.

На вредности RQD не утичу димензије анализираног објекта. У пракси је велика разлика између релативно кратког и уског тунела у односу на велики резервоар за чување воде. Тако, за ископе великог распона RQD систем даје непоуздане податке. Сходно претходном Douglas и други (1999. године) су напоменули да је мало вероватно да ће сва оштећена која су уочена у бушотинама бити од значаја и утицаја на стабилност стенског масива при анализи и прорачуну геомеханичких параметара.

Вредност RQD не представља поуздан параметар у случају када се у стенском масиву појављују пукотине на растојању блиском 100 mm. Тако, ако је растојање између пукотина 105 mm (дужина језгра), онда ће вредност RQD износити 100 %. Уколико је растојање између пукотина 95 mm, вредност RQD ће износити 0%. Уколико се у претходна два случаја примени параметар  $J_v$  (запремински број пукотина, Palmström 1982. година), његова вредност би била блиска 10 пукотина/m за оба случаја (Helgstedt, 1997. година). RQD систем је релативно неосетљив на промену величине блока непоремећене стене (Milne и други, 1991. година). Milne и други научници. су закључили да стенски масив код кога је одређена вредност RQD од 100 % може имати 3 система пукотина на међусобном просечном растојању од 0,4 m или један систем пукотина на међусобном растојању од неколико метара.



Вредност RQD се може значајно променити у зависности од оријентације саме бушотине у односу на геолошку структуру истраживаног масива. Сходно томе, Ноек и други научници. (1993. године) су предложили да се примени метода одређивања запреминског броја пукотина ( $J_v$ ) да би се утицај оријентације бушотина што више умањио. [1]

#### **4.2.5. Препоручена класификација стена за потребе механике стена**

Patching i Coates (1968. године) су развили класификациони систем који су назвали препоручена описна класификација стене за потребе механике стена. Овај систем представља измењену класификацију стенског материјала коју је предложио Coates 1964. године, као и оне коју су предложили Coates и Parsons 1966. године. Припреми ове класификације је претходила расправа стручне јавности и заинтересованих људи.

На основу претходног закључено је да класификација треба да има довољно категорија којима би се омогућила подела стенског материјала у различите класе, а у исто време да и број категорија не буде превелик чиме би се њена примена закомпликовала. Категорије за класификацију стенског материјала су приказане у табели 4.3, тако да се стенски материјал може описати као „дијабаз, врло високе чврстоће, еластичан, масиван и компактан“.

Стенски материјал је дефинисан као еластичан уколико је релативна трајна деформација при притисном оптерећењу у тренутку лома мања од 25 % или уколико је брзина пузања мања од 0,05  $\mu\text{m}/\text{h}$  при половини вредности притисног оптерећења у тренутку лома (Coates и Patching, 1968. године).

Увођењем овог класификационог система у многостепено је олакшано дефинисање стенског масива и материјала са становишта једноосне чврстоће на притисак, целокупне хомогености деформације и континуалности стенског масива у формацији, где се даје могућност за избор више различитих карактеристика стенског масива. [1]



Табела 4.3- Описни појмови које су користили Coates i Patching (1968)

Стенски материјал	<b>1. Геолошки назив стенског материјала</b>
	<b>2. Једноосна чврстоћа на притисак стенског материјала</b>
	а) Врло мала (< 27,5 МПа) б) Мала (27,5 – 55 МПа) в) Средња (55 – 110 МПа) г) Висока (110 – 220 МПа) д) Врло висока (> 220 МПа)
	<b>3. Деформација стенског материјала у тренутку лома</b>
	а) Еластична б) Пластична
Стенски масив	<b>4. Целокупна хомогеност деформације</b>
	а) Масивна б) Услојена
	<b>5. Континуалност стенског материјала у формацији</b>
	а) Компактан (растојање између пукотина > 1,8 m) б) Блоквит (растојање између пукотина 0,9 – 1,8 m) в) Услојен (растојање између пукотина 0,08 – 0,9 m) г) Испуцао (растојање између пукотина < 0,08 m)

#### 4.2.6. Геомеханичка класификација испуцале стенске масе (RMR)

Геомеханичку класификацију или RMR (Rock Mass Rating) систем је развио Bieniawski 1973. године и приказао је на Саветовању о научним и индустријским истраживњима у Јужноафричкој Републици (CSIR). Класификациони систем је заснован на искуствима Bieniawski–ог стеченим при пројектовању и изради плитких тунела у седиментним стенама. RMR систем је у основној верзији обухватио 49 анализа пројектованих и изведених рударских





објекта који до тада нису приказани. Ова класификација је 1974. године претрпела неколико значајних измена тако што је број анализираних параметара смањен са 8 на 6, а 1975. године извршене су измене у бодовању и предвиђању потреба за применом одређеног система подграђивања. 1976. године извршене су измене у подели, односно у границама појединих категорија на основу резултата новоизведених анализа 64 пројектована и изведена рударска објекта. 1979. године је прихваћен опис стенског масива који је представио ISRM. Из тих разлога је веома важно да се приликом навођења вредности RMR наведе и верзија то јест (година) по којој је извршено њено одређивање.

Класификација је први пут објављена 1973. године и доживела је више измена (Bieniawski) у рангирању стена које ће најочигледније бити приказане на примеру у табели 4.4: [1]

*Табела 4.4- Класификација и рангирање стена Bieniawski-ог (1973)*

<b>Геомеханички параметар</b>	<b>Вредност</b>	<b>1973</b>	<b>1974</b>	<b>1976</b>	<b>1979</b>	<b>1989</b>
Индекс чврстоће	7 Мра	5	5	12	12	12
RQD	70%	14	14	13	13	13
Растојање између пукотина	300 mm	20	20	20	10	10
Стање пукотина	Описано	12	10	20	20	25
Оводњеност	Суво	10	10	10	15	15
Орјентација пукотина	Веома повољна	15	15	0	0	0
RMR		76	74	75	70	75

Према евиденцији Bieniawski –ог (1989. година) RMR систем је примењен у изради више од 268 рударских пројеката на изради тунела, комора, рудника, косина, темеља и просторија у стенском материјалу. Разлог за примену RMR система је, према Bieniawski–ом (1989. године), једноставност и свестраност њене примене у инжењерској пракси. Такође, треба напоменути да је RMR систем одређен на основу искустава у изради рудника угља, ископа за потребе грађевинарства и изради плитких тунела.



Стенски масив се класификује по издвојеним квазихомогеним зонама у којима су његова битна обележја више–мање уједначена. Наведени параметри се одређују за сваку зону понаособ. Класификациони систем RMR користи следеће улазне параметаре на основу чијег се бодовања одређује и коначна вредност RMR, а који се могу добити и из истражних бушотина:

- једноосна чврстоћа на притисак непоремећеног стенског материјала,
- показатеља квалитета стенског масива (RQD),
- средње растојање између пукотина или дисконтинуитета,
- стање пукотина,
- стање подземних вода и
- оријентација пукотина или дисконтинуитета.

Првих пет параметара у овом класификационом систему представљају основне параметре (RMR основа). Шести параметар је посебно обрађен из разлога што утицај оријентације дисконтинуитета зависи од њене инжењерске примене. За сваки од наведених параметара се врши бодовање, а што уједно представља и опис квалитета стенског материјала. Сви наведени подаци се класификују према табелама 4.5, 4.6 и 4.7. [1]

Табела 4.5- RMR систем (Bieniawski, 1976. година)

Параметар	Поена						
	> 8	4 – 8	2 – 4	1 – 2	–		
$I_s$ (MPa)	> 200	100 – 200	50 – 100	25 – 50	10 – 25	3 – 10	1 – 3
$\sigma_c$ (MPa)	15	12	7	4	2	1	0
Поена	15	12	7	4	2	1	0
RQD (%)	90 – 100	75 – 90	50 – 75	25 – 50	< 25		
Поена	20	17	13	8	3		
Растојање пукотина (m)	> 3	1 – 3	0,3 – 1	0,05 – 0,3	< 0,05		
Поена	30	25	20	10	5		
Стање пукотина	Врло храпава, без зева, чврсти зидови	Мало храпава, зев <1mm, чврсти зидови	Мало храпава, зев <1mm, меки зидови	Глатке површине, или испуна <5mm, зев 1–5mm	Мека испуна >5mm, зев >5mm		
Поена	25	20	12	6	0		



Табела 4.6- RMR систем (Bieniawski, 1989. година) – приказ А параметра

А. Класификациони параметри								
Параметар		Вредност						
1	Чврстоћа монолита	Индексна $I_s$ (MPa)	>10	4–10	2–4	1–2	За ове ниске вредности користити само $\sigma_c$	
		Једнооксијална $\sigma_c$ (MPa)	>250	100–250	50–100	25–50	5 – 2 5	1–5 < 1
	Поена	15	12	7	4	2	1	0
2	RQD (%)		90–100	75–90	50–75	25–50	<25	
	Поена		20	17	13	8	3	
3	Растојање пукотина (m)		>2	0,6–2	0,2–0,6	0,06–0,2	<0,06	
	Поена		20	15	10	8	5	
4	Стање пукотина		Веома храпаве површине. Неконтинуалне. Без зева. Нераспаднута стена	Блахо храпаве површине. Зев <1 mm. Благо распаднута стена	Благо храпаве површине <1 mm. Високо распаднута стена	Клизаве површине или Испуна испод 5 mm или Зев 1–5 mm. Континуалне	Мека испуна дебља од 5 mm или Зев већи од 5 mm. Континуалне	
			Поена	30	25	20	10	0
5	Подземна вода	Прилив $I/m$ на 10 m просторије	Никакав	<10	10–25	25–125	>125	
		Притисак воде у пукотини / $\sigma_1$	0	<0,1	0,1–0,2	0,2–0,5	>0,5	
		Опште стање	Суво	Влажно	Мокро	Капље	Тече	
	Поена		15	10	7	4	0	

Целокупно бодовање за првих пет параметара се сабира и оно се може усагласити шестим параметром чија вредност зависи од оријентације пукотина у односу на посматрани објекат, а што је приказана у следећим једначинама:

$$RMR = RMR_{\text{основа}} + \text{усаглашавање у зависности од оријентације пукотина} \quad (4.9)$$

$$RMR_{\text{основа}} = \sum \text{параметара (1 + 2 + 3 + 4 + 5)} \quad (4.10)$$



Табела 4.7- RMR систем (Bieniawski, 1989. година) - Наставак

<b>Б. Корективни поени за оријентацију пукотона (Види Ђ)</b>						
Пружање и пад		Веома повољан	Повољан	Осредњи	Неповољан	Веома неповољан
Поени	Ходници	0	-2	-5	-10	-12
	Темелји	0	-2	-7	-15	-25
	Косине	0	-5	-25	-50	-60
<b>В. Класе стенског масива</b>						
Поени	100-81	80-61	60-41	40-21	<21	
Класа	I	II	III	IV	V	
Опис стене	Веома добра	Добра	Осредња	Лоша	Веома лоша	
<b>Г. Тумачење класа стенског масива</b>						
Класа	I	II	III	IV	V	
Просечно време држања неподграђеног распона	20 год., за 15 m	1 год., за 10 m	1 нед., за 5 m	10 час., за 2,5 m	30 мин, за 1 m	
Кохезија масива	>0,4	0,3-0,4	0,2-0,3	0,1-0,2	<0,1	
Угао унутрашњег трења	>45°	35°-45°	25°-35°	15°-25°	<15°	
<b>Д. Смернице за класификацију дисконтинуитета</b>						
Дужине пукотина (m)	>1	1-3	3-10	10-20	<20	
Поени	6	4	2	1	0	
Зев (mm)	Без зева	<0,1	0,1-1,0	1-5	>5	
Поени	6	5	4	1	0	
Храпавост	Веома храпаво	Храпаво	Благо	Глатко	Клизаво	
Поени	6	5	3	1	0	
Испуна	Без испуне	Тврда <5 mm	Тврда >5mm	Мека <5 mm	Мека >5mm	
Поени	6	4	2	2	0	
Распаднутост	Нераспаднута	Благо распаднута	Умерен распаднута	Јако распаднута	Потпуно распаднута	
Поени	6	5	3	1	0	
<b>Ђ. Утицај положаја пукотина на ходнике</b>						
Пружање управно на осу пукотине			Пружање паралелно са осом			
Напредовање у правцу пада. Пад 45-90°		Напредовање у правцу пада. Пад 20-45°		Пад 45-90°	Пад 20-45°	
Веома повољно		Повољно		Веома повољно	Осредње	
Напредовање супротно паду. Пад 45-90°		Напредовање супротно паду. Пад 20-45°		Пад 0-20°, без обзира на пружање		
Осредње		Неповољно		Осредње		



Коначне вредности RMR су груписане у пет класа стенског масива, где свака класа стенског масива групише 20 претходних бодовања. Сви различити параметри нису подједнако битни за целокупну класификацију стенског масива, па се стога и различито бодују. Веће вредности RMR указују на боље стање/квалитет стенског масива.

Wieniawski (1989. године) је објавио упутства за одређивање одговарајућег система подграђивања стенског масива на основу вредности RMR. Упутства су дата за тунел потковичастог свода са распонем од 10 m који је израђен бушачко–минерским методама. Јасно је да облик, величина и дубина се разликује у рудницима и из тих разлога се посебна пажња мора посветити приликом примене ових упутстава у рударству. Фактори као што су „in-situ“ напонско стање, димензије и облик тунела, као и метода ископавања утичу на примену ових упутстава. У овом упутству се дају предлози за трајни систем подграђивања, а не за примарно подграђивање.

RMR систем је веома једноставан за примену и параметри потребни за ову класификацију се могу једноставно одредити како из истражних бушотина, тако и на основу картирања израђених рударских просторија. Такође, овај систем се може применити и за избор трајног система подграђивања. Највећа примена RMR система је у области израде рударских објеката од којих је најчешће израда тунела, али и за различите врсте косина приликом спровођења анализе стабилности, стабилност темеља, комора или различите облике примене приликом картирања.

RMR систем врши бодовање различитих параметара, а што уједно и представља ограничавајућу околност за његову примену на само одређене врсте стенског материјала Kristen (1988. година). Тако, овај систем се не може применити за ископ материјала који се могу налазити у интервалу од тла до чврстог стенског материјала. Према закључцима Kristen–а (1988. година) овај проблем се може превазићи тако што вредности за поједине параметре треба одређивати унутар њиховог целокупног интервала, а не само унутар одређених класа. Wienerowski (1989. године) је, такође, предложио да корисници могу



вршити интерполацију вредности RMR између различитих класа и на тај начин се не морају стриктно придржавати одређених уских интервала за поједине класе. RMR класификација је примењена у Hoek–Brown–овом критеријуму лома (1980. година), као и у критеријумима Shorey –а (1997. година) и Yudhbir –а (1983. година) у циљу одређивања својстава стенског масива.

#### **4.2.7. Класификација Норвешког Геотехничког Института – Q систем класификације**

Barton, Lien и Lunde 1974. године првенствено су разрадили и предложили класификацију за потребе израде тунела под називом Индекс квалитета (Quality Index) или Q система. Ова класификациона метода и препоруке за избор система подграђивања које су проистекле из ње су засноване на анализи 212 пројектованих и изведених рударских објеката. Поред претходног, наведена класификација је још названа и Квалитет стенског масива или Индекс квалитета израде тунела, али се среће и назив NGI класификација, јер је ова класификација развијена на Норвешком Геотехничком Институту. Основне податке за развој Q система је прикупио је Cecil, 1970. године, обрадивши више од 90 пројектованих и изведених објеката у Шведској и Норвешкој. У оквиру анализираних 212 објеката, 180 њих је било изведено са одређеним системом подграђивања, док је преосталих 32 трајно било без икакве подграде. Анализом су обухваћени објекти чији су се неподграђени распони кретали у интервалу од 1.2 m за пилот тунеле до 100 m за рудничке коморе. Дубине на којима су били изграђени наведени објекти су се кретале од 5 до 2500 m при чему је најчешће дубина била у интервалу од 50 до 250 m.

Q систем је допуњаван у неколико наврата, тако да је до 1993. године овим системом анализирано и обухваћено око 1050 пројектованих и изведених рударских објеката. Основни улазни параметри Q система се нису променили, али је начин бодовања утицаја напонског стања (SRF) измењем од стране Grimstad –а и Barton–а (1993. године). Barton је 2002. године представио неке



нове везе вредности  $Q$  система класификације чиме су обухваћена нова појашњења за постојећи начин бодовања појединих параметара.

Изворна класификација норвешког института (Barton и други, 1974. године) је користила следећих шест улазних параметара:

- ***$RQD$ ,***
- ***број система пукотина,***
- ***храпавост пукотина,***
- ***измењеност зидова пукотина,***
- ***стање воде у пукотинама,***
- ***фактор напонског стања.***

Према Barton-у (1988. године) основни геотехнички параметри су величина елементарног блока, минимална чврстоћа на смицање између елементарних блокова и активно напонско стање. Наведени основни геотехнички параметри су приказани преко следећих односа (Barton, 2002. године):

- релативна величина елементарног блока  $\frac{RQD}{J_n}$
- релативна чврстоћа на смицање (дуж најнеповољнијег система пукотина или испуњеног дисконтинуитета)  $\frac{J_r}{J_a}$
- активно напонско стање  $\frac{J_w}{SRF}$

Оцена стенског масива по овој класификацији изведена на основу шест основних параметара који су повезани следећом једначином:

$$Q = \left( \frac{RQD}{J_n} \right) \cdot \left( \frac{J_r}{J_a} \right) \cdot \left( \frac{J_w}{SRF} \right), \quad (4.11)$$



где су:

RQD – показатељ квалитета стенског масива према Деере–у (када је мањи од 10 узима се 10),

$J_n$  – утицај пукотина,

$J_r$  – утицај хрпавости зидова пукотина (најнеповољнијег дисконтинуитета или система пукотина),

$J_a$  – утицај промене зидова пукотина и испуне (најнеповољнијег дисконтинуитета или система пукотина),

$J_w$  – утицај воде у пукотинама и њеног притиска и

SRF – утицај напонског стања.

Вредност најмање чврстоће на смицање између елементарних блокова треба да буде одређена за критични систем пукотина, то јест за систем пукотина који је најнеповољнији за стабилност кључног блока стенског материјала.

Детаљан опис шест основних параметара и поступак за њихово бодовање је приказан у табелама 4.8 до 4.12. [1] Класификационим системом Q није третирана оријентација пукотина. Barton и др (1974. године) су изјавили да је утврђено да овај податак није толико битан. Уколико би оријентација пукотина била укључена онда би овај класификациони систем изгубио суштинску једноставност примене.

Табела 4.8- Утицај броја пукотинских система

Опис масива	$J_n$
Масивна стена, без или са мало пукотина	0,5 – 1,0
Један систем пукотина	2
Један систем са случајним пукотинама	3
Два система пукотина	4
Два система пукотина са случајним пукотинама	6
Три система пукотина	9
Три система пукотина са случајним пукотинама	12
Четири и више система, са случајним пукотинама, јако испуцале стене	15
Здробљена, спрашена стена	20

Као напомену за претходну табелу би требало додати да се вредност за раскршћа усваја 3 -  $J_n$ , а за портале 2 -  $J_n$ .





Табела 4.9- Утицај храпавости зидова пукотина

Опис пукотина	$J_r$
Испрекидане пукотине	4
Храпаве, таласасте	3
Глатке, таласасте	2
Клизаве, таласасте	1,5
Храпаве, равне	1,5
Глатке, равне	1,0
Клизаве, равне	0,5
Отворене пукотине, запуњене глином, без контакта зидова пукотине	1,0
Пукотине испуњене дробиним, без контакта зидова пукотине	1,0

Као напомену треба истаћи да ако је разлика између средњег растојања већа од 3 m, на вредност  $J_r$  потребно је додати 1,0.

Табела 4.10- Утицај промене зидова пукотине и пукотинске испуне

Опис промене зидова пукотине	$J_a$	$\phi_r$
<b>Зидови и пукотине су у контакту</b>		
Срасла пукотина, зацементирана чврстим водонепропусним материјалом	0,75	–
Зидови пукотине неизмењени	1,0	25 – 35
Зидови пукотине мало измењени, тврда минерална превлака испуна је дезинтегрисана стена без глине	2,0	25 – 30
Прашинаста или песковито-глиновита превлака	3,0	20 – 25
Превлака од меких материјала са малим коефицијентом трења: талк, хлорит, гипс, графит итд.	4,0	8 – 16
<b>Зидови пукотине долазе у контакт при помаку од 10 cm</b>		
Испуна је дезинтегрисана стена без глине, зрнца песка	4,0	25 – 30
Јако збијена преконсолидована глиновита испуна испод 5 mm дебљине	6,0	25 – 30
Мало збијена преконсолидована глиновита испуна испод 5 mm дебљине	8,0	12 – 16
Глиновита испуна склона бубрењу испод 5 mm дебљине ( <i>вредност зависи од процента бујајућих честица, присуства воде итд</i> )	8 – 12	6 – 12
<b>Зидови пукотина не долазе у контакт при смицању</b>		
Испуна је дезинтегрисана стена без глине, или дробина	6	6 – 24
Испуна је од здробљене стене и глине	8 – 12	
Испуна је од прашинасте или песковите глине	5	
Дебљина, непрекидна глиновита испуна	10 – 20	6 – 24



Табела 4.11- Утицај пукотинске воде

Опис стања пукотинске воде	$J_w$	Притисак воде (МПа)
Суво радилиште или прилив мањи од 5 l/min	1,0	< 0,1
Средњи прилив, понекад испрана испуна из пукотина	0,66	0,1 – 0,25
Велики прилив у здравој стени са пукотинама без испуне	0,55	0,25 – 1,0
Велики прилив уз значајно испирање пукотинске испуне	0,33	0,25 – 1,0
Изузетно велики прилив, после минирање опада	0,2 – 0,1	> 1,0
Изузетно велики прилив без приметног опадања	0,1 – 0,05	> 1,0

Табела 4.12- Утицај смањења напона

Опис стања	SRF	
<b>Просторија сече ослабљену зону</b>		
Више ослабљених зона, испуна је глина или хемијски распаднута стена, врло лабава околна стена, (за било које дубине)	10	
Смањити ову вредност за 25 – 50% ако зоне смицања само утичу, а не секу просторију		
Једна ослабљена зона, испуна је глина или хемијски распаднута стена(за дубине мање од 50 метара)	5,0	
Једна ослабљена зона, испуна је глина или хемијски распаднута стена (за дубине веће од 50 m)	2,5	
Више раседних зона у здравој стени, без глина, растрешена околина стена (за било које дубине)	7,5	
Једна раседна зона у здравој стени, без глина (за дубине мање од 50 метара)	5,0	
Једна раседна зона у здравој стени, без глина (за дубине веће од 50 m)	2,5	
Растрешене отворене пукотине, јака испуцалост (за било које дубине)	5,0	
Опис стања	SRF	
<b>Здрава стена (ненарушен стенски масив)</b>		
За јако анизотропно поље напона (ако се мери) када је: $5 \leq \sigma_1/\sigma_3 \leq 10$ редуковати на $0,8 \cdot \sigma_c$ и $0,8 \cdot \sigma_i$ ; када је: $\sigma_1/\sigma_3 > 10$ редуковати на $0,6 \cdot \sigma_c$ и $0,6 \cdot \sigma_i$ ; где је $\sigma_c$ – једноаксијална чврстоћа на притисак, $\sigma_i$ – чврстоћа на истезање, $\sigma_1$ , $\sigma_3$ – максимални и минимални главни напон		
Низак напон, близу површине	$\sigma_c/\sigma_1 > 200$ $\sigma_i/\sigma_1 > 13$	2,5
Средње вредности напона	$\sigma_c/\sigma_1 = 200 - 10$ $\sigma_i/\sigma_1 = 13 - 0,66$	1,0
Висока вредност напона	$\sigma_c/\sigma_1 = 10 - 5$ $\sigma_i/\sigma_1 = 0,66 - 0,33$	0,5 – 2,0
Госки удар слабог интезитета	$\sigma_c/\sigma_1 = 5 - 2,5$ $\sigma_i/\sigma_1 = 0,33 - 0,16$	5,0 – 10
Горски удар јаког интезитета	$\sigma_c/\sigma_1 < 2,5$ $\sigma_i/\sigma_1 < 0,16$	10 – 20
<b>Бујаве стене, пластично течење под дејством високог јамског притиска</b>		
Благ притисак бубрења		5 – 10
Јак притисак бубрења		10 – 20
<b>Стене склоне бубрењу, хемијска активност, бубрење уз присуство воде</b>		
Благ притисак бубрења		5 – 15
Јак притисак бубрења		10 – 15



Примена Q система најширу примену је нашла код анализе тунела и комора који су засвођени. Стенски масив је подељен у 9 категорија на основу вредности Q параметра, а што је приказано у табели 4.13 [1]. За Q систем се сматра да по квалитету обухвата широк спектар стенских масива од веома стишљивог тла до чврсте неиспуцале стене. Интервал вредности параметра Q се креће од 0.001 до 1000. У највећем броју случајева код првих 212 анализираних пројектованих и изведених рударских објеката (Barton, 1988. године) утврђено је присуство тачно три система пукотина, утицај хрпавости зидова пукотина је износио 1.0 – 1.5 – 2.0, утицај промене зидова пукотина и испуне је био 1.0, утицај воде у пукотинама је описан као суво стање или мањи прилив и средње вредности напона. Највећи број анализираних случајева, око 76 је класификовано у централне категорије: веома слаб, слаб, задовољавајућ и добар. Проблеми услед стишљивости или бубрења су уочени само код девет анализираних случајева.

Табела 4.13- Класификовање стенског масива на основу вредности Q параметара (Barton и други, 1974. године)

Q	Група	Класификација
400 – 1000	1	Изузетно добро
100 – 400		Веома добро
40 – 100		Врло добро
10 – 40		Добро
4.00 – 10.00	2	Задовољавајуће
1.00 – 4.00		Лоше
0.10 – 1.00		Врло лоше
0.01 – 0.10	3	Веома лоше
0.001 – 0.01		Изузетно лоше

Да би се успоставила веза између индекса квалитета (Q) и понашања, као и потребе за одређеним системом подграђивања поцемног ископа уведен је термин модификоване димензије ( $D_e$ ). Ова величина се одређује тако што се распон, пречник или висина ископа подели са коефицијентом подграђивања ископа (ESR):

$$D_e = \frac{\text{Распон, пречник или висина (m)}}{\text{Коефицијент подграђивања ископа}}, \quad (4.12)$$



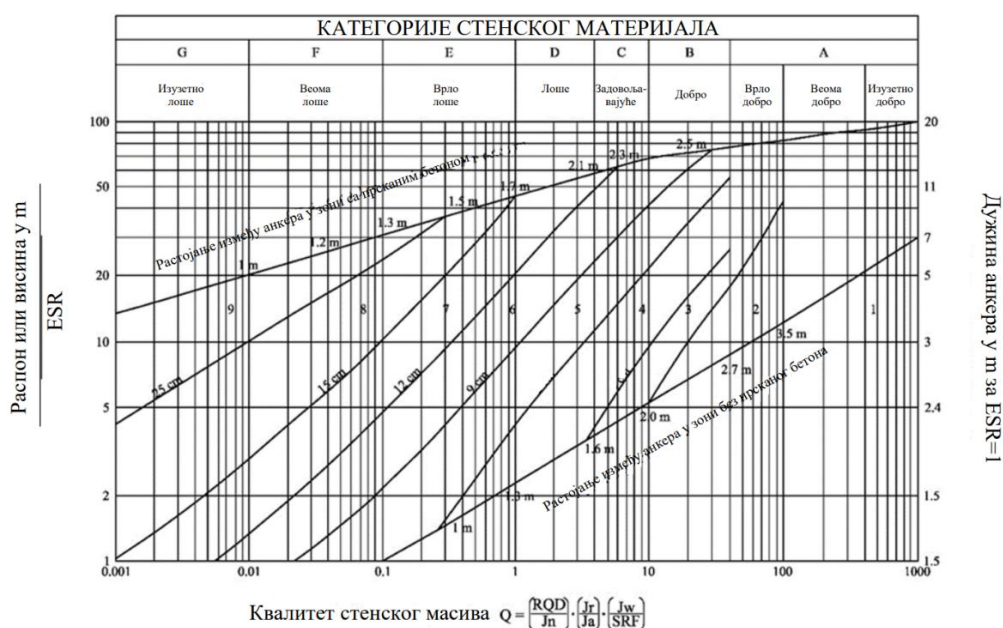
Коефицијент подграђивања ископа (ESR) се одређује на основу истраживања међусобне везе између максималног неподграђеног распона ископа (SPAN) и вредности Q за непосредну околинду ископа који није подграђен дуже од 10 година. Претходна наведена веза је одређена следећом:

$$SPAN = 2 \cdot Q^{0.66} = 2 \cdot (ESR) \cdot Q^{0.4}, \quad (4.13)$$

У табели 4.14 су приказане вредности коефицијента подграђивања ископа (ESR) које је предложио Barton (1976. година).

Табела 4.14- Вредности коефицијента подграђивања ископа (ESR) за различите врсте ископа

Категорија ископа		ESR
A	Привремени ископ у руднику	3 – 5
B	Трајни ископ у руднику, тунел за воду, за хидроцентралу (изузев водених тунела под високим притиском) пилот тунели, нископ или чепа великих ископа.	1.6
C	Просторије за складиштење, Постројења за прераду воде, мањи путнички или железнички тунели, водосабирници, приступни тунели.	1.3
D	Погонске станице, већи путнички или железнички тунели, склоништа за људе, улази, раскрснице.	1.0
E	Подземне нуклеарне централе, железничке станице, просторије за јавне и спортске манифестације производни погони.	0.8



Слика 4.3- Дијаграм за пројектовање подграде од прсканог бетона



Као што је претходно наведено, Q систем је доживео извесне измене и то у фактору утицаја напонског стања (Grimstad и Barton, 1993. године) и увођењем нових метода подграђивања као што је прсканим бетоном са челичним влакнима (S(fr)) и систематским анкерисањем (B). Grimstad и Barton су 1993. године приказали допуњен дијаграм подграђивања на основу вредности Q укључивши и нове методе подграђивања, слика 4.3.

Нову везу Q вредности је предложио Barton 2002. године при чему је посебну пажњу посветио примени Q система у опису стања одређене локације и при пројектовању тунела. Barton је дао везу између вредности Q и брзине простирања лонгитудиналних таласа ( $V_p$ ):

$$V_p \approx 3.5 + \log_{10} Q_c, \quad (4.14)$$

где је:

$$Q_c = Q \cdot \frac{\sigma_c}{100} \text{ – редукована вредност Q применом једначине чврстоће од}$$

100 МПа као просечне вредности за чврсте стенске материјале.

Наведена међусобна веза је заснована на ранијим истраживањима и анализама изведеним 1979. године, када су Sjögren и сарадници представили резултате испитивања брзине простирања лонгитудиналних таласа ( $V_p$ ), мерења RQD и учесталости пукотина на профилима испитаним сеизмички рефракционим методама укупне дужине 120 km и језгрима истражних бушотина који су пратиле ове профиле, укупне дужине 2.8 km. На основу претходног утврђено је да без обзира на вредност RQD, учесталост пукотина и вредности Q, са повећањем дубине или напонског стања долази до повећања брзине простирања лонгитудиналних таласа ( $V_p$ ) (Barton, 2002. године). Од 2002. године Q систем се може применити и на процену једноосне чврстоће на притисак за анизотропни испуцао стенски масив применом следећег обрасца:

$$\sigma_{cm} = 5 \cdot \rho \cdot Q_c^{1/3} \quad Q_c = Q_0 \cdot \frac{\sigma_c}{100}, \quad (4.15)$$



где је:

$Q_0$  - вредност заснована на вредности  $RQD_0$ ,

$RQD_0$  – вредност  $RQD$  одређена у правцу напредовања тунела

Интерпретацијом  $Q$  класификационог система, може се извести закључак да овај систем није погодан за геомеханичке параметре у површинској експлоатацији, пошто се класификациони систем базира на квалитету стенске масе  $RQD$  и примени у подземним рударским објектима. Такође, применом  $Q$  класификације имамо много мање утицајних фактора стенског масива у односу на претходно приказане класификационе системе, па неопходно је да инжењери приликом примене класификационог система буду обазриви и са више аспеката анализирају зону у којој се експлоатишу рударске активности.

#### **4.2.8. Међусобна веза између RMR и Q класификационих система**

Развојем класификационих система Bieniawski (1976) је био први аутор који је на основу анализе пројектованих и изведених објеката предложио међусобну везу између RMR система и Q система. Та веза је представљена следећом једначином:

$$RMR = 9.0 \cdot \ln Q + 44 \quad (4.16)$$

Анализом међусобне везе поменутих класификационих система 1978. године Rutledge и Preston су предложили другачију везу која је представљена следећом једначином:

$$RMR = 5.4 \cdot \ln Q + 43 \quad (4.17)$$

Подстакнути другим научницима, развоју везе RMR и Q допринели су и други научници дефинисањем следећих једначина:

- Moreno 1980. године  $RMR = 5.4 \cdot \ln Q + 55.2 \quad (4.18)$



▪ Camern и други 1981. године  $RMR = 5.0 \cdot \ln Q + 60.8$  (4.19)

▪ Abad и други 1984. године  $RMR = 10.5 \cdot \ln Q + 41.8$  (4.20)

На основу запажања Goela-а и других научника (1995. године) претходно наведени коефицијенти у обрасцима за међусобне везе између RMR система и Q система нису били поуздани. Ова запажања су заснована на анализи 115 пројектованих и изведених објеката, при чему је констатовано да ова два система класификације у разматрање узимају различите параметре, па стога се не могу изједначавати. При овоме треба нагласити да RMR класификација узима у обзир већи скуп података на основу кога се може изабрати класификациони систем.

#### **4.2.9. Модификована геомеханичка класификација за испуцале стенске масе за потребе рударства (MRMR)**

Модификовна геомеханичку класификацију за потребе рударства или MRMR (Mining Rock Mass Rating) је за потребе примене у рударству развио Laubscher 1975. (1977,1984) године. Извесне модификације наведене класификације су извршили Laubscher и Taylor 1976. године. Laubscher је у Африци вршио детаљна истраживања кристаластог азбеста у пет различитих геолошких окружења. Модификовна геомеханичка класификација за потребе рударства (MRMR) у обзир узима исте параметре као основна геомеханичка класификацију (RMR). Одређивање вредности MRMR се заснива на бодовању чврстоће на притисак непоремећеног стенског материјала, RQD, растојања између пукотина и стања пукотина. Интервал вредности MRMR се, као и код RMR система, креће између 0 и 100, при чему су овим вредностима обухваћене све могуће варијације које се могу затећи у испицим стенским масивима и које се могу описати од врло лошег до врло доброг. Систем бодовања је подељен у пет категорија и десет подкатегија. Пет наведених категорија носе од 0 до 20 бодова, а под категорије носе од 0 до 10 бодова.



Вредност MRMR се одређује тако што се саберу бодовања за чврстоћу непоремећеног стенског материјала, RQD, растојање између пукотина, стање пукотина. Претходно наведена бодовања појединих својстава стенског масива су приказана у табелама 4.15, 4.16, 4.17 као и на слици 4.4.

Табела 4.15- Класификовање различитих испуцалих стенских масива (Laubscher, 1984. година)

Категорија	1		2		3		4		5	
Бодовање	100 – 81		80 – 61		60 – 41		40 – 21		20 – 0	
Опис	Врло добро		Добро		Задовољавајуће		Лоше		Врло лоше	
Подкатегорија	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B

Табела 4.16- Основни поступци бодовања код MRMR класификације (Barton и Laubscher, 1984. године) – први део

$\sigma_c$ (MPa)	Бодова
> 185	20
165 – 185	18
145 – 164	16
125 – 144	14
105 – 124	12
85 – 104	10
65 – 84	8
45 – 64	6
35 – 44	5
25 – 34	4
12 – 24	3
5 – 11	2
1 – 4	1

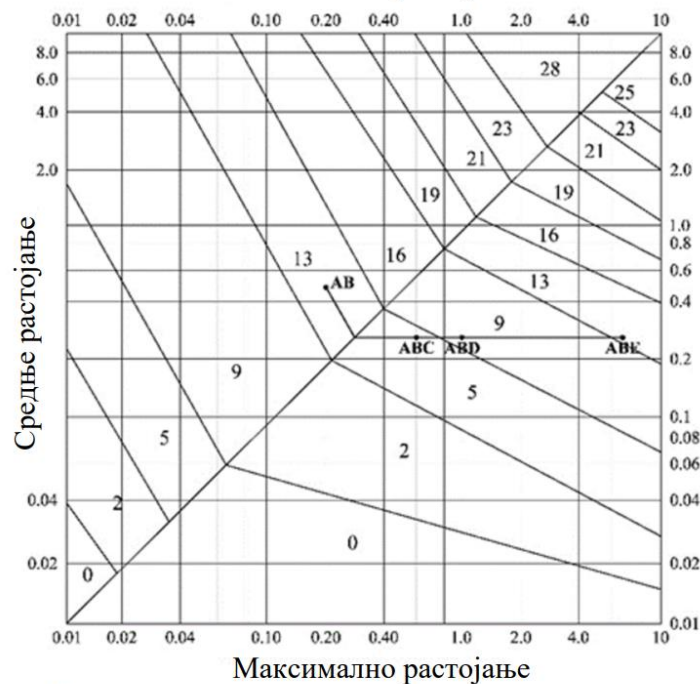
Табела 4.16- Основни поступци бодовања код MRMR класификације (Barton и Laubscher, 1984. године) – други део

RQD	Бодова
97 – 100	15
84 – 96	14
71 – 83	12
56 – 70	10
44 – 55	8
31 – 43	6
17 – 30	4
4 – 16	2
0 – 3	0





БОДОВАЊЕ ЗА СИСТЕМЕ СА  
ВИШЕ ПУКОТИНА  
Минимално растојање



Слика 4.4- Поступак бодовања за вишепукотинске системе

Laubscher (1984. године) је представио и везу између MRMR система и „in-situ“ чврстоће на притисак стенског масива следећом једначином:

$$\sigma_{cm} = \sigma_c \cdot \frac{MRMR - \text{бодовање за } \sigma_c}{100}, \quad (4.21)$$

За одређивање чврстоће стенског масива за потребе пројектовања (DRMS), MRMR класификацијом је обухваћен и утицај оријентације пукотина, као и утицај минирања и распаднутост.

Утицај претходно наведених својстава обухваћен је применом поступка редуковања бодовања и приказан је у табелама 4.17 до 4.19. Слично као и код RMR система, дате су препоруке за избор система за подграђивање на основу коначне вредности MRMR.



Табела 4.17- Поступак редуковања бодовања на основу орјентације пукотина (Laubscher, 1984. године)

Број пукотина које одређују блок	Број пукотина које имају пад од вертикалне осе				
	70 %	75 %	80 %	85 %	90 %
3	3		2		
4	4	3		2	
5	5	4	3	2	1
6	6		4	3	1; 2

Табела 4.18- Поступак редуковања бодовања на основу утицаја минирања (Laubscher, 1984. године)

Поступак	Редуковање бодовања (%)
Бушење	100
Глатко минирање	97
Добро производно минирање	94
Лоше производно минирање	80

Табела 4.19- Укупно редуковање бодовања (Laubscher, 1984. године)

	$RQD$	$\sigma_c$	Растојање пукотина	Стање пукотина	Укупно
Распаднутост	95	96	–	82	75
Положај правца и пад	–	–	70	–	70
Минирање	93	–	–	86	80



#### **4.2.10. Класификациони систем геолошког индекса чврстоће (ГСИ)**

Геолошки индекс чврстоће (GSI) су предложили Ноек и сарадници (1995. године), као допуну њиховог општег критеријума лома, а представља поступак за одређивање параметара  $s$ ,  $a$  и  $m_i$  неопходних за овај критеријум. GSI класификација врши редуковање чврстоће стенског масива на основу различитих геолошких услова. Вредност GSI

Постоје три начина за прорачун вредности GSI:

- *Применом геомеханичке класификација испуцале стенске масе (RMR) за стенски масив бољег квалитета (GSI > 25)*

$$\text{За } RMR_{76}' > 18: \quad GSI = RMR_{76}' . \quad (4.22)$$

$$\text{За } RMR_{89}' > 23: \quad GSI = RMR_{89}' - 5 . \quad (4.23)$$

У оба случаја треба претпоставити да је стање без присуства подземне воде, односно суво, на пример. код класификационог система  $RMR_{76}'$  стање подземне воде бодовати са 10 поена, а код  $RMR_{89}'$  стање подземне воде бодовати са 15 поена. Такође, приликом примене класификације не треба бодовати оријентацију пукотина (усвојити врло повољну оријентацију), собзиром да ће се стање подземних вода и оријантације пукотина узети у обзир приликом анализе самог стенског масива (Ноек и други., 1995. године). Ноек и Brown (1997. године) су препоручили да се RMR класификација примењује за одређивање GSI за стенске масиве бољег квалитета (нпр. за  $GSI > 25$  и вредности  $RMR_{76}' > 18$  и  $RMR_{89}' > 23$ ). За стенске масиве врло лошег квалитета тешко је одредити RMR на основу табела које је предложио Bieniawski (1976. године). Ноек и други (1995. године) предложили да се у оваквим случајевим примењује Q систем (Barton и други, 1974. године).



- **Применом Q класификационог система**

За све вредности Q класификације:

$$GSI = 9 \cdot \ln Q' + 44 \quad (4.24)$$

Да би се успоставила веза између Q система и GSI потребно је код примене Q система за вредности фактора утицај воде у пукотинама и њеног притиска ( $J_w$ ) и фактора утицаја напонског стања (SRF) усвојити вредности од 1.

- **Применом саме GSI класификације**

Ноек и Brown (1997. године) нису стриктно препоручили да се примењује Q класификациони систем, већ препоручују да се директно примењује GSI класификација који су они предложили (Ноек и др., 1995. године). Ноек и Brown (1997. године) су истакли да овај класификациони систем треба применити на стенски масив који није поремећен или оштећен минирањем или нестручним откопавањем.

Задатак GSI класификационог система је да се одреде својства непоремећеног стенског масива, у супротном потребно је извршити корекцију умањивањем вредности GSI које су добијене у случајевима када није доступан непоремећени стенски масив. У случају да се примењује старија верзија класификационог система пре 2002. године, потребно је да се усвоје вредности из једног реда више, уколико је чело стене оштећено минирањем. Уколико се примењује верзија из 2002. године вредности материјалних константи  $m$  и  $s$  треба кориговати за фактор оштећења ( $D$ ). Вредности фактора оштећења стенског масива ( $D$ ) су приказане у табели 4.20.







Табела 4.20- Вредности фактора оштећења стенског масива ( $D$ )

Изглед стенског масива	Опис стенске масе	Препоручена вредност $D$
	Контролисано минирање одличног квалитета или откопавање помоћу машине за копање тунела (ТВМ) најмање поремећује околну стенску масу тунела која се налази у одређеном напонском стању.	$D = 0$
	Механизовано или ручно откопавање у стенској маси лошег квалитета (без минирања) има за последицу минимално оштећење околне стенске масе. У случајевима где се јављају проблеми повећаних притисака који се огледају у већем бујању подине, оштећење може бити значајно уколико се не постави привремена подграда, као што је приказано на слици.	$D = 0$ $D = 0,5$
	Минирање врло лошег квалитета у чврстим стенама доводи до значајног локалног оштећења, које се пружа 2 до 3 м унутар околне стенске масе.	$D = 0,8$
	Минирања мањих размера за формирање косина у грађевинарству доводе до мањих оштећења стенске масе, нарочито ако се примењује контролисано минирање као што је приказано на левој страни слике. Ипак, ослобађање напона доводи до одређеног оштећења.	$D = 0,7$ Добро минирање $D = 1,0$ Лоше минирање
	Косине великих површинских копова трпе значајна оштећења услед минирања великих размера и услед ослобађања напона након уклањања отквивке. У појединим мекшим стенама могуће је откопавање вршити риповањем и гурањем и у тим случајевима степен оштећења косина је мањи	$D = 1,0$ Минирање великих размера $D = 0,7$ Машинско откопавање



Табела 4.21- Одређивање константи за непоремећени стенски масив (Ноек, Kaiser u Bawden, 1995. године)

УОПШТЕНИ НОЕК–BROWN–ОВ КРИТЕРИЈУМ		СТАЊЕ ПОВРШИНА	ВРЛО ДОБРО Врло храпаве, свеже, нераспаднуте површине	ДОБРО Храпаве, делимично распаднуте површине са мрљама од рђе	ЗАДОВОЉАВАЈУЋЕ Глатке, умерено распаднуте или алгерисане површине	ЛОШЕ Глатке, изразито распаднуте површине прекривене збијеним материјалом или са испуном од шиљатих комада	ВРЛО ЛОШЕ Глатке, изразито распаднуте површине прекривене или са испуном од меке глине			
СТРУКТУРА										
	<b>БЛОКОВИТА</b> Врло добро укљештен непоремећен стенски масив који се састоји од коцкастих блокова дефинисаних са три ортогонална система дисконтинуитета	$m_b/m$ $i$ $s$ $a$ $E_m$ $\nu$ $GSI$	0.60 0.190 0.5 75 000 0.2 85	0.40 0.062 0.5 40 000 0.2 75	0.26 0.015 0.5 20 000 0.25 62	0.16 0.003 0.5 9 000 0.25 48	0.08 0.0004 0.5 3 000 0.25 34			
		<b>ВРЛО БЛОКОВИТА</b> Укљештен, делимично поремећен стенски масив са вишестраним блоковима дефинисаних са четири или више система дисконтинуитета	$m_b/m$ $i$ $s$ $a$ $E_m$ $\nu$ $GSI$	0.40 0.062 0.5 40 000 0.2 75	0.29 0.021 0.5 24 000 0.25 65	0.16 0.003 0.5 9 000 0.25 48	0.11 0.001 0.5 5 000 0.25 38	0.07 0 0.53 2 500 0.3 25		
			<b>БЛОКОВИТА/УСЛОЈЕНА</b> Наборан и испуцао стенски масив са више дисконтинуитета који се пресецају формирајући шиљате блокове	$m_b/m$ $i$ $s$ $a$ $E_m$ $\nu$ $GSI$	0.24 0.012 0.5 18 000 0.25 60	0.17 0.004 0.5 24 000 0.25 65	12 0.001 0.5 6 000 0.25 40	0.08 0 0.5 3 000 0.3 30	0.06 0 0.55 2 000 0.3 20	
				<b>ЗДРОБЉЕНА</b> Слабо укљештен, изразито испуцао стенски масив са измешаним шиљатим и заобљеним блоковима	$m_b/m$ $i$ $s$ $a$ $E_m$ $\nu$ $GSI$	0.17 0.004 0.5 10 000 0.25 50	0.12 0.001 0.5 6 000 0.25 40	0.08 0 0.5 3 000 0.3 30	0.06 0 0.55 2 000 0.3 20	0.04 0 0.60 1 000 0.3 10

Вредности константи  $m_b/m$ ,  $s$ ,  $a$  модула деформације  $E$  и Поиссон–овог коефицијента  $\mu$  код уопштеног Ноек-Brown–овог критеријума лома зависе од структуре стенског масива и стања површина дисконтинуитета. Треба





напоменути да се вредности приказане у табели 4.21 односе на непоремећени стенски масив.

Табела 4.22- Одређивање уопштеног Геолошког индекса чврстоће (GSI) према програмском пакету „RocLab“ (Хоек 2002. године) [19]

Pick GSI Value		SURFACE CONDITIONS				
Rock Type: General		VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR
GSI Selection: 50						
STRUCTURE		DECREASING SURFACE QUALITY →				
	INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90			N/A	N/A
	BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets	80	70			
	VERY BLOCKY- interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets		60	50		
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity			40	30	
	DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces				20	
	LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes	N/A	N/A			10

Табела 4.23- Одређивање Геолошког индекса чврстоће ( ) за флишеве према програмском пакету „“ (Хоек, 2002. године) [19]

Pick GSI Value		SURFACE CONDITIONS OF DISCONTINUITIES				
Rock Type: Flysch		VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR
GSI Selection: 50						
COMPOSITION AND STRUCTURE						
	A. Thick bedded, very blocky sandstone The effect of pelitic coatings on the bedding planes is minimized by the confinement of the rock mass. In shallow tunnels or slopes these bedding planes may cause structurally controlled instability.	70				
	B. Sandstone with thin inter-layers of siltstone	60	A			
	C. Sandstone and siltstone in similar amounts		50	B		
	D. Siltstone or silty shale with sandstone layers			40	C	
	E. Weak siltstone or clayey shale with sandstone layers				30	D
C,D, E and G - may be more or less folded than illustrated but this does not change the strength. Tectonic deformation, faulting and loss of continuity moves these categories to F and H.						20
	F. Tectonically deformed, intensively folded/faulted, sheared clayey shale or siltstone with broken and deformed sandstone layers forming an almost chaotic structure					F
	G. Undisturbed silty or clayey shale with or without a few very thin sandstone layers					G
	H. Tectonically deformed silty or clayey shale forming a chaotic structure with pockets of clay. Thin layers of sandstone are transformed into small rock pieces.					H 10

→ : Means deformation after tectonic disturbance



На крају представљања класификација, може се закључити да класификација геолошког индекса чврстоће представља класификациони систем који је за потребе Ноек-овог критеријума лома GSI настао као допуна класификационих система који нису могли у потпуности да окарактеришу стање стенског масива.

Као основа класификационих система за потребе формирања геомеханичког модела за стенске материјале, кључни класификациони системи се односе на:

- RMR класификациони систем,
- GSI класификациони систем и
- RQD класификацију, као показатеља квалитета стенске масе.

Остли систем класификације представљају или допуне поменутих класификационих система или системе који су засновани на класификацији подземних рударских објеката.





## **5. ИЗБОР РАЧУНСКИ ВРЕДНОСТИ СВОЈСТАВА СТЕНСКОГ МАТЕРИЈАЛА**

Дефинисаним геомеханичким моделом испуњени су сви потребни услови за приступ избора рачунски вредности својстава стенског материјала за потребе пројектовања косина површинских копова. Неопходни чиниоци за избор рачунски вредности су подаци који имају директан утицај. Ти чиноци су:

- Запреминска тежина стенског материјала,
- Чврстоћа на притисак,
- Чврстоћа на затезање,
- Чврстоћа на смицање.

Дефинисањем поменутих чинилаца стичу се коначни услови за избор вредности на основу којих ће бити приступљено геомеханичкој провери стабилности рударских обејаката, што чини последњи корак у ланцу за израду овог завршног рада.

### **5.1. Запреминска тежина стенског материјала**

#### ▪ *Специфична тежина*

Под појмом специфичне тежине или запреминске тежине чврсте фазе подразумева се однос између тежине узорка у сувом стању и запремине узорка без пора и шупљина, односно:

$$\gamma_s = \frac{G_s}{V_s} \quad (5.1)$$

где је:

$G_s$  – тежина узорака у сувом стању, N,

$V_s$  – Запремина узорака без пора и шупљина, m<sup>3</sup>

#### ▪ *Запреминска тежина у природном стању*

Под појмом запреминске тежине у природном стању подразумева се однос тежине и запремине узорка у природном стању влажности:



$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (5.2)$$

где је:

$G$  – тежина узорака у природном стању влажности,  $N$ ,

$V$  – Запремина узорака са порама и шупљинама,  $m^3$

Одређивање запреминске масе у природном стању или густоће у масиву, која представља однос између масе и запремине узорка у природном стању влажности, врши се потапањем узорка у воду и мерењем истиснуте течности уз претходно парафинисање и мерење масе узорка.

▪ **Запреминска тежина у сувом стању**

Под појмом запреминске тежине у сувом стању подразумева се однос између тежине узорка у сувом стању и првобитне запремине узорка:

$$\gamma_d = \frac{G_s}{V} \quad (5.3)$$

где је:

$G_s$  – тежина узорака у сувом стању,  $N$ ,

$V$  – Запремина узорака са порама и шупљинама,  $m^3$

▪ **Насипна запреминска тежина**

У експлоатацији минералних сировина од изузетног значаја је познавање насипне запреминске тежине која представља однос између тежине и запремине стенског материјала који је добијенодговарајућим начином откопавања. Ова физичка особина је у директној зависности од коефицијента растреситости испитиваног материјала што је у директној вези од примењене методе откопавања или примењеног начина добијања. Одређивање насипне запреминске тежине своди се на мерење тежине на одређени начин добијеног материјала који је смештен у одговарајућу запремину без накнадног растресања или збијања уз регистровање природне влажности у моменту испитивања. Познавање напред наведених физичких величина је од изузетног значаја у експлоатацији минералних сировина ради добијања података о рудним



резервама, прорачуну елемената транспорта, одлагања материјала и сагледавања радне средине као физичке величине. [33]

За потребе извора рачунски вредности користи се вредност запреминске тежине у природном стању влажности.

## 5.2. Чврстоћа на притисак

Сигурно једна од основних механичких особина у чије истраживање се улажу и улагаће се знатна средства што као резултат има велики број различитих метода од којих ће се обрадити оне најчешће.

Чврстоћа на притисак при једноаксиалном оптерећењу представља однос силе која је довела узорак до лома и површине узорка која је била изложена дејству силе:

$$\sigma_c = \frac{P}{A}, \quad (5.4)$$

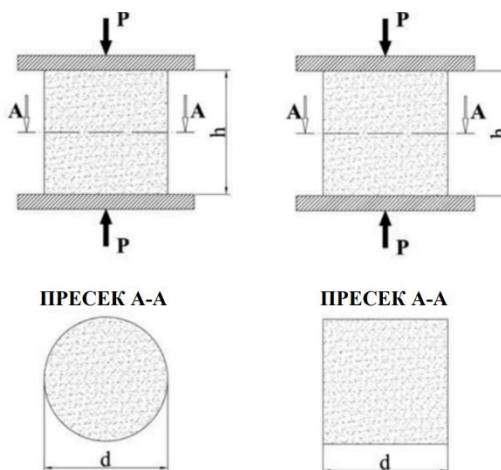
где је:

$\sigma_c$ - чврстоћа на притисак при једноаксиалном оптерећењу, N/m<sup>2</sup>

P- сила која је довела до лома, N,

A- површина узорка, m<sup>2</sup>.

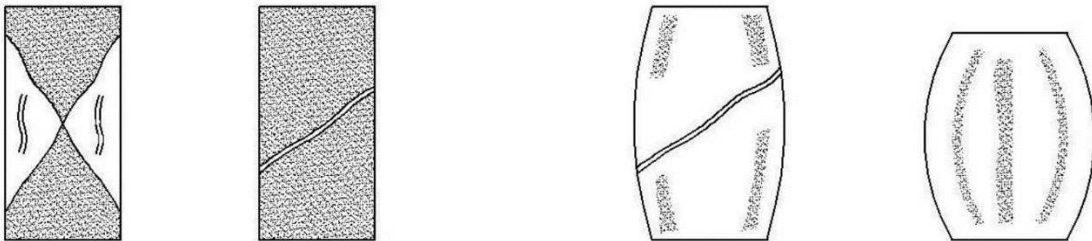
Испитивање ове механичке особине врши се, по правилу, на пробним телима правилног облика, ваљак или коцка, различитих димензија уз услов да је однос висине и пречника ваљка за чврсте стенске материјале 1, а за пластичне материјале 2. [33]



Слика 5.1- Изглед облика пробних тела за испитивање чврстоће на притисак



Не улазећи, овом приликом, на разлике које се јављају приликом испитивања чврстих и пластичних стенских материјала, карактеристично је да се уз регистровање одговарајуће чврстоће на притисак може одредити и такозвани. угао лома „ $\alpha$ “ (угао под којим долази до лома узорка) помоћу кога се може уз коришћење теорије Mohr-овог круга напона оријентационо одредити угао унутрашњег трења и кохезија.



Слика 5.2- Шема кртог лома и пластичног лома [33]

Према хипотези проф. Протођаконова постоји оправдање да се на све стене и минералне сировине примене закони који важе за невезане стене, па се механичка карактеристика чврстих стена:

$$\tau = \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi + c, \quad (5.5)$$

дели нормалним напонам „ $\sigma$ “ и добија „привидни“ коефицијент трења или коефицијент чврстоће:

$$f = \frac{c}{\sigma} + f', \quad (5.6)$$

где су:

$f$ - коефицијент чврстоће

$f'$ -коефицијент трења

Овако предложени коефицијент чврстоће исказује релативни отпор стене према спољним силама и послужио је као основа за класификацију стенског масива, што је приказано у табели 5.1.



Табела 5.1- Класификација стена по коефицијенту чврстоће [33]

Категорија	Опис стене	Врста стенског материјала	Коефицијент чврстоће $f$
I	Ванредно чврсте стене	Кварцити и најчешће остале стене, базлти	20
II	Врло чврсте стене	Чврсти гранити, масивна руда гвожђа, кварц, порфири, кречњак	15
III	Чврсте стене	Чврсти кречњаци и пешчари, гранит..	10
IIIa	Чврсте стене	Кречњаци, слаб гранит, пирит..	8
IV	Доста чврсте стене	Обични пешчар, руде гвожђа..	6
V	Средње чврсте стене	Слаб кречњак и пешчар	4
Va	Средње чврсте стене	Шкриљци, једри лапорци	3
VI	Доста меке стене	Шкриљци, једри лапорци, меки кварцити	2
VIa	Доста меке стене	Меки кречњаци, лапорци, угљеви	1,5
VII	Меке стене	Слаб пешчар, угаљ, глинац	1,0
VIIa	Меке стене	Угаљ, збијене глине, глина, тресет	0,8
IX	Земљаста тља	Меки угљеви, меке глине..	0,5
X	Муљева тла	Муљ, мочварно тло, излужени лес	0,3

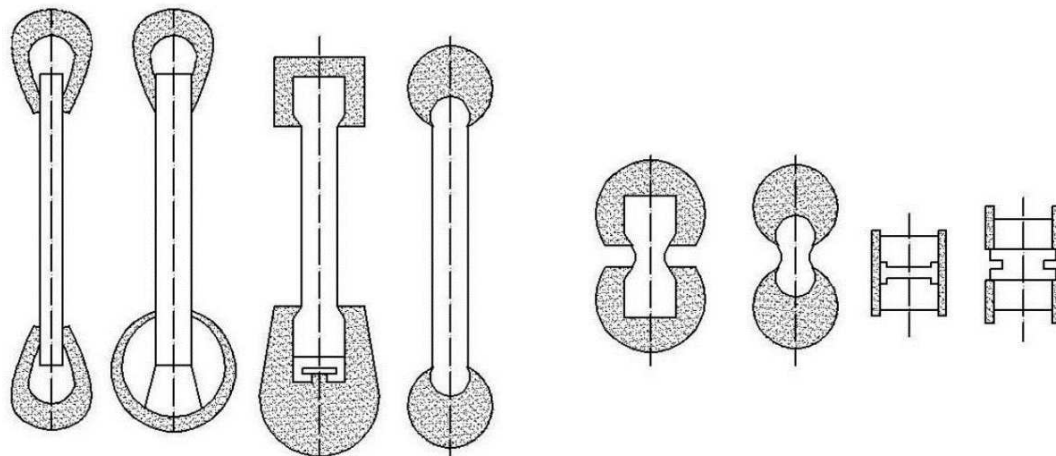
Треба нагласити да се код слојевитих стенских материјала разликује чврстоћа на притисак управно на слојење и чврстоћа на притисак паралелно слојењу у зависности од тога да ли сила делује управно или паралелно на слојење.

### 5.3. Чврстоћа на затезање

Познате су директне и индиректне методе испитивања чврстоће на истезање. Директне методе испитивања чврстоће на истезање састоје се од израде пробних тела облика издужене призме и пресека који може бити круг, квадрат или правоугаоник и постављањем таквих огледних „епрувета“ у



одговарајуће држаче који обезбеђују да се врши испитивање истезања у кидалицама различитог типа.



*Слика 5.3- Држачи за испитивање, чврстоће на истезање [33]*

Чврстоћа на затезање добија се из израза

$$\sigma_t = \frac{P}{A}, \quad (5.7)$$

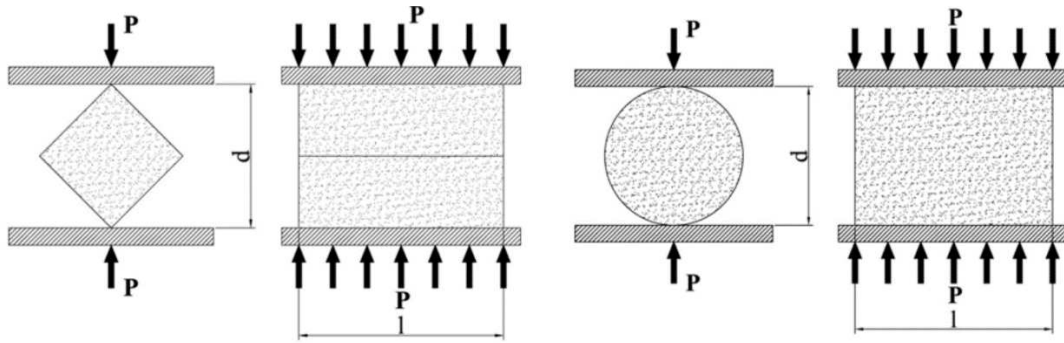
где је:

$\sigma_t$ - чврстоћа на затезање, N/m<sup>2</sup>

P- сила која је довела до лома, N,

A- површина узорка, m<sup>2</sup>.

Имајући у виду велике проблеме који се јављају при изради пробних тела призматичног облика као и проблеме причвршћења ових тела у држачима, развиле су се одговарајуће индиректне методе испитивања које се свODE на постављање пробних тела у одговарајући положај и оптерећење истих силом притиска до лома. Једна од најпознатијих метода из ове групе позната је као „Бразилска метода“ која се свODE на постављање пробних тела ваљкастог или коцкастог облика у пресу одговарајућег типа на начин како је то приказано на слици 5.4. [33]



Слика 5.4- Испитивање чврстоће на затезање [33]

Чврстоћа на затезање пробног тела облика коцке износи:

$$\sigma_t = 0.734 \frac{P}{h \cdot l'} \quad (5.8)$$

где је:

$h$  – дијагонала квадрата, оса симетрије коцке, m

$l$  – страница коцке m

Чврстоћа на затезање пробног тела облика коцке износи: [33]

$$\sigma_t = 0.637 \frac{P}{d \cdot l'} \quad (5.9)$$

где је:

$d$  – пречник ваљка, m

$l$  – дужина ваљка, m

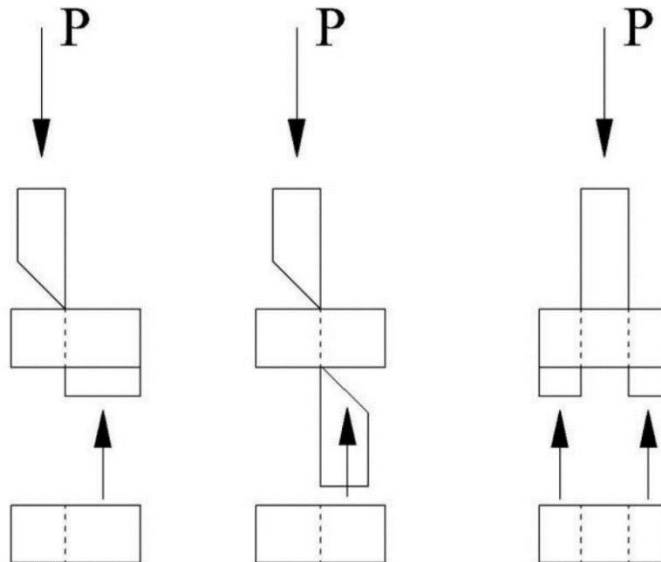
#### 5.4. Чврстоћа на смицање

Постоји велики број метода за испитивање чврстоће на смицање, па ће се у овом поглављу приказати две методе које се примењују за испитивање чврстих стена, док постоји и једна од метода испитивања за пластичне и растресите материјале позната као „опит директног смицања“. Одређивања угла унутрашњег трења и кохезије. [33]



▪ **Класично испитивање чврстоће на смицање**

Ово испитивање изводи се на пробним телима призматичног облика, пресека круга или квадрата, која се постављају у уређаје за испитивање па у зависности од тога да ли се ради о једностраном или двостраном смицању одређује се чврстоћа на смицање, шематски приказ дат је на слици 5.5. [33]



Слика 5.5- Шематски приказ једностраног и двостраног смицања [33]

Чврстоћа на смицање се добија из следећих једначина:

$$\tau = \frac{P}{A}, \quad (5.10)$$

$$\tau = \frac{P}{2A}, \quad (5.11)$$

где је:

$\tau$  – чврстоћа на смицање  $N/m^2$

$P$  – сила која је довела узорак до лома,  $N$

$A$  – површина узорка,  $m^2$

На основу дефинисаних чинилаца за избор рачунски вредности, створени су сви потребни услови да се неопходне вредности усвоје, прорачунају и статистички обраде. На основу свих чинилаца можемо извршити





поступак избора, и по завршеном поступку приступити геомеханичкој провери рударских објеката. Теренским огледом смицања у великој размери стичу неходни параметри за одређивање вредности когезијеи угла унутрашњег трења, где добијена вредност одсечка на ординатној оси представља вредност кохезије која се добија по једначини:

$$\tau = \sigma \cdot \operatorname{tg}\varphi + c, \quad (5.12)$$

Док вредност угла унутрашњег трења биће представљена нахибом праве  $\tau=f(\sigma)$  према апцисиној оси.

На тај начин обезбеђени су подаци за анализу стабилности и све наредне прорачуне који буду били постављени пред инжењере из области геомеханике.  
[33]



## **6. ЗАКЉУЧАК**

Утврђивање рачунских вредности неопходних података за потребе пројектовања косина површинских копова представљају веома сложен и дуг процес за инжењере из области геомеханике при пројектовању. Да бисмо извршили избор рачунски вредности пред инжењере се ставља низ захтева које је потребно испунити како би били задовољени услови за пројектовање у геомеханици. Полазна основа у процесу избора података за пројектовање је прикупљање података са површинског копа. То представља захтеван посао, како би на основу добијених параметара са површинског копа могли да се дефинишу даљи кораци које следе ка избору рачунски вредности. Неопходно је формирати квалитетну базу података у оквиру које се прикупљају и анализирају различите карактеристике стенског масива који је обухваћен површинским копом, а требали би да обухвате механичка својства, структурна својства, хидрогеолошка својства..., а која су потребна да би се формирао одговарајући геомеханички модел. Формирање геомеханичког модела је кључни чинилац овог завршног рада ка избору рачунских вредности својстава стенског материјала. До формирања геомеханичког модела, неопходно је на основу података са површинског копа уз инжењерске приступе установити одговарајући критеријум лома стенског материјала. Одређивањем критеријума лома ствара се перцепција о стању стенског материјала који се даље класификује одговарајућим системом класификације. У циљу формирања геомеханичког модела, односно одређивања критеријума лома, испитивање чврстоће на одговарајући начин представља основу како би био формиран комплетан геомеханички модел, и како би приступили процесу избора рачунски вредности. При одређивању чврстоће лабораторијским испитивањем је неопходно пробно тело подвргнути различитим притисцима како би „in-situ“ стање стенског масива могли на што квалитетнији начин интерпретирати. Последњи корак који се ставља пред инжењере је избор рачунски вредности на основу свих расположивих података који су обрађени. За те потребе одређују се кључни чиниоци који директно утичу на вредности при анализи и



пројектовању у геомеханици. Подаци као што су запреминска тежина, чврстоћа на притисак, чврстоћа на затезање, чврстоћа на смицање представљају основне ставке ка избору рачунски вредности. Избор рачунских вредности одговарајућих својстава стенског материјала се заснива на примени статистичке обраде расположивих података, а на основу чега се врши усвајање улазних вредности за потребе дефинисања геомеханичког модела као основе за анализу стабилности косина површинских копова. Осетљивост поменутих података је на високом нивоу и са инжењерске тачке гледишта треба посебну пажњу посветити прикупљању података, интерпретацији истих, као дефинисању и непоходних корака које је потребно извршити у циљу формирања геомеханичког модела. На основу квалитетне обраде података, интерпретације и дефинисања рачунски вредности израдом стварају се сви неопходни услови на основу којих инжењери из области геомеханике могу приступити геомеханичкој провери стабилности рударских објеката и задовољавању услова сигурности за обављање рударских активности на изграђеним објектима.

**Кандидат:**

**Александар Милијановић**

**Број индекса: P510/21**

**У Београду, 21. 09. 2022.**



## **7. ЛИТЕРАТУРА**

- [1] Геомеханичка истраживања стенског масива за потребе складиштења материјала у откопаном простору, мр Владимир Р. Чебашек, Београд, новембар 2010. година
- [2] Guidelines for open pit slope design, John Read, Peter Stacey, Australia, 2010.
- [3] Rock Mechanics for underground mining, B. H. G. Brady, E. T. Brown, United States of America
- [4] Underground Excavation in Rock, Hoek E., Brown E. T., Institution of Mining and Metallurgy, London, 1980.
- [5] Empirical strength criterion for rock masses, Hoek E., Brown E. T., j. Geotech.-Engng-Div., ASCE 106 (GT9), 1013-1035 1980.
- [6] Strength of jointed rock masses, Hoek E., 23<sup>rd</sup> Rankine Lecture, Geotechnique 33 (3) 187-223, 1983.
- [7] The Hoek–Brown failure criterion – a 1988 update, Hoek E., Brown E. T., Proc. 15th Canadian Rock Mech. Symp. (ed. J.H. Curran) pp. 31–38, Toronto: Civil Engineering Dept., University of Toronto, 1988.
- [8] Estimating Mohr–Coulomb friction and cohesion values from the Hoek–Brown failure criterion. Intl. J. Rock Mech. & Mining Sci. & Geomechanics Abstracts. 12(3), 227–229, Hoek E., 1980.
- [9] A modified Hoek–Brown criterion for jointed rock masses. Proc. rock characterization, symp. Int. Soc. Rock Mech.: Eurock '92, (J. Hudson ed.) 209–213, Hoek E., Wood D. i Shah S., 1992.
- [10] Strength of rock and rock masses, ISRM News Journal, 2(2), 4–16, Hoek E., 1994.
- [11] Support of underground excavations in hard rock, Hoek E., Kaiser P.K. i Bawden W. F., Rotterdam: Balkema, 1995.
- [12] Practical estimates of rock mass strength. Intl. J. Rock Mech. & Mining Sci. & Geomechanics Abstracts. 34(8), 1165–1186, Hoek E., Brown E. T, 1997.



- [13] Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses. The case of the Athens Schist Formation. Bull. Engg, Geol. Env. 57(2), 151–160, Hoek E., Marinos P., Benissi M. 1998.
- [14] Predisting Tunnel Squeezing. Tunnels and Tunneling International..., Hoek E., Marinos P, 2000.
- [15] From The Geological to Rock Mass Model: Driving the Egnatia Highway through difficult geological conditions, Marinos P., Hoek E., Northern Greece, Proc. 10<sup>th</sup> Intenational Conference of Italian National Council of Geologist, Rome, 2000.
- [16] Rock–Mass properties for surface mines. In Slope Stabilitz in Surface Mininig (Edited by W. A. Hustralid, M. K. McCarter i D. J. A. von Zyl), Littleton, CO: Society for Mininig, Metallurgical and Exploration (SME), strane 59–70, Hoek E., Karzulovic A., 2000.
- [17] GSI: A geological friendly tool for rock mass strength estimation, Proceedings of the Intenational Conference on Geotechnical & Geological Engineering (GeoEng 2000, Technomic Publishing Co. Inc., strane. 1422–1440, Marinos P., Hoek E., Melbourne, Australia, 2000.
- [18] Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch, Bulletin of the Engineering Geology & Enviroment (IAEG) 60, 85–92., Marinos P., Hoek E. 2001.
- [19] Hoek–Brown failure criterion – 2002 edition. Proc. North American Rock Mechanics Society meeting, Hoek E., Carranza–Torres C. T. i Corkum B., Toronto, 2002.
- [20] Geotechnical Characterisation of Soils and Rocks: a Geological Perspective. Keynote paper in: Advances in geotechnical engineering. The Skempton conference, v1, strane. 67–102, Thomas Telford, ICE, Chandler R. J., De Freitas M. H. i Marinos P. G., London, 2004.
- [21] The Geological Strength Index: applications and limitations, Bull. Eng. Geol. Environ., 64, 55–65, Marinos V., Marinos P., Hoek E. 2005.



- [22] Characterization and engineering properties of tectonically undisturbed but lithologically varied sedimentary rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 42/2, 277–285, Hoek E., Marinos P., Marinos V., 2005.
- [23] Variability of the engineering properties of rock masses quantified by the geological strength index: the case of ophiolites with special emphasis on tunnelling. *Bull. Eng. Geol. Env.*, 65(2), 129–142, Marinos P., Hoek E., Marinos V., 2006.
- [24] Empirical estimation of rock mass modulus. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43, 203–215, Hoek E., Deiderichs M. S., 2006.
- [25] The Hoek-Brown failure criterion and GSI edition, E. Hoek, E.T. Brown, 2018, <https://www.sciencedirect.com/journal/journal-of-rock-mechanics-and-geotechnical-engineering>, 2018.
- [26] Strain Gauges Available <https://www.controls-group.com/eng/moe-accessories-compressometers/strain-gauges.php>
- [27] Quantification of the Geological Strength Index Chart, Hoek E., Carter T. G., Diederichs M. S., San Francisco, CA, USA, 2013.
- [28] Technical description of rock mass for engineering purposes. *Felsmechanik und Ingenieurgeologie (Rock Mechanics and Engineering Geology)*, 1 (1, 16-22, Deere, D.U., 1963.)
- [29] International Society for Rock Mechanics. Committee on Laboratory Tests. Suggested method for determining the uniaxial compressive strength of rock material. Document No. 1, first revision (March 1977).
- [30] ASTM. Standard method of test for triaxial compressive strength of undrained rock core specimens without pore pressure measurements. ASTM Designation D 2664-67.
- [31] Kovari K., Tisa A. Höchstfestigkeit und Restfestigkeit von Gesteinen im Triaxialversuch. Institut für Strassen- und Untertagbau an der ETH Zürich. Mitteilung Nr. 26.
- [32] Mechanical properties of materials, David Roylance, 2008.



[33] Механика стена и тла, Универзитет у Београду, Рударско – геолошки факултет, Београд, 2015.

## ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ ЗАВРШНОГ РАДА

Име и презиме студента Александар Милијановић

Број индекса P510/21

### Изјављујем

да је завршни рад под насловом

Избор рачунаских вредности својствених стених  
материјала за потребе пројектовања косих позршних  
капаца

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

У Београду, 21.09.2022.

Потпис студента

\_\_\_\_\_



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

Име (име родитеља) и презиме студента Александар (Дејан) Милијановић

Број индекса Р510/21

Студијски програм Рударски инжењерство

Наслов рада Израда техничких вредности електрог статичког материјала за потребе пројектовања космичких површинских канала

Ментор Проф др Владимир Чешшек, редовни професор

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

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

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

У Београду, 20.09.2022

**Потпис студента**

---

## ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ ЗАВРШНОГ РАДА

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

Избор рачунаскy вредности изјетног стандарта  
историјалне за потребе пројектовања катане  
пазиштинских катане

који је моје ауторско дело.

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

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

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

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

1. Ауторство (CC BY)

2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)

3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)

5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)

6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

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

У Београду, 21.09.2022.

Потпис ментора

Потпис студента

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Библиотека Рударско-геолошког факултета

---

**ПОТВРДА**

**О ПРЕДАЈИ ЕЛЕКТРОНСКЕ ВЕРЗИЈЕ ЗАВРШНОГ РАДА**

Потврђује се да је студент Александар (Дејан) Милутиновић,  
(име (име родитеља) презиме)

бр. индекса Р510 / 21 предао/ла електронску верзију завршног рада на  
основним/мастер академским студијама под насловом:

Избор рачуњски вредности свјетске станице  
материјала за потребе пројектовања камена  
површинских капова

који је урађен под менторством Проф. др Владимир Чебошук, редовни професор  
(име, презиме и звање)

за Дигитални репозиторијум завршних радова РГФ-а.

Потврда се издаје за потребе Одељења за студентска и наставна питања и не може се  
користити у друге сврхе.

У Београду, 20. 03. 2022.

Библиотекар

---