

Развој модела конструкције просторија отварања рудника са подземном експлоатацијом; Development of a modelling for openings in the underground mines

Dražana M. Tošić



Дигитални репозиторијум Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду

[ДР РГФ]

Развој модела конструкције просторија отварања рудника са подземном експлоатацијом; Development of a modelling for openings in the underground mines | Dražana M. Tošić | Универзитет у Београду | 2016-08-26 | |

<http://dr.rgf.bg.ac.rs/s/repo/item/0004058>

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
РУДАРСКО-ГЕОЛОШКИ ФАКУЛТЕТ

Дражана М. Тошић

**РАЗВОЈ МОДЕЛА КОНСТРУКЦИЈЕ
ПРОСТОРИЈА ОТВАРАЊА РУДНИКА
СА ПОДЗЕМНОМ ЕКСПЛОАТАЦИЈОМ**

докторска дисертација

Београд, 2016.

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MINING AND GEOLOGY

Dražana M. Tošić

**DEVELOPMENT OF A MODELLING FOR
OPENINGS IN THE UNDERGROUND
MINES**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2016.

Ментор:

др Војин Чокорило, редовни професор

Ужа научна област: Механизација у рударству и енергетици

Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет у Београду

Чланови комисије:

1. др Војин Чокорило, редовни професор

Ужа научна област: Механизација у рударству и енергетици

Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет у Београду

2. др Владимир Милисављевић, ванредни професор

Ужа научна област: Механизација у рударству и енергетици

Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет у Београду

3. др Александар Цвијетић, доцент

Ужа научна област: Заштита на раду и заштита животне средине

Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет у Београду

4. др Владимир Малбашић, ванредни професор

Ужа научна област: Површинска експлоатација минералних сировина

Универзитет у Бањој Луци, Рударски факултет у Приједору

5. др Јово Миљановић, ванредни професор

Ужа научна област: Подземна експлоатација минералних сировина

Универзитет у Бањој Луци, Рударски факултет у Приједору

Датум одбране:

Развој модела контрукције просторија отварања рудника са подземном експлоатацијом

Резиме

Приликом израде подземних просторија у стијенској маси долази до нарушавања природне равнотеже напонских стања стијенског масива који су владали прије израде тих просторија, при чему долази до појаве прерасподјеле напона и његове концентрације у појединим правцима и тачкама, односно долази до појаве пластичних деформација које су праћене ломљењем стијенске масе и кретањима материјала према откопаном простору.

Основни задатак ове дисертације је развој модела стијенског масива у околини просторија отварања. Примјењивост модела ће бити приказана за моде конструкције просторије отварања за рудно лежиште боксита "Подбраћан" Милићи, у циљу процјене деформација и напона стијенске масе приликом израде тих подземних просторија.

На основу процјене понашања стијенске масе око откопа потребно је извршити адекватан избор осигуравања откопаних простора за краћи временски период и осигуравања просторија отварања за дужи временски период у циљу спречавања њиховог зарушавања.

Модел који ће бити представљен у овој дисертацији у великој мјери помаже доносиоцу одлуке да на основу дефинисаних критеријума и интерпретације напонских стања, може да изврши избор система за подграђивање за просторије у нестабилној радној средини и на тај начин осигура капиталне просторије рудника за период вијека трајања рудника. У циљу избора оптималне просторија отварања за дату радну средину и избора подградних конструкција у циљу побољшања безбједности подземних просторија и објеката и људи, проблем је рјешаван кроз објашњења свих утицајних параметара, одређених методологија за прорачун и дата интерпретација примјењеног модела. Добијени резултати ће послужити као основа за формулисање алгоритма математичких зависности одређених

параметара и извршена упоредна анализа утицаја напонских стања за конкретан примјер израде подземне просторије отварања у лежишту "Подбраћан", Република Српска.

Кључне ријечи: модел, метод коначних елемената, просторија отварања, напон, деформација стијенског масива, алгоритам функционалних зависности

Научна област: Рударско инжењерство

Ужа научна област: Подземна експлоатација лежишта минералних сировина

УДК: 622.281/.289(043.3)

622.268.1/.8:624.131.21(043.3)

622.272.6(043.3)

Development of a modelling for openings in the underground mines

Abstract

During the construction of the underground stopes in the rock mass, comes to disrupting the natural balance of rock mass stress states that existed prior these facilities in and leads to the redistribution of stress and its concentration in certain directions and points, and comes to the appearance of plastic deformation, that are monitoring hydraulic fracturing rock mass and movements of materials to the excavated area. The main task of this thesis is to develop a model of rock massif around opening. The applicability of the model will be displayed for the model construction of the opening for bauxite ore deposit "Podbraćan" Milići, in order to estimate stress and deformation of the rock mass around the openings. According to the basis of rock mass behavior around the stope it is necessary to ensure the selection of adequate support of openings for short periods and ensuring that openings for a longer period in order to prevent their caving. The model will be presented in this thesis greatly helps to the decision on the basis of the defined criteria and interpretation of stress conditions, for support elements for underground openings in an unstable work environment and thus provide capital for the period rooms of the mine life of the mine . In order to select the optimal premises opening for a given work environment and the choice of supporting construction in order to improve the safety of underground stopes and facilities and people, the problem is solved through the explanations of all parameters which have influence, the specific methodologies for the calculation and interpretation of data applied model. The results will serve as a basis for the formulation of mathematical algorithms depending on the certain parameters and comparative analysis of the impact of stress conditions for a concrete underground opening in the ore deposit "Podbraćan", Republic of Srpska.

Key words: modelling, finite method, strain, rock mass deformation

Scientific discipline: Mining engineering

Scientific subdiscipline: Underground mining

UDC: 622.281/.289(043.3)

622.268.1/.8:624.131.21(043.3)

622.272.6(043.3)

САДРЖАЈ

1. УВОД	1
1.1. Значај и циљ истраживања	3
1.2. Структура дисертације са кратким прегледом поглавља	4
2. ПРЕГЛЕД ДОСАДАШЊИХ ИСТРАЖИВАЊА	5
2.1. Дефинисање параметара	5
2.1.1. Стијенска маса	5
2.1.2. Класификација стијенске масе	7
2.1.2.1. Показатељ квалитета стијенске масе (<i>RQD систем</i>)	9
2.1.2.2. Систем оцјене квалитета стијенске масе (<i>RMR систем</i>)	12
2.1.2.3. Индекс квалитета стијенске масе (<i>Q систем</i>)	13
2.1.2.4. Геолошки индекс чврстоће (GSI)	16
2.1.2.5. Класификација стијенске масе по Lauffer-у	18
2.1.3. Параметри стијенске масе	21
2.1.3.1. Чврстоћа стијенске масе	21
2.1.3.2. Модул еластичности	22
2.2. Критеријуми лома стијенске масе	25
2.2.1. Mohr- Coulomb критеријум	26
2.2.2. Hoek-Brown критеријум	28
2.3. Метода пројектовања у подземној експлоатацији	32
2.3.1. Аналитичке методе	32
2.3.2. Нумеричке методе	33
2.3.2.1. Модел континуума	37
2.3.2.2. Модел дисконтинуума	38
2.3.3. Метода коначних елемената	40
2.3.3.1. Phase ² програм	41
2.4. Анализа напонских стања у стијенској маси	43
2.4.1. Примарно напонско стање	43
2.4.2. Секундарно напонско стање	49
2.4.3. Стање напона око подземних просторија различитог попречног	

	52
пресјека	
2.4.4. Критеријум избора оптималног профила подземне просторије отварања	57
2.5. Избор оптималног начина подграђивања	60
2.5.1. Врсте подграде	69
2.5.1.1. Подграђивање сидрима	69
2.5.1.2. Подграда од бетона	79
2.5.1.3. Челична подграда	81
2.5.1.4. Подграда од дрвета	83
2.6. Примјена нумеричког моделирања у слојевитим рудним лежиштима	84
2.6.1. Amadei-а и Goodman приступ за израду модела у услојеној стијенској маси	87
2.6.2. Параметри и резултати анализе за модел у услојеним стијенским масама	90
2.7. Примјена математичког програма <i>MatLab</i>	91
3. РАЗВОЈ МОДЕЛА КОНТРУКЦИЈЕ ПРОСТОРИЈА ОТВАРАЊА РУДНИКА СА ПОДЗЕМНОМ ЕКСПЛОАТАЦИЈОМ	93
3.1. Дефинисање проблема	93
3.2. Моделирање радне средине	100
3.2.1. Поставке нумеричког модела	100
3.2.2. Израда геомеханичког модела за анализу напонских стања у масиву	103
3.3. Избор величине и облика просторија отварања	109
3.3.1. Избор попречног пресјека подземне просторије отварања према критеријуму механизације	109
3.3.1.1. Димензионисање подземних просторија кружног попречног пресјека	111
3.3.1.2. Димензионисање подземних просторија нискозасвођеног попречног пресјека	112
3.3.1.3. Димензионисање подземних просторија правоугаоног попречног пресјека	113

3.3.1.4. Димензионисање подземних просторија високозасвођеног попречног пресјека	113
3.3.2. Избор попречног пресјека подземне просторије по критеријуму протока ваздуха	114
3.4. Избор наповољније радне средине	117
3.4.1. Избор оптималне радне средине у лежишту за лоцирање просторија отварања	117
3.5. Избор најповољнијег система подграђивања	119
3.5.1. Избор система за подграђивања просторије отварања на основу примјењених модела	119
3.5.2. Основни критеријум адекватног избора сидара	121
3.5.3. Модели система подграђивања сидрима	123
3.6. Алгоритам зависности параметара нумеричке анализе	124
4. ПРИМЈЕНА РАЗВИЈЕНОГ МОДЕЛА НА ПРИМЈЕРУ РУДНОГ ЛЕЖИШТА "ПОДБРАЋАН"	128
4.1. Опис лежишта	128
4.2. Геолошка грађа лежишта "Подбраћан"	129
4.3. Структурне карактеристике лежишта	131
4.4. Хидрогеолошке карактеристике лежишта	133
4.5. Анализа улазних параметара за потребе моделирања	134
4.5.1. Геомеханички параметри стијенске масе	134
4.5.2. Примарно напонско стање у рудном лежишту	135
4.5.3. Преглед кориштених података у напонско-деформационој анализи	136
4.5.4. Избор оптималне подземне просторије	137
4.5.4.1. Просторије типа А	138
4.5.4.2. Просторије типа В	141
4.5.5. Избор најповољније радне средине за лоцирање просторија отварања	142
4.5.6. Предлог система подграђивања	143
4.5.6.1. Улазни подаци за дефинисање алгоритма	145
4.5.6.2. Избор оптималног система подграђивања	147
4.5.6.3. Резултати анализе	149

4.6.	Коментар добијених резултата	153
5.	ЗАКЉУЧЦИ И ПРЕПОРУКЕ ЗА ДАЉА ИСТРАЖИВАЊА	155
5.1.	Закључци истраживања	155
5.2.	Препоруке за даља истраживања	159
	ЛИТЕРАТУРА	162

1. УВОД

Због великих инвестиционих улагања приликом израде капиталних просторија у рудницима са подземном експлоатацијом потребно је вршити процјену утицаја свих неповољних фактора на стабилност тих просторија прије и након њене израде.

У зависности у каквој радној средини се раде подземне просторије потребно је сагледати све геолошке услове и концепте механике стијена. Због комплексних услова процјене понашања стијенске масе за сваку геометрију откопа и методу откопавања у руднику са подземном експлоатацијом у новије вријеме ти проблеми се рјешавају примјеном савремених рачунарских технологија. У рударству и механици стијена данас се сви проблеми могу ефикасно рјешавати примјеном различитих метода нумеричких модела.

Основни појам који се у највећем обиму тиче ове проблематике је појам стијенске масе односно концепт њеног понашања. Стијенска маса у природним условима представља нехомоген, анизотропан, нееластичан и испрекидан материјал.

То се првенствено односи на присуство дисконтинуитета у геолошкој структури стијенске масе који увелико могу утицати на стабилност ових просторија и откопа али и дисконтинуитета који могу настати приликом израде тих просторија.

Поред наведеног посебно је важно и присуство *in-situ* напона у стијенској маси око израђене подземне просторије које се лоцирају на различитим дубинама, пошто се вриједности ових напона повећавају са повећањем дубине.

У складу са наведеним, проблематику одржавања капиталних просторија у подземним производним системима у неслојевитим лежиштима стабилним за одређени временски рок је у основи потребно рјешавати са више аспеката.

Потребно је познавати и користити важније класификације стијенске масе, прихваћене критеријуме лома стијенске масе, пратити геолошке карактеристике разматраног проблема, дефинисати избор и технологију израде подземних просторија, и вршити моделирање у складу са реалним условима на терену и адекватан избор врсте подграде за дате услове рада.

Са становишта стабилности подземних просторија у рудницима са подземном експлоатацијом и сигурности обављања процеса рада важне су намјене подземних просторија и њихов вијек трајања.

У подземним рудницима за случајеве откопа са привременим сигурносним стубовима потребно је сигурносне стубове радити за краћи временски период односно толико колико би трајао радни вијек откопа, док се код израде ходника који трају дужи временски период мора вршити праћење дејства напона односно дубина и пружање нестабилне зоне стијенске масе око израђене подземне просторије и избором одговарајуће подграде да се утиче на смањење зоне ослабљене стијенске масе.

Према Ноек-у (1995) у чврстим стијенама стабилност подземних просторија се нарушава под дејством гравитационог оптерећења када се избор система подграде врши на основу положаја и интензитета пукотина, док је у случају лома стијенске масе под интезивним дејством напона много комплекснији избор подграде и процјена лома стијенске масе је једино могућа код кртог понашања стијенске масе око израђене подземне просторије.

Према Kaiser-у (2000), основни фактори који утичу на понашање стијенске масе око подземне просторије су стање напона у стијенској маси, чврстоћа стијенске масе, напони у зависности од понашања стијенске масе и геометрије и редоследа откопавања.

Истраживање у овом раду се темељи на праћењу и процјени одређених појава у разматраном рудном лежишту приликом израде подземних просторија, примјеном нумеричких модела који се могу примјенити и за друге руднике са експлоатацијом у неслојевитим лежиштима у условима стабилне подине и нестабилне кровине.

Да би се измоделирала радна средина која се прва рјешава и симулирало стање приближно стању у реалним условима потребно је увести одређене апроксимације. Процеси у стијенској маси се могу описати преко система нелинеарних парцијалних диференцијалних једначина. У принципу те једначине је немогуће рјешити аналитички путем па се за такве потребе користе нумерички модели.

Развијени модел радне средине се темељи на основним параметрима стијенског материјала и то првенствено преко модула еластичности, притисне чврстоће,

коэффициента дилатације, Poisson коефицијента, угла унутрашњег трења, кохезије и запреминске тежине тежине стијенске масе.

За потребе тачности извршене нелинеарне анализе и њене практичне примјене развијени модел се уводи у софтверски пакет *Phase2*, на основу кога се добија прорачун и интерпретација понашања стијенске масе око просторија отварања рудника са подземном експлоатацијом.

1.1. Значај и циљ истраживања

Пројектовања капиталних просторија рудника са подземном експлоатацијом је један од веома важних техничких и пословних фактора, који утиче на економску оправданост рударских пројеката.

Основна научна хипотеза која је постављена у овој дисертацији је да се интеграцијом одређених математичких алгоритама у јединствен нумерички модел може постићи ефикасније димензионисање капиталних просторија рудника са подземном експлоатацијом. У томе смислу истраживање се базира на утврђивању утицаја свих релевантних параметара на појаву лома у стијенској маси и на утврђивању оптималног система подграђивања у циљу одржавања просторије отварања у што дужем временском периоду.

Имајући у виду напред наведено јасно је да и поред значајних напредака у овој овласти истраживања, интегрални нумерички приступ планирања подземних просторија, обезбеђује велики простор за даље научно и стручно истраживање.

Да би се остварио циљ дисертације и развио интегрални нумерички модел за разматрани проблем потребно је обезбједити релевантне улазне параметре на основу расположивих инжењерских података о руднику и података добијених на основу класификација стијенске масе и одређених критеријума, како би се могло ефикасно пратити понашање стијенске масе око израђене просторије у датим условима у лежишту. Зато је врло често потребно одређеним научним приступима прогнозирати релевантна стања утицаја на коначно решење. Ово је једино могуће развојем јединственог нумеричког модела који ће обухватити интеракцију утицаја свих релевантних параметара реалног стања у руднику са подземном експлоатације.

Из претходног произилазе задаци који обезбеђују испуњење постављеног циља и верификацију полазне хипотезе, а своде се на развој више подмодела чији се алгоритми јединствено повезују у интегрални нумерички модел који ће омогућити решавање проблема оптимизације подземних просторија у реалној радној средини у функцији планирања рудника са подземном експлоатацијом.

1.2. Структура дисертација са кратким прегледом поглавља

У структурном смислу дисертација, је прилагођена постављеним циљевима и примењеној методологији и састоји се из 5 поглавља.

Прво поглавље представља увод у третирану проблематику са кратким освртом на основне циљеве и методологију коришћену у дисертацији.

Друго поглавље даје кратак преглед актуелних истраживања и коришћене литературе на пољу конвенционалних метода за пројектовање и планирање подземних просторија у реалној радној средини у рудницима са подземном експлоатацијом.

Треће поглавље даје детаљан опис развијеног интегралног нумеричког модела за потребе планирања подземних и оптимизације подземних просторија у реалној радној средини у рудницима са подземном експлоатацијом.

Четврто поглавље даје приказ примене развијеног модела на реалном руднику са подземном експлоатацијом. Детаљно су приказани и анализирани резултати моделирања оптималне просторије отварања у реалним условима рудника.

Пето поглавље даје стручне закључке и наглашава научни и практични допринос примењене методологије и развијеног модела за процесе оптимизације просторије отварања у реалним условима рудника. Такође у овом поглављу су дате и препоруке за будући научно-истраживачки рад, у правцу даљег унапређења развијеног нумеричког модела.

2. ПРЕГЛЕД ДОСАДАШЊИХ ИСТРАЖИВАЊА

2.1. Дефинисање параметара

У фази пројектовања рудника са подземном експлоатацијом све анализе истраживања се заснивају на емпиријским, аналитичким и нумеричким методама. Код емпиријских метода, анализе истраживања су засноване на принципу практичних искустава из ранијих пројеката који имају сличности са предметом истраживања или се углавном базирају на основу инжењерске процјене.

Јединствену емпиријску методу која се користи широм свијета за потребе пројектовања рудника са подземном експлоатацијом, за пројектовање тунела и других подземних објеката представљају системи класификација стијенске масе.

По Ноек-у [2], системи класификације стијенске масе могу послужити као основно средство за потребе физибилити студија и прелиминарних истраживања разматраног проблема и као полазна основа за процјену чврстоће и деформација стијенске масе за потребе избора система подграђивања подземних просторија и објеката.

Према томе, системи класификација се не могу са великом позданошћу користити за дефинисање стијенске масе у комплексним рударским условима али се могу употпунити и надоградити са нумеричким методама истраживања.

2.1.1. Стијенска маса

Као полазна основа за сва истраживања у вези са пројектовањем рудника са подземном експлоатацијом, пројектовањем и израдом подземних просторија и проблемима везаним за њихову стабилност и дуготрајност је стијенска маса.

У подземним рудницима, када се узму у обзир сви утицајни фактори који утичу на трошкове експлоатације рудника и трошкове реконструкције у случају рушења просторија у јами, и све ригорознији прописи у погледу сигурности рада у јамским условима, најважнију улогу у фази пројектовања рудника и избора технологије откопавања, поред геолошких структура на терену имају геомеханичке карактеристике стијенске масе.

Појам стијенска маса представља стијену каква се јавља *in-situ* са њеним структурним дисконтинуитетима, равнима услојености, расједима, пукотинама и другим структурним појавама. Појам стијенски материјал се односи на нетакнуту стијену између дисконтинуитета.

Према Brady и Brown [3], природа и распоред структурних појава у стијенској маси који чине структуру стијене имају највећи утицај на понашање стијенске масе приликом израде подземних просторија.

Приликом рударских активности долази до развоја механичких процеса у стијенској маси који утичу на промјене стања напона и деформација око контуре подземне просторије и у дубини стијенског масива. Према томе, јасно је да се понашање стијенске масе услед таквих процеса не може процјенити са стопостотно тачношћу али је познато да понашање стијенске масе зависи од њених геомеханичких карактеристика, карактеристика дисконтинуитета, оптерећења, распона подземних просторија и других фактора.

Да би се израђена подземна просторија у одређеним условима одржала стабилном потребно је процјенити и спречити развој тих механичких процеса у стијенској маси око просторије. То значи да је потребно дефинисати деформабилност и хомогеног и испуцалог дијела стијенске масе и пратити однос између стијене и система подграде.

Према Ноек-у [4], у природи се стијенска маса јавља као испуцали, хетероген, анизотропан и нееластичан материјал. Сходно томе, стијенска маса је састављена од више материјала, испресјечана дисконтинуитетима и са промјењивом чврстоћом у различитим правцима. Ријетко се стијенска маса у природи јавља као хомогена и изотропна односно сачињена од једног материјала и са једнаком чврстоћом у свим правцима.

У складу са наведеним, са становишта стабилности подземних просторија и увођења савремених и економичних технологија израде тих просторија у различитим условима стијенске масе веома су значајне класификације стијенске масе.

2.1.2. Класификација стијенске масе

Системи класификације стијенске масе служе за добијање основних података о одређеним особинама стијенске масе као што су чврстоћа на притисак, модул еластичности, угао унутрашњег трења, чврстоћа на затезање и друго, које свеукупно дефинишу карактеристике разматраног поља истраживања услед рударских активности и сачињавају основу за нумеричко моделирање разматраног проблема.

Према Wieniawski [5], основна намјена класификација стијенске масе је:

- утврђивање најзначајнијих параметара који утичу на карактеристике стијенске масе,
- подјела стијенске масе у групе сличног понашања, тј. подјела у класе стијенске масе различитих квалитета,
- основа за разумјевање основних карактеристика сваке поједине класе стијенске масе и компаративних анализа карактеристика стијенске масе на различитим мјестима, и
- да на основу квантитативних података служе као основа и смјернице за фазу пројектовања и боље разумјевање рудара и геолога на одређеним рударским пројектима.

Општи системи класификација стијенске масе по ауторима, њиховом настанку и подручјима примјене су приказани у Табели 2.1.

Табела 2.1. Системи класификација стијенске масе Bieniawski, 1989 [6]

Системи класификације стијенске масе	Аутор	Земља порјекла	Подручје примјене
Класификација по оптерећењу	Terzaghi, 1946	USA	Тунели са челичном подградом
Класификација на основу времена стајања подземне просторије	Lauffer, 1958	Australia	Тунели
Нова аустријска метода за тунеле (NATM)	Pacher, 1964	Austria	Тунели
Квалитет стијенске масе (RQD)	Deere, 1967	USA	Узорковање, тунели
Оцјена структуре стијенске масе (RSR)	Wickham, 1972	USA	Тунели
Оцјена стијенске масе (RMR)	Bieniawski, 1973 (модификована 1989, USA)	South Africa	Тунели, рудници (косине, градња)
Квалитет стијенске масе (Q)	Barton, 1974 (модификована 2002)	Norway	Тунели, рудници, грађевинарство
Чврстоћа блокова	Franklin, 1975	Canada	Тунели
Основна геотехничка класификација	ISRM, 1981	International	Општа примјена
Чврстоћа стијенске масе (RMS)	Stille, 1982	Sweden	Рудници метала
Унифицирани систем класификације (URCS)	Williamson, 1984	USA	Опште комуникације
Систем коефицијента ослабљености (WCS)	Singh, 1986	India	Рудници угља
Индекс стијенске масе (RMi)	Palmström, 1996	Sweden	Тунели
Геолошки индекс чврстоће (GSI)	Hoek и Brown, 1997	Canada	Све подземне просторије

Најранија примјена система класификације стијенске масе за потребе пројектовања тунела и подгађивања је уведена 1879 године по Ritter-у.

Ова класификација је касније дорађена по Terzaghi-у 1946 године и била је заснована на дескриптивном опису стијенске масе. Састојала се из девет класа, од

класе 1 за чврсту и нетакнуту стијенску масу, до класе 9 која је описивала стијенску масу склону бубрењу.

Класификација по Lauffer-у (1955), је дефинисана на односу времена трајања неподграђене подземне просторије одређеног распона у зависности од квалитета стијенске масе у којој је просторија израђена.

Класификација из 1967 године по Deeg-у из 1967, познатија као Показатељ квалитета стијенске масе (*RQD*) је представљала први нумерички облик система квалитета.

По Palmström-у (1982), када језгро није на располагању за процјену Показатеља квалитета стијенске масе, *RQD* се може одредити на основу броја дисконтинуитета по јединици запремине стијенске масе. Међу првим класификацијама стијенске масе је била Оцјена структуре стијенске масе (*RSR*), по Wickham-у из 1972 године. На основу *RSR* класификације су развијени и остали системи класификација стијенске масе по којима се квалитет стијенске масе представљао у нумеричком облику. Системи класификације који се примјењују за потребе у рударству су *RQD*, *RMR*, *Q* и *GSI* класификације.

2.1.2.1. Показатељ квалитета стијенске масе (*RQD систем*)

Показатељ квалитета стијенске масе *RQD*, је дефинисан као проценат извађеног језгра нетакнуте стијенске масе дужине 100 mm или већих дужина (Слика 2.1.)

Намјена овог система класификације је да представља квалитет стијенске масе *in situ* [5].

Вриједност *RQD* зависи од правца бушотине и може се добити на основу следећег израза:

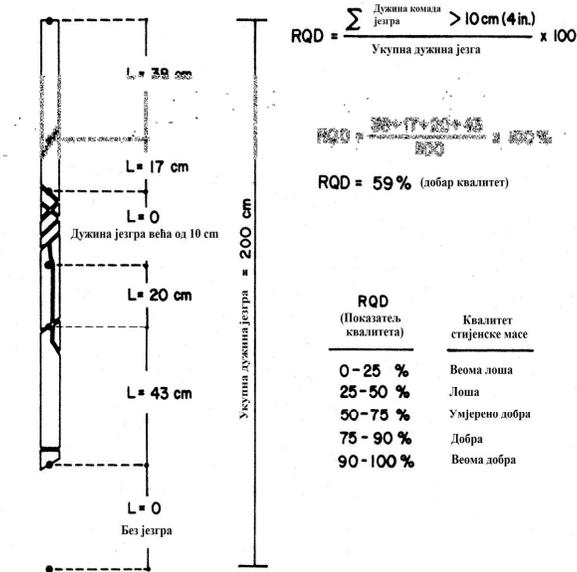
$$RQD = \frac{100 \sum x_i}{L} \quad (1.1.)$$

гдје је

x_i - дужина комада језгра узетих из бушотине дужине 0,1 m или више,

L - укупна дужина бушотине.

Дужина комада језгра узетих из бушотина се могу мјерити од врха једног комада до врха другог дуж линије кроз језгро или као цијела дужина цилиндра језгра. Из више разлога се примјењује метод са линијом кроз центар језгра (Brown, 2003; Goodman, 1993; ISRM Commission, 1978a) [3].



Слика 2.1. Одређивање *RQD* показатеља на основу језгра узорка (по Deere и Deere-у, 1988)

По Deere-у (1968), однос квалитета стијенске масе и *RQD* је приказан у Табели 2.2.

Табела 2.2. Однос између *RQD* и квалитета стијенске масе

<25	веома слаба
25 до 50	слаба
50 до 75	просјечна
75 до 90	добра
90 до 100	одлична

У случају да језгро није на располагању, *RQD* се може одредити на основу мјерења растојања пукотина λ (пукотина/м), (Priest и Hudson, 1976) и изразити у следећем облику

$$RQD = 100e^{-0.1\lambda} (0.1\lambda + 1) \quad (1.2)$$

За $\lambda=6-16/m$, RQD се може користити у следећем облику (Priest, 1976):

$$RQD = -3.68\lambda + 110.4 \quad (1.3)$$

RQD је употпуњен са још пет параметара који чине основ најпримјењивијих класификација стијенске масе у рударству: RMR или система процјене стијенске масе (Bieniawski 1973, модификована 1979) и квалитета стијенске масе, Q -систем (Barton, 1974).

У случају када језгро није на располагању (подземне просторије) а у стијенској маси су присутни дисконтинуитети, RQD се састоји у бројању пукотина распрострањених на $1m^3$ стијенске масе [3].

Према Palmström-у (1982)[5], однос између броја пукотина J_v и RQD се може изразити као:

$$RQD = 115 - 3.3J_v \quad (1.4)$$

гдје је

J_v - укупан број пукотина на јединицу дужине за све серије пукотина у глиненој стијенској маси.

За $J_v < 4.5$, $RQD=100$.

За одређивање параметра J_v се не узимају у обзир пукотине стијене које су настале услед поступака минирања.

Важно је напоменути да RQD није добар показатељ квалитета стијенске масе у случају за стијенску масу са растојањем дисконтинуитета око 100 mm. У случајевима када је растојање између дисконтинуитета око 105 mm (дужина језгра), RQD ће бити 100% док за растојање око 95 mm, RQD ће бити 0%.

За подземне просторије великог профила RQD је упитан параметар за оцјену квалитета стијенске масе.

2.1.2.2. Систем оцјене квалитета стијенске масе (*RMR систем*)

Систем оцјене квалитета стијенске масе, *RMR* или познатији као Геомеханичка класификација стијенске масе је увео Bieniawski 1973 године али је касније модификован у верзијама из 1974, 1976, 1979 и 1989 године.

RMR класификација је првенствено била намјењена за потребе стабилности подземних просторија у рудницима и тунелима и за избор трајне подграде [6].

Овај систем класификације квантитативно описује стијенску масу и сви параметри се могу добити на основу података из бушотина и геолошким картирањем на терену.

За *RMR* систем класификације се користе следећи параметри (Bieniawski, 1989):

1. једнооксијална чврстоћа нетакнутог стијенског материјала,
2. степен испуцалости стијенске масе *RQD*,
3. растојање пукотина или дисконтинуитета,
4. стање дисконтинуитета,
5. утицај подземних вода.
6. оријентација дисконтинуитета.

Заједнички утицај *RQD* и растојања пукотина се огледа на основу учесталости пукотина, услова стања пукотина (храпавости и оштећења пукотина), угла унутрашњег трења дуж клизања дисконтинуитета и утицаја правца пукотина на основу анизотропних особина стијенске масе [6].

Према томе, највећи утицај на чврстоћу и модул еластичности стијенске масе имају нагиб пукотина клизања, учесталост пукотина и чврстоћа дуж пукотина клизања.

Сваки од наведених параметара класификације је дефинисан одређеним бројем бодова који симболизују опис квалитета стијенске масе па највећа вриједност *RMR*-а показује најбољи квалитет стијенске масе.

У Табели 2.3. у дијелу (*I*) су приказани параметри који сачињавају *RMR* систем класификације.

Важно је напоменути да сви параметри нису једнако значајни за укупну оцјену стијене по овој класификацији већ њихова вриједност, пошто високе оцјене указују на боље карактеристике односно боље понашање стијенске масе.

У дијелу (II) у Табели за прорачун параметара и прорачун оцјене стијенске масе према условима по *RMR*-у (Bieniawski, 1989) ISRM, у Додатку А.1., је дат приказ класификације стијенске масе на основу укупне оцјене *RMR* и стијенска маса је класификована у пет категорија са вриједностима од 0 до 100. Распон вриједности између свих класа је по 20 и стијенска маса је по класама оцјена квалитета подјелена од веома добра до веома лоша стијенска маса.

У истом дијелу табеле су дати и подаци за квалитет стијенске масе за потребе израде подземних просторија односно квалитет стијенске масе у зависности од времена трајања просторије одређених димензија (распона просторије) и подаци за основне карактеристике стијенске масе у погледу стабилности стијенске масе (кохезија и игао унутрашњег трења).

Подаци у Табели 2.3. могу послужити за потребе рударства првенствено код израде подземних просторија али *RMR* систем класификације има највећу примјену у изради тунела што у принципу није предмет овог истраживања.

2.1.2.3. Индекс квалитета стијенске масе (*Q* систем)

Q систем или познатији као *NGI* класификација стијенске масе је основана на Норвешком Геотехничком Институту (Barton, 1974) и служила је за класификацију стијенске масе према индексу квалитета за потребе подграђивања тунела и подземних просторија.

Q систем стијенске масе је базиран на три основна принципа:

- одређивању квалитета стијенске масе,
- избору оптималних димензија просторија у зависности од њихове намјене и задовољавајућег фактора сигурности, и
- избору оптималне подграде за дату просторију.

Да би се одредио квалитет стијенске масе и одредиле оптималне димензије подземне просторије потребно је подјелити трасу подземне просторије у блокове. Сваки блок треба да сачињава стијенска маса са истим карактеристикама и истим условима подграђивања.

Да би се наведени принципи система задовољили, уведен је нови параметар или тзв. еквивалентни распон просторије D_e . Параметар D_e представља везу између индекса квалитета стијенске масе и подграде, односно да ће просторија одређених димензија бити стабилна или не у датој стијенској маси. За прорачун вриједности еквивалентног распона просторије D_e , поред димензија просторије користи се коефицијент сигурности у зависности од врсте и намјене подземних просторија (Barton, 1974).

$$D_e = \frac{\text{Распон, пречник или висина просторије (m)}}{ESR} \quad (1.5)$$

Вриједности фактора сигурности ESR у зависности од врсте и намјене подземне просторије су дате у Табели 2.3.

Табела 2.3. Фактор сигурности за подземне просторије

Врста и намјена просторије	ESR
Привремене подземне просторије	3-5
Сталне подземне просторије, тунели за воду код хидроелектрана (осим цијеви под притиском), пилот тунели, приступни ходници за велике откопе	1.6
Складишта, фабрике за пречишћавање вода, мали тунели, тунели за путеве и пруге, таложне коморе, прилазни тунели	1.3
Електране, тунели за главне путеве и пруге, просторије за цивилну заштиту, улази, раскрснице	1.0
Подземна нуклеарна станице, жељезничке станице, спортски терени и јавне дворане, фабрике.	0.8

По Barton-у [7], за подземне просторије које је потребно подграђивати сидрима, дужина сидра се може одредити на основу прорачуна

$$L = \frac{2 + 0.15B}{ESR} \quad (1.6)$$

гдје је

B - ширина просторије која се подграђује (m),

ESR - фактор сигурности у зависности од врсте и намјене подземне просторије.

За прорачун максималног распона просторије која може да стоји неподграђена користи се Индекс квалитета стијенске масе Q . Пошто се дефинишу еквиваленти распон просторије, потребно је одредити индекс квалитета стијенске масе који представља нумеричку вриједност квалитета стијенске масе.

За добијање вриједности индекса квалитета користи се израз:

$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n} \right) \left(\frac{J_r}{J_a} \right) \left(\frac{J_w}{SRF} \right) \quad (1.7)$$

гдје је

RQD - показатељ квалитета стијенске масе по Deeg-у (1968),

J_n - фактор утицаја пукотина,

J_r - фактор утицаја храпавости зидова пукотина,

J_a - фактор утицаја промјене зида пукотине и испуне пукотина материјалом,

J_w - фактор утицаја воде у пукотинама,

SRF - фактор утицаја напонског стања у различитим стијенским масама.

У наведеном изразу, први члан се односи на структуру стијенске масе, односно на груби израз димензија блокова или дијелова стијене.

Други члан израза се односи на храпавост и отпор смицања дуж дисконтинуитета или материјала којим су пукотине испуњене, док трећи члан у наведеној изразу представља емпиријски фактор који дефинише напонско стање у масиву.

Класификација појединих параметара који се користе за Q систем по Barton-у 1974 је приказана у Табели А.2.1. у Додатку А.2.

Према изразу (1.4), Показатељ квалитета стијенске масе RQD је могуће одредити на основу броја пукотина по јединици запремине стијенске масе (J_v).

Нумеричка вриједност Индекса квалитета стијенске масе Q се добија на основу укупног броја бодова свих фактора из израза (1.7) и креће се од 0.001 до 1000.

На основу добијених вриједности, стијенска маса се може подјелити у девет категорија, у класама од изузетно добре до изузетно лоше стијенске масе.

2.1.2.4. Геолошки индекс чврстоће (GSI)

Геолошки индекс чврстоће је први пут уведен према Ноек-у (1994) и служи као систем за оцјењивање карактеристика чврстоће и деформације стијенске масе за различите геолошке услове. Систем класификације по Ноек и Brown-у се заснива на визуелном утиску структуре стијенске масе односно процјени међусобних веза између камених блокова и услова површина између тих блокова.

Код пројектовања и израде подземних просторија основну проблематику представља процјена параметара чврстоће стијенске масе *in situ*. Пошто параметре чврстоће и модула деформација за испуцале стијенске масе није могуће директно одредити јер су резрезентативни узорци стијенских маса толико велики да не могу да се користе у лабораторијским условима као једино рјешење за ове потешкоће уведен емпиријски критеријум лома. По критеријуму Ноек и Brown-а квалитет стијенске масе је описан увођењем Оцјене квалитета стијенске масе (RMR класификације) па је овај критеријум касније више пута модификован и кориштен за слабо квалитетне стијенске масе. За процјену параметара чврстоће и модула деформација стијенске масе по критеријуму Ноек- Brown-а, као улазни параметар GSI систем класификације је практичнији параметар у односу на Q и RMR класификације стијенске масе.

У првобитном облику GSI система класификације по Ноек- Brown-у (1997), стијенска маса је подјељена у двадесет различитих категорија а основу су представљале словне ознаке као визуелни приказ стијенске масе и карактеристика дисконтинуитета и вриједности квалитета стијенске масе по GSI су биле у распону од 10 до 85. Касније, по Ноек-у (1998 и 1999) у овај систем су додате

двје категорије стијенске масе односно за услојене/шкриљаве структуре стијенске масе и масивну или нетакнуту стијенску масу.

Због анизотропних и хетерогених особина услојених/шкриљавих стијенских маса по Marinou-у и Hoek-у (2001) усвојен је посебан *GSI* систем једино за класификацију хетерогених стијенских маса као што је случај за флиш.

GSI систем класификације стијенске масе се данас много више користи због класификације параметара испуцале стијенске масе за инжењерске потребе а која није нарушена или оштећена приликом минирања или откопавања.

На Слици 2.2. је дат приказ *GSI* система класификације стијенске масе.

GSI ЗА ИСПУЦАЛУ СТИЈЕНСКУ МАСУ

Просјечна вриједност *GSI* се одређује на основу литологије, структуре и површине дисконтинуитета. Узимање вриједности од 33 до 37 је више реално него да се узима почетна вриједност $GSI=35$. Ова табела се не може примјенити за структурно контролисане пукотине.

Када су ослабење структурне равни приказане у непожељном правцу у односу на чело радилишта, тада је изражено понашање стијенске масе.

Чврстоћа на смицање површина у стијенама које су склоне трошењу услед промјена влаге ће бити смањена ако је присутна вода.

Када се ради у стијенама умјереног до врло слабог квалитета промјенива са десне стране може да важи за влажне услове. Притисак воде се одређује преко анализа ефективних напона

СТРУКТУРЕ	УСЛОВИ НА ПОВРШНИ				
	ВЕОМА ДОБРИ Веома хрпаве, сјајне неизмјењене површине	ДОБРИ Хрпаве, мало измјењене, замрљане површине	ПОВОЉНИ Глаке, умјерено нарушене и измјењене површине	СЛАБИ Доста измјењене површине обложене или испуцале компактним материјалом или фрагментима	ВЕОМА СЛАБИ Веома измјењене површине са омотачем или загуљене глиненим материјалом
 <p>НЕТАКНУТА ИЛИ МАСИВНА- узорци нетакнуте стијенске масе или масивне <i>in situ</i> стијене са неколико дисконтинуитета</p>	90			N/A	N/A
 <p>БЛОКОВИТА- веома издјелена стијенска маса која садржи блокове настале са три серије дисконтинуитета</p>	80	70			
 <p>ВЕОМА БЛОКОВИТА- испресјечана, дјелимично поремећена стијенска маса са угластим блоковима насталих са 4 или више серија дисконтинуитета</p>		60	50		
 <p>БЛОКОВИТА/ПОРЕМЕЂЕНА/УСЛОЈЕНА- наборана са угластим блоковима настали пресецањем са више серија дисконтинуитета. Присуство услојених равни или љуски</p>			40	30	
 <p>РАСПАДНУТА- слабо компактна, врло изломљена стијенска маса са измјешаним угластим и заобљеним коадима стијене</p>				20	
 <p>СЛОЈЕВИТА- слабо блоковита услед блиског контакта ослабљених слојевитих равни или равни смицања</p>	N/A	N/A			10

СМАЊЕНА БЛОКОВИТОСТ КОМДА СТИЈЕНЕ

СМАЊЕНЕ КВАЛИТЕТА ПОВРШИНА

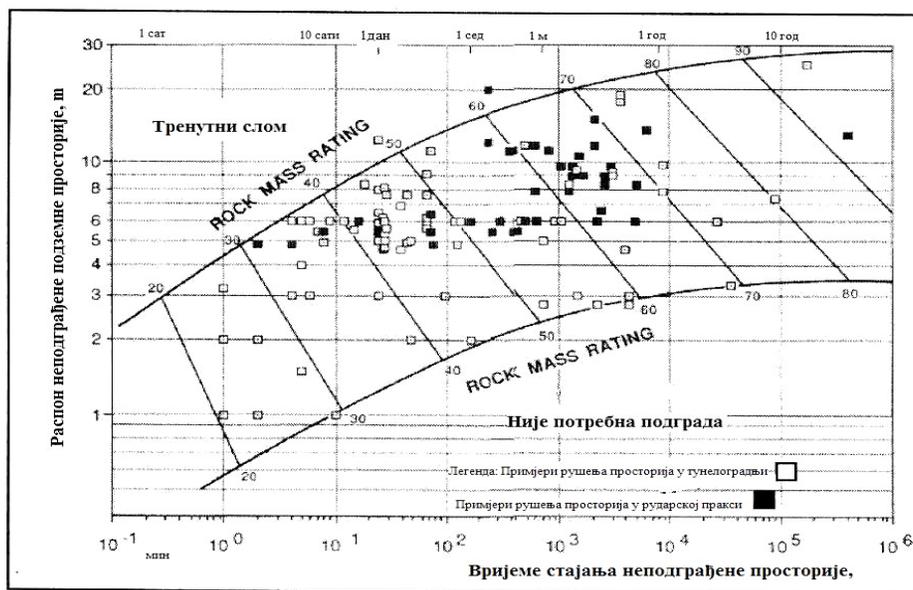
Слика 2.2 Одређивање *GSI* за испуцалу стијенску масу (по Hoek-у, 2003)

2.1.2.5. Класификација стијенске масе по Lauffer-у

На основу практичних искустава утврђено је да се понашање стијенске масе мјења са повећањем димензија подземних просторија а тиме и стабилност тих подземних просторија у датим радним условима.

Према класификацији по Lauffer-у, однос времена стајања подземне просторије и распона просторије за сваку стијенску масу се мјења у зависности од величине и облика просторије, правца осе просторије, дубине на којој се просторија налази, начина израде подземне просторије и начина њеног подграђивања, чак и при промјени само од једног од наведених фактора [23].

Вријеме стајања подземне просторије се односи на вријеме које прође од тренутка израде подземне просторије до момента постављања подграде у просторији, односно вријеме за које кровина подземне просторије након израде минирањем стоји и не обрушава се у откопани простор.



Слика 2.3. Дијаграм времена стабилности неподграђене подземне просторије у функцији од распона просторије према геомеханичкој класификацији стијенских маса, Bieniawski (1984)

Са дијаграма на Слици 2.3., се може видјети зависност величине неподграђене подземне просторије одређеног распона и времена њене стабилности од категорије стијенске масе у рудницима са подземном експлоатацијом и тунелима.

На приказаном дијаграму категорије стијенске масе су ограничене са двије криве линије које представљају укупан збир бодова по *RMR* систему класификације.

Према квалитету стијенске масе који се наноси на доњу *RMR* граничну линију може се очитати распон неподграђене подземне просторије за одређени временски период (сати, дани, мјесеци или године).

У складу са наведеним дијаграмом могу се користити подаци из Табеле 2.6, и према начину израде подземних просторија вршити и избор њиховог подграђивања.

По Rebsewitz-у (1957), фактор времена стајања неподграђене просторије представља карактеристику понашања стијенске масе. Класификација стијенске масе по истом аутору је настала код примјене нове аустријске методе за подграђивање сидрима као начина подграђивања подземних просторија.

Када се не располаже са подацима о распону и времену трајања просторије, да би се предвидјело механичко понашање стијенске масе око подземних просторија, често се као полазни параметри користе показатељ оштећења стијенске масе *RQD* и начин израде подземних просторија.

Према томе, класификација стијенске масе према начину израде и степена оштећења стијенске масе *RQD* је приказана у Табели 2.4. а погледу дефинисања квалитета стијенске масе по Deer-у (1968), је употпуњена подацима из Табеле 2.2.

Према подацима из табеле се може видјети да стијенска маса доброг квалитета односно са највећим вриједностима показатеља квалитета стијенске масе независно од начина израде подземне просторије не захтјевају нити један од начина подграђивања док супротно томе, са најмањим вриједностима *RQD* је неопходно користити комбиновану подграду и са мањим растојањима подградног материјала.

Табела 2.4. Класификација стијенске масе по *RQD* (Deer, Peck и сарадници)

<i>RQD</i> (%)	Начин израде подземних просторија	Челична пограда	Сидра	Прскани бетон
90	А-израда машинама Б- класична израда	Без подграде или лака подграда	Без сидара или изузетно са сидрима	Без прсканог бетона или мјестимично са примјеном
75-90	А-израда машинама Б- класична израда	Лака подграда или системски на 1,5 до 2m, са мјестимичним залагањем	Сидра мјестимично или сидра систематски на 1,5 до 1,8 m	Без прсканог бетона или мјестимично са примјеном дебљине 5 до 7 cm
50-75	А-израда машинама Б- класична израда	Лака до средњетешка подграда, системски на 1,5 до 1,8 m, са 50% залогом у кровини	Систематско сидрење на размаку од 1,2 до 1,8 m, мјетимично са мрежом	Прскани бетон дебљине од 5 до 10 cm у калоти 10 cm и више у калоти и на опорцима
25-50	А-израда машинама Б- класична израда	Средње тешка подграда на размаку од 1 до 1,2 m са залагањем кровине. Средње тешка до тешка подграда на размаку од 0,6 до 1,2 m, са залагањем кровине.	Систематско сидрење на размаку 1- 1,5 m, са мрежом. Систематско сидрење на размаку 0,6 до 1,2 m, са мрежом	Прскани бетон дебљине 10 до 15 cm са употребом сидара Прскани бетон дебљине 15 и више cm са употребом сидара

*А-израда подземних просторија машинама за бушење (комбајни),

*Б- израда подземних просторија уз примјену експлозива.

Поред наведених карактеристика стијенске масе велику примјену у свијету има Нова Аустријска Метода (NATM), али посебно у условима у којима вријеме је стајања просторије ограничено прије појаве лома и за потребе израде тунела.

2.1.3. Параметри стијенске масе

2.1.3.1. Чврстоћа стијенске масе

Као што је наведено у Поглављу 2.3.4., основни проблем код пројектовања подземних просторија је процјена чврстоће стијенске масе in-situ, пошто су репрезентативни узорци испуцале стијенске масе превелики за испитивања у лабораторијским условима.

Опште методе које се данас примјењују за одређивање чврстоће стијенске масе су:

- емпиријско одређивање критеријума лома и класификације стијенске масе;
- анализе постојећих ломова;
- испитивање са великим бројем узорака, и
- математичко моделирање.

Наведена проблематика понашања стијенске масе са становишта чврстоће се може једноставно рјешити примјеном критеријума по Ноек и Brown-у, почев од монолитних дијелова стијенске масе до оштећених дијелова стијенске масе са једним или више пукотинских система.

Пукотински системи у виду различитих дисконтинуитета утичу на чврстоћу стијенске масе с тим да ослабљеност стијенске масе може да варира у зависности од присуства мањих пукотина до великих ломова стијенске масе. Док по Krauland-у (1989), само дисконтинуитети који се налазе у критично оптерећеном подручју утичу на чврстоћу стијенске масе [32]. На Слици 2.4. је дат приказ односа подземне просторије у условима испуцале стијенске масе (по Janelid-у , 1965).



Слика 2.4. Зависност чврстоће стијенске масе од величине разматраног подручја (по Janelid-у , 1965). За случај једне просторије, критична површина оптерећења је мала, чврстоћа стијенске масе је велика. За случај тунела већа расподела напона око подземне просторије утиче на већу оптерећену површину услед већих појава ослабења а мању чврстоћу стијенску масу [32].

За инжењерске потребе код праћење понашања стијенске масе односно процјене чврстоће стијенске масе највећу примјену имају теорија лома по Mohr-у и критеријум лома по Hoek и Brown-у. Критеријум лома по Hoek и Brown-у је дуги низ година имао одређене модификације све у циљу да се добије адекватан критеријум за процјену чврстоће стијенске масе преко параметара чврстоће односно константи m и s и GSI система класификације.

Чврстоћа, лом и деформабилност стијенске масе зависе од механичких особина нетакнуте стијенске масе и геометријских и механичких особина дисконтинуитета.

2.1.3.2. Модул деформација

Поред чврстоће стијенске масе, важан параметар у анализама понашања стијенске масе које садрже деформације је модул деформације стијенске масе (E_m).

Поред модула деформација стијенске масе као основне механичке карактеристике деформабилности, важни су и модул еластичности E и Poisson-ов коефицијент μ .

Посебна важност модула деформација је код пројектовања примарне подграде подземних просторија за стијенску масу која окружује подземну просторију и за потребе нумеричких анализа развијених деформација у стијенској маси.

Први емпиријски приступ за одређивање модула деформација стијенске масе је уведен по Bieniawski-ом (1978). Касније је овај емпиријски приступ модификован од стране више истраживача и то у зависности од система класификација *RMR* [11], *Q* [7], *GSI* [12], *RMi* [13], и фактора поремећености стијенског масива *D* [14].

Фактор поремећености или оштећења масива *D* знатно варира у односу на удаљеност од слободне површине чела услед нарушавања стијенске масе минирањем и под дејством напона и у неким случајевима до напона услед рушења стијенске масе.

Због тога је тешко дати прецизне смјернице за примјену фактора нарушености стијенске масе пошто овај фактор зависи од услова фаза откопавања и утовара за сваку средину у којој се изводе те фазе рада.

Вриједности фактора оштећења масива за добре услове минирања је $D \approx 0.7$, за неоштећену *in situ* стијенску масу $D=0$, и за оштећену стијенску масу $D=1$.

На Слици 2.4. је дат приказ вриједности коефицијента оштећења стијенске масе *D*:

Сви прорачуни за добијање модула деформација по Bieniawski (1978), Serafim и Pereira (1989), Nicholson и Bieniawski (1990) и Mitriet (1994) су засновани на *RMR* класификацији и то:

По Bieniawski (1978) за $RMR > 50$, модул деформација је

$$E_m = 2RMR - 100 \text{ (GPa)} \quad (1.8)$$

За $RMR=50$ модул деформација је једнак нули а промјена модула се одвија по линеарној законитости до крајње вриједности $RMR=100$.

По Serafim и Pereira (1983), модул деформација за вриједност $RMR \leq 50$ се може одредити [8]:

$$E_m = 10^{[(RMR-10)/40]} \text{ (GPa)} \quad (1.9)$$

Наведена формула има практичну примјену јер се модул деформација мјењају за све вриједности RMR , док се за $RMR \leq 50$ вриједности крећу од око $E_m = 10 \text{ GPa}$.

Модул деформација по Barton-у (1980, 2002) за потребе нумеричке анализе методом коначних елемената користи Q класификацију стијенске масе на основу следећег израза:

$$E_m = 25 \log_{10} Q \text{ (GPa)} \quad (1.10)$$

Прорачуни по Ноек и Brown-у (1997, 2002) су засновани на GSI систему класификација и фактору поремећености стијенског масива D .

$$\text{за } \sigma_c \leq 100 \text{ MPa } E_m = [1 - (D/2)] \sqrt{(\sigma_c / 100)} \cdot 10^{(GSI-10)/40} \text{ (GPa)} \quad (1.11)$$

$$\text{за } \sigma > 100 \text{ MPa } E_m = [1 - (D/2)] \cdot 10^{(GSI-10)/40} \text{ (GPa)} \quad (1.12)$$

За прорачун модула деформација Palmström и Singh (2001) су увели RMI систем класификације док су Ноек и Diederichs (2006) за прорачун модула деформација стијенске масе користили GSI систем класификације и фактор поремећености масива D .

Тако да се за прорачун модула деформација користи следећи израз:

$$E_m = 100000 \left[\left(1 - (D/2) / \left(1 + e^{((75+25D-GSI)/11)} \right) \right) \right] \text{ (MPa)} \quad (1.13)$$

Иако су у претходним изразима узете у обзир класификације стијенске масе пошто није увијек могуће одредити прецизне вриједности E_m , модули стијенске масе могу бити анизотропни и могу нелинеарно да варирају са дејством притисака и са дубином.

Из разлога што су тестови за директно одређивање модула деформација *in situ* веома скупи, и поузданост резултата опита је упитна, за одређивање *in situ* модула деформација користе се геофизичке методе које су базиране на истраживањима преноса притисака и таласа смицања кроз стијенску масу и емпиријским односима са класификацијама стијенских маса и динамичким и /или статичким моделима [10].

2.2. Критеријуми лома стијенске масе

Први извор о примјени критеријума лома за инжењерске потребе у рударству датира од 1773 године по Coulomb-у, док је 1964 године уведен први познати емпиријски критеријум лома за нетакнуту стијенску масу по Fairhurst-у и Hobbs-у. Након првих извора је уследио развој критеријума лома за нетакнуту стијенску масу који је испитиван са тријаксијалним опитима на малим узорцима стијене.

Први критеријум лома за стијенску масу који је био основан на критеријуму лома за нетакнуту стијенску масу је уведен 1980 године, по Hoek и Brown-у [9].

До лома стијенске масе долази услед преоптерећења дејства напона у односу на чврстоћу стијенске масе тако да се у стијенској маси могу пратити три различита механизма лома:

- лом при затезању,
- лом при цјепању (лом на истезање) и
- лом на смицање.

Ако се узме под претпоставком тријаксијално стање напона у стијенском масиву тада се јављају максимални, минимални, смичући и нормални напони. У том случају линија граничног стања се усваја као права линија што одговара Mohr-Coulomb критеријуму, који гласи:

$$\tau = c + \sigma_n \operatorname{tg} \varphi \quad (1.14)$$

гдје је

- τ - чврстоћа на смицање,
- c - кохезија,
- σ_n - нормални напон који дјелује на раван смицања,
- φ - угао унутрашњег трења.

Према овој теорији, у стијенској маси долази до лома у тренутку када кругови главних ломова додирују Mohr-у обвојницу.

Емпиријски прорачуни за одређивање критеријума лома су базирани на емпиријским опитима на узорцима непоремећеног стијенског масива а у вези су

са показатељима класификације стијенске масе (*RMR*, *GSI* класификације и Ноек - Brown критеријум).

2.2.1. Mohr- Coulomb критеријум

Поред наведеног израза (1.14), критеријум лома по Mohr-Coulomb-у се такође може изразити и преко основних напона у следећем облику

$$\frac{\sigma_1}{\sigma} = \frac{2c \cos \phi}{\sigma_3(1 - \sin \theta)} + \frac{1 + \sin \theta}{1 - \sin \theta} \quad (1.15)$$

или у већини случајева

$$\sigma_1 = \sigma_c + k\sigma_3 \quad (1.16)$$

гдје је

k - нагиб линије који повезује σ_1 и σ_3 ;

σ_c - једноаксијална притисна чврстоћа.

Пошто стијенска маса по Mohr-Coulomb критеријуму не може да поднесе изазито велике притиске затезања у том случају се узима максимална вриједност силе затезања.

Вриједност угла унутрашњег трења ϕ и кохезије c се могу одредити на основу следећих израза

$$\sin \phi = \frac{k - 1}{k + 1}, \quad (1.17)$$

$$c = \frac{\sigma_c (1 - \sin \phi)}{2 \cos \phi} \quad (1.18)$$

Предности примјене Mohr-Coulomb критеријум у механици стијена се огледају у једноставности за разумјевање и изражавању са једноставним математичким изразима.

Код примјене овог критеријума мора се узети у обзир следеће:

- механизам лома се дешава при лому смицања;
- однос између нормалних и смичућих притисака који су добијени експерименталним опитима обично показују не-линеарно понашање и нису линеарни као што се то предвиђа овим критеријумом.

Поред наведеног, сви софтверски програми за потребе механике стијена и тла су снабђени конститутивним моделом за симулацију пластичног понашања стијенске масе иако генерално не постоји директна метода за одређивање параметара стијенске масе (c, ϕ) по овом критеријуму.

Посебно је важно у случајевима када се за процјену ових параметара користе анализе линеарне регресије не-линеарне енvelope лома по Hoek-Brown-у. Последња верзија успостављања просјечног линеарног односа на кривој утврђеној по Hoek-Brown-у је урађена 2002 године и представљена преко једначина за ефективни угао унутрашњег трења ϕ' и ефективну кохезију c' :

$$\phi' = \sin^{-1} \left[\frac{6am_b (s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b (s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1}} \right] \quad (1.19)$$

$$c' = \frac{\sigma_{ci} [(1+2a)s + (1-a)m_b \sigma'_{3n}] (s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a) \sqrt{\frac{6am_b (s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1}}{((1+a)(2+a))}}} \quad (1.20)$$

гдје је

$$\sigma'_{3n} = \frac{\sigma'_{3\max}}{\sigma_{ci}} - \text{однос равнотеже поља изнад и испод Mohr-Coulomb криве;}$$

m, s - константе које зависе од особина стијенске масе;

a - константа за изломљену стијенску масу;

σ_{ci} - једноаксијална притисна чврстоћа нетакнуте стијенске масе.

За подземну експлоатацију се усваја да је однос између $\sigma_{3\max}$ и σ_{cm} за еквивалентне Mohr-Coulomb и Hoek-Brown параметре (Hoek, 2002).

$$\frac{\sigma'_{3\max}}{\sigma'_{cm}} = 0.47 \left(\frac{\sigma'_{cm}}{\sigma_{in-situ}} \right)^{-0.94} \quad (1.21)$$

гдје је

$\sigma_{in-situ}$ - максимални основни или примарни напон који дјелује управно на осу подземне просторије;

σ'_{cm} - ефективна чврстоћа стијене.

Ако је вертикални притисак максималан, тада је

$$\sigma_{in-situ} = \rho g H \quad (1.22)$$

гдје је

ρ - густина стијене;

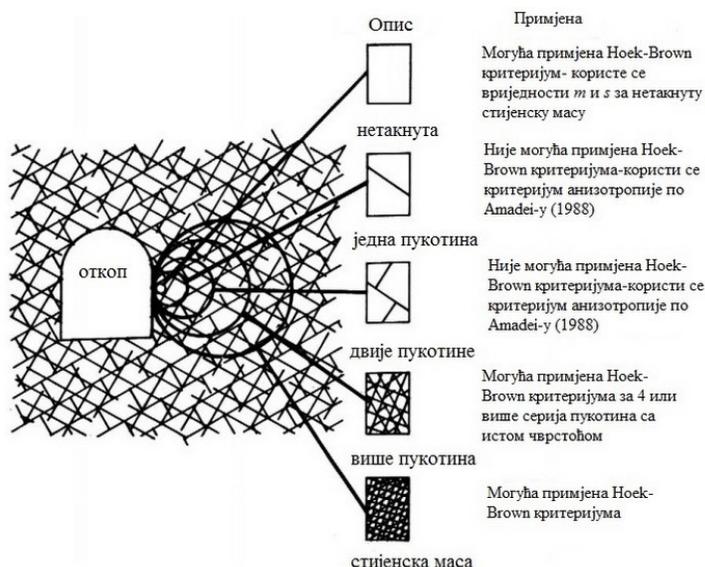
H - дубина тунела испод површине [15] .

Критеријум Mohr-а се показао погоднијим за случајеве лома стијенске масе као последице смицања што је најчешће случај са косинама на површинским коповима и клизиштима за разлику од Hoek и Brown критеријума који је погоднији за прорачун стијенске масе око подземних просторија.

2.2.2. Hoek-Brown критеријум

Критеријум је првенствено намјењен за одређивање чврстоће на смицање испуцале стијенске масе али је касније модификован и за непоремећени стијенски масив. Hoek и Brown (1980) су предложили свој критеријум заснован на односу између највећег и најмањег главног напона у моменту лома, тј. на основу деформација различитих стијенских материјала. Овај критеријум је примјењив за стијенске масе чије се понашање може процјенити на основу константи m и s .

Приказ понашања стијенске масе од нетакнуте до веома испуцале у зависности од распона подземне просторије је дат на Слици 2.5.



Слика 2.5. Приказ понашања стијенске масе по Ноек-Броун-у, 1980 [3]

Максимална вриједност тријаксијалне чврстоће на притисак за непоремећени стијенски масив се може написати у следећем облику

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + 1 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.23)$$

гдје је

σ_1 - максимални напон при лому,

σ_3 - минимални напон при лому,

σ_{ci} - једноаксијална чврстоћа на притисак непоремећене стијенске масе,

m_i - материјална константа за непоремећену стијенску масу.

Оригинални Ноек-Броун критеријум лома за испуцалу стијенску масу је имао најприхватљивије вриједности чврстоће за случајеве када је најмањи притисак на сабијање имао значајну вриједност.

По Ноек - Броун (1988) је уведен однос између константи m , s и модификованог облика RMR класификације (Bieniawski, 1974).

Модификовани облик RMR класификације прелази у RMR_{basic} . За потребе изградње подземних просторија у чврстим стијенама вриједност RMR_{basic} се може користити да се одреде следећи параметри

$$s = e \frac{RMR_{basic} - 100}{9} \quad (1.24)$$

$$m = m_i e \frac{RMR_{basic} - 100}{28} \quad (1.25)$$

ако се узму у обир суви услови рада (узима се вриједност 10 за параметар подземне воде у систему класификације по Bieniawski.

Поред наведених израза, вриједности константи m и s према квалитету стијенске масе по критеријуму NGI и квалитета стијенске масе по RMR се могу одредити према подацима из Табеле 2.5.

Табела 2.5. Вриједности m и s према NGI и $Bieniawski$ систему класификације [16]

Монолит без пукотина	Одличан квалитет-непоремећен	Врлодобар квалитет пукотине на 1-3m	Добар квалитет пукотине на 0.5-1m	Лош квалитет пукотине 0.1	Врло лош квалитет пукотине 0.01
Q=500 RMR=100	Q=100 RMR=50	Q=10 RMR=65	Q=1.0 RMR=44	Q=1.0 RMR=44	Q=1.0 RMR=44
s=1	s=0.1	s=0.004	s=0.0001	s=0.00001	s=0
Карбонатне стијене: доломит, кречњак, мермер					
m=7	m=3.5	m=0.7	m=0.14	m=0.04	m=0.007
Глиновите стијене: глинац, глиновити шкриљац, аргилит алевролит					
m=10	m=5	m=1	m=0.2	m=0.05	m=0.01
Пјесквите стијене са чврстим кристалима: пјешчар, кварцит					
m=15	m=7.5	m=1.5	m=0.3	m=0.08	m=0.015
Магматске ситнозрне стијене: андезит, долерит, дијабаз, риолит					
m=17	m=8.5	m=1.7	m=0.34	m=0.09	m=0.017
Магматске ситнозрне стијене: гнајс, гранит, габро, диорит, норит					
m=25	m=12.5	m=2.5	m=0.5	m=0.13	m=0.0025

Модификована варијанта првог критеријума по Ноек- Brown-у (2002), која је имала одређене промјене због нарушене структуре стијенске масе преко параметара s и a се може изразити преко образаца

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_c \left(mb \frac{\sigma'_3}{\sigma'_c} + s \right)^a \quad (1.26)$$

гдје су

σ'_1, σ'_3 - највећи односно најмањи напон;

σ_c - чврстоћа на притисак комада нетакнуте стијенске масе,

a, s -константе које зависе од карактеристика стијенске масе и степена изломљености стијенске масе,

m_b - вриједност константе m за стијенску масу која зависи од минералогije, састава и величине зрна нетакнуте стијенске масе.

Вриједности константи m_b и s се могу добити на основу следећих израза:

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right) \quad (1.27)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) \quad (1.28)$$

гдје је

GSI - геолошки индекс чврстоће (из 2.3.4.),

D - коефицијент оштећења стијенског масива (из 2.4.2.).

У првој варијанти Ноек-Brown критеријума, вриједност a је била 0.5 али после је извјесних промјена, по Ноек- у (2002) се ова вриједност може изразити преко вриједности GSI :

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right) \quad (1.29)$$

Када је $GSI > 50$, $a \approx 0.5$. За мање вриједности GSI , $a \rightarrow 0.65$.

Када је $\sigma'_3 = 0$ онда се једноаксијална притисна чврстоћа одређује преко израза

$$\sigma_{cm} = \sigma_c s^a \quad (1.30)$$

Пошто се за већину проблема у рударству за рјешавање аналитичких и нумеричких анализа користе параметри чврстоће за смицање по Coulomb-у више него критеријум основних напона, тако се и критеријум по Ноек-Brown-у

изражава у терминима ефективних нормалних напона смицања. То значи да енvelope чврстоће на смицање нису линеарне и да се такви параметри смицања одређују за дате нормалне или ефективне притиске или за мале вриједности ових напона [3].

Поред наведених критеријума, за потребе у рударству користе се још Drucker-Prager критеријум, Cam-Clay критеријум, критеријум по Bieniawski и Yudhbir-у, Sheorey критеријум лома и модификовани Cam -Clay критеријум лома.

2.3. Методе пројектовања у подземној експлоатацији

2.3.1. Аналитичке методе

Аналитичке методе код пројектовања рудника са подземном експлоатацијом углавном служе као основа за упоредне анализе емпиријских података и спроведених истраживања. Стијенска маса у којој се врши пројектовање рудника са подземном експлоатацијом односно подземних просторија представља нехомоген материјал, па су деформације које се јављају у стијенској маси углавном пластичног или дјелимично еластичног и дјелимично пластичног карактера.

Прва истраживања везана за еласто-пластичну расподјелу напона око кружне подземне просторије су спроведена по Terzaghi-у (1925) али у овим разматрањима није узета у обзир утицај подграде. Касније, Fenner (1938) је објавио прва истраживања везана за одређивање притисака подграде за тунеле у стијенској маси са еласто-пластичним понашањем па су неке аналитичка рјешења поново објавили Brown (1983) и Duncan (1993). Основна разлика између ових рјешења се огледа у понашању стијенске масе око подземне просторије после лома. Сва аналитичка рјешења из ових истраживања нису прихватљива за случајеве кружних подземних просторије у стијенској маси која је изложена дејству хидростатичког притиска. Стијенска маса у рудницима са подземном експлоатацијом се углавном не налази под дејством хидростатичког притиска јер су рјетки случајеви да се рудно тијело залијеже цијелом дужином на истој дубини

и да је израђено од исте стијенске масе и рјеђи су случајеви израде подземних просторија кружног попречног пресека у металичним рудницима.

Према наведеном се може закључити да су аналитичке методе ограничене и углавном могу послужити у већем дијелу за разумјевање основних принципа међусобног односа подграде и околне стијене, која се могу добити на основу испитивања различитих особина стијенске масе, различитих поља напона и различитих система подграде. Да би се превазишла та ограничења и добили практични прорачуни стања напона и деформација, у новије вријеме се користе нумеричке методе истраживања.

2.3.2. Нумеричке методе

У случајевима када се за одређене инжењерске проблеме не могу примјенити аналитичка рјешења, тада велику примјену имају нумеричке методе елемената. Према (Nilsen и Palström-у, 2000) нумеричко моделирање представља дискретизацију стијенске масе у велики број појединачних елемената.

Сама ријеч дискретизација проблема упућује на добијање прецизнијих рјешења проблема. Што је већи степен дискретизације односно већи број елемената, рјешења ових метода су приближнија рјешењима аналитичких метода.

Основна предност примјене модела нумеричких метода се огледа у њиховој примјени у комплексним радним условима тако да се у рударству могу разматрати:

- тродимензионални проблеми,
- било који облик откопа,
- различите врсте материјала,
- лом пластичних материјала у зависности од времена,
- структурни дисконтинуитети,
- вишеструке фазе откопавања и сл.

Поред тога, пружа се могућност кориштења података добијених *in situ* и на основу лабораторијских испитивања и сам унос података и интерпретација истих имају главну улогу код примјене нумеричких модела у рударству.

Основни улазни подаци који се користе за нумеричке програме су [35]:

- еластичне особине стијенске масе,
- почетно *in situ* стање напона,
- чврстоћа стијенске масе,
- облик подземне просторије,
- неопходне граничне услове,
- положај разматране тачке у стијенској маси гдје се врши процјена напона и деформација.

Што се тиче еластичних особина стијенске масе, као једног од основних улазних параметара за потребе нумеричких програма користе се модул еластичности и Poisson коефицијент за сваки разматрани материјал. Код моделирања нелинеарних еластичних материјала, користе се максималне вриједности модула еластичности.

У већини случајева, *in situ* стање напона се не одређује директно на терену него се користе једноставне претпоставке о величини и правцу дјеловања *in situ* напона. За хоризонталне и вертикалне напоне се узима да су директно пропорционални са дубином од површине терена.

За чврстоћу стијенске масе у моделирању је важно да се вриједности чврстоће добијају у лабораторијским условима са вишестукиим опитима на узорцима стијене, због тога што чврстоћа стијенске масе у реалним условима може бити значајно мања због присуства структурних појава као што су пукотине, смицања и расједи.из тог разлога се врши кориговање вриједности чврстоће на основу чврстоће нетакнуте стијенске масе, односно стијенске масе без дисконтинуитета.

Поред тога, критеријум лома као што је објашњено у претходним дијеловима овог поглавља, дефинише однос између нормалног напона и напона смицања приликом лома стијенске масе. У већини нумеричких модела, стијенска маса се може дефинисати као материјал без напона са претпоставком да ће да се сломи

ако је само један елемент изложен напону. Док се за случај лома смицања, модул стијенске масе се мјења. Уопштено, критеријум лома је од велике важности као улазни параметар за оне методе гдје се гранични услови и понашање модела налазе под утицајем лома неких елемената стијенске масе.

Следећи важан параметар код нумеричких модела је облик подземне просторије с обзиром да су откопи у рудницима обично неправилних облика, па се због једноставнијих и бржих прорачуна у анализама користе општи облици подземних просторија.

Гранични елементи који се користе код моделирања у рударству могу бити напони и деформације или и једни и други. Тако да се узима да подземна просторија нема утицаја на деформације у стијенској маси у распону од тростуке величине просторије. Из тог разлога је потребно урадити више модела укључујући и структурне појаве у стијенској маси и откопа на различитим растојањима да би се утврдио утицај напона и деформација у подручју које се разматра.

Још један од наведених улазних параметара који су од велике важности за нумеричко моделирање стијенске масе је положај тачке одређеног проблема који се моделира. Праћења на терену се односе на мјерење опсега просторија и може се лако повезати са излазним подацима нумеричког моделирања.

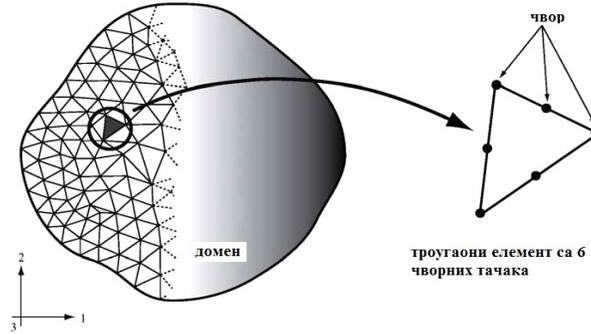
Важно је напоменути да се нумеричким методама добијају најбољи резултати код анализа стијенске масе, деформација, и избора система подграђивања. Ове методе се такође користе и за верификацију других једноставнијих метода.

Основна подјела нумеричких метода је на:

- Методе коначних елемената (FEM),
- Методе коначних разлика (FDM),
- Методе граничних елемената (BEM), и
- Методе дискретних елемената (DEM).

За потребе подземне експлоатације, односно праћења понашања стијенске масе највећу примену има Метода коначних елемената (FEM). Структура проблема са

овом методом се дијели у елементе са различитим карактеристикама материјала. Наведени елементи у моделу се спајају у чворове и обрадом тих елемената се добија симулација приближног стања у реалним условима. Примјер подјеле одређеног проблема у елементе са троугаоним елементима и чворним тачкама је дат на Слици 2.6.



Слика 2.6. Примјер дискретизације коначних елемената са 6 чворних тачака у елементу [30]

Практично све аналитичке и емпиријске методе користе хомогене материјале стијенске масе и једноставну геометрију откопа, и то најчешће просторије кружног попречног пресека. Са овим приступом се могу разматрати и други пресеци подземних просторија у комплексним геолошким условима али се тиме и добијају и комплекснији резултати. Нумеричко моделирање понашања стијенске масе око подземних просторија које се представља наведеним елементима се може подјелити у два основна приступа и то: приступ континуума и приступ дисконтинуума.

Приступ континуума третира стијенску масу као непрекидну стијену која је испресјечана дисконтинуитетима док приступ дисконтинуума третира стијенску масу као систем појединачних блокова распоређених дуж њихове границе (Goodman и Shi, 1985) и тако представља стварну природу стијенске масе (Nilsen и Palström-у, 2000).

Основа нумеричког моделирања коначним елементима је увођење мреже коначних елемената која се може представљати као степенаста, хомогена, радијална и мрежа без унутрашњих чворних елемената са граничним условима, најчешће условима напона и деформација.

2.3.2.1. Модел континуума

За подземну експлоатацију у чврстој стијенској маси усваја се модел континуума. Основни параметри за моделирање континуума су чврстоћа и деформације стијенског материјала. Чврстоћа стијенске масе се утвђује на основу изабраних критеријума лома, најчешће по Mohr-Coulomb и Hoek- Brown критеријуму лома [16].

За овај модел су карактеристична два типа модела континуума:

- интегрални, и
- диференцијални модел континуума.

Код интегралних модела или Модела Граничних елемената (BEM) дискретизује су унутрашње и вањске границе проблема. Контакт између различитих врста материјала и дисконтинуитета се третира као унутрашње границе које би требало исто да се дискретизују. Метода граничних елемената се користи за моделирање линеарно еластичних система с тим да се могу моделирати и одређени нелинеарни системи.

Код диференцијалних модела дискретизација се врши у цјелини и садржи Методе коначних разлика (FDM) и Методе коначних елемената (FEM).

За сложене геометрије проблема користе се Методе коначних елемената (FEM).

За овај приступ се користе програми PHASE (Rockscience), ABAQUS (Hibbit, Karlson i Sorensen, Inc.), PENTAGON 2D, 3D (Emerald Soft) и други.

Према Mohammad Khan-у (2010), континуум се третира као: (1) континуум са граничном површином пукотина; (2) еквивалентни континуум заснован на класичној или микрополарној теорији; (3) са техникама дискретних елемената; и (4) преко приступа хибридних дискретних континуума [17].

Приступ континуума са граничном површином пукотина уведе површине дисконтинуитета у облик елемената пукотина или деформација директно у модел. Модел еквивалентног континуума модификује конститутивне једначине стијенске масе тако да у њих буду уврштени механички ефекти пукотина. Приступ дискретних елемената разматра међусобни однос између блокова стијене када се

стијенска маса представља као склоп крутих или деформисаних дискретних блокова који могу да се релативно крећу један од другог и клижу дуж дисконтинуитета.

У геомеханици приступ дискретних елемената се највише користио код Методе раличитих елемената (DEM) по Cundall-у (1971), и анализа деформација дисконтинуума (DDA) по Shi-у (1988).

По истом аутору [18], елементи пукотина у FEM се могу користити са одређеним ограничењима:

1. Густина FEM мреже углавном зависи од растојања и правца пукотина тако да се са повећањем броја пукотина отежава поступак дефинисања проблема геометрије и дискретизације.
2. Да би се општа матрица крутости могла одржати потребан је релативно мали број елемената пукотина а да не утиче на нумеричку стабилност код занемарљиво мале дебљине елемената пукотина.
3. Потпуно раздвајање и ротација елемената или групе елемената није дозвољено или се третира са посебним алгоритмима (велике деформације, контакт и слично) за што су потребни моћнији компјутерски програми.

Методе засноване на континууму више одговарају за рјешавање проблема за пукотине са малим деформацијама.

2.3.2.2. Модел дисконтинуума

Модел дисконтинуума третира стијенску масу као систем појединачних блокова односно представља нумерички приступ на основу једначина кретања блокова или дијелова стијенске масе дуж дисконтинуитета (Cundal, Hart 1993), док према истраживању Therese Scheldt (2002), ако је стијенска маса без дисконтинуитета или су дисконтинуитети распоређени веома близу у односу на димензије просторије која се анализира у том случају се стијенска маса моделира као дисконтинуум [17]. У подземној експлоатацији под појмом дисконтинуитети се могу сврстати појаве расједа, зона смицања, појаве усложених равни и пукотина,

прслине као и остали механички дефекти стијенске масе. Утицај ових појава у стијенској маси се огледа на њено понашање и стабилност просторија које се раде у таквој средини. За овај приступ моделирања најчешће се користи Метода различитих елемената (DEM) која је основа за програм UDEC.

По Ноек-у (2005), истраживање стабилности подземних просторија првенствено зависи од правилне интрепретације структурних и геолошких карактеристика стијенске масе као и идентификације и праћења појава блокова и клинова стијенске масе приликом израде подземних просторија. Велику улогу код процеса формирања лома или деформација имају развојене површине равни или ротација блокова и клинова стијенске масе [5].

По Brown-у (1987), код моделирања стијенске масе пресудну улогу има однос између растојања дисконтинуитета и димензија подземне просторије који улазе у анализу.

Модели дисконтинуума би се требали примјенити у свим случајевима гдје год се препознају кретања појединачних блокова у стијенској маси и за њихово моделирање од највеће важности су распоред пукотина, параметри чврстоће пукотина и *in situ* напони.

Стога је потребно на вријеме препознати потенцијалну угроженост стабилности подземне просторије, пратити и идентификовати ослабљене блокове стијенске масе у крову и боку просторије. У складу са наведеним, потребно је вршити подграђивање откопа у свакој фази експлоатације прије него што дође до најмање појаве блока у стијенској маси. За разлику од ових анализа које се раде у чврстој стијени, посебан случај анализа стабилности подземних просторија је када се оне раде кроз слабу стијенску масу која је сва испресјецана пукотинама или у стијенама које имају малу чврстоћу. Појам нумеричких метода за испуцалу стијенску масу први пут је уведен од стране Cundall-a (1989).

На основу ових метода испуцала стијенска маса се третира као дисконтинуум и њихов облик је дефинисан на основу општих принципа механизма континуума са становишта теорије Cosserat-a (Doolin, 2003) по којем сваки материјал има три степена слободе (два преноса и једну ротацију) у дводимензионалном облику [18]. За потребе геомеханике у новије вријеме се користе дводимензионални и тродимензионални модели на основу којих се може пратити линеарно еластично,

не-линеарно еластично, линеарно вискозно-еластично, еластопластично, анизотропно, стохастично, термичко и друго понашање стијенске масе.

2.3.3. Метода коначних елемената

Примјеном програма на основу коначних елемената се може добити симулација понашања стијенских маса око подземних просторија односно може се јасно предвидјети међусобни однос између израђене просторије и стијенске масе која је окружује. Аналитичким приступом су се раније могла добити одређена рјешења разматраног проблема али не у толикој мјери и са толиком прецизношћу као са примјеном нумеричких метода, са којима могу да се симулирају одређени утицајни фактори на стабилност подземних просторија.

Методом коначних елемената могу да се добију подаци о примарном напонском стању и расподјели напона након израде подземних просторија, односно могуће је предвидјети утицај времена до постављања система подграђивања и опис карактеристика стијенске масе (механизми лома, понашање стијенске масе после лома и др). Модел континуума је погодан за симулацију околних стијена око подземне просторије и њихов међусобни однос са постављеном подградом, тако што се стијенска маса и подграда подијеле у мале сегменте који су спојени са одређеним бројем чворних тачака. У сваком елементу деформације се апроксимирају преко функција интерполације кориштењем деформација у свакој чворној тачки елемента тако да се за сваки елемент уводи координатни систем и на исти начин одређују гранични услови.

На основу тих деформација у чворним тачкама се могу одредити помјерања по контури просторије и по дубини масива, гдје је за сваку тачку на основу компоненти напона σ_z и σ_x могуће одредити линије једнаких напрезања, трајекторије, величине и правце главних напона. У дисертацији, за потребе одређивања напонских стања око израђених просторија и избора система подграђивања користи се програм коначних елемената *Phase²* (Rocscience Inc., Toronto-Canada).

2.3.3.1. *Phase*² програм

*Phase*² је дводимензионални еласто-пластични програм за прорачун напонских стања и деформација које се јављају у стијенском масиву приликом израде подземних просторија или одређених метода откопавања (Rocscience, 2012). У програму за моделирање радне средине користе се критеријуми Mohr-Coulomb, Hoek Brown, Drucker-Prager, Модификовани Hoek-Brown и Cam-Clay критеријум. Сам програм се састоји из три основна дијела, уноса података, прорачуна и интерпретације добијених података.

Поред наведеног, овај програм се може користити и за потребе подграђивања откопаних простора у стијенском масиву и се могу моделирати различите врсте подградног материјала од прсканог бетона, торкрет бетона, челичних профила до вишеслојних композитних облога.

Основни улазни параметри који се користе за анализу напонских стања и деформација у стијенској маси у *Phase*²-у, су:

- а) услови оптерећења,
- б) карактеристике стијенског материјала,
- ц) карактеристике подграде, и
- д) карактеристике расједа и пукотина.

Што се тиче оптерећења (*a*), у наведеном програмском пакету се оптерећења могу испитивати као константа оптерећења или као гравитационо оптерећење. За случај константних оптерећења користе се три компоненте напона (МРа) и углом који главни напон заклапа са хоризонталом (°). За случај гравитационог напона односи се на стање напона које се мјења са дубином од површине терена. Други случај је карактеристичан за моделе разматраних проблема близу површине на мањим дубинама. Важно је напоменути да за случај гравитационог оптерећења поред близине површине терена су битни топографски услови терена и утицај расједа на интезитет и правац напона.

Однос вертикалне и хоризонталне компоненте напона у овом случају се одређује на основу Poisson-ог коефицијента.

Најважније карактеристике стијенског материјала (δ), које се користе у програмском пакету *Phase²* су почетно оптерећење сваког елемента, карактеристике чврстоће и особина стијенског материјала.

Важно је рећи да почетно стање елемената зависи од врсте оптерећења које влада у масиву (а). Што се тиче карактеристика чврстоће, чврстоћа дефинише карактеристике материјала и критеријум лома материјала (Тачка 2.5.).

У *Phase²*-у, стијенски материјал се може дефинисати као еластичан и пластичан. За еластичан материјал, параметри критеријума лома ће се користити за прорачун и интерпретацију чврстоће у материјалу. Добијене вриједности ће показивати стање преоптерећења стијенског материјала али неће доћи до лома материјала.

За пластичан стијенски материјал, карактеристике материјала ће се користити у анализама када долази до појаве лома. Тако да у зависности од критеријума лома, дефинишу се коефицијент дилатације и резидуалне вриједности чврстоће.

Карактеристике подграде (u), у овом програмском пакету се односе на карактеристике висеће подграде односно сидара и карактеристике стајаће подграде.

За случај примјене сидара, могу се моделирати се сидра причвршћена на крајевима, потпуно спојена или учврћена сидра, једноструки каблови, Swellex сидра, сидра са расцјепком и затегнута сидра. Тако да зависећи од избора сидра као улазни параметри се користе пречник сидра, Young-ов модул еластичности челичног сидра, максимална и резидуална затезна чврстоћа сидра, распоред сидара, карактеристике на смицање, силе претнапрезања и слично. Треба напоменути да различите врсте сидара имају и различите механизме лома.

Такође, поред висеће подграде може се моделирати и "носећа" подграда, од чега најчешће модели простих подградних елемената, као на примјер један слој прсканог бетона, ојачана бетонска подграда и вишеслојни композитни материјали. За случај ојачане подграде и бетона, њихове карактеристике се дефинишу појединачно док за случај композитних материјала се дефинишу карактеристике сваког појединог слоја подградног материјала. Такође се може вршити моделирање сидара са бетоном заједно са подјелењеним оптерећењем, односно одмах после израде просторије и након израде подземне просторије. Након

уноса података и прорачуна, интерпретација модела зависи од намјене анализе која се врши.

Интерпретација чврстоће у анализама са еластичним моделима се односи на приказ контура са различитим вриједностима фактора чврстоће око подземне просторије. Када је фактор чврстоће око подземне просторије већи од 1, резултати таквих анализа су исти као за случај пластичних модела. Када је вриједност фактора чврстоће мањи од 1, тада се долази до рушења материјала ако просторија стоји неподграђена.

Према свему наведеном, интерпретацијом података модела у програмском пакету *Phase2* могу се добити трајекторије напона, затим напрезања у стијенској маси и подгради, носивост ојачане подраде, помјерања у вертикалном и хоризонталном правцу, укупне деформације и слично.

Прве анализе еласто-пластичних расподјела напона око подземних просторија су први пут изведене по Terzaghi-у (1925), али такве анализе нису биле засноване на концепту подградних система. Касније су код еласто-пластичних анализа са одређивањем притиска подграде уведене нове теорије по Fenner-у (1938). Исте године су Brown и Duncan Fama увели аналитичка рјешења која су била заснована на карактеристикама стијенске масе која окружује подземну просторију кружног попречног пресјека под хидростатичким притиском. Пошто остали проблеми у рударству нису кружног попречног пресјека и нису изложени дејству хидростатичким притиском, та ограничења код одређивања понашања стијенске масе око подземних просторија услед лома се могу лако превазићи примјеном *Phase* програма [2].

2.4. Анализа напонских стања у стијенској маси

2.4.1. Примарно напонско стање

У стијенској маси прије израде подземних просторија влада равнотежно напонско стање које се налази под утицајем дјеловања првенствено гравитационих а затим тектонских и динамичких сила. Гравитациона напонска стања зависе од карактеристика стијенског материјала односно понашања стијенске масе и дубине

посматране тачке на којој се одређени проблем анализира. Стање напона у земљиној кори се разматра преко двије основне компоненте, вертикалног примарног напона σ_v и хоризонталног примарног напона σ_x . Вертикални примарни напон σ_z проистиче из гравитационе компоненте услед тежине вишележећих наслага и тектонских сила које дјелују у земљиној кори а хоризонтална компонента σ_x из услова постојања вертикалне компоненте због бочног притиска (Poisson коефицијент), тектонских потисака, растерећења и сл. По Heim-у (1878), вертикални напон σ_v по дубини у стијенском масиву је једнак запреминској тежини вишележећих наслага и дубини до посматране тачке од површине терена и може се одредити преко израза

$$\sigma_v = \gamma \cdot z \quad (1.31)$$

гдје је

γ - запреминска тежина вишележећих стијена,

z - дубина или растојање од површине терена.

Хоризонтална компонента напона може да се одреди преко израза:

$$\sigma_x = k \cdot \gamma \cdot z \quad (1.32)$$

Хипотеза о једнакости вертикалног и хоризонталног примарног напона по Heim-у или хидростатичког стања напона се може претпоставити за услове вискозно-пластичног понашања стијене која је изложена дуготрајним притисцима и температуром.

По Terzaghi и Richard-у (1952), однос између хоризонталне и вертикалне компонентне напона се може одредити преко израза:

$$k = \frac{\nu}{(1-\nu)} \quad (1.33)$$

гдје је

ν - Poisson коефицијент.

Према P. R Sheorey-у [19], коефицијент k се може добити преко израза:

$$k = 0.25 + 7 \cdot E_h \cdot \left(0.001 + \frac{1}{z} \right) \quad (1.34)$$

гдје је

z - дубина (m),

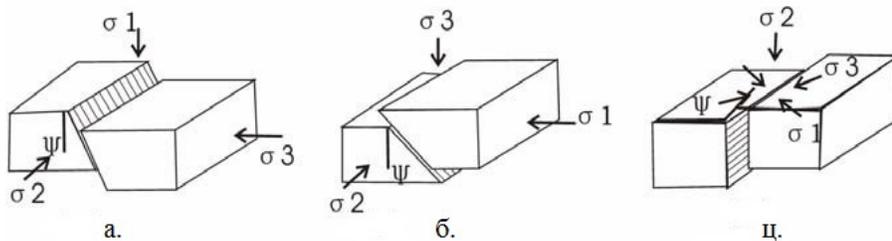
E_h - модул деформација стијенског масива (GPa).

Однос вертикалног и хоризонталног напона у зависности од различитих модула деформација по теорији Sheorey-а је приказана на Слици 2.5.

На основу односа између основних напона и вертикалног, минималног и максималног хоризонталног напона се могу описати три основна режима *in situ* напона и то [37]:

- режим услед нормалног расједања (NF режим),
- режим расједања услед клизања (SS режим), и
- режим реверзног расједања (TF режиме).

Према S.Peng и J. Zhang-у [37], стање напона за NF, SS, TF режим се може одредити на основу односа између основних напона, као што је приказано на Слици 2.7.



Слика 2.7. Приказ положаја главних напона за а. NF, б. TF и ц. SS, режим напона: максимални главни напон σ_1 , средњи напон σ_2 и минимални главни напон σ_3 , $\psi = \pi/2 - \varphi_f$, [37].

На Слици 2.7. φ_f је угао унутрашњег трења расједа који се креће од 30 до 45°.

Према истим ауторима [37], за наведени режим напона када је разлика између максималног и минималног напона велика онда у том случају долази до расједања по равни клизања, односно важи услов да је $\sigma_H \geq \sigma_V \geq \sigma_h$.

За наведени режим је карактеристичан услов да вертикални напон σ_V представља средњи напон σ_2 , тј. $\sigma_V = \sigma_2$.

Према ауторима, [38] важе услови да су:

- in-situ напони у еластичном дијелу Земљине литосфере на притисак (испод горњих 10 m),

- главни напони се пружају у апсолутно хоризонталним и вертикалним равнима:

σ_V = вертикални напон $\approx \rho g z$,

σ_{Hmax} = максимални хоризонтални напон,

σ_{hmin} = минимални хоризонтални напон,

- релативне магнитуде напона одређују облик деформација:

нормални расјед: $\sigma_V \geq \sigma_{Hmax} \geq \sigma_{hmin}$,

расјед услед клизања: $\sigma_{Hmax} \geq \sigma_V \geq \sigma_{hmin}$,

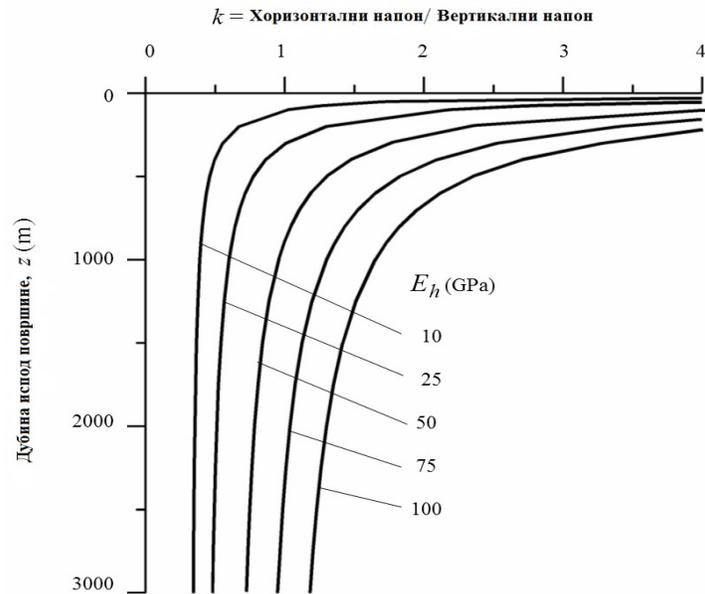
реверзни расјед: $\sigma_{Hmax} \geq \sigma_{hmin} \geq \sigma_V$.

Према положају са Сликe 2.7. ц, минимални хоризонтални напон $\sigma_{Hmax} = \sigma_1$ и

$\sigma_{hmin} = \sigma_3$.

Карактеристично је за сваки сваки режим расједања гравитациони или вертикални напон има својство одређеног примарног напона односно или σ_1 , или σ_2 , и у трећем случају σ_3 .

Стога и стање напона у земљиној кори може бити неравномјерно распоређено по дубини при чему коефицијент k може имати различите вриједности.

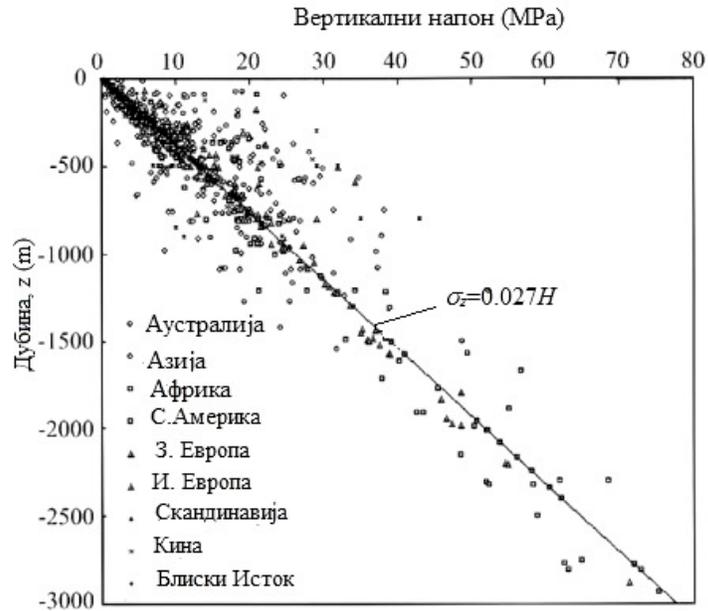


Слика 2.8. Однос хоризонталног према вертикалном напону за различите модуле деформација засновано на једначина по Sheorey-у (по Sheorey-у, 1994)

До појаве вишеструког повећања хоризонталних напона у односу на вертикалну компоненту напона долази због различитог понашања стијенске масе у зависности од литолошког састава терена, рељефа терена и од механичких, структурних, тектонских и хидрогеолошких карактеристика разматраног подручја.

Према Е.Т. Brown-у, у различитим регионима, континентима и дубинама су присутни различити односи хоризонталне и вертикалне компоненте напона, који се може изразити са коефицијентом односа $k_p = \sigma_x / \sigma_v$.

Према истом аутору [21], приказ резултата за вриједности вертикалних напона за различите регионе и континенте је дат на Слици 2.9.



Слика 2.9. Вриједности вертикалног напона за различите регионе и континенте и различитим дубинама, према Е.Т. Brown-у [21]

За потребе подземне експлоатације, код анализа напонских стања око подземних просторија ови проблеми се рјешавају на основу гравитационих напона, које се усваја као хомогено и промјене се једино дешавају по дубини стијенског масива. На основу Сlike 2.9. се може видјети да се сви резултати углавном концентришу око једне праве са вриједностима израза за вертикални напон $\sigma_z = 0.027 \cdot H$, гдје је H - дубина масива на којој се просторија ради. Треба напоменути да се вриједности вертикалних напона повећавају са дубином.

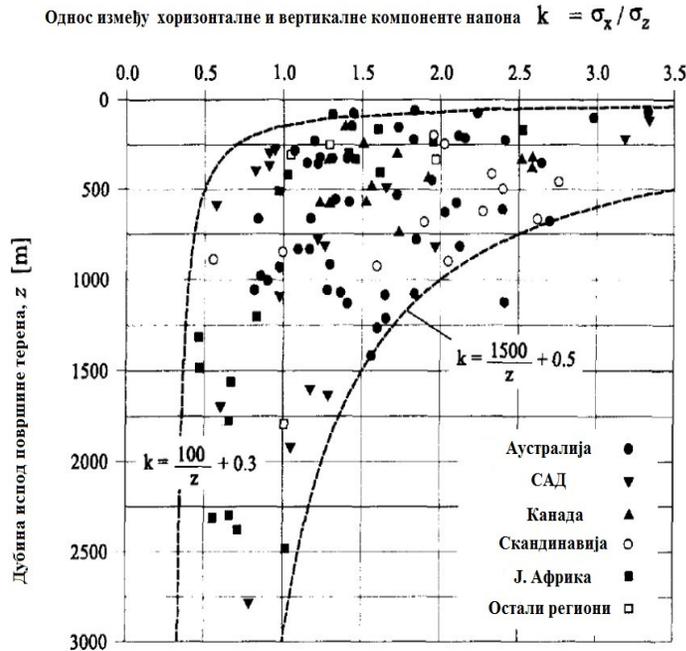
Поред наведеног, треба узети у обзир да подземна просторија има малу висину у односу на стијенски масив, са претпоставком да је напон по висини просторије истог интензитета. Као дубина стијенског масива се узима кров, под или центар подземне просторије која се анализира.

По оваквом начину дефинисања напонских стања у непоремећеном стијенском масиву, могуће је добити реалнију процјену напона који дјелују на подземну просторију и претпоставити све промјене које настају изградом те просторије, што се може детаљније на основу следеће слике.

На Слици 2.10. је дат приказ односа између коефицијента k (однос између хоризонталне и вертикалне компоненте напона) и дубине H на којој се подземна

просторија налази, што се може видјети да се вриједност коефицијента k мјења са дубином и креће се у распону између:

$$\frac{100}{H} + 0.3 < k < \frac{1500}{H} + 1.5 \quad (1.35)$$



Слика 2.10. Однос просјечног вертикалног и хоризонталног напона и дубине испод површине терена (Carranza-Torres и Fairhurst, 2000)

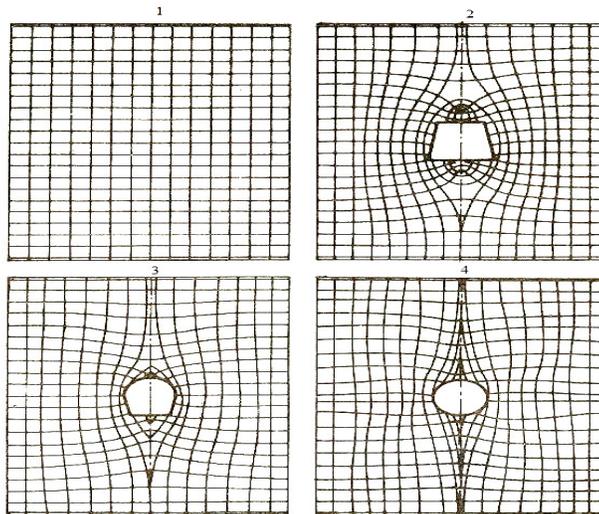
На основу Сlike 2.10. се може видјети да су за дубине подземних просторија мањих од 500 m, вриједности хоризонталних напона у већини случајева веће од вриједности вертикалних напона.

Према М.Л. Vestad-у [34], код подземних просторија које се налазе на дубинама већих од 1 km, вриједности вертикалних и хоризонталних напона су уједначене и коефицијент односа напона k има константну вриједност.

2.4.2. Секундарно стање напона

Секундарно напонско стање у стијенском масиву настаје изградом откопа или подземних просторија при чему долази до формирања празног простора у стијенској маси када истовремено долази до поремећаја примарног напонског

стања односно гравитационог поља напона, чија величина и дејство највише зависе од механичких карактеристика стијенског материјала, облика и величине подземне просторије. На Слици 2.7 дат је приказ облика трајекторија главних напона за стијенски масив прије израде подземних просторија и после израде подземних просторија различитог попречног пресека [20] .



Слика 2.11. Трајекторије главних напона у стијенском масиву прије и после израде подземних просторија различитог профила: за непоремећен стијенски масив (1), трапезни профил (2), потковичасти профил (3) и кружни профил просторије (4).

У наведеном случају долази до нове прерасподјеле напона и деформација око подземне просторије односно до промјена на контури израђене просторије за одређено помјерање (u), јер је свака тачка у стијенском масиву који окружује подземну просторију изложена дејству и примарног и секундарног напона.

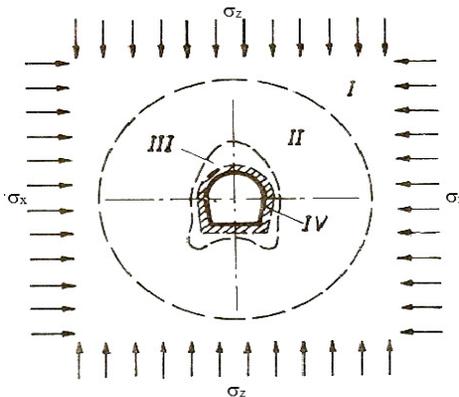
Да би се сагледали, разумјели и прорачунали деформације и наведена помјерања у појединим тачкама од контуре подземне просторије у дубину стијенској масива или на самој контури подземне просторије тј. дефинисала стања напона прије израде просторије и промјена које се дешавају након њене израде, потребно је прво кренути од математичке теорије еластичности. Условно, под утицајем наведених промјена у стијенском масиву и око контуре подземне просторије може доћи до појава еластичних и нееластичних деформација.

Код еластичног модела стијенска маса се узима да је једнородна, изотропна, хомогена и када је изложена оптерећењу има карактеристике понашања по

Хуковом закону. То значи да су деформације у стијенском масиву пропорционалне примјењеном оптерећењу коме је стијенска маса изложена односно могу се одредити из односа напрезања и Young-ов модул еластичности дате стијене. Дакле, ове деформације престављају само неколико процената од укупне деформације стијеске масе.

Треба напоменути да су основне карактеристике стијенског материјала са еластичним понашањем поред Young-ов модула еластичности, и модул деформација, Poisson-ов коефицијент и модул смицања. Од наведених карактеристика стијенске масе Poisson-ов коефицијент има најзначајнију улогу код расподјеле напона у стијенској маси и деформација еластичних материјала. Коефицијент Poisson-а је такође и један од основних улазних параметара код нумеричких анализа напона и деформација стијенске масе и по Kulatilake, (2004) његова вриједност за стијенску масу се може добити из односа $\nu \approx 1.2\nu$ (нетакнуте стијене).

Када су деформације стијенске масе у питању, приликом израде подземних просторија манифестују четири зоне утицаја израђене просторије на појаву деформација у стијенском масиву и то: зона масива у којој нема појава деформација стијенског масива под утицајем израђене подземне просторије (I), зона у стијенском масиву у којој под утицајем израђене подземне просторије долази до појаве деформација у области еластичности (II), зона стијенског масива са нееластичним деформацијама (III) и зона у којој долази до разарања стијенског материјала и деформација око израђене подземне просторије (IV).



Слика 2.12. Приказ зона око израђене подземне просторије у околној стијенској маси [20]

Може се видјети са приказа са слике, да се зона нееластичних деформација односи на зону у којој стијенска маса са слабијим механичким карактеристикама не може да се одупре дуготрајном дејству напона. У овој зони долази до разарања стијенске масе и појаве пукотина или блокова, па као таква тежи обрушавању према откопаном простору које може да захвати дијелове или цијелу контуру подземне просторије.

Према Булућев-у [25], под зоном нееластичних деформација се подразумјева област у којој за еластични модел стијенске масе није испуњен услов чврстоће по Mohr- Coulomb-у.

Треба напоменути да граница између еластичних и нееластичних деформација може бити усвојена нулта вриједност коју представља однос $\frac{c}{\gamma \cdot H}$, при чему c у изразу представља кохезију стијенског материјала а производ $\gamma \cdot H$ вертикалну компоненту оптерећења тј напона.

По наведеном аутору и условима, за сваки попречни пресјек подземне просторије се може одредити конфигурација зоне нееластичних деформација.

На појаву нееластичних деформација на контури подземних просторија и у стијенском масиву око просторије, у великом обиму утичу димензије односно распони подземних просторија.

Вриједност критичне деформације око различитих распона подземне просторије према J.Z. Zaslavski [26], се може одредити на основу израза

$$U = 0.014 \cdot B \quad (1.36)$$

гдје је

B- распон подземне просторије (m).

2.4.3. Стање напона око подземних просторија различитог попречног пресјека

У стијенској маси око подземних просторија различитих попречних пресјека долази до појаве различитих мјеста концентрација главних напона у стијенској маси око појединих дијелова просторије а посебно када се те просторије раде на

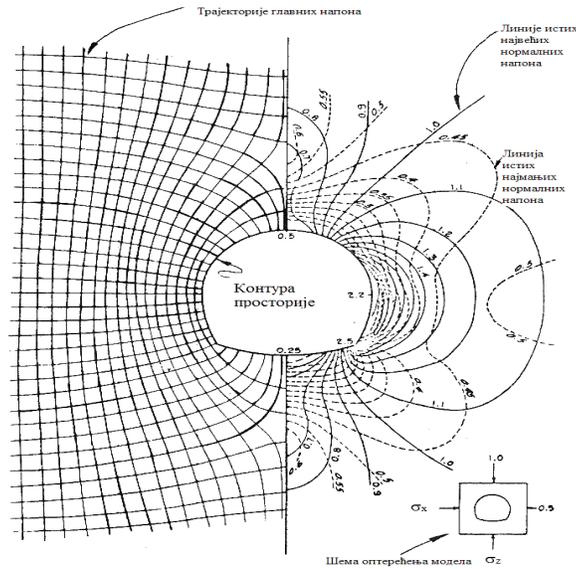
различитим дубинама. Један од најутицанијих технолошких факора на величине коефицијената концентрације секундарних напона је избор облика подземне просторије. Да би се могле пратити промјене у стијенском масиву и добити прецизне анализе напона и развоја деформација око подземних просторија различитог попречног пресека користе се различити модели, најчешће фотоеластични модели, модели стијенске масе, и модели са примјеном методе коначних елемената.

У складу са тиме, одређеним теоријским приступима и практичним искуствима за одређивање нестабилних зона око израђених подземних просторија различитог попречног пресека може се примјенити критеријум вриједности максималног главног напона који дјелује у свакој тачки у стијенском масиву око дате просторије.

Када су концентрације максималног напона присутне у појединим дијеловима стијенске масе око подземне просторије, у тим дијеловима ће доћи до лома стијенске масе и до њеног рушења. У случајевима када у тим дијеловим долази до појаве напона на затезање, у тим зонама ће доћи до лома стијенске масе због њене мање отпорности у односу на напоне на притисак. Напони око подземних просторија приказани на следећим сликама су неравномјерно распоређени по стијенском масиву за различите профиле подземних просторија а у зависности од попречног пресека и карактеристика стијенског масива та концентрисана напрезања су на притисак, затезање и на смицање. Квадратни, правоугаони и трапезни облик хоризонталних просторија поред велике примјене имају велике коефицијенте концентрација напрезања на истезање у стијенама кровине и подине као и знатна напрезања на притисак на стијене у боковима просторије док је кружни попречни пресјек просторија нешто неповољнији али се често користи у пракси. Угласти облици подземних просторија се могу економично примјењивати у условима стабилних стијена са мањом манифестацијом подземних притисака [23].

На сликама са приказом у Додатку А.3., су дати прикази принципијалних шема за сагледавање проблема концентрација напрезања око подземних просторија различитог попречног пресека и, које се најчешће користе као просторије

отварања у рудницима са подземном експлоатацијом, и различитим вриједностима вертикалних и хоризонталних оптерећења, по Ноек, Brown [21].



2.13. Изолиније главних напона и трајекторије напона у стијенском материјалу који окружује подземну просторију у еластичном раванском стању. Примарни напони су такви да је коефицијент за бочни напон $k=0.5$. Концентрација напона у боку просторије на контури има вриједност од 2.2, а смањује се у масиву [21]

На Слици 2.13 је дат приказ изолинија са којима се приказују промјене око подземних просторија услед дејства различитих напона. Према томе, изолиније представљају линије које повезују тачке око подземне просторије са истим интензитетом анализираних напона, а бројеви на приказаним изолинијама представљају однос између напона у датим тачкама после израде подземних просторија и напона прије израде тих просторија.

Вриједност односа наведених напона представља коефицијент концентрације напона око подземне просторије који зависи од интензитета примарног напона, облика подземних просторија и удаљености разматране тачке од контуре разматране просторије.

За подземне просторије кружног попречног пресека које се раде близу површине или на већим дубинама највеће концентрације напона се јављају на контури просторија, с тим да су за други случај просторије поред вертикалних напона изложене и дејству хоризонталних напона.

Према резултатима за трајекторије главних напона око подземних просторија различитог попречног пресека по Elsayed Ahmed Eiss-у и руководству J.W. Bray [21], у већини случајева ови коефицијенти концентрације напона се обично крећу до 1.5, у одређеним случајевима до 3 и изузетним случајевима и више.

У Додатку А.3.2. је дат јасан приказ трајекторија у зависности од дејства примарног напона, гдје су концентрације напона највеће у дијелу са оштрим угловима просторије а на контури крова и пода се јављају затезна напрезања која се са удаљавањем од контуре смањују и прелазе у притисна напрезања у стијенама бокова просторије.

Приказ трајекторија напона око подрземних просторија правоугаоног попречног пресека (Додатак А.3.3.) су видљиве високе концентрације напона око оштрих углова просторије у масиву које се сразмјерно са повећавањем хоризонталног напона повећавају у угловима просторије. За подземне просторије квадратног и правоугаоног попречног пресека на вриједности напона на контури просторије поред дејства главних напона велики утицај имају и коефицијенти облика који зависе од односа димензија просторија односно висине и ширине просторије.

Према Савину и Моргајевском, напони око подземних просторија правоугаоног попречног пресека се могу добити преко израза:

$$\begin{aligned} \text{у боковима} \quad \sigma_x' &= 0 \\ \sigma_z' &= \sigma_{z \max}' = \sigma_z(1 + \alpha) - \sigma_x \end{aligned} \quad (1.37)$$

$$\begin{aligned} \text{у крову и поду просторије} \quad \sigma_z' &= \sigma_{x \max}' = \sigma_x(1 + \beta) - \sigma_z \\ \sigma_x' &= 0 \end{aligned} \quad (1.38)$$

при чему су α, β коефицијенти облика у зависности од димензија просторија [30]. На основу изложених пресека са слике се види да промјене око подземних просторија нису равномјерно распоређене по стијенском масиву. Стога се ради прецизнијих рјешења ових проблема најчешће користе различити модели подземних просторија у различитим стијенским материјалима.

На приказу у Додатку А.3.6., хоризонтални напон σ_x је једнак нули за први случај подземне просторије, за други случај исте подземне просторије хоризонтални напон σ_x је једнак половини вертикалног напона.

Напони око подземне просторије за случај подземних просторија потковичастог попречног пресека, Додатак А.3.7. се значајно мјењају у зависности од примарног напона, од затезања до концентрације притиска на различитим дијеловима подземне просторије, када је у првом случају хоризонталан напон једнак вертикалном напону $k=1$, у другом случају са хоризонталним напоном који је једнак двострукој вриједности вертикалног напона $k=2$ и када је вертикални напон једнак нули а хоризонтални случај једнак максималној вриједности вертикалног напона као за случајеве на слици у Додатку А.3.8.

За наведене услове, деформације у еластичној средини се одвијају великом брзином што је разлог да одмах после израде подземне просторије долази и до развоја деформација. Према томе, случај пластичног понашања стијенске масе карактерише знатан обим трајне деформације при чему услед преласка критичне вриједности долази и до разарања стијенског материјала око подземне просторије. Према томе, пластична деформација стијенског материјала настаје када деформација стијенског материјала пређе границу еластичности и може се изразити преко образаца

$$\sigma_g = (\sigma_t - \sigma_r) \quad (1.39)$$

гдје је

σ_g - гранична вриједност напона,

σ_r - радијални напон, и

σ_t - тангенционални напон,

Наведени однос не одступа од стварног понашања стијенске масе и настаје у случајевима када подземна просторија стоји неподграђена, тако да радијални напон тежи ка нули ($\sigma_r \rightarrow 0$), и тангенционални напон тежи максималној вриједности $\sigma_t \rightarrow \sigma_{max}$, с тим кад њихова разлика прекорачи граничну вриједност тада се око подземне просторије формира зона у којој стијена има пластично понашање [20]. У складу са тиме, поред напонских стања који владају у

стијенском материјалу и деформација стијенског масива после израде подземне просторије, величине просторије и механичких карактеристика стијенске масе са аспекта стабилности подземних просторија, веома су важна радијална помјерања или деформација контуре подземне просторије, што ће бити детаљније објашњено у следећем дијелу дисертације.

2.4.4. Критеријуми избора оптималног профила подземне просторије отварања

Под критеријумом избора оптималног профила подземне просторије у руднику са подземном експлоатацијом подразумјевају се начини и услови избора по којима би подземна просторија адекватног облика и димензија требала да задовољи све услове стабилности, функционалности и оправданости. У подземној експлоатацији све подземне просторије било да се раде за потребе истраживања или експлоатације лежишта минералних сировина се класификују према намјени, облику, величини и положају у простору. Просторије за потребе експлоатације лежишта се базирају на подјели просторија са изразито великом дужином или висином у односу на њихов поречни пресјек, просторије са знатним попречним пресеком и не великом дужином и просторије различитих димензија у складу са фазом откопавања руде.

Када се узму у обзир сви параметри који утичу на избор оптималног профила и облика велику пажњу треба посветити стабилности тих просторија током и после израде, јер у зависности од карактеристика радне средине и поремећаја равнотеже која је владала у стијенском масиву прије израде тих просторија и дјеловања напонских стања у стијенском масиву после израде тих просторија, потребно је преузети све потребне мјере да се такве просторије одрже стабилне за предвиђени вијек њиховог трајања.

Облик подземних просторија највише зависи од намјене те просторије и од геолошких услова у којима се та просторија израђује односно од величине и правца јамског притиска и времена кориштења те просторије. У зависности од наведених фактора а највише од величине и правца дејства подземног притиска за облик подземне просторије одређује се и врста материјала за подграђивање те

просторије а најчешће су те просторије правоугаоног, квадратног, трапезног, нискозасвођеног, кружног и потковичастог попречног пресека.

Величина подземне просторије је углавном одређена функционалним затјевима њиховог капацитета односно намјене те просторије, избора методологије израде, од геолошких услова у којима се израђују, механичко-деформационих карактеристика радне средине, времена њиховог трајања и функционисања. Величина подземне просторије у руднику са подземном експлоатацијом код претходно одабраног профила највише зависи од примјењене технологије и опреме у руднику, од сигурносно-техничких прописа у погледу минималних растојања између опреме и подграде у изабраном профилу за несметано кретање људи и механизације и потребне количине јамског ваздуха у складу са дозвољеном брзином кретања ваздушне струје у јамским условима рада.

Основна намјена избора оптималне подземне просторије је да она задовољи све техничке критеријуме у погледу њене стабилности, отпорности и трајности односно да пројектовани облик и величина израђене подземне просторије у технолошком процесу и за вријеме трајања просторије задовољавају наведене критеријуме.

Сигурносно-технички нормативи за главну транспортну просторију, односе се на вриједности минималних сигурносних растојања за кретање радног особља у просторији, у зависности од врсте транспортног средства односно наистуреније тачке средства који се користи за транспорт и извоз руде и материјала у датом руднику, као и инсталације и опреме која се предвиђа за уградњу у одређени профил просторије.

Такође се избор величине просторије може вршити на основу потребне депресије ваздуха и техничких могућности израде подземне просторије. Важно је напоменути да се за овај критеријум одређивања величине подземне просторије на основу потребне количине јамског ваздуха, може са становишта трошкова провјетравања такође утицати на избор профила конкретно за руднике са дизел опремом, односно на основу минималних трошкова провјетравања и трошкова израде просторије.

Избор оптималне величине подземне просторије се такође може вршити и на основу планиране производње за дати рудник тако да за случајеве кад се отварање

рудника са подземном експлоатацијом врши поткопима или нископим, величина подземне просторије се може одредити на основу следећег израза:

$$S_p = 6,2 + 5,4 \cdot Q_{god} \quad (1.40)$$

гдје је

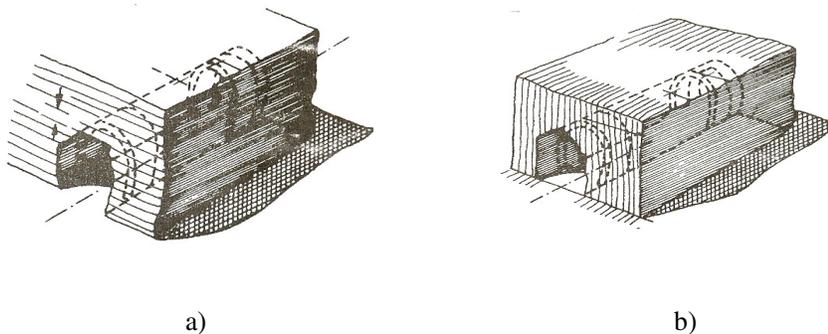
S_p - површина слободног профила,

Q_{god} - годишњи капацитет рудника.

Поред наведених критеријума, да би се израђена просторија са оптималним обликом и димензијама одржала, пресудна је стабилност стијенске масе у којој се подземна просторија ради односно да је стијенска маса таквих физичко-механичких карактеристика да сачува облик и димензије израђене просторије, било да се сама одржава одређени временски период или се осигурава неком врстом подградног материјала.

Већ је раније објашњен утицај структурних особина стијенске масе, али треба напоменути са структурне особине стијенског масива, односно пукотине, њихов положај, оријентација и број система пукотина имају већи утицај на облик и положај подземних просторија а њихова густина и ако су пукотине отворене или запуњене материјалом на њихову стабилност. Овде се мисли на стабилност подземних просторија у односу на положај пукотина и прелина у стијенском масиву.

У складу са наведеним, на Слици 2.14. је дат приказ положаја подземних просторија у односу на положај и оријентацију пукотина у стијенском масиву.



2.14. Положај подземних просторија у односу на оријентацију пукотина: а) паралелно у односу на положај пукотина; б) управно на положај пукотина

Према положају подземних просторија са слике може се закључити да је најнеповољнији положај подземних просторија у односу на положај пукотина за а) положај са слике, јер је подземна просторија паралелна са површинама пукотина јер се са повећањем броја пукотина увелико умањује стабилност подземне просторије. За случај када су пукотине управне на правац израде подземне просторије б) положај са слике, утицај пукотина на стабилност просторије је мањи [23].

Што се тиче избора оптималног пресјека и димензија подземне просторије отварања за рудник са подземном експлоатацијом са становишта стабилности подземне просторије приликом њихове израде, и поред свих наведених критеријума може се сматрати да је најважнији параметар код избора параметара просторија интезитет напонских стања стијенског масива односно интезитет вертикалне и хоризонталне компоненте напонског стања у стијенском масиву. Наведени параметар се мјења у зависности од промјене облика, величине и просторног положаја израђене просторије као што је наведено у Поглављу у 2.9.2.1.

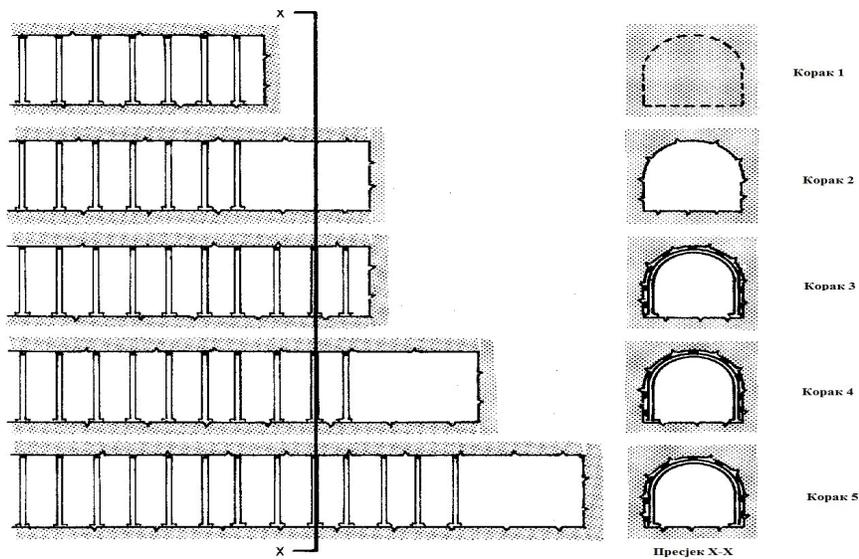
2.5. Извор оптималног начина подграђивања подземних просторија

Под избором оптималног начина подграђивања подземне просторије се сматра да је потребно изабрати такав систем подграде чија ће основна функција бити да смањи деформацију контуре подземне просторије услед дејства подземних притисака и да очува неопходан облик просторије и њену стабилност. То значи да изабрана подграда треба да представља такву конструкцију која по својој функцији треба да одговара класичном примјеру њеног статичког дјеловања и неутралисања деформационих промјена.

Осим величине и карактера дејства подземног притиска који највећим дијелом утичу на стабилност подграде, велики утицај имају облик и конструкција подграде, режим рада подграде, отпори стијенске масе и материјал од којег ће се подграда израђивати. Стога је потребно пратити понашање и развој деформација контуре подземне просторије при изради једне просторије отварања за једно напредовање, и њено подграђивање у случајевима када је то потребно.

Међусобни однос између понашања стијенске масе око израђене просторије и система подграде је најбоље описано на основу примјера хипотетичког откопавања са класичним начином израде подземних просторија и подграђивањем челичним оквирима по Daemen-у (1977), [22].

Сва разматрања за овај случај су извршена за пресјек x-x који представља профил на коме се виде промјене стања напона на деформације контуре подземне просторије и промјене у масиву и подгради с тим да у стијенском масиву влада хидростатичко напонско стање односно да су вриједности вертикалних главних напона једнаке вриједностима хоризонталног напонског стања.

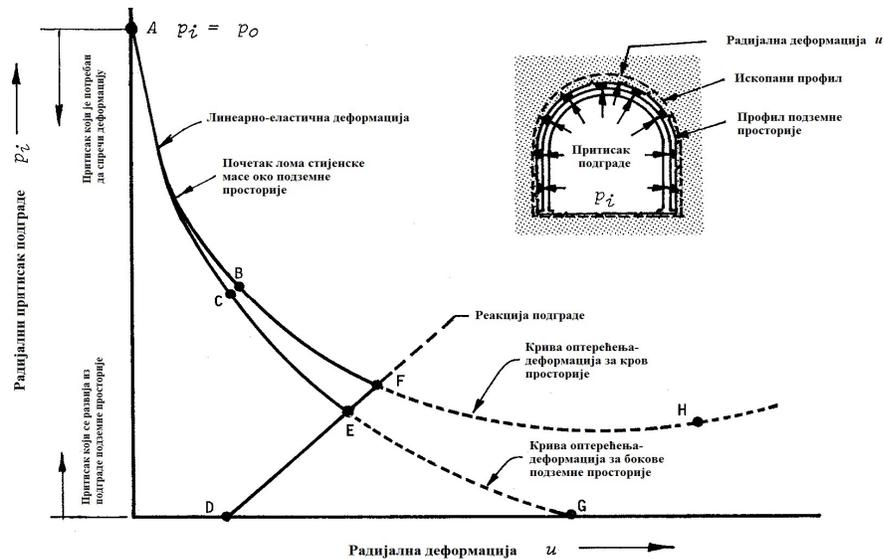


2.15. Напредовање подземне просторије са корацима израде и подрађивање [22]

У првом кораку чело подземне просторије није достигло пресјек x-x, па је стога профил подземне просторије само назначен у пресјеку. У стијенском масиву влада примарно стање напона, а притисак који би дјеловао на подграду подземне просторије p_i је једнак притиску p_0 односно $p_i = p_0$, на Слици 2.15. тачка А.

У другом кораку, чело подземне просторије је наредовало иза линије посматрања x-x, па је вриједност $p_i = 0$, односно не постоји подупирање стијене на контури па се дешава деформација контуре за вриједност u . Величина притисака p_i зависи од облика просторије, распона крова и пода висине бокова и услова примарног стања напона око подземне просторије и његова вриједност није иста у крову, поду и боковима просторије. У кораку 3, подземна просторија је очишћена за дужину

једног напредовања l , а челична лучна подграда се поставља на одређеном растојању све до самог чела радилишта. У кораку 4, напредовање чела радилишта је даље од линије посматрања, $x-x$ па се на том пресеку дешава деформација контуре подземне просторије јер не постоји утицај чела радилишта на смањење контуре подземне просторије. По кораку 5 се види да је чело радилишта далеко напредовало испред пресека $x-x$ и не постоје никакве препреке за деформисање стијенске масе по контури просторије.



2.16. Напонско-деформацијска крива масива и подграде, [3]

На Слици 2.16. карактеристике стијенске масе и потребне подграде подземних просторија се могу приказати преко кривих ABFH, ACEG, и DEF. Криве ABFH, ACEG представљају понашање крова и бокова откопане стијенске масе. По Brady и Brown-у, (1992), да би се одржала стабилност стијенске масе и спречило њено пропадање у крову просторије под дејством силе гравитације потребно је обезбједити довољно велики притисак подграде. Линија DEF представља реакцију подграде при чему се притисак подграде p_i повећава све док потпуно не блокира радијалну деформацију стијене на контури подземне просторије.

Основни проблем који треба рјешавати код подрађивања подземних просторија је одредити моменат када треба поставити подграду и колико оптерећење треба дозволити стијени да се деформише прије него што подграда преузме на себе оптерећење и спријечи даљу деформацију контуре подземне просторије. То значи

да се код подграђивања и избора оптималног система подграђивања морају узети у обзир оптерећење и деформација и стијенске масе и подграде.

Имајући у виду да је основна функција подграде да прими оптерећење из стијенског масива и спријечи или умањи кретање контуре просторије, као таква би требала да буде прилагођена радним условима и има различите режиме понашања. Када се радови изводе на већим дубинама у присуству слабих и нестабилних стијена и са појавама испуцалог стијенског материјала и тектонских поремећаја тада долази до промјена карактеристика подграде односно носивости подградног материјала а тиме и до промјена на цјелокупној подградној конструкцији [24].

То значи да карактеристике саме подграде зависе од механичких особина стијенске масе и дубине на којој се просторија налази и све промјене на контури просторије и подгради се дешавају под утицајем оптерећења које влада око подземне просторије односно од утицаја подземног притиска.

Дакле, носивост подграде мора бити већа од величине подземног притиска у стијенској маси око подземне просторије с тим да развијена деформација на контури те просторије буде минимална, тачније у дозвољеним границама. Поред носивости подграде веома важна карактеристика подграде са аспекта њене функционалности је попустљивост подграде која се односи на деформабилност подграде.

Што се тиче прорачуна подграде на основу оптерећења и деформација користе се различити прорачуни од којих су највише кориштени прорачуни по Протуђаконову и Terzaghi-у.

Према П. Јовановићу [27], прорачуни подграде се базирају на основу датог оптерећења на подграду, деформације подграде и узајамног утицаја деформације подграде и деформације контуре просторије.

Прорачун оптерећења односно притиска на подграду подземне просторије по Протуђаконову је првенствено заснован на случајевима неvezаног стијенског материјала али се може користити и за чврсте стијенске масе преко израза:

$$P_b = \frac{y_n}{n} y \quad (1.41)$$

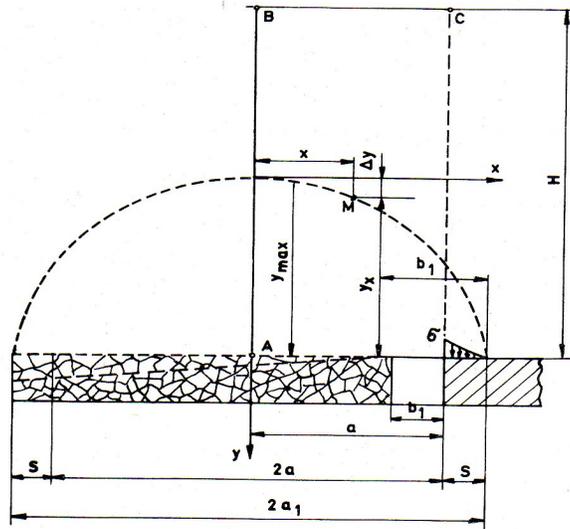
гдје је

P_b - притисак површине кровине која је подупрта подградом на растојању b од чела откопа (kN/m^2),

y_n - висина свода обрушавања на растојању b од чела откопа (m),

n - број ступаца на m^2 површине кровине,

γ запреминска тежина стијене.



Слика 2.17. Шема за прорачун свода оптерећења по Протуђаконову [30]

$$y_x = y_{\max} - \Delta y = \frac{a_1}{f} - \frac{x^2}{a_1 f} = \frac{a_1}{f} - \frac{(a_1 - b_1)}{a_1 f} \quad (1.42)$$

гдје је

a_1 - половина растојања свода (m),

f - коефицијент чврстоће материјала кровине,

y_{\max} - максимална висина свода (m),

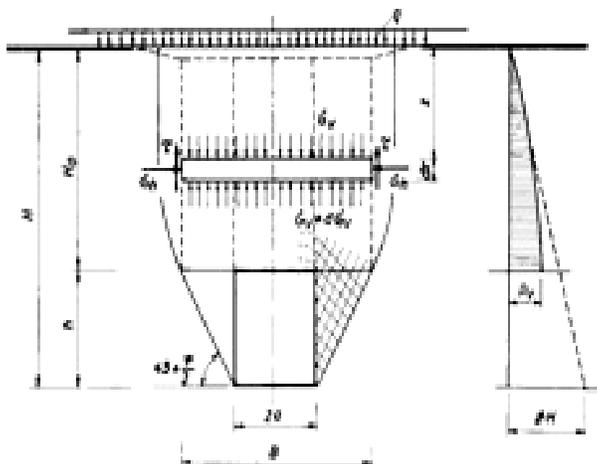
x - апсциса тачке M,

Δy - ордината тачке M,

b_1 - растојање од ослонца свода до одговарајућег реда подграде.

Важно је напоменути да се наведена теорија притисака на подграду услед формирања свода по М.М. Протуђаконову се може користити у случајевима слабе кровине и великог растојања основне кровине од слоја [30].

Прорачун подграде на основу дате деформације се врши да би се одредило оптерећење које подграда може да издржи. За овакве случајеве постоји више теорија које су засноване углавном на анализама деформација до нивоа сјемењаче, док се теорија по Terzaghi-у користи за случајеве када се деформација манифестује у виду помјерања до пода просторије, и за случајеве када се просторија налази на већим дубинама испод површине.



Слика 2.18. Шема за прорачун оптерећења подграде по Terzaghi-у [28]

По овом прорачуну ширина призме оптерећења је већа од ширине просторије и може се одредити преко израза:

$$B = 2 \left[a + h \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{90 - \varphi}{2} \right) \right] \quad (1.43)$$

гдје је

h - висина просторије (m).

По овој теорији као што је приказано на Слици 2.18., последице израде подземне просторије долази до појаве клизања материјала дуж клизних равни, па се чврстоћа на смицање дуж ових равни може добити преко образаца:

$$\tau = c + \sigma_x \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad (1.44)$$

гдје је:

c - кохезија стијенског материјала,

σ_x - хоризонтална компонента нормалног напона.

Однос између хоризонталне и вертикалне компоненте напона Terzaghi је исказао

преко коефицијента $k = \frac{\sigma_x}{\sigma_z} = 1,0 - 1,5$ за неvezане средине, па образац за чврстоћу

има други облик

$$\tau = c + k \cdot \sigma_z \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad (1.45)$$

Када се узму обзир наведени изрази, по овој теорији оптерећење односно притисак на подграду се рачуна за различите висине утицаја подземне просторије, тако да ако се узме само прорачун на подграду подземне просторије на већој дубини испод површине онда се оптерећење на подграду може добити преко израза:

$$q_v = \frac{B \cdot \gamma}{2 \cdot k \cdot \operatorname{tg} \varphi} \left(1 - e^{-k \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot \frac{2 \cdot H_2}{B}} \right) + \gamma \cdot H_1 \cdot e^{-k \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot \frac{2 \cdot H_2}{B}} \quad (1.46)$$

гдје је

H_1 - висина до које је евидентан утицај подземне просторије,

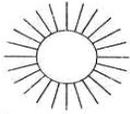
H_2 - висина од H_1 до површине терена.

За случај оптерећења на подграду у условима узајамног дејства деформације подграде и деформације контуре просторије утврђују се деформационо - напонске карактеристике стијенске масе и подграде и усклађују њихови односи. То значи

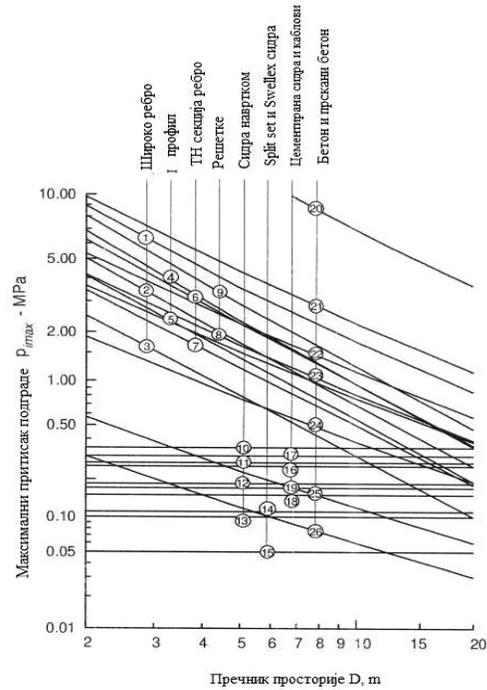
да се одређују носивост и деформабилност подграде и отпор који стијена пружа развијеној деформацији подграде.

За потребе у рударству најчешће се користи примјена viseће подграде, бетонске и челичне подграде за умјерено чврсте стијене док се за случај стијена које су склоне обрушавању користе дрвени и челични залагачи, челична и пластична мрежа, арматурно гвожђе и други расположиви материјали.

У зависности од тога да ли се понашање стијенске масе послје лома манифестује као стијенска маса која изазива притисак или је склона обрушавању, да би се извршио адекватан избор подграде за први случај понашања стијенске масе потребно је одредити притисак који подграда може да прихвати према крову и боковима просторије. У складу са тим вриједности максималних притисака за различите врсте подграде се могу добити према подацима по Ноек-у (1999), за инсталиране врсте подграде у просторији кружног попречног пресека, приказаних на Слици 2.18.

Тип подграде	Ширина ребра- mm	Дубина секције- mm	Тежина - Kg/m	Број криве	Максимални притисак подграде $P_{i\max}$ (MPa) за тунеле пречника D (m) и растојање оквира s (m)
Широко ребро	305	305	97	1	$P_{i\max} = 19.9D^{-1.23}/s$
	203	203	67	2	$P_{i\max} = 13.2D^{-1.3}/s$
	150	150	32	3	$P_{i\max} = 7.0D^{-1.4}/s$
I профил	203	254	82	4	$P_{i\max} = 17.6D^{-1.29}/s$
	152	203	52	5	$P_{i\max} = 11.1D^{-1.33}/s$
ТН секција	171	138	38	6	$P_{i\max} = 15.5D^{-1.24}/s$
	124	108	21	7	$P_{i\max} = 8.8D^{-1.27}/s$
Решетка са 3 шипке	220	190	19	8	$P_{i\max} = 8.6D^{-1.03}/s$
	140	130	18		
Решетке са 4 шипке	220	280	29	9	$P_{i\max} = 18.3D^{-1.02}/s$
	140	200	26		
 Цементирана сира или каблови s/s m мрежи. Максимални просјечни напон је око 0.2% осим за анкере са навртком и шипке са влакнима и кабловима.	34 mm	сидро	10	$P_{i\max} = 0.354/s^2$	
	25 mm	сидро	11	$P_{i\max} = 0.267/s^2$	
	19 mm	сидро	12	$P_{i\max} = 0.184/s^2$	
	17 mm	сидро	13	$P_{i\max} = 0.10/s^2$	
	SS39 Split set		14	$P_{i\max} = 0.05/s^2$	
	EXX Swellex		15	$P_{i\max} = 0.11/s^2$	
	20mm шипке		16	$P_{i\max} = 0.17/s^2$	
	22mm влакна		17	$P_{i\max} = 0.26/s^2$	
	Обични каблови		18	$P_{i\max} = 0.15/s^2$	
	Кавез каблови		19	$P_{i\max} = 0.30/s^2$	

Тип подграде	Дебљина- mm	Трајање- дана	UCS - MPa	Број криве	Максимални притисак подграде $P_{i\max}$ (MPa) за тунеле пречника D (m)
 Торчет или прскани бетон. Просјечни максимални притисак је око 0.1%.	1m	28	35	20	$P_{i\max} = 57.8D^{-0.92}$
	300	28	35	21	$P_{i\max} = 19.1D^{-0.92}$
	150	28	35	22	$P_{i\max} = 10.6D^{-0.97}$
	100	28	35	23	$P_{i\max} = 7.3D^{-0.98}$
	50	28	35	24	$P_{i\max} = 3.8D^{-0.99}$
	50	3	11	25	$P_{i\max} = 1.1D^{-0.97}$
	50	0.5	6	26	$P_{i\max} = 0.6D^{-1.0}$



Слика 2.19. Максимални притисци различитих подграде на зидове просторије (профили, шипке, сидра и бетон), [29]

Наведени случајеви понашања стијенске масе и функције изабране подграде су детаљно приказани на Слици 2.19. За случај када подграда не налијеже на стијенски масив по обиму просторије долазиће до појаве помјерања стијене, тачка G (испрекидани дио криве EG и FH од линије подграде DEF) и до појаве притиска од растресања (тачка H на дијаграму).

Потребно је истаћи да се за дефинисање функције подграде у односу на понашање стијенске масе користе анализе по разним истраживачима, од којих најчешће анализе по Egger-у, Seeber-у, Dessenne-у и Duffat-у, Rebsewitz-у и другима.

Да би се одредиле деформационо-напонске карактеристике стијенске масе и подграде односно предвидјело понашање и лом стијенске масе, у новије вријеме са великом прецизношћу се користе методе коначних елемената.

2.5.1. Врсте подграде

Према функцији коју треба да обавља подграда, за потребе подземне експлоатације најчешће се користе системи за ојачавање стијенске масе и спречавање пропадања стијенске масе у откопани простор. Ојачавање стијенске масе односно побољшање услова стабилности стијенске масе се врши углавном клиновима, пренапрегнутим сидрима и кабловима док се за спречавање пропадања комада стијенске масе у откопани простор користи прскани бетон, мрежа и челични оквири. То значи да на избор система подграђивања највећи утицај има поље напона око подземне просторије и структура стијенске масе која окружује подземну просторију односно величина зоне ослабљена или изломљене стијенске масе. Који систем подграђивања ће се бирати у одређеним условима зависи од распона односно геометрије откопа, услова подземних вода, потенцијалног лома стијенске масе и присуства сусједних просторија и откопа.

Избор система подграђивања се може базирати на основу аналитичких, емпиријских и нумеричких рјешења.

2.5.1.1. Подграђивање сидрима

Сидра се према класификацији од стране Међународног друштва за механику стијена (ISRM) из 1974 године, дијеле на:

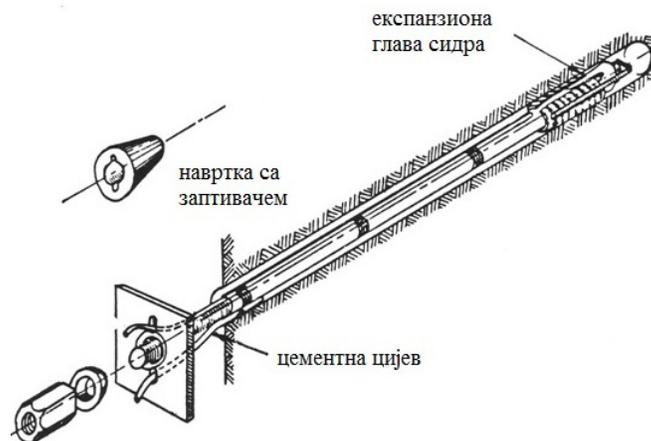
- штапна сидра, који представљају челичну шипку која је на једном крају учвршћена у бушотину помоћу механичког уклештења или учвршћена пријањањем, и

- кабловска сидра, који представљају челично кабл од ужета или жице уграђене у бушотину учвршћено адхезијом.

Основна карактеристика сидара је да се обично врши њихово преднапрезање прије постављања у стијену. Ако служе за трајну стабилизацију подземних просторија или се користе у средини склоној корозији онда се цементирају цијелом дужином. Ако је њихова примјена намјењена за краћи временски период онда у том случају се постављају без цементирања.

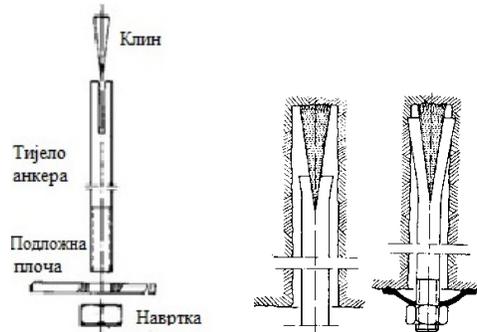
У рудницима са подземном експлоатацијом се користе два основна типа анкера и то преднапрегнута механичка или експанзиона сидра и цементирани или фриксиони клинови.

Према Ноек-у [2], сидра са механичким или експанзионим учвршћењем тијела имају највећу примјену у пракси и користе за осигурање подземних просторија у компактним и чврстим стијенама док мање у слабир, распуцалим и невезаним стијенама. Поред наведеног, ова сидра неби требало да се користе у стијенској маси са великим деформацијама, за дуготрајну стабилизацију подземних просторија у течној или агресивној средини, у стијенској маси са појавом клизања блокова, у условима када се не могу пратити затезања сидра и друго.



Слика 2.20. Приказ уградње сидра са механичким учвршћењем [28]

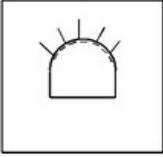
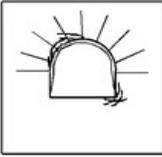
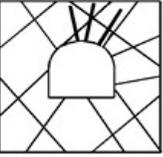
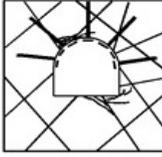
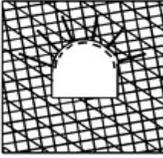
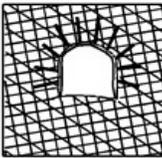
Клинови се обично не преднапрежу и оптерећење у клину се ствара приликом утискивања клина у стијенску масу. Треба напоменути да је клинове најбоље постављати прије значајних помјерања у стијенској маси.



Слика 2.21. Шема уградње сидра са клином

На Слици 2.22. је дат приказ више врста сидара и клинова који се могу користити за ојачавање стијенске масе при различитим типовима стијена и различитим појавама лома у стијенској маси којом је окружена подземна просторија.

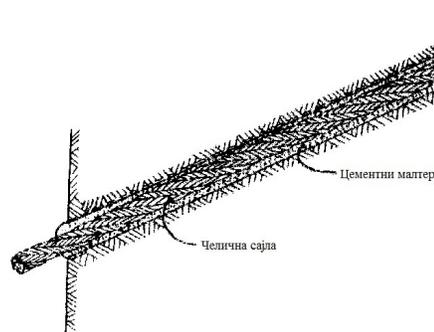
Пошто је основни недостатак механичких сидара у томе да се приликом проклизавања или пуцања сидра носивост сидра пада до нулте вриједности и стијенска маса може да се обруши. Предност у таквим случајевима имају потпуно цементирани или фрикциони клинови јер када долази до проклизавања сидра или пуцања навртке преостала дужина сидра и даље има функцију одржавања стијенске масе.

	Зоне малих напрезања	Зоне великих напрезања
Масивна стијена	 <p>Масивна стијена изложена дејству напона. Није потребна стална подграда. Може се користити привремена подграда.</p>	 <p>Масивна стијена изложена дејству великих напона. Да би се спрјечило пропадање стијенског материјала користе се сидра или клинови са мрежом или торкрет бетоном.</p>
Испуцала стијена	 <p>Масивна стијена са дисконтинуитетима изложена дејству малих <i>in situ</i> напона. Сидра се постављају тако да спрјече појаву лома појединих блокова и комада. Сидра мора бити затегнута.</p>	 <p>Масивна стијена са дисконтинуитетима изложена великим <i>in situ</i> напона. Тешка сидра или клинови су постављени тако да пресецају структуру стијене, са мрежом или челичним влакнима</p>
Веома испуцала стијена	 <p>Веома испуцала стијенска маса изложена дејству слабих <i>in situ</i> напона. За спречавање испадања ослабљених комада стијенске масе користе се сидра са мрежом и/или прсканим бетоном.</p>	 <p>Веома испуцала стијенска маса изложена великим <i>in situ</i> притисцима. користе се сидра или клинови са челичним влакнима ојачаним са бетоном. У екстремним случајевима, могу се користити челични оквири. За осигуравање крова се могу користити окренути упорњаци или бетон.</p>

Слика 2.22. Примјена различитих врста сидара приликом различитих појава лома стијенске масе [2]

На Слици 2.23. се може видјети примјена сидара у различитој стијенској маси, и са различитим дејством напонских стања у стијенској маси, с тим да ако дође до проклизавања или кидања сидра капацитет сидра опада и стијена која је подграђена може да се обруши осим када је то случај код потпуно цементираног сидра или клина код којих иако дође до таквих појава, стијена ће остати ојачана цијелом дужином клина.

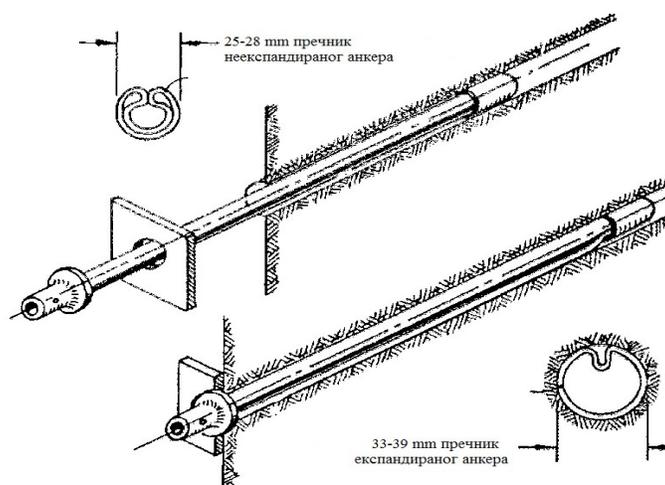
Што се тиче каблова, њихов састав је сличан цементираним сидрима или сидрима са смолом с тим што челичну шипку у овом случају замјењују челични каблови. Предност примјене каблова је у томе што њихова дужина може бити већа од распона подземне просторије и имају велике капацитете али главни недостатак примјене се огледа у томе што не могу да се користе у присуству воде у бушотинама.



Слика 2.23. Приказ уградње каблова у стијенску масу

Поред наведених сидара у новије вријеме широку примјену подземној експлоатацији имају тзв. Swellex и Split set сидра.

Swellex сидра су цијеви од специјалног челика које су савијене у омега профилу, са једне стране отворени а на другом крају имају отвор за пуњење анкера водом под притиском. Ова сидра неби требало да се користе у стијенској маси са великим деформацијама.



Слика 2.24. Шематски приказ уградње Swellex сидра [44]

Split set сидра сну једноставније конструкције али имају ограничену примјену. Ова сидра се неби требали да користе у мекој или изломљеној стијенској маси услед потенцијалног смањена напрезања у сидру, у стегнутим условима стијенске масе и када је тешко постићи контролу пречника бушотина.



Слика 2.25. Изглед Split set сидра

Као што је већ наведено, основна функција примјене висеће подграде односно сидара је побољшање основних параметара стијенске масе (чврстоће и модула деформација стијенске масе).

Наведена теорија побољшања карактеристика стијенске масе (Young модул деформација и модул смицања) је представљена по Aydan-у (1989) на основу израза:

$$\begin{aligned}\Delta E_x &= (E_b - E_m) \cdot n \\ \Delta G_y &= (G_b - G_m) \cdot n \\ \Delta G_z &= (G_b - G_m) \cdot n\end{aligned}\tag{1.47}$$

гдје су

E_m, E_b - модули еластичности стијенске масе и челичне шипке,

G_m, G_b - модули смицања стијенске масе и челичне шипке,

$n = A_b / A_t$

A_b - попречни пресјек челичне шипке,

A_t - попречни пресјек површине стијенске масе.

По (Zhao и Zhu, 2003) побољшање чврстоће стијенске масе сидрењем зависи од повећања кохезивне чврстоће стијенске масе, тако да се ефекат сидрења може изразити по критеријуму Mohr-Coulomb- а:

$$\begin{aligned}
\sigma_1 &= N_\theta \sigma_3 + 2c^* \sqrt{N_\theta} \\
c^* &= c + \Delta c = \frac{1}{2} \Delta \sigma_3 \sqrt{N_\theta} \\
N_\theta &= \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \\
\Delta \sigma_3 &= \frac{A_b \sigma_b \sin \phi}{s^2}
\end{aligned}
\tag{1.48}$$

гдје је

s - растојање сидара,

A_b - попречни пресјек сидра,

σ_b - оптерећење односно напон у сидру, $\sigma_b = E_b \epsilon_b$.

Вечина оптерећења које сидро треба да прими се одређује прорачуном по одређеним условима за свако мјесто гдје се врши његово уграђивање а на основу:

- стања стијенске масе у којој се врши осигуравање подземне просторије,
- правца оптерећења,
- дужине сидра, и
- растојања између анкера.

Проблематиком одређивања дужине сидра постоји више теорија и тиме су се бавили доста истраживача тако постоји више начина прорачуна дужине сидра.

Дужина сидра се обично усваја да буде једнака дужини напредовања једног циклуса избијања подземне просторије, мада се може дужина сидра може ускладити и са ширином подземне просторије.

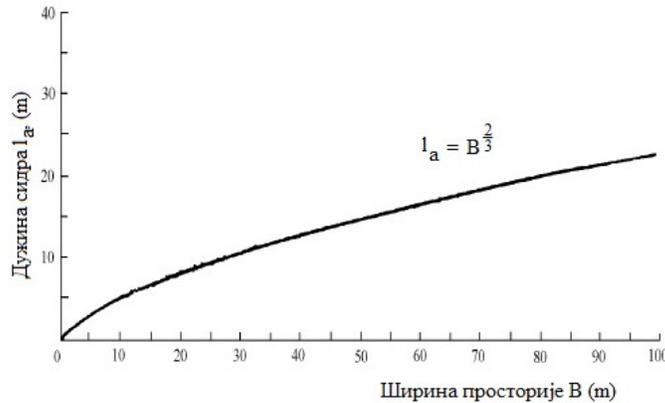
Према Е. V. Robcewicz-у, услов за прорачун сидра се узима претпоставка да се након једног циклуса израде подземне просторије дужине (l) у кровини просторије образује растрешена зона дебљине

$$\frac{t}{2} = \frac{l}{2}
\tag{1.49}$$

Према Lang и Bischoff-у, зависност између дужине сидра и ширине подземне просторије се може изразити следећим изразом [31]:

$$l_a = B^{2/3} \quad (1.50)$$

Познавајући ширину подземне просторије могуће је одредити дужину сидра на основу дијаграма на Слици 2.26.



2.26. Дијаграм зависности дужине сидра од ширине просторије [27]

Према А.С.Куриски дужина сидра се одређује по обрасцу:

$$l_a = \frac{2a}{f} \quad (1.51)$$

гдје је

l_a - дужина сидра (m),

$2a$ - ширина просторије (m),

f - коефицијент чврстоће по Протуђаконову.

Дужина сидра се може одредити према класификацији стијенског материјала-*RMR*:

$$l_a = \frac{B}{2} \left(100 - \frac{RMR}{100} \right) \quad (1.52)$$

гдје је

B - ширина просторије (m),

RMR - показатељ квалитета стијенске масе.

Описани начини одређивања дужине сидра се односе на њихову примјену у подземним просторијама са ширином просторије $B=2a$, која се изражава у метрима.

Важно је да дужина сидра буде довољна да савлада зону ослабљених дијелова стијенске масе и да његовим утискивањем у стијенски масив захвата неослабљену зону изнад свода природне равнотеже.

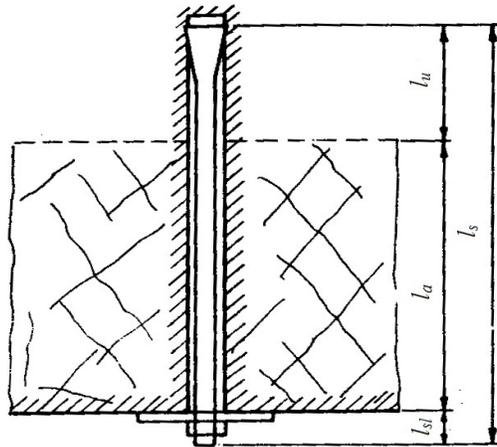
Висина свода природне равнотеже се одређује према изразу:

$$h_1 = l_a = \frac{a}{f} \quad (1.53)$$

гдје је

a -половина ширине просторије (m),

f - коефицијент чврстоће стијенске масе у којој се врши подграђивање.



2.27. Шема за прорачун дужине сидра [23]

Дужина утискивања сидра у неоштећени стијенски масив се може добити преко израза:

$$l_u = 0,4 \cdot \sqrt{\frac{d_1 \cdot \sigma_z}{\sigma_t}} \quad (1.54)$$

гдје је

d_1 - пречник језгра навоја сидра (mm),

σ_z - дозвољена затезна чврстоћа сидра (daN/cm²),

σ_T - дозвољена затезна чврстоћа стијене (daN/cm²),

l_{sl} - дужина сидра ван бушотине (8-10cm).

Поред дужине сидра, важан параметар код подрађивања сидрима је растојање између сидракоје се рачуна по образцу:

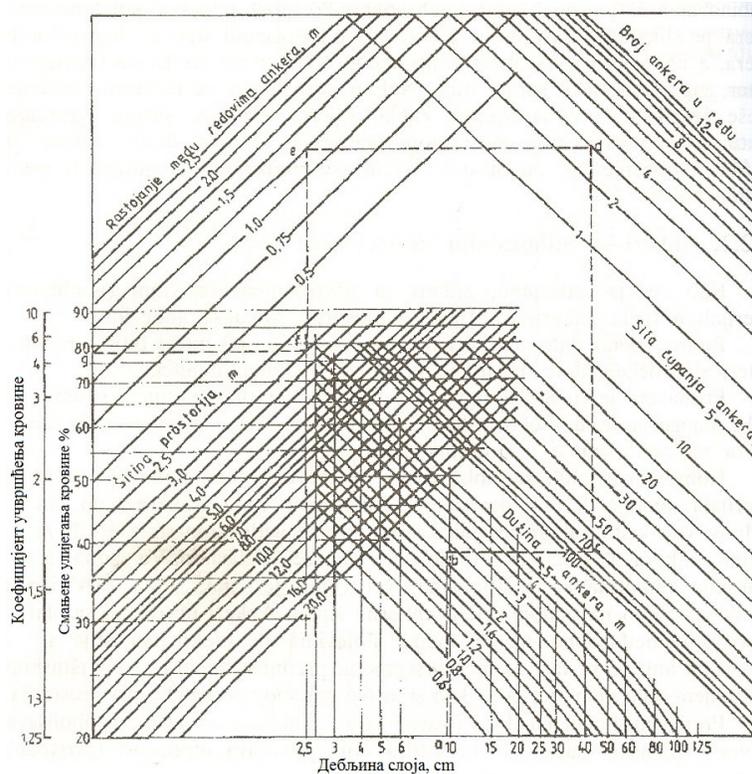
$$l_k = 0,886 \sqrt{\frac{d_1^2 \cdot \sigma_z}{\gamma \cdot h_1}} \quad (1.55)$$

гдје је

γ запреминска тежина стијене (N/cm³).

За случај дјеловања висеће подграде на принципу механизма формирања греде, дужина сидра се одређује на основу природних и рударско-геолошких услова и намјенски се користи искључиво за примјену у рудницима са подземном експлоатацијом угља.

У слојевитим лежиштима основни параметри код избора параметара висеће подграде могу одредити на основу специјалном номограму за хоризонтално услојену кровину примјеном пренапрегнутих сидара, по Рапек-у (1964).



Слика 2.28. Приказ номограма за одређивање параметара сидара за примјену у хоризонтално услојеној слабој стијени, по Panek-у (1964).

Поступак избора параметара висеће подграде по дијаграму са Сlike 28. се састоји из следећих корака:

- избора дужине сидра на основу дебљине кровине,
- одређивање сила чупања сидра,
- одређивање дебљине сидра односно број сидара у реду и растојања између редова,
- одређивање распона просторија отварања у циљу одређивања коефицијента ојачавања кровине.

2.5.1.2. Подграда од бетона

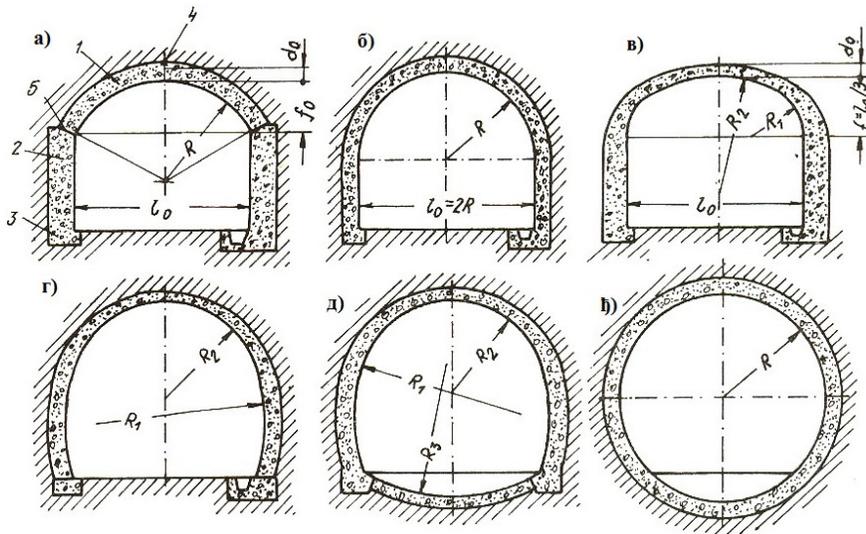
У подземној експлоатацији, подграда од бетона се искључиво користи за подграђивање капиталних просторија које треба да служе дужи временски период

а које се налазе ван утицаја откопног притиска и деформација стијенског масива изазване откопавањем и искључиво се користи за засвођен и кружни облик подземне просторије.

Такође, по својим деформационим карактеристикама спада у непопустљиву подграду и поред подграђивања у чврстим стијенама и на великим дубинама успјешно се користи и код подграђивања подземних просторија у слабом материјалу на малим и средњим дубинама.

Бетон као подградни материјал, има малу затезну чврстоћу, трајност и способност да издржи велика напрезања на притисак и погодан је за израду било које форме подградне и других конструкција.

У зависности од спољашњег оптерећења, правца његовог дјеловања, величине просторије и марке бетона зависи облик подграде и њен попречни пресјек па тако и сводови могу имати различите облике који су приказани на следећој слици.



Слика 2.29. Различити пресјечи подземних просторија подграђених подградом од бетона.

1- свод, 2- зид, 3- темељ, 4- свод, 5- ослонац свода; R - полупречник закривљености, f_0 - висина свода, l_0 -ширина просторије.

У стијенским материјалима са коефицијентом чврстоће $f=3 - 9$, користи се нискозасвођени облик а за коефицијент чврстоће $f<3$ високозасвођени облик подграде.

Када је тај бочни притисак све већи и када се приближава вертикалном притиску тада је облик подградне конструкције приближнији кругу.

Када се подземни притисак јавља са свих страна примјењује се потковичасти облик подграде, кружни или кружни облик са обрнутим сводом.

На великим дубинама и у нестабилном стијенском материјалу, класична бетонска подграда се показала неефикасна пошто се бетон са временом стврдњава и практично ствара једну непопустљиву и нееластичну конструкцију и тако услед великих напрезања долази до појаве пукотина у бетону и њихових разарања.

Што се бетонске подграде тиче, њена примјена је ограничена величином деформација контуре подземне просторије а може се побољшати са повећањем попустљивости саме конструкције.

Прскани бетон у подземној експлоатацији у већини случајева има функцију као мрежа, са којом се одржавају мали комади стијенске масе приликом пропадања из крова и бокова просторије. Овакав начин подграде служи да се стијенска маса задржи у мјесту и да има карактеристике самоодрживости.

Основна битна карактеристика прсканог бетона је да се примјењује одмах након израде подземне просторије пошто се услед дужег стајања постиже већа чврстоћа бетона а с тиме и отежана примјена по ободу просторије.

Подграда од бетона у условима већих притисака и обрушавања материјала може да се ојача са челичним влакнима обично дужине 30-38 mm и пречника влакана од 0.5 mm да би се постигла већа носивост подградног система.

Табела 2.7. Мјешавина за прскани бетон [35]

Компоненте	kg/m ³	Procent
Цемент	420	18.6
Микро-силикатни адитиви	42	1.9
Измјешани агрегати	1735	76.9
Челична влакна	59	2.9

2.5.1.3. Челична подграда

Основна намјена и употреба челичних оквира се огледа у замјени дрвених оквира у подземној експлоатацији.

Важно је напоменути да се подграда челичним оквирима сматра пасивном подградом у том смислу што се не постиже исто садејство са стијенском масом као у случају сидара или клинова. Али у том случају предност је што челични оквири због својих констуктивних карактеристика могу да поднесу оптерећења којима су изложена приликом кретања стијенске масе у унутрашњости просторије.

По својим физичким и механичким особинама челик представља еласто–пластични материјал који може да издржи и значајне пластичне деформације без већих губитака способности почетне носивости.

Поред способности да може да истрпи велика оптерећења велика предност примјене ове подграда је у томе шт послјије исправљања деформисаних елемената метална челична подграда се може поново користити.

Конструктивно, челична оквирна подграда састоји се од више елемената међусобно спојених, тако да у односу на облик конструктивних елемената оквири могу бити састављени од :

- правих елемената (трапезни и правоугаони облик),
- лучних и правих елемената (засвођени облик),
- лучних елемената (кружни и потковичасти облик).

Према начину функционисања (деформационим карактеристикама) подградни оквир може бити:

- попустљив,
- ограничено попустљив,
- непопустљив.

Свака од наведених конструкција подесна је за одређене експлоатационе услове.

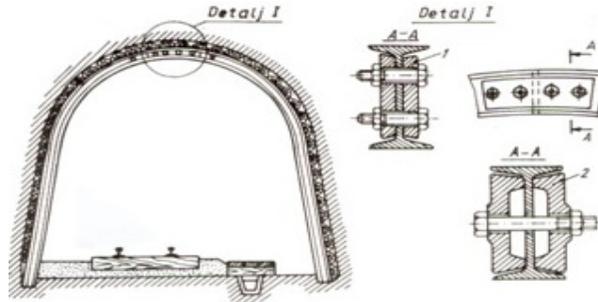
Поред наведених основних подградних оквира, у пракси се примјењују и многи други облици, прилагођени конкретним природним условима и материјалима од којих се подграда израђује.

У непопустљиву оквирну челичну подграду припадају трапезни, засвођени, кружни и јајолики облик са основним карактеристикама непромјењљивости облика и димензија. Овај оквир нашао је примјену у условима када је величина

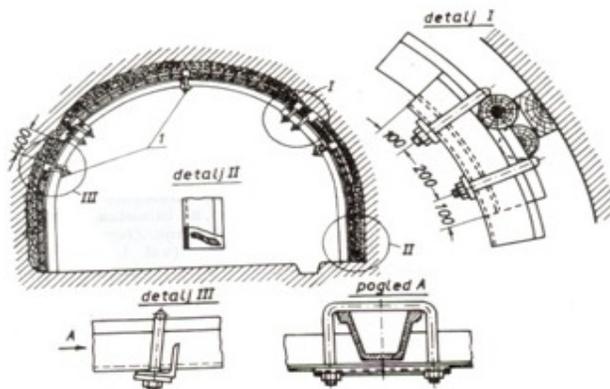
подземног притиска позната и користи се за подграђивање основних просторија (просторија отварања и основне припреме).

За израду сегмената користе се различити челични профили (I профил, челична шина, специјални рударски I – профил са широким ножицама и други).

На следећим сликама су приказани неки од облика елемената челичне подраде:



Слика 2.30. Приказ лучног непопустљивог оквира



Слика 2.31. Приказ лучног попустљивог оквира

2.5.1.4. Подграда од дрвета

У случајевима када је подземни притисак умјереног интензитета и када подземна просторија треба да траје један краћи временски период углавном се користи дрвена подграда.

Основни облик подграде од дрвета се састоји од дрвеног оквира, односно од сљеменаче и два ступца (стојке) и најчешће се користи код правоугаоног,

трапезног и полигоног облика подземних просторија с тим да се у зависности од стабилности стијена у крову и боку просторије може да користи потпуни и непотпуни подградни оквир [20].

Када из кровине и бокова просторије дјелује јамски притисак умјерене јачине тада се користи трапезни облик подградног оквира док код дејства притиска из кровине користи се правоугаони подградни оквир.

За примјену дрвене подграде код подграђивања подземних просторија користи се залагање

Код стијенског материјала са коефицијентом чврстоће $f=1\div 3$ бокови просторије се потпуно залажу, за $f=4\div 7$ бокови просторије се мјестимично осигуравају гредицама, а за $f=8\div 9$ бокови просторија се само мјестимично залажу и осигуравају.

Важно је напоменути да се у чврстим стијенама подградни оквири постављају обично на растојањима од 0.8 до 1,2 m, док код слабих стијена услед великог подземног притиска постављају један поред другог, најчешће у границама од 0.5 до 0.8 m.

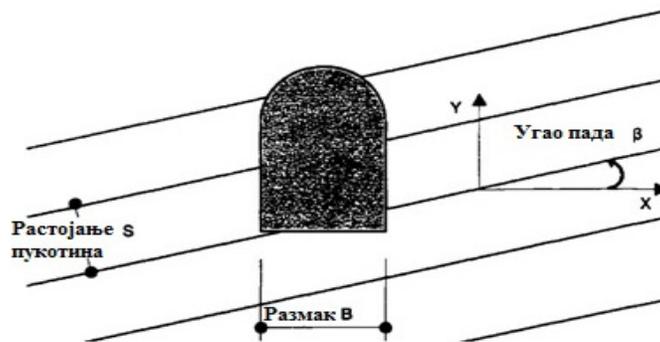
Карактеристично је за подграду од дрвета да може бити и сложене конструкције што зависи од величине подземне просторије, начина израде и интезитета подземног притиска.

У материјалу склоном одроњавању и осипању срвени оквири се споља залажу залагама од окрајака, обично од танког облог дрвета или цјепаног дрвета под кровом и по потреби дуж бокова ходника.

2.6. Примјена нумеричког моделирања у слојевитим рудним лежиштима

Подземна експлоатација минералних сировина а тиме и израда подземних просторија отварања у услојеним стијенама првенствено зависи од пројектованих димензија откопа, in-situ напона, растојања између слојева, угла пада слојева и основних карактеристика слојева.

Приказ односа одређених параметара у слојевитој стијенској маси је дат на Слици 2.33.

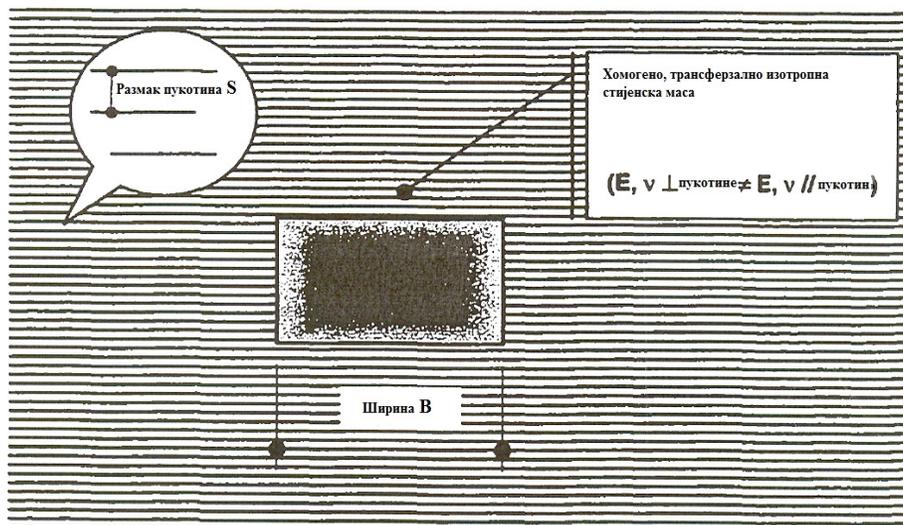


Слика 2.32. Параметри у услојеној стијенској маси, [41]

Нумеричко моделирање у услојеним стијенским масама се може примјенити на основу димензија откопа и *in situ* напона с тим да се услојене равни морају третирати као дискретни слојеви и да не зависе од дебљине слоја.

Према I. Vicenzi [41], у услојеној стијенској маси у зависности од растојања између дисконтинуитета могу се разматрати три основна случаја распореда слојева стијенске масе у односу на ширину просторије.

У првом случају као што је приказано на Слици 2.32., присутан је мали размак између дисконтинуитета.



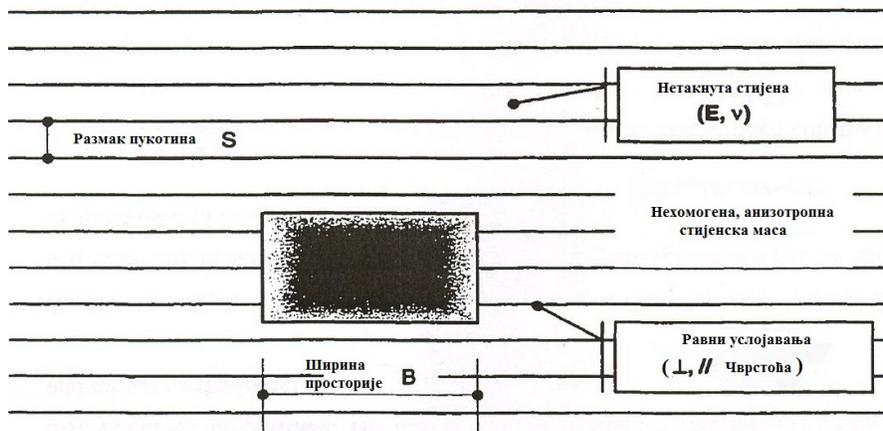
Слика 2.33. Мали размак дисконтинуитета, B/S

За наведени случај мањег размака дисконтинуитета у односу на ширину откопа кровина откопа се третира као хомогена са трансферзално изотропним стијенским

материјалом када су основне карактеристике материјала паралелне са пукотинама различите од истих када су окомите на њих.

У случају дисконтиуитета у услојеној стијенској маси са умјерним размацима када се стијена третира као изотопан или трансферзално изотропан материјал потребно је разматрати утицај дисконтиуитета између слојева и пратити чврстоћу стијенског материјала.

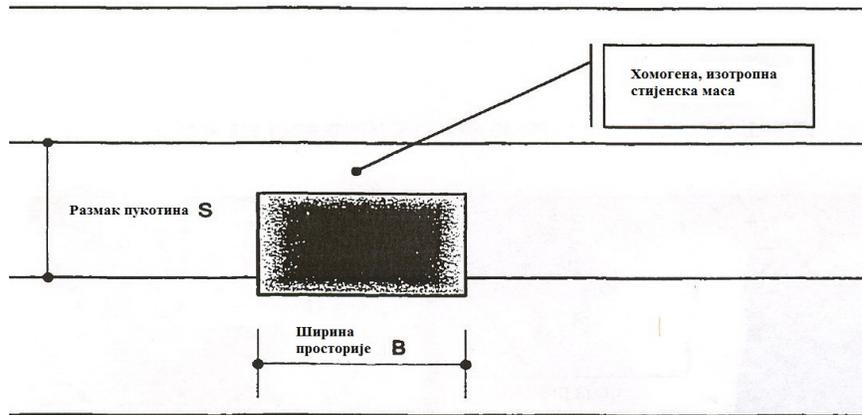
На Слици 2.34. је дат приказ односа умјерених размака дисконтиуитета у односу на ширину просторије.



Слика 2.34. Умјерено размакнуги дисконтиуитети, B/S [41]

За случај услојених стијенских маса са дисконтиуитета на ширим размацима, присуство дисконтиуитета не мора имати никакав или може имати мали утицај на чврстоћу и деформације стијенске масе.

Однос наведених параметара у услојеној стијенској маси је приказан на Слици 2.35.



Слика 2.35. Широки размак дисконтинуитета, B/S

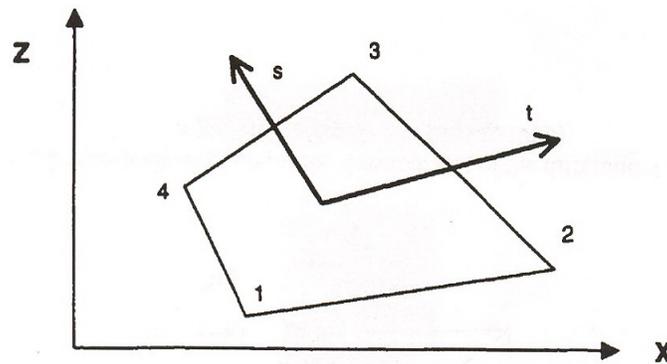
2.6.1. Amadei-a и Goodman приступ за израду модела у услојеној стијенској маси

Према аутору [41], код пројектовања и израде тунела за истраживање P101 у Швајцарским Алпама за праћење понашања услојених стијенских маса, основни циљ истраживања је био да се развојем једноставних нумеричких модела који су базирани на методи коначних елемената симулирају основне карактеристике услојених стијенских маса узимајући у обзир произвољну геометрију откопа, присуство *in situ* напона, механичке карактеристике стијенске масе (E , ν) и равни услојавања због растојања пукотина, нагиба и чврстоће на смицање равни услојавања.

У складу са наведеним према методологији и на основу симулација услојене стијене базиране на појму еквивалентне еластичне средине према приступу Amadei-a и Goodman-a, у моделу су разматрани утицај карактеристика дисконтинуитета и утицај размјере подземне просторије отварања. Због немогућности да се добију једноставни улазни подаци са поузданим резултатима симулације стијенске масе узимало се стварно стање пукотина са становишта њиховог утицаја на деформационе карактеристике и чврстоћу стијенске масе у којој се радила просторија.

За потребе модела понашања стијенске масе при изради просторија отварања узета је једна серија пукотина и модел је преформулисан је у дводимензионални код за примјену коначних елемената.

Кориштена је мрежа коначних елемената са 4-чворним елементом и локалним системом координата (s,t) , Слика 2.36.



Слика 2.36. 4-чворни елемент у глобалном и локалном систему координата [41]

Према истом аутору, глобалне координате (x,z) у свакој тачки елемента су повезане са локалним координатама (s,t) на основу следећег израза:

$$x = [N]\{X\} \quad (1.56)$$

$$z = [N]\{Z\}$$

гдје је

$[N]$ - распоред облика функције интерполације, и

$\{X\}, \{Z\}$ - глобалне координате x, z координате чвора елемента.

Облик функције је изражен преко локалних координата на основу следећих израза:

$$\begin{aligned}
N_1 &= \frac{1}{4}(1-s)(1-t) \\
N_2 &= \frac{1}{4}(1+s)(1-t) \\
N_3 &= \frac{1}{4}(1+s)(1+t) \\
N_4 &= \frac{1}{4}(1-s)(1+t)
\end{aligned} \tag{1.57}$$

За потребе анализе напона и деформација да би се формулисале једначине коначних елемената потребно је усвојити модел за поље промјенивих у елементу. Напони и притисци у дводимензионалном координатном систему (x, z) су повезани на основу закона Хук-а, преко константи еластичности E и ν :

$$\begin{aligned}
\sigma_x &= \frac{E}{1-\nu-2\nu^2} [(1-\nu)\epsilon_x + \nu\epsilon_z] \\
\sigma_z &= \frac{E}{1-\nu-2\nu^2} [\nu\epsilon_x + (1-\nu)\epsilon_z]
\end{aligned} \tag{1.58}$$

$$\tau_{zx} = \frac{E}{2\left(\frac{E}{2(1+\nu)}\right)} \gamma_{zx}$$

Према теорији по Lekhnitskom (1963), напони су дефинисани изразима:

$$\begin{aligned}
\epsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} \\
\epsilon_z &= \frac{\partial v}{\partial z} \\
\gamma_{xz} &= \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)
\end{aligned} \tag{1.59}$$

или у терминима производа материце и вектора, као:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix}$$

Према Amadei и Goodman (1981), матрица еластичности на основу модела еквиваленте еластичне средине за услојену стијенску масу у дводимензионалном облику је:

$$[D] = \begin{bmatrix} \frac{1-\nu-\nu}{E} & \frac{-\nu}{E} & \frac{-\nu}{E} & 0 \\ \frac{-\nu}{E} & m & \frac{-\nu}{E} & 0 \\ \frac{-\nu}{E} & \frac{-\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -n \end{bmatrix} \quad (1.60)$$

гдје је

$$m = \frac{1}{E} + \frac{1}{k_n S} \quad (1.61)$$

$$n = \frac{1}{2G} + \frac{1}{2k_s S} \quad (1.62)$$

Према наведеном, матрица садржи четири независна параметра еластичности тако да E , ν описују карактеристике нетакнуте стијенске масе, $k_n S$, $k_s S$ описују карактеристике чврстоће пукотина и S растојање између равни услојавања.

2.6.2. Параметри и резултати анализе за модел у услојеним стијенским масама

Примјер анализе напона и деформација у услојеним стијенама по I. Vicenzi [41], је дат за случај израде истражног тунела Piogi у услојеној стијенској маси у дужини од 17 km Швајцарским Алпама. Иако се тунел ради кроз повољну радну средину

дуж тунела услед појава пукотина са малим растојањима између равни постоји опасност колапса горњег дијела просторије које је повезано са ширином просторије.

Према томе, присутност пукотина у највећој мјери угрожава стабилност тунела и у овом случају је урађена дводимензионална симулација са $e-z$ алаткама софтвера за моделирање услојених стијена тако да према приступу Amadei и Goodman-a, могуће је пратити утицај пукотина и карактеристике нетакнуте стијенске масе и стање напона на деформабилност услојене стијенске масе око израђеног тунела за истраживање.

Од основних параметара за израду модела карактеристични су Модул еластичности стијенске масе E чија вриједност се усваја око 40 GPa, и Poisson-ov коефицијент ν , вриједности 0.2. Тунел кружног попречног пресјека је рађен на дубини од 800 m што тиме значи да је изложен великим хоризонталним и вертикалним притисцима, а модел стијенске масе је описан као анизотропни континуум са вриједностима коефицијента, $k=0,5/1,0/1,5$.

Са датим подацима и попречним пресјеком просторије, разматраним са 2-D анализом се показало да оријентација пукотина заједно са димензијама подземне просторије а тиме и са карактеристикама пукотина и различитим вриједностима напона имају негативне утицаје на деформације и расподјелу напона у стијенској маси око подземне просторије једино у случајевима веома малих вриједности нормалне чврстоће и чврстоће на смицање. Наведени примјер модела у услојеној стијенској маси може послужити и за моделирање у неслојевитој стијенској маси у условима испуцалих стијена, стијена са великим модулом еластичности, у условима са великим хоризонталним и вертикалним притисцима и великим распонима подземних просторија отварања.

2.7. Примјена математичког програма *Matlab*

Matlab је широко примјењив математички језик који се користи у разним пројектима за нумеричке прорачуне, за обраду и визуализацију податка, за програмирање и развој алгоритама и служи као основа за софтверске програме. Примјена *MatLab* је вишеструка и у рударству се првенствено користи за

оптимизацију одређених параметара након нумеричке представе одређеног проблема односно служи за обраду нумеричких рјешења код веома комплексних проблема у циљу да се добију специфична рјешења у случајевима када је деривација математичких једначина компликова. Овим програмским језиком могу да с врше прорачуни матрицама, приказ функција и података, увођење алгоритама и међусобна интеракција са другим програмима написаних у другим језицима укључујући C, C++, Java, Fortran и Python.

Према ауторима [43], примјена овог програма је послужила за оптимизацију вриједности притисака приликом израде бушотина у четири различите геолошке формације у Ирану, приликом нумеричког моделирања анализе стабилности бушотина примјеном FLAC3D, на основу односа ослабљене површине попречног пресејка око бушптине и унутрашње површине бушотине.

Примјер примјене *MatLab* за одређивање алгорита код нумеричког моделирања код стабилности косина примјеном преднапрегнутим *Tieback* сидрима је објашњен према ауторима [44]. Према ауторима [45], *MatLab* има широку примјену у код геотехничког пројектовања и у рудницима са поземном експлоатацијом и код пројектовања површинских копова, узимајући у обзир и регионалне тектонске покрете, *in situ* напоне и друге геолошке параметре за праћење односно контролу стања напона околне стијенске масе код откопа било у рудницима са подземном експлоатацијом или на површинским коповима.

3. РАЗВОЈ МОДЕЛА КОНСТРУКЦИЈЕ ПРОСТОРИЈА ОТВАРАЊА РУДНИКА СА ПОДЗЕМНОМ ЕКСПЛОАТАЦИЈОМ

3.1. Дефинисање проблема

Пројектовање конструкције подземних просторија при отварању рудника са подземном експлоатацијом је врло комплексан и мултидисциплинарни процес који захтјева свеукупно познавање ове области и добро разумијевање многих питања. Рјешавање овог проблема у савременој рударској пракси се заснива на развоју сложених нумеричких модела, како би се сви релевантни фактори интерактивно могли узети у обзир при избору коначног дизајна конструкције.

Интегралним приступом нумеричког моделирања релевантних стијенских параметара и одређених претпоставки развијамо модел понашања стијенске масе око просторија отварања у реалним условима за дато лежиште. На овај начин се реалније интерпретира понашање и реакција стијенске масе, а тиме и ефикаснији начин доношења инжењерских одлука.

Интегрални нумерички модел ће бити развијен на основу модела радне средине, модела просторије отварања у погледу димензија и облика, и модела система подграђивања подземне просторије отварања. Сви моделовани релевантни параметри се затим уводе у интегрални математички модел да би се формулисао алгоритам математичких зависности појединих параметара.

Моделирање радне средине. Моделирање радне средине ће се извршити примјеном методе коначних елемената, која за потребе анализа узима у обзир све параметре материјала добијене на основу критеријума лома стијенске масе по Нок-Броун критеријуму.

Примјеном методе коначних елемената у рударству, за потребе израде подземних просторија отварања могуће је обухватити сложу геометрију континуума и граничних услова и пратити напоне и деформације које се јављају у стијенском масиву приликом дејстава различитих напонских стања прије и после израде подземне просторије чија је дужина знатно већа од њеног попречног пресека.

Израда модела ће бити заснована на карактеристичном геолошком профилу лежишта које ће се разматрати са свим литолошким члановима и њиховим геомеханичким карактеристикама добијених на основу испитивања узорака у лабораторијским условима, искуствено или *in-situ*.

У следећем кораку потребно је извршити дискретизацију модела, односно потребно је развити модел са одређеним бројем коначних елемената тако да последице уноса тих параметара, програм може да генерише дату мрежу коначних елемената којима ће се касније додати подаци за запреминску тежину и механичке карактеристике стијенске масе да би се извршила симулација стварног напонског стања у стијенској маси.

Након уноса података, њиховом обрадом и интерпретацијом се може се одредити примарно напонско стање које влада у непоремећеној стијенској маси прије откопавања. Пошто је стијенска маса сама оптерећена сопственом тежином и оптерећењима са површине терена, јер како је већ раније наведено последице израде просторије се ремети природно равнотажно стање које влада у масиву, из тог разлога је потребно вршити даљу процјену да би се подземне просторије осигурале и одржавале одређени временски период.

У анализама напона и деформација стијенског масива када се не располаже са подацима за измјерене вриједности примарних напона у масиву онда се узимају у обзир различите дубине откопавања испод површине терена и модули еластичности за дате радне средине у тим случајевима компоненте вертикалних и хоризонталних оптерећења могу имати различите вриједности.

Из разлога што нису постојала досадашња мјерења за примарно напонско стање у стијенској маси за разматрани рудник, за одређивање вертикалних и хоризонталних примарних напона може се користити прорачун преко аналитичких израза према Е. Ноек-у [26] или се те вриједности могу процјенити и одредити на основу режима за ранија тектонска помјерања у региону.

Поред наведеног, у циљу постизања стабилности просторија отварања рудника и избора оптималног система подграђивања, односно постизања потребног фактора сигурности и смањена зоне пластификације око подземне просторије, следећу фазу напонско- деформационе анализе чине израда модела израђене подземне просторије без подграде и израда модела подземне просторије са примарном

подградом. У складу са тим, формира се мрежа коначних елемената са задатим границама модела да би се добила детаљнија интерпретација напона у масиву око подземне просторије и након уноса параметара за стања модела врши се интерпретација секундарног напонског стања напона и деформација у стијенској маси односно се прате се промјене напрезања и величине деформација око контуре подземне просторије. Моделирање радне средине подразумијева, поставку нумеричког модела, израду геомеханичког модела за анализу напонских стања у масиву.

Избор облика и величине просторија отварања. У рудницима са подземном експлоатацијом минералних сировина, избор облика и величине подземне просторије може да се врши на основу одређених критеријума. Основна методологија избора облика подземне просторије се заснива на физичко-механичким карактеристикама стијенске масе, функционалним карактеристикама облика профила и вијека трајања одговарајућег профила подземне просторије.

Физичко-механичке карактеристике стијенске масе утичу на локацију просторија отварања у односу на положај лежишта, односно да ли ће се подземна просторија радити у подинском или кровинском боку или у самом лежишту, утиче на технологију израде просторије, на брзину израде, начин подграђивања просторије, што све у цјелини утиче на укупне трошкове израде подземне просторије.

Поред намјене просторије и радне средине кроз коју се просторија израђује, са аспекта одређивања величине подземне просторије према критеријуму примјењене технологије у руднику, морају да буду задовољени сви критеријуми у погледу стандардних димензија просторије у складу са сигурносно-техничким нормативима за несметано кретање транспортних средстава и сигуран рад радног особља и опреме.

У складу са изабраним профилем подземне просторије од посебне важности је величина подземне просторије отварања која зависи од начина отварања и планираног капацитета производње, односно од експлоатационих резерви минералних сировина у лежишту. Наведени критеријум се у највећој мјери користи код одређивања најповољнијег облика и величине подземних просторија отварања у неслојевитим лежиштима.

Веома важан критеријум избора оптималног облика и величине подземних просторија отварања је критеријум провјетравања, по којим подземне просторије отварања треба да задовоље услов потребне количине ваздуха у јамским условима за континуирано и сигурно провјетравање услед примјене бушачко-минерских радова, рада утоварно-транспортних машина и рада људи а у складу са јамским нормативима за дозвољену брзину кретања ваздуха за провјетравање. За дати критеријум, избор величине подземне просторије се може вршити са становишта трошкова провјетравања за случај рудника са дизел опремом, тако што је могуће одредити оптималну величину просторије отварања према услову минималних трошкова провјетравања и трошкова израде просторије отварања.

Поред тога, за избор просторије отварања може се примјенити и критеријум одводњавања, али се наведени критеријум претежно примјењује код избора мјеста отварања у зависности од близине водотока због могућег плављење просторија отварања него толико директно код одређивања величине подземне просторије отварања. По критеријуму примјењене технологије и конструктивних карактеристика у јамским условима за просторије отварања најчешће се користе кружни, правоугаони, високосасвођени и нискозасвођени облик подземне просторије.

Важно је напоменути да облик подземне просторије отварања зависи од величине и правца јамског притиска, односно избор облика се може вршити на основу критеријума минималних напона и деформација који се јављају у стијенском масиву.

Модел оптималне подземне просторије у дисертацији ће бити развијен на основу више варијанти подземних просторија у различитим радним срединама, с тим да ће се најповољнији профил подземне просторије који задовољава све наведене критеријуме изабрати на основу најмањих вриједности напона, фактора сигурности и деформација у стијенском масиву. Избор облика и величине подземних просторија се односи на избор величине и облика подземних просторија отварања према критеријуму механизације (за кружни, нискозасвођени, правоугаони и високосасвођени облик подземне просторије) и избор попречног пресека подземне просторије према критеријуму протока ваздуха.

Избор најповољније радне средине. Избор најповољније радне средине у напонско-деформационој анализи ће се вршити у два корака:

- Први корак: Израда модела просторија отварања у више радних средина са различитим коефицијентима односа примарних напонских стања у масиву.
- Други корак: Интерпретација напонских стања око разматраних просторија и усвајање најповољније радне средине.

У првом кораку ове фазе истраживања, потребно је урадити варијанте модела усвојене просторије отварања одређеног попречног пресека кроз моделиране радне средине. Сваку појединачну варијанту модела је потребно урадити на основу различитих коефицијента односа дјеловања примарних напонских стања у масиву да би се добила реална слика понашања стијенске масе у различитим условима напонских стања.

У последњем кораку, интерпетацијом свих варијанти модела се могу донијети закључци у којој средини се просторије отварања могу сматрати стабилним, са или без присуства великих деформација контуре подземне просторије те у складу са тим извршити и избор система подграђивања. Избор најповољније радне средине подразумијева избор оптималне радне средине у лежишту за лоцирање просторија отварања.

Избор најповољнијег система подграђивања. Раније су основни критеријум за избор најповољнијег система подграђивања углавном били базирани на присуству и дејству притисака у стијенском масиву на подграду и минимални напони и деформације стијенског масива према теоријама по Протуђаконову, Terzaghi-у, Bierbaumer-у и Sallustowiz-у. У новије вријеме прорачун напона и деформација врши примјеном рачунарских програма и најчешће примјеном методе коначних елемената. Примјеном нумеричких метода се може процјенити понашање подземних просторија без подграде и са подградом. Нумеричким налазама се добијају вриједности фактора сигурности и у складу са њима врши избор система подграђивања за сваку појединачну просторију у различитим условима рада.

Добијене вриједности фактора сигурности на основу прорачуна добијених преко чврстоће стијенском масе и насталих напона ће служити као показатељ правилног избора система за подграђивање. За потребе модела на основу методе дводимензионалних коначних елемената ће се извршити моделирање основних елемената примарне подграде (сидра, армирани млазни бетон са мрежом и челични оквири) различитог распореда, дужине и дебљине подградних елемената и узети у обзир модули еластичности појединих типова подграде, чврстоћа на кидање, Poisson-в коефицијент, притисна и затезна чврстоћа, и друге битне карактеристике подградних система. Интерпретацијом добијених резултата ће се пратити деформације стијенске масе у крову и боку просторије и избором одговарајућег система подграђивања утицати на повећање фактора сигурности од лома и смањење зоне пластификације стијенске масе око подземне просторије. Када се у анализу избора подграде уводе сидра, користиће се различите дужине сидара и комбинације сидра са мрежом и прсканим бетоном, с тим да је потребно да аксијалне силе у анкерима приликом утискивања у стијенски масив одговарају његовим механичким карактеристикама, да не би дошло до њиховог проклизавања. Поред наведеног критеријума и методологије избора подграде, други веома важан критеријум за избор најповољнијег система подграђивања код просторија отварања у рудницима са подземном експлоатацијом је цијена подградног материјала односно укупни трошкови подграђивања.

На основу интерпретације модела за сваки начин подграђивања у изабраној радној средини у складу са наведеним критеријумима добиће се резултати свих варијанти модела и извршити избор оптималног система подграђивања у погледу њихове техничке функционалности. Поред модела конструкције подземних просторија основни циљ овог истраживања нумеричка потврда примјењивог модела система подграђивања просторија отварања у рудника са подземном експлоатацијом неслојевитих рудних лежишта. Избор најповољнијег система подграђивања подразумјева избор система за подграђивање просторије отварања на основу примјењених модела, основне критеријуме за избор система подграђивања сидрима, моделе подграђивања сидрима.

Одређивање функционалне зависности одређених параметара у анализи. Да би одредио утицај параметара који су уведени у моделе конструкције просторија отварања на коначан исход појединих резултата анализе примјеном нумеричког програма (*Phase²*) и доношења одређених одлука о наведеним изборима у претходним ставкама, следећи корак анализе би се огледао у обради параметара са становишта њихове математичке зависности са примјенивим математичким програмом *MatLab*. За потребе обраде параметра који су кориштени у нумеричким моделима радне средине, облика и система подграђивања просторија отварања у рудницима са подземном експлоатацијом, најпогоднији је математички програмски пакет *MatLab* због могућности постизања једноставнијих, брзих и прецизних рјешења овако комплексног проблема процјене понашања стијенског масива. Предност кориштења програмског језика *MatLab* у овом случају се огледа у томе, да сви подаци добијени обрадом овог математичког пакета могу послужити као основа за следећу фазу пројектовања у раду рудника са подземном експлоатацијом односно да се избором једног параметра након добијене функције зависности може утицати на избор другог параметра или више параметара који су уведени у анализу.

Примјеном програмских пакета (*Phase²* и *MatLab*) у рјешавању оваквих проблема може се постићи већа флексибилност у раду, тако што се примјеном алгоритама може утицати на одређивање појединих параметара у нумеричким моделима и добити резултати истраживања приближни резултатима који се могу постићи у реалним условима.

Наведено се конкретно односи на избор адекватног система подграђивања код просторија отварања у неслојевитим рудним лежиштима, да би се за поједине случајеве облика подземних просторија и у различитим радним средина, у условима различитих дејстава примарних напона могао формирати алгоритам и добила функционална зависност једног од наведених случаја. Одређивање функционалне зависности одређених параметара у анализи подразумјева алгоритам зависности параметара нумеричке анализе.

3.2. Моделирање радне средине

3.2.1. Поставке нумеричког модела

Нумеричко моделирање стијенске масе представља један од начина праћења и процјене понашања стијенске масе приликом и након израде подземних просторија у рудницима са подземном експлоатацијом. За симулацију праћења понашања стијенске масе око подземних просторија у неслојевитим рудним лежиштима у условима различитих примарних напона за потребе нумеричког моделирања описан је и шематски приказан општи поступак рада.

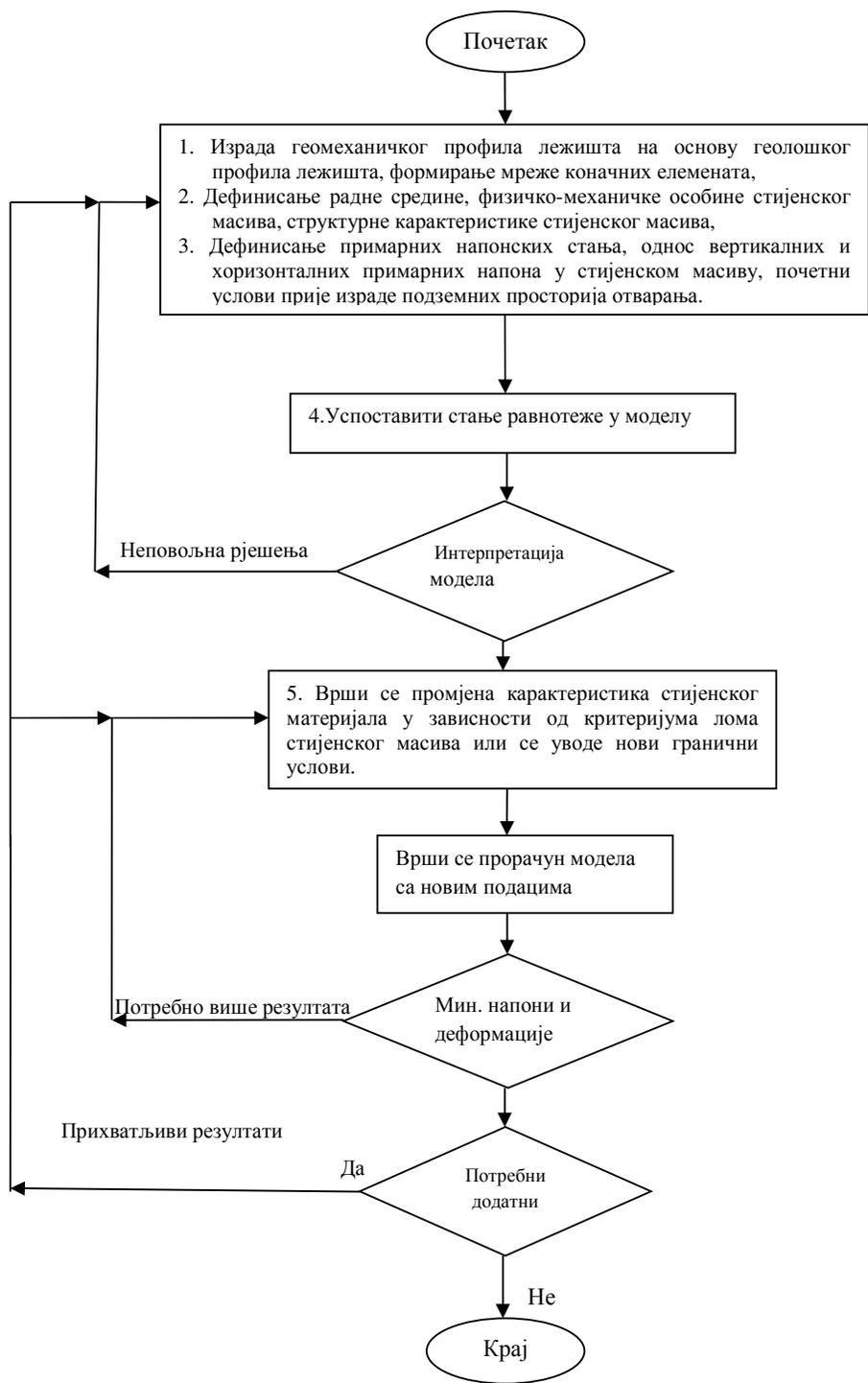
Поставке нумеричког модела:

1. Увођење геомеханичког профила лежишта, формирање мреже коначних елемената,
2. Дефинисање радне средине, физичко-механичке особине стијенског масива, структурне карактеристике стијенског масива,
3. Дефинисање примарних напонских стања, однос вертикалних и хоризонталних примарних напона у стијенском масиву, почетни услови прије израде подземних просторија отварања.
4. Понашање стијенске масе у равнотежном стању напона.
 - Интерпретација модела.
5. Ако се на основу модела добија јасна слика понашања стијенске масе у модел се уводе просторије различитог облика и димензија, мјењају се карактеристике стијенског материјала у зависности од критеријума лома стијенског масива или се уводе нови гранични услови.
 - Ако модел не задовољава, сав процес до сада у моделу се враћа на корак 2.
 - Са сваком изменом услова у моделу, врши се испитивање сваке промјене док се не добију прихватљиви резултати приближни реалном понашању стијенског масива.

- За потребе већег обима резултата потребно је вратити процес модела на корак 5.
- Ако се моделом постижу прихватљиви резултати ту се завршава процес моделирања, у случају када се не постижу потребна рјешења онда се процес враћа на корак 2 односно на поновно дефинисање параметара радне средине.

Након формулисаног нумеричког модела и добијених рјешења потребно је извршити додатне анализе изабраних параметара у једном од примјенивих математичких програма.

Претходно описан поступак рада за потребе нумеричког модела је шематски приказан на Слици 3.1.

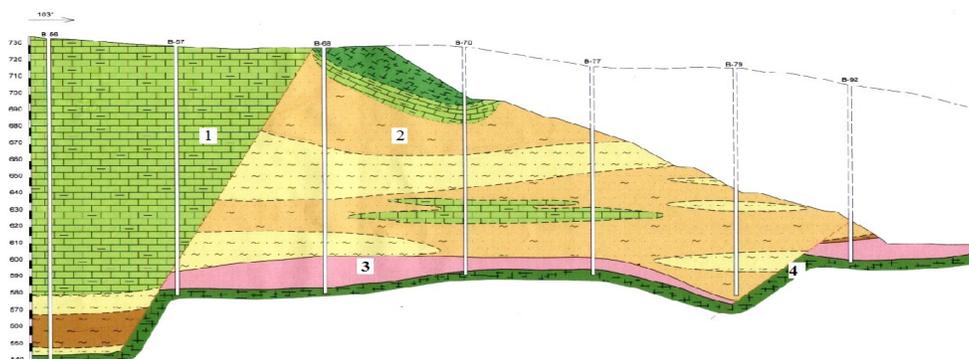


Слика 3.1. Шематски приказ тока израде примјењеног нумеричког модела

3.2.2. Израда геомеханичког модела за анализу напонских стања у масиву

Почетни корак у напонско-деформационој анализи стијенске масе са примјеном методе коначних елемената је израда геомеханичког модела стијенског масива.

Полазна основа за израду геомеханичког модела стијенске масе представља карактеристичан геолошки профил лежишта са свим литолошким члановима, тако да се са становишта израде и стабилности подземних просторија морају узети у обзир појаве свих геолошких формација у подручју гдје би се лоцирала просторија отварања. Примјер геолошке грађе лежишта је дат на Слици 3.2.



Слика 3.2. Геолошки профил рудног лежишта: литолошки члан 1, литолошки члан 2, литолошки члан 3, литолошки члан 4, литолошки члан, литолошки члан 5

Код нумеричког моделирања стијенске масе за случај примјене методе коначних елемената морају се обезбједити одређени улазни параметри, с тим да се вриједности тих параметара за сваки литолошки члан могу добити мјерењима *in situ*, статичким прорачунима, лабораторијским опитима, искуствено и на основу литературних извора.

Неопходни улазни подаци односно физичко-механичке карактеристике стијенске масе за наведену методу прорачуна у зависности од усвојеног критеријума лома (Поглавље 2.2.) су :

- запреминска тежина γ
- модул еластичности E ,
- Poisson-ов коефицијент μ ,
- угао унутрашњег трења ϕ ,

- кохезије c ,
- чврстоћа на притисак σ_c ,
- чврстоћа на истезање σ_t ,
- коефицијент стијенског масива m_i ,
- фактор оштећења стијенског масива D ,
- GSI , и други.

Табела 3.1. Карактеристичне физичко-механичке особине стијенске масе [46]

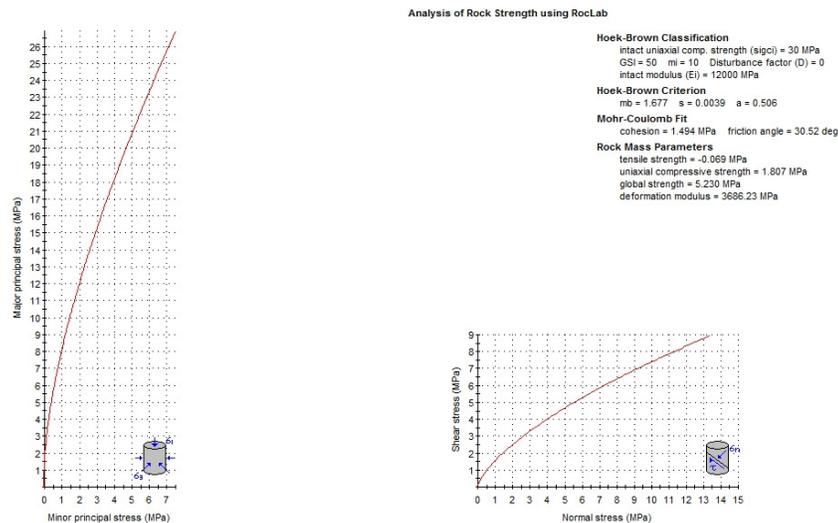
Стијенски материјал	γ (MN/m ³)	σ_c (MPa)	f	c (MPa)	E (MPa)	φ (°)
Литолошки члан 1	2.60	30÷50	7	10÷50	2500/6000	35÷50
Литолошки члан 2	2.30	10÷100	-	3÷30	-	15÷30
Литолошки члан 3	-	15÷55	8	-	3200/4500	-
Литолошки члан 4	2.70	20÷250	-	8÷40	1400/4000	35÷50
Литолошки члан 5						

Вриједност Poisson-ов коефицијент μ за већину стијенских материјала се креће између 0.15 -0.35, с тим да у анализама напонских стања када не постоје подаци за одређену средину обично се узима да је $\mu =0.25$. Вриједност $\mu < 0.2$ је карактеристична за масивне стијене, док је за седиментне стијене вриједност $\mu = 0.3$.

По теоријским разматрањима познато је да стање напона око подземне просторије није зависно од Poisson-ог коефицијента μ , али да су напони у стијенској маси и напони код примјене методе коначних елемената зависни од вриједности Poisson-ог коефицијента док су деформације стијенске масе обрнуто пропорционалне модулу стијенске масе E .

Када се не располаже са подацима за параметре чврстоће стијенске масе у зависности од примјењеног критеријума лома, потребни подаци се могу добити класификацијом стијенске масе и прорачунима за одређивање параметара чврстоће стијенске масе примјеном одређених програмских пакета.

Приказ добијених података на основу програмских прорачуна је дат на Слици 3.3.



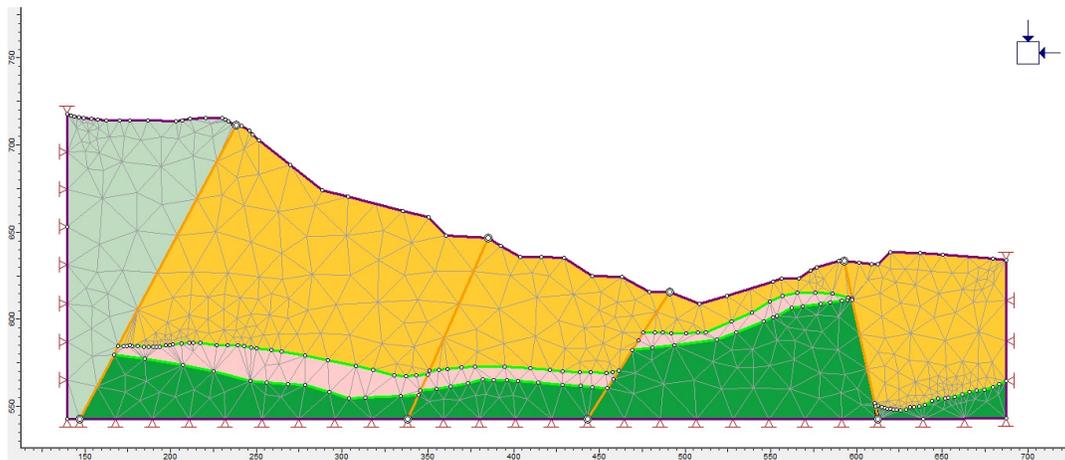
Слика 3.3. Интерпетација података за параметре чврстоће стијенске масе

Када се за дефинисање радне средине користи *GSI* класификација стијенске масе критеријум по коме је рађен модел са прорачунима за параметре чврстоће је детаљније објашњен у Поглављу 2.5.2. Према ауторима [40], у зависности од *GSI* класификације стијенске масе могу се одредити вриједности параметара чврстоће (*peak* и *residual*) за типичне стијенске масиве. Различите стијене осим у случају веома нарушених стијенских маса показују другачије понашање послје лема, тако да су са становишта пројектовања и израде подземних просторија поред максималних (*peak*) вриједности чврстоће од посебне важности и процјене минималних (*residual*) вриједности параметара чврстоће. Практично, резидуална чврстоћа се поштиже након пластичне деформације стијенске масе и има значајан утицај на стабилност откопа односно подземних просторија.

Критеријуми по коме се раде модели за случај стијенских маса односно Hoek-Brown критеријум са прорачунима за параметре чврстоће је детаљније објашњен у Поглављу 2.5.2.

За формирање мреже коначних елемената најчешће се користе триангуларни коначни елементи са 6 чворова по елементу, с тим да се сваком елементу додају карактеристике стијенске масе.

Примјер геомеханичког модела стијенске масе прије израде подземних просторија је дат на Слици 3.4.



Слика 3.4. Примјер модела радне средине за рудно лежиште прије израде подземних просторија:
литолошки 1, литолошки члан 2, литолошки члан 3. литолошки члан 4

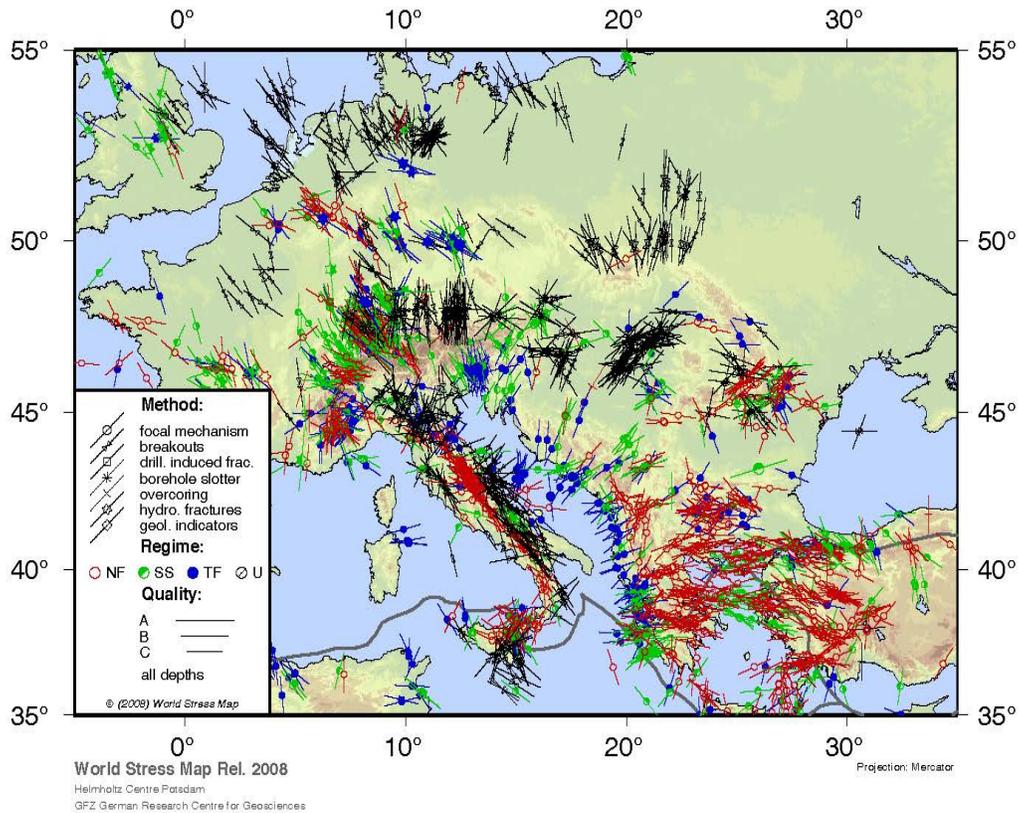
С обзиром да на избор оптималне локације просторија отварања утичу положај рудног тијела, карактеристике околних стијена, краћи приступ рудном тијелу, положај постројења на површини, конфигурација терена и примјењена метода откопавања, од посебне важности је постављање локације просторије отварања што је даље могуће од присутних расједања у лежишту. На развој деформација у околној стијенској маси и у дубини стијенског масива, може утицати положај подземне просторије у односу на елементе расједа и других тектонских појава (Поглавље 2).

За општи случај примарног напонског стања могу се усвојити услови са или без дјеловања Poisson-ог коефицијента и тектонских дјеловања који доводе до различитих услова напрезања на различитим дубинама стијенског масива. Те разлике напона у земљиној кори у различитим регионима и дубинама зависе од тектонских активности које су се дешавале у земљиној услед појава земљотреса, дјеловања вулкана и формирања планинских вјенаца, и других активности.

Да би се могле приближно утврдити и пратити те промјене користи се инструментално праћење и прорачуни у односу на теоријски одређене вриједности напона или још једноставније за одређивање примарних напона

користи се Глобална база података тектонских дешавања у Земљиној кори (World Stress Map), [33].

Примјер мапе тектонских помјерања у ближем региону и у Европи је приказан на Слици 3.5.



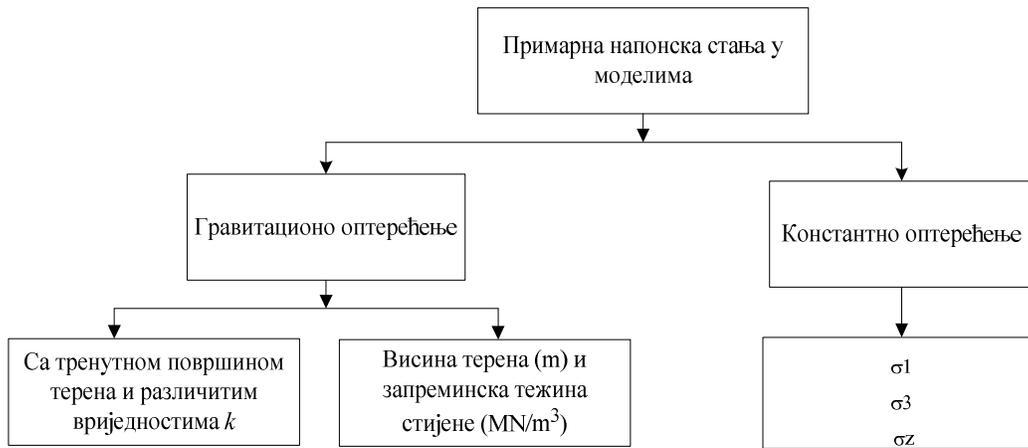
Слика 3.5. Мапа тектонских напона за подручје средње и југоисточне Европе са ознакама механизма земљотреса са TF, NF и SS режимом расједања. Црна линија на слици представља кретање тектонских плоча, са карактеристичним интензивним сеизмичким покретима у зонама кретања плоча.

Према подацима са Сlike 3.5. и режимима расједања који су се десили у прошлости у датим регионима могу се одредити положаји примарних напона у стијенском масиву, што је детаљније објашњено у Поглављу 2.4.1.

Поред наведених фактора, од пресудног утицаја на стање напона и развој деформација око подземне просторије је избор најповољнијег попречног пресека и димензије подземне просторије.

Да би се измоделирало напонско стање стијенског масива прије и после израде подземних просторија потребно је дефинисати примарна напонска стања које владају у стијенском масиву.

У моделима радне средине се могу усвојити гравитационо напонско стање са тренутном површином терена и почетним стањем елемената са напонским стањем у пољу и притисцима у рудном тијелу, или константно напонско стање када се располаже са подацима за највећи, средњи и најмањи напон у стијенском масиву и за угао под којим дјелује главни напон у масиву.



Слика 3.6. Услови оптерећења у стијенском масиву за потребе модела за истраживање

Важно је напоменути да у случају гравитационог напонског стања у моделима када се не користи постојећа површина тла, онда се на основу висине од површине тла и запреминске тежине стијенских наслага одређује примарно напонско стање у масиву, тачније вертикална компонента напона према изразу (1.31), Поглавље 2.

Да би се сагледали сви могући утицајни фактори на расподјелу напона око подземних просторија различитог попречног пресека и извршила нумеричка анализа напонских стања у околној стијенској маси у условима дејства хоризонталног и вертикалног напона, све наведено ће послужити за доношење одлука који облик и величина просторије се може сматрати оптималним у одређеним условима примарних напона. Под појмом оптимална подземна просторија се мисли на подземну просторију чији ће облик и величина

задовољити све критеријуме за њену стабилност и функционисање у планираном временском периоду.

Да би се извршила анализа стања напона и деформација око изабране подземне просторије отварања под датим условима оптерећења и добила реална слика стања у лежишту полазни услов ће бити да се просторија ради у пластичној средини, односно да се стијенска маса понаша према пластичном моделу.

3.3. Избор величине и облика просторија отварања

3.3.1. Избор попречног пресека подземне просторије отварања према критеријуму механизације

Са аспекта више критеријума избора облика подземних просторија, радне средине у лежишту у којој би се просторија израђивала посебно је важна метода откопавања у датом лежишту а тиме и избор облика, величине и лоцирање просторија отварања јаме.

То се првенствено односи на положај и правац пружања рудног слоја и чврстоће и карактеристика околних стијена односно каквих су карактеристика кровински и подински слојеви у лежишту. У зависности од методе откопавања и карактеристика подинског дијела лежишта у неслојевитим рудним лежиштима претежно се лоцирање просторија отварања врши баш у подинском дијелу лежишта.

Према прописима за подземну експлоатацију металних минералних сировина, облик и величина попречног пресека подземних просторија се одређује према примјеној механизацији, технолошком процесу производње, и од количине ваздуха потребне за провјетравање због сигурносних услова рада.

Полазни подаци за прорачун димензионисања подземних просторија отварања различитог облика по критеријуму димензионисања транспортне механизације и сигурносних прописа се врши према димензијама највеће транспортне јединице.

Према техничко-сигурносним прописима у просторијама које се користе за транспорт руде и материјала, без обзира на врсту транспортног средства дуж једне

стране просторије потребно је обезбједити простор за кретање радника са минималном ширином од 700 mm и висином 1800 mm.

У подземној експлоатацији металних минералних сировина израда подземних просторија се углавном врши класичним начином израде, тако да у систему израде подземних просторија бушења и минирања, утовара претежно утоварним лопатама, одвоз материјала и транспорт руде и јаловине најчешће врши или локомотивама и вагонетима или јамским камионима. Било који вид транспорта и извоза да се користи што зависи од капацитета рудника и рудних резерви са становишта примењене механизације се врши и димензионисање просторија отварања.

Према В. Чокорило [41], област примјене јамских камиона је ограничена и своди се на велике руднике метала, тако да би се јамски камиони могли користити за транспорт руде и материјала потребно је да буду испуњени следећи услови:

- адекватан попречни пресјек подземне просторије,
- висока производња рудника,
- добро регулисања вентилација,
- извоз откопаног материјала поткопом или нископом одговарајућег нагиба,
- адекватан квалитет подлоге за кретање камиона, и
- добро обучена, организована и опремљена служба за одржавање.

Према П. Јовановићу [28], за транспорт руде са јамским камионима са стране гдје је дозвољен пролаз радника, потребно је обезбједити минималну ширину од 1200 mm.

Код димензионисања подземних просторија, према Правилнику о техничким нормативима за машине са дизел опремом које се користе у рударским радовима у неметанским јамама, минимална ширина просторије кроз коју се креће транспортна механизација мора бити најмање за 1,0 m већа од ширине транспортног средства [36].

За анализу избора облика и величине подземне просторије отварања у лежишту металних минералних сировина могу се користити просторије кружног, правоугаоног и засвођеног попречног пресјека.

3.3.1.1. Димезионисање подземних просторија кружног попречног пресека

У складу са наведеним прописима и техничким карактеристикама расположиве механизације за транспорт руде и јаловине у руднику са подземном експлоатацијом боксита, под претпоставком да би се за просторију отварања могла користити просторија кружног попречног пресека, ширина просторије на нивоу транспортне механизације се може одредити преко израза:

$$B = b_1 + b_o + b_2 \text{ (mm)} \quad (4.1)$$

гдје је

b_o - ширина јамског камиона (mm),

b_1, b_2 - сигурносна растојања са лијеве односно десне стране механизације од бока просторије (mm).

За просторије кружног попречног пресека основни елемент овог попречног пресека подземне просторије представља полупречник просторије који се одређује преко израза:

$$R = k \cdot R' \quad (4.2)$$

$$R' = \sqrt{c^2 + (g + j)^2} \quad (4.3)$$

гдје је

k - коефицијент повећања полупречника просторије, (1.03-1.05),

c - растојање разматране тачке на профилу просторије до осе просторије (mm),

g - растојање од горње ивице јамског камиона до разматране тачке на профилу(mm),

j - растојање од центра просторије до горње ивице јамског камиона (mm).

Да би се извршила провјера величине попречног пресека пресека изабраног профила на основу брзине кретања ваздуха кроз просторију, слободна површина попречног пресека се може добити на основу израза:

$$S_{sl} = R^2 \pi - \frac{R^2}{2} \left(\frac{\pi \alpha}{180} - \sin \alpha \right), \text{ m}^2 \quad (4.4)$$

Централни угао α се добија преко израза $\text{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{0.5b_3}{e}$,

гдје је

b_3 - ширина подземне просторије на нивоу стајања камиона, (mm),

e - растојање од нивоа стајања камиона до центра просторије, (mm).

3.3.1.2. Димензионисање подземних просторија нискозасвођеног попречног пресека

За случај подземне просторије нискозасвођеног попречног пресека, прорачун ширине просторије се врши на основу израза:

$$B = b_1 + b_o + b_2 \text{ (mm)} \quad (4.5)$$

За одређивање димензија засвођеног дијела просторије полупречници закривљености се могу одредити на основу ширине просторије преко израза:

$$R = 0,692 \times B \quad (4.6)$$

$$r = 0,262 \times B \quad (4.7)$$

Површина слободног пресека подземне просторије се може добити преко израза

$$S = B \cdot (0.78 \cdot c + h_4) \quad (4.8)$$

гдје је

c - краћа полуоса елипсе (mm),

h_4 - висина центра малог полупречника, (mm).

3.3.1.3. Димензионисање подземних просторија правоугаоног попречног пресека

За случај правоугаоног попречног пресека подземне просторије у зависности од наведених димензија јамског камиона и сигурносних прописа прорачун ширине и висине просторије се врши према изразима:

$$B = b_1 + b_o + b_2 \text{ (mm)} \quad (4.9)$$

Као у претходним прорачунима за димензионисање подземних просторија, сигурносна растојања се могу произвољно усвојити под претпоставком да се подземна просторија користи у фази отварања и у фази експлоатације.

За прорачун висине просторије од коловоза до крова просторије се користи образац:

$$h_1 = h_o + \min 500mm \quad (4.10)$$

гдје је,

h_o - висина јамског камиона (mm).

Површина слободног профила подземне просторије се рачуна преко

$$S_l = B \cdot h_1 \quad (4.11)$$

3.3.1.4. Димензионисање подземних просторија високозасвођеног попречног пресека

Да би се извршио избор најповољнијег облика и величине подземне просторије на основу транспортне механизације и осталих критеријума, за радне услове у лежишту у анализи избора најповољније подземне просторије отварања може се користити и високозасвођени попречни пресјек подземне просторије.

Основни елемент код високозасвођеног попречног пресека просторије је полупречник свода, пошто из разлога бољег искориштења профила свод просторије треба да буде нешто већи од половине ширине просторије на нивоу горње ивице возила.

Полупречник свода се рачуна по образцу:

$$R = 0,5 \cdot B \cdot k \text{ (mm)} \quad (4.12)$$

гдје је

k - коефицијент корекције полупречника R , (1.10-1.15),

B - минимална дозвољена ширина просторије на нивоу стајања механизације.

Минимална ширина просторије на нивоу стајања транспортне механизације се рачуна као у претходним случајевима за различите облике подземних просторија, изрази (4.5),(4.9), тако да је ширина просторије у нивоу ивице јамског камиона:

$$B = b_1 + b_0 + b_2 \text{ mm.}$$

Површина слободног пресека просторије се добија преко израза:

$$S_{sl} = D(h_3 + 0.785D) \quad (4.10)$$

3.3.2. Избор попречног пресека подземне просторије по критеријуму протока ваздуха

Посебно важан критеријум код избора облика и величине подземних просторија је критеријум провјере профила подземне просторије са становишта дозвољене брзине кретања ваздуха.

Дозвољена брзина кретања ваздуха кроз јамске просторије зависи од врсте просторије, њене намјене и климатских фактора, тако да је по стандардима највећа дозвољена брзина кретања ваздушне струје кроз капиталне просторије 8 m/s, [39].

Одређивање величине профила подземне просторије у складу са овим критеријумом се врши на основу образаца за прорачун брзине кретања ваздуха:

$$v = \frac{Q}{S_{sl}} \quad (4.11)$$

гдје је

Q - потребна количина ваздуха, m^3/s ,

S_{sl} - слободна површина попречног пресека, m ,

v - дозвољена брзина кретања ваздуха кроз јаму, m/s .

Потребна количина ваздуха при изради подземне просторије у јамских условима може се одредити и према критеријуму једновремене потрошње експлозива при изради просторије на откопу преко израза:

$$Q = \frac{13.5}{t} \sqrt{Q_p \cdot S_{sl} \cdot \left(15 + \frac{Q_p}{5}\right)} \quad (m^3 / \text{min}) \quad (4.12)$$

гдје је

Q_p - количина једновремене потрошње експлозива за израду просторије (kg).

t - вријеме провјетравања (min),

S - површина попречног пресека (m^2).

Потребна количина ваздуха у односу на једновремену потрошњу експлозива може да се одреди по критеријуму за подземну просторију узимајући у обзир њену максималну дужину према изразу:

$$Q = \frac{0.4}{t} \sqrt{Q_p \cdot S_{sl} \cdot L} \quad (4.13)$$

гдје је

L - максимална дужина подземне просторије (m).

Потребна количина ваздуха према критеријуму за рад утоварно-транспортне и извозне опреме на дизел погон за случај рада са јамским камионима се може одредити по изразу:

$$Q = \frac{p \cdot Q_g \cdot Q_s \cdot k}{3600} \quad (4.14)$$

гдје је

p - снага мотора (kW),

Q_g - специфична потрошња горива (kg/kW),

Q_s - специфична потрошња ваздуха (3500 m³/kg дизел горива),
 k - фактор искориштења снаге мотора камиона.

Према критеријуму потребне количине ваздуха у односу на микроклиматске услове рада прорачун се врши према изразу:

$$Q = v \cdot S_{st} \quad (4.15)$$

гдје је

v - минимална брзина ваздушне струје (m³/s),

S_{st} - површина попречног пресека подземне просторије (m²).

Избор величине подземне просторије на основу брзине кретања ваздушне струје треба да задовољи основни услов да минимална брзина кретања ваздуха не смије бити испод 0.25 m/s.

Профил оптималног попречног пресека се може одредити и на основу анализа свих трошкова који настају приликом изградње и одржавања просторије као и трошкова провјетавања за одређени временски период [14].

Оптимална величина попречног пресека се може одредити на основу образца:

$$S_o = 4,3 \cdot \sqrt[3,5]{\frac{\alpha \cdot c \cdot w \cdot Q^3 \cdot t}{n \cdot (b + b_1)}} \quad (m^2) \quad (4.16)$$

гдје су

α - коефицијент аеродинамичког отпора подграде просторије у зависности од врсте подграде и степена храпавости контуре просторије,

t - вријеме експлоатације просторије,

w - цијена киловата електричне енергије,

Q - количина ваздуха која протиче кроз просторију, m³/s,

n - укупни коефицијент дејства вентилатора, (обично 0,5),

a - цијена коштања 1 m³ просторије- директни трошкови,

b - трошкови везани за цијену коштања,

$$b_1 = a \cdot b \quad (4.17)$$

c - коефицијенти прелаза од обима ка површини пресека и за одређене пресеке износи:

- кружни пресјек $c=3,54$
- правоугаони пресјек $c=4,00$
- нискозасвођени пресјек $c=3,80$.

Однос између обима и површине пресека подземне просторије се може изразити односом:

$$O = c \cdot \sqrt{S} \quad (4.18)$$

тако да у случају када се познају обим и површина профила просторије коефицијент c се може према изразу

$$c = \frac{O}{\sqrt{S}} \quad (4.19)$$

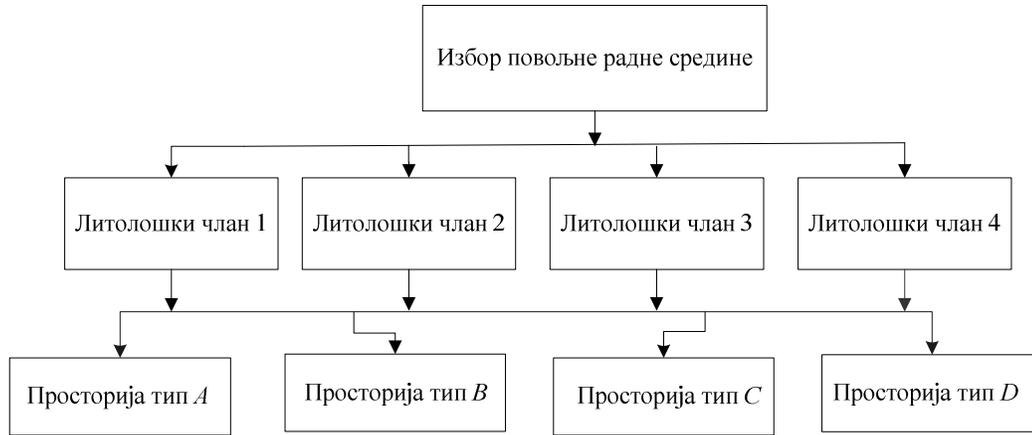
Након што се димензије подземних просторија одреде преко основних критеријума следећи корак истраживања је анализа распореда напонских стања и вриједности насталих деформација стијенске масе око подземних просторија у датим радним условима и у складу са тиме и изврши избор оптималне радне средине за њихово лоцирање.

3.4. Избор најповољније радне средине

3.4.1. Избор оптималне радне средине у лежишту за лоцирање просторија отварања

Да би извршио избор оптималне радне средине за локацију подземних просторија отварања потребно је урадити моделе подземних просторија различитих димензија и облика у више радних средина, и у складу са понашањем стијенске масе и критеријумима минималних деформација и повољних фактора сигурности стијенске масе усвојити најповољнију радну средину за лоцирање просторије отварања. Према томе, утицај величине попречног пресека откопа на напонско-

деформациона стања у различитим радним срединама се може утврдити на основу трајекторија напона у стијенском масиву.



Слика 3.7. Услови избора повољне радне средине и оптималне просторије

Након што просторија различитих величина и облика уведу у анализу, у моделе се може увести *load splitt* оптерећење између фаза израде подземне просторије, од почетног стања прије израде подземне просторије, стањем израђене просторије и коначним задњим стањем, са уграђеном подградном конструкцијом односно комбинацијом сидара, мреже и прсканим бетоном или другим видом подграђивања.

Пошто су главни предуслови са избор оптималне радне средине за лоцирање просторије отварања минималне деформације стијенске масе и фактори сигурности стијенске масе $F_s > 1$, односно услов да би разматране подземне просторије могле да остану стабилне након њене израде или да се подграђују у мањем обиму, потребно је да према резултатима спроведене анализе примјеном нумеричких модела подземна просторија задовољава све наведене критеријуме. У складу са резултатима анализе се врши избор оптималне просторије отварања и повољна радна средина за лоцирање таквих просторија.

3.5. Избор најповољнијег система подграђивања

3.5.1. Избор система за подграђивање просторије отварања на основу примјењених модела

Након избора радне средине за лоцирање просторија отварања и избора одговарајуће подземне просторије према усвојеним критеријумима, следећи корак анализе је избор оптималног система подграђивања као и међусобна зависност стијенске масе и примјењене подграде.

Позната је констатација да стијенска маса у зависности од врсте и интезитета оптерећења сама себи формира наповољнији носиви облик тако да би расподјела напона у стијенској маси по контури просторије биле приближно једнаке.

Основни циљ истраживања се огледа у томе да је потребно утврдити основне законитости односа напона и деформација, и у складу са тиме вршити процјену на који начин и када је потребно одржати стијенску масу. Практично то значи да се правилним избором начина и времена када је то потребно може постићи да стијенска маса успостави ново равнотежно стање односно да се сама одржава. За процјену односа напона и деформација у стијенској маси по контури подземне просторије у моделима коначних елемената од подградних елемената могу да се користе сидра, мрежа, бетон и челични I профили. У реалним условима приликом акције стијенске масе и реакције подграде по контури подземне просторије формира се зона деформација у стијенској маси, при чему облик и димензије зоне растерећења стијена директно утиче на интезитет подземних притисака, при чему нумеричким моделирањем и процјеном напонских стања за такве услове може утицати на конструкцију одговарајућег облика подземне просторије, на облик димензије, врсте и тип система подграђивања.

Избор оптималног начина подграђивања за сваки модел просторије може бити изведен у неколико фаза рада. Од првог стања са моделом непоремећеног стијенског масива са почетним напонским стањем, другог стања модела са израђеном подземном просторијом различитог попречног пресека и фазама са постављањем одређеног броја сидара и модел са крајњим стањем у комбинацији сидара са мрежом и прсканим бетоном или другим подградним материјалима.

Између стања се може узети подјељено оптерећење (*Load split*) да би свако стање са уградњом подграде могло симулирати стање да подграда прима одређени проценат оптерећења стијенске масе. Број сидара се одређује у складу са ширином подземне просторије и положаја зоне пластификације око подземних просторија. За почетни корак анализе избора оптималног броја и дужине сидара се користе основне карактеристике сидара: тип сидра, пречник, модул деформација сидра, затезна чврстоћа и друго.

Податак о носивости сидра је од велике важности с обзиром да сидро у условима кад постигне своју максималну носивост и даље извјесно вријеме има функцију подграде.

Анализа подграђивања изабране просторије отварања сидрима се првенствено базирана на различитим дужинама сидара. Дужина сидра се одређује у складу са класификацијом стијенске масе односно у зависности од чврстоће стијенске масе, на основу распона подземне просторије, прорачунима у Дијелу 2.5.1.1. и према резултатима напонско-деформационе анализе за разматране случајеве. Број сидара се такође одређује у зависности од ширине просторије.

Поред различитих дужина сидара у анализи избора оптималног система подграђивања сидрима потребно је уврстити и различита растојања између сидара. Досадашња исраживања су показала да растојање између сидара и облик односно профил утичу на побољшање чврстоће на смицање између сидра и околне стијенске масе. За ова истраживања утицаја различитих растојања између сидара, угла под којим се раде, облика и димензија на повећање стабилности околне стијенске масе кориште се опити чупања сидра. Процјена утицаја се такође врши емпиријским приступом односно графичком интерпретацијом, нумеричким техникама моделирања и лабораторијским испитивањем. Предност нумеричког моделирања је у томе што се може вршити праћење истовремено више модела и веома брзо и прецизно добити оптимална рјешења одређених проблема.

За случај подграђивања комбинацијом сидара, мрежа и бетона као крајње стање подграђивања у обзир се може узети највећи број сидара, мрежа и бетон са дебљином слоја у зависности од притисака који дјелују по контури просторије.

Код избора челичне мреже основни подаци који се користе су: пречник, Young-ов модул еластичности, и коефицијент Poisson-а.

Сваки испитивани модел подземне просторије отварања у напонско-деформационој анализи може бити рађен у неколико фаза подграђивања са различитим бројем сидара по контури одабране просторије, као на примјер у случају:

- Стање 1, би се односило на стање стијенског масива прије израде подземних просторија.
- Стање 2, на израђену подземну просторију без уграђених сидара. То значи да просторија није подграђена након њене израде.
- Стање 3, подземна просторија са уграђених три сидра након израде.
- Стање 4, са уграђених пет сидара.
- Стање 5, подземна просторија са уграђених седам или више сидара.
- Стање 6, са уграђених седам или више сидара у комбинацији са мрежом и прсканим бетоном
- Стање 7, само бетонска подграда, и друга стања.

3.5.2. Основни критеријуми адекватног избора сидара

Пошто примјена сидара у рудницима са подземном експлоатацијом има велике предности у погледу једноставности и обезбјеђења сигурности рада, стога се нумеричким моделирањем сидара као начина подграђивања може добити доста података који могу послужити као основа за правилан избор сидара у комплексним условима рада. Поред постизања повољног фактора сигурности у околној стијенској маси и очувања контуре подземне просторије уградњом сидара, избором оваквог начина подграђивања потребно је задовољити и остале критеријуме избора и међусобног односа сидра и стијенске масе.

Поред наведеног, за правилан избор система подграђивања сидрима неопходно је дефинисати просторни положај односно правац сидра, распоред сидара, густину сидара односно број сидара по јединици површине, дубину сидрења, начин

преноса вучне силе анкера на слободну површину и начин комбиновања са другим подградним елементима.

Важно је напоменути да се уградњом сидара поред повећања фактора сигурности утиче на смањење зоне пластификације околне стијенске масе и смањење деформација по контури подземне просторије. У случају када деформације прелазе критичне вриједности тада се помјерање стијенске масе формира облик природног лука. Избором сидара одређене дужине, броја и карактеристика се утиче на смањење деформација стијенске масе по контури просторије. Када се дужина сидра повећава тада се смањују деформације стијенске масе. Стварна дужина сидра L би требала бити већа од теоријске и у пракси се обично узима да дужина сидра буде 1,5 до 2 пута већа од дебљине пластичне зоне око подземне просторије.

Следећи важан критеријум избора је утицај смањења аксијалних сила у сидрима. На вриједности аксијалних сила у сидрима утиче сам распоред сидара по контури подземне просторије. Према искуственим подацима када се растојање између сидара смањује, у том случају долази до смањења вриједности аксијалних сила у сидрима. Примјеном сидара у рудницима са подземном експлоатацијом утиче се и на расподјелу индукованих напона тако да са примјеном сидара већих дужина може се постићи боља расподјела и повећање напона.

И поред велике примјене сидара данас као начина подграђивања подземних просторија односно очувања карактеристика околне стијенске масе на располагању је мали број поузданих података истраживања у лабораторијским и *in situ* условима да би се такви могли примјенити у сличним случајевима.

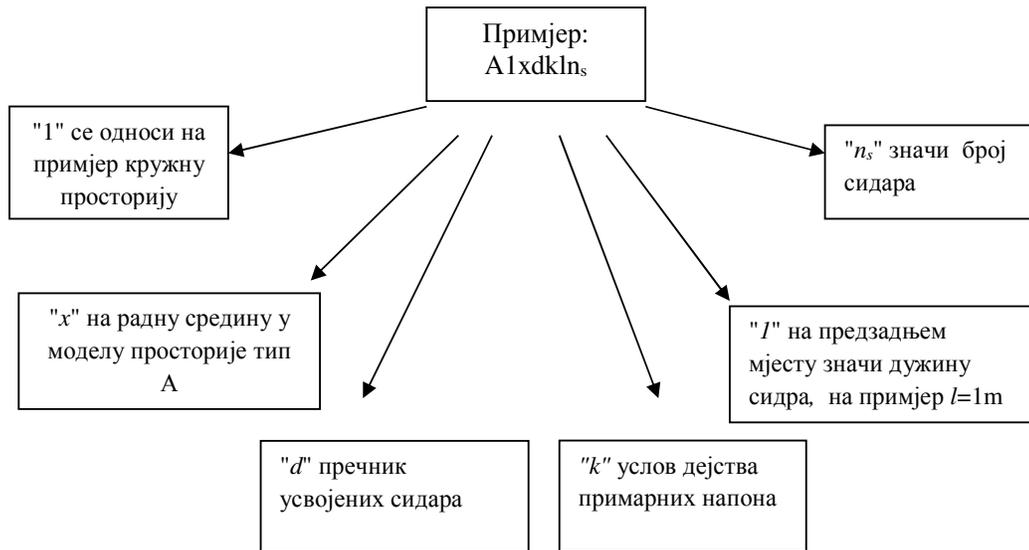
Поред наведених критеријума адекватан избор система подграђивања сидрима утичу на даљу организацију израде, транспорт као и на радове на провјетравању и одводњавању рудника с обзиром да просторије отварања првенствено служе као и просторије за те намјене.

3.5.3. Модели система подграђивања сидрима

Пошто је у анализи напонских стања потребно увести много података који се понављају у одређеним стањима и условима k , најкраћи опис инсталираних сидара у просторијама типа A, B, C, D би могао бити у следећем облику:

- Први број у ознаци инсталираног сидра би могло да представља ознаку подземне просторије, ($1xdkln_s$), при чему се " l " односи на примјер кружну подземну просторију.
- Друга слово у ознаци би представљало радну средину у којој се просторија израђује.
- Ознака " d " се односи на пречник инсталираних сидара.
- Задња бројчана ознака представља број сидара односно одређено стање у моделу са бројем сидара одређене дужине која преставља број прије задњег броја у ознаци, при чему " l " представља дужину сидра.
- Словна ознака " k " у наведеном случају представља однос хоризонталног напона према вертикалном напону у извршеној анализи.
- За случајеве подземних просторија у стањима без постављених сидра онда би ознака имала следећи израз, на примјер $1x0k$, што би се односило на просторију кружног попречног пресека која се ради у x радној средини и условима вертикалног напона у односу на хоризонтални примарни напон у масиву. За стања са сидрима у комбинацији са мрежом и прсканим бетоном задњем броју у ознаци би се могао додати знак $+$.

Наведеним ознакама се на првом мјесту могу додати и словне ознаке A, B, C, D , да би се на тај начин истакли типови просторије кориштених у анализи напонских стања односно да се вриједности очитаних максималних аксијалних сила у сидрима односи за распоред у просторијама различитих површина попречног пресека. Шематски приказ кориштених података у нумеричким моделима је дат на Слици 3.8.



Слика 3.8. Шематски приказ кориштених података у моделима

3.6. Алгоритам зависности параметара нумеричке анализе

Према наведеној методологији нумеричког моделирања подземних просторија у рудницима са подземном експлоатацијом, односно моделирања радне средине, избора оптималне радне средине, облика подземних просторија и система подграђивања за различите услове рада у неслојевитим лежиштима, било је потребно извршити формулацију одређеног алагоритма којим би се добиле смјернице за рјешавање одређених проблема.

Алгоритам се огледа у дефинисању проблема, анализи параметара и услова у нумеричким моделима и добијања оптималних рјешења проблема.

Проблем алгоритма се тиче одређивања математичких зависности одређених параметара у напонско-деформационој анализи на основу више група улазних параметара.

Анализа алгоритма се огледа у разматрању свих услова и улазних параметара у анализи.

Рјешење алгоритма представљају математички изрази за избор одређених параметара као корисне смјернице за даљу фазу пројектовања израде и подграђивања подземних просторија у одређеним условима.

Формулација алгоритма

- Први корак:

Потребно је навести све улазне параметре: Дефинисати радну средину у лежишту, величине подземних просторија, облике попречних пресека просторије, избор система подграде.

- Други корак:

За радну средину потребно је дефинисати напоне у масиву, физичко механичке карактеристике, структурне карактеристике, ниво подземних вода и друго.

- Трећи корак:

Користити различите облике подземних просторија на примјер кружни, нискозасвођени, правоугаони, високозасвођени, лучни, трапезни попречни пресјек за дефинисање величине просторија тип *A, B, C, D* итд.

- Четврти корак:

За сидра изабрати број анкера, пречник, дужину, растојање између сидара, карактеристике сидара и друго.

- Пети корак:

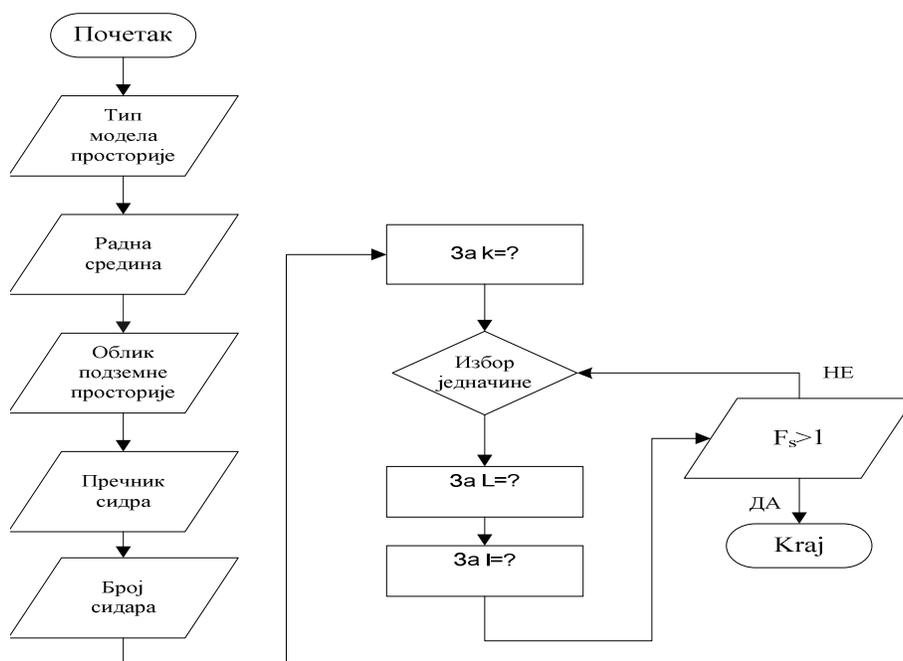
Дефинисати ознаке добијених једначине математичке зависности у складу са избором одређених параметара (нпр. 1, 2, 3...324. итд. или 1а, 2а,...324а).

Исход алгоритма:

Исход примјене алгоритма су изрази математичких функција зависности за одређене изборе радне средине, облике просторија и системе подграђивања.

Избором једне или двије вриједности параметара који нису познати на основу добијених функција добити вриједности других параметара у опсегу повољних рјешења.

Дијаграм тока алгоритма за просторије различитих величина и облика у различитим условима рада је дат на Слици 3.9.



Слика 3.9. Шематски приказ поступка одређивања функционалних зависности избора система подграђивања сидрима

Одлука о једначини математичке зависности, односи се на избор једначина према броју улазних података у алгоритму, које се могу користити за сваки облик и величину просторије са стањима од n броја сидара и n броја сидара у комбинацијом са мрежом и прсканим бетоном. Тако се, према односу примарних напона у стијенском масиву и дужине уграђених сидара према броју уграђених сидара у моделима подземних просторија, у математичком програму се уведу очитане вриједности аксијалних сила за сидра из нумеричких модела и добију готови математички изрази са поједина стања уграђених сидара (n број сидара, и n број сидара у комбинацији са мрежом и бетоном).

Математичке једначине зависности је најбоље изразити у облику полиномима трећег степена, јер се на такав начин могу добити најприближније апроксимације већег броја чворних тачака са малим грешкама приликом читавања.

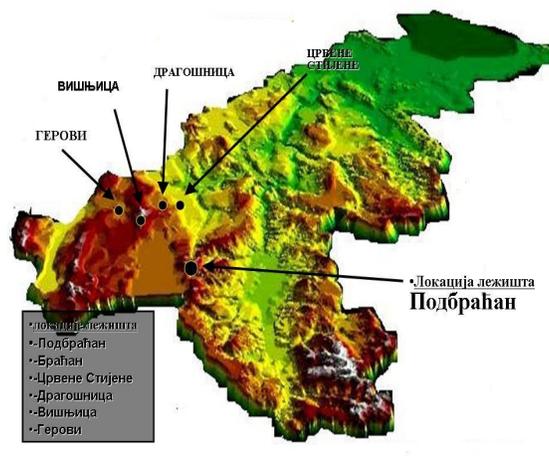
Према томе, тако добијени математички изрази са једном промјењивом се могу користити у даљем кораку анализе и послужити код избора одређених параметара по критеријуму стабилности подземних просторија односно минималних фактора сигурности и деформација стијенске масе.

Дијаграм тока избора одређених параметара и добијених израза математичких зависности по критеријуму фактора сигурности је дат у Прилогу 3.А.1. и 3.А.2.

4. ПРИМЈЕНА РАЗВИЈЕНОГ МОДЕЛА НА ПРИМЈЕРУ РУДНОГ ЛЕЖИШТА "ПОДБРАЋАН"

4.1. Опис лежишта

Рудно лежиште "Подбраћан" припада налазиштима боксита на подручју Власеница-Милићи- Сребреница, које се налази у средњем дијелу Источне Босне на падинама планина Јавор и Сушница. Рудник боксита је удаљен 20 km од магистралног пута Сарајево- Зворник а у локалном смислу се налази поред асфалтног пута Милићи - З. Јадар.



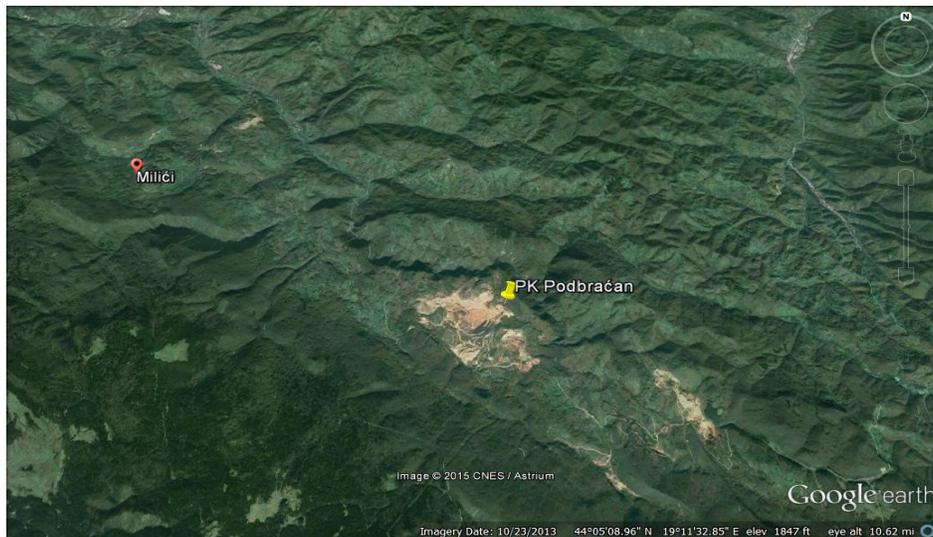
Слика 4.1. Локација лежишта боксита-рудносно поље Милићи

Лежиште "Подбраћан" са површином 523.000 m² је засада највеће познато лежиште боксита у овом региону. По структурно-морфолошком типу и економском значају спада у прву групу лежишта црвених боксита.

Рудно тијело је неправилног слојног облика благо заталасаног према југу и југоистоку под углом од 20°. За боксите власеничког подручја треба истаћи велику концентрацију боксита на малом простору.

Важно је напоменути да се рудно лежиште "Подбраћан" експлоатише површинским начином са планираном експлоатацијом у средишњем и сјеверном дијелу површинског копа, до коте К+410m. Таквим начином откопавања у јужном

дијелу лежишта изван контура копа, на основу процјењених рудних резерви за ово рудно лежиште би остало преко милион тона руде. Према томе, због немогућности даљег проширења површинског копа и повећања угла завршне косине копа а тиме и економске оправданости досадашњим начином експлоатације, ток експлоатације преосталих рудних резерви изван контура копа, односно изнад тренутно најниже коте копа +420 m ће бити усмјерен на подземни начин откопавања.



Слика 4.2. Положај ПК "Подбраћан", слика ширег подручја са Google Earth Map

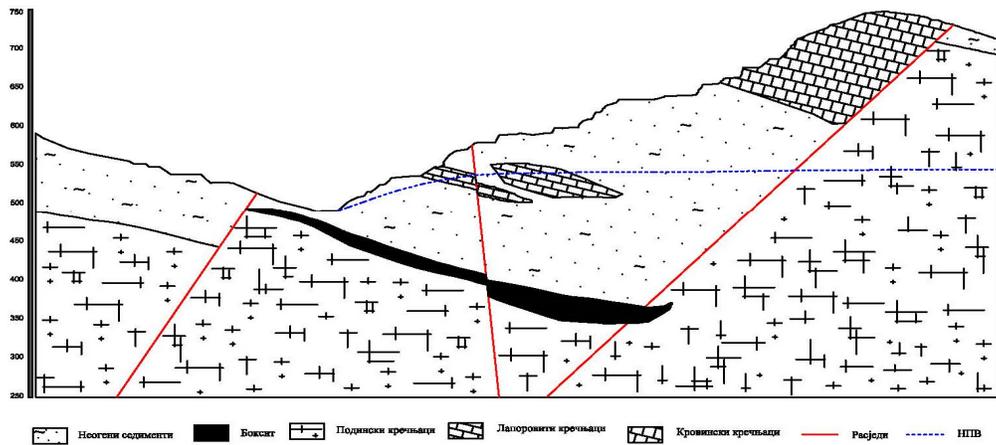
Поред експлоатације руде боксита на површинском копу "Подбраћан", у склопу Компаније "Боксит" Милићи, врши се и подземна експлоатација боксита у јами "Браћан".

4.2. Геолошка грађа лежишта "Подбраћан"

Ужа околина лежишта боксита "Подбраћан" је израђена од седимената тријаске, кредне, неогене и квартарне старости.

Са становишта израде подземних просторија отварања, геолошку грађу лежишта и околних стијена најбоље илуструје профил приказан на Слици 4.3.

На наведеном профилу се могу уочити сви седименти који се појављују у власеничком бокситоносном подручју.



Слика 4.3. Геолошки профил за рудно лежиште "Подбраћан": кровина- неогени седименти (сочива пјеска, лапоровити кречњаци, пјесковите глине, лапорци, и глинене пјешчари), руда боксита, и подина: масивни тријаски кречњаци. Црвеном бојом на слици су означени расједи, плавом бојом је означе ниво подземних вода.

Ужа околина лежишта боксита "Подбраћан" је израђена од седимената тријаске, кредне, неогене и квартарне старости.

Литолошки састав лежишта састоји се од:

Тријаски седименти чине подину наслага боксита и осталим млађим серијама и у хидрогеолошком погледу имају доминантан значај. Ови кречњаци су углавном масивни, местимично прекристалисани, веома поремећени и поломљени са појавом већих и мањих расједа и пукотина.

Боксит се јавља дискордантно, преко тријаских кречњака, различите дебљине од пар цм до скоро 40 m. Рудно тијело залијеже према југозападу под углом од 20°.

Горња креда (K2) ови седименти имају малу распрострањеност и то углавном у југоисточном дијелу лежишта "Подбраћан", и јављају се у највишим деловима лежишта у виду "оаза" у оквиру неогених седимената и тријаских кречњака. Ове насlage представљене су лапоровитим кречњацима и пјешчарима.

Неоген (N) имају велико распрострањење и леже дискордантно преко боксита или понегдје директно на подинским тријаским кречњацима. У литолошком погледу је то веома хетерогена серија, која се састоји углавном од пјесковитих глина и пешчара (тзв. "шарена серија"). У вертикалном профилу ових наслага налазе се

шљунак и песак (у вишим деловима), суглине и супјесак, пјешчари и ријетко чисте глине. Унутар ових наслага налазе се још и кречњаци и лапорци.

Наведени литолошки чланови веома се тешко могу издвојити јер се латерално и вертикално смењују и међусобно прожимају.

Квартар (Q) су најмлађи седименти, немају веће распрострањење и састоје се углавном из

делувијалног хумусног покривача и пролувијалних шљунковито-песковитих наноса појединих потока дебљине око 1 m [29].

У Табели 4.1. су дати параметри литолошких чланова у лежишту.

Табела 4.1. Рачунски параметри литолошких чланова усвојених статистичким прорачунима

Материјал	γ (kN/m ³)	σ_c (MPa)	c_t (MPa)	E (MPa)
Кречњак кредни	25.46	14.171	1.417	1281
Пјешчар,рјесковита глина	23.98	5.24	0.600	236
Лапоровити кречњак	25.53	23.271	2.327	3753
Боксит	25.39	17.668	1.796	1550
Кречњак подински	26.80	30.631	3.063	5700

За потребе подземне експлоатације преосталих резерви боксита у овом рудном лежишту нису вршена испитивања физичко-механичких карактеристика радне средине.

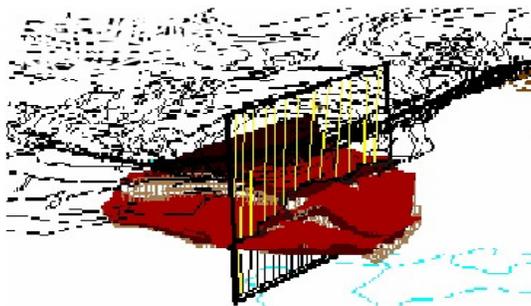
Према томе, за анализу напонско-деформационих стања у стијенском масиву и испитивања са становишта услова и технологије израде подземних просторија отварања користиће се подаци карактеристика стијенске масе за локалитете ПК "Подбраћан" и за Јаму "Браћан".

4.3. Структурне карактеристике лежишта

У тектонском склопу лежишта "Подбраћан" највећу улогу имају интезивна расједања. Ово лежиште са својом ужом околином представља мањи тектонски ров. Спуштање је извршено дуж два скоро паралелна расједа. На овом лежишту расјед је разломио рудно тијело и спустио сјевероисточно крило за око 70 m. Што

се тиче тектонских поремећаја поред ових расједа постоје и низ мањих расједа који пролазе преко самог лежишта.

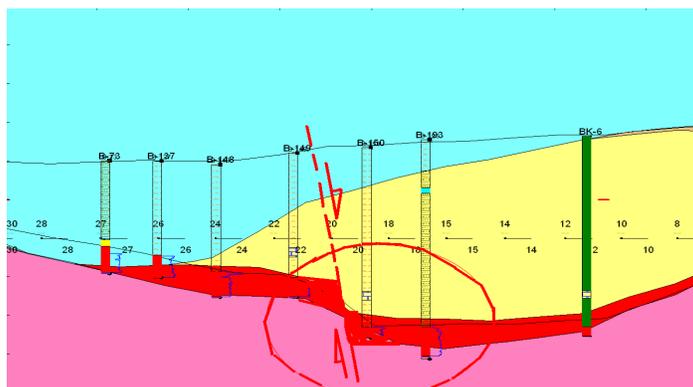
На Слици 4.4. је дат приказа расједне плохе за дато лежиште.



4.4. Расједна плоха на лежишту "Подбраћан"

На западном дијелу лежишта се налази још један расјед чијим дјеловањем су тријаски кречњаци и боксити са неогеним седиментима доведени у исти ниво.

На Слици 4.5. се може јасно видјети ситуација расједне равни на карактеристичном профилу за рудно лежиште "Подбраћан".



4.5. Ситуациони план расједне равни на профилу рудног лежишта

Поред наведених појава расједа на лежишту се не располаже са детаљнијим подацима за структурно-тектонске елементе пратећих стијена у руднику посебно за податке који се тичу размака између пукотина, непрекидност дисконтинуитета, храпавост површина дисконтинуитета, ширину отвора пукотина и опис материјала којим су шупљине испуњене.

Растојање између пукотина је посебно важно јер улази *GSI* систем класификација а према ауторима [40], наведени фактори имају утицај на чврстоћу пукотина или површине блокова пошто услед лома стијенске масе долази до промјене услова пукотина односно до храпавости пукотина. То значи да понашање стијенске масе услед оптерећења односно чврстоћа стијенског материјала прије и после лома зависи од отпора који настаје у зони лома. Па стога чврстоћа стијенске масе после лома или тзв. резидуална чврстоћа зависи од интензитета напона после лома на што у великом обиму утичу оријентација пукотина, неправилности површина или храпавости пукотина и густине пукотина.

4.4. Хидрогеолошке карактеристике лежишта

Лежиште боксита "Подбраћан" се налази у веома сложеним хидрогеолошким условима највише у условима карстне издани. Наведена издан се не може посматрати изоловано од осталих дијелова у широј околини јер са њима представља једну цјелину.

Карстна издан је константована у ободу и у подини лежишта боксита са нивоом под притиском, који је често изнад коте кровине рудног тијела. У хидрогеолошком смислу важни су постојање повремених извора у нивоу Јадра или изнад њега. Дијелови терена израђени од палеозојских, кредних и неогених седимената су нешто богатији водом.

На самом лежишту се налази више слабих извора чија издашност је мала и варира у току године са појавом кишевина. Све ове појаве и релативно обиље подземних вода у кровини су условљене пјесковитим седиментима.

Треба напоменути да се у хидрогеолошком погледу боксит понаша као водонепропусна средина. То значи да је водонепропусност боксита у подини и кровини посебно наглашена појавом бокситних глина. Због тога се сматра да лежиште боксита са својом непосредном кровином представља добру изолацију између кречњачке подине и дијела кречњачке кровине у оквиру које је развијен пукотинско-карстни тип издани.

Што се тиче непосредне кровине лежишта она је веома значајна јер се изнад комплекса пјешчарско - глиновитих стијена у једном дијелу лежишта налази

карсно-пукотински тип издани. У хидрогеолошком смислу, тај комплекс стијена је окарактерисан као водонепропустан и практично представља добру заштиту лежишта од вода из горњег дијела кровине. Дебљина овог комплекса стијена је у границама од 1-150 m.

4.5. Анализа улазних параметра за потребе моделирања

За потребе моделирања користиће се подаци о геомеханичким карактеристикама радне средине, примарним напонским стањима, димензијама подземних просторија и система за подграђивање.

4.5.1. Геомеханички параметри стијенске масе

Вриједности улазних параметара модела на основу расположивих података за *GSI* радне средине у лежишту "Подбраћан" (за кровински кречњак, боксит, неогене седименте и подински кречњак) су дати у Табели 4.2., (Прилог 4.А.1).

Важно је напоменути да досада нису вршена детаљна мјерења везана за пукотине у лежишту, па се подаци за дубину и правце пукотина, серије пукотина и материјале којим су пукотине испуњене и подаци добијени бушењем на основу јездра, нису могли користити у анализи.

Све наведено би било изузетно важно са аспекта утицаја пукотина на расподјелу напона у стијенском масиву око израђене подземне просторије у лежишту, стога се за напонско-деформациону анализу могу користити само добијени подаци за Геолошки индекс чврстоће, константу чврстоће m_i , и фактор оштећења стијенског масива D док су константе m_b , s , и a добијене прорачунима софтверским програмом *RocLab* (Rocscience, 2007). За потребе модела кориштен је Hoek-Brown критеријум (у Поглављу 2.2.2.).

Табела 4.2. Основни подаци за израду модела стијенске масе

Материјал	E	μ	GSI	m_i	D	m_b	γ	ICS	s	a
Подински кречњак	5700	0.15	70	12	0.7	2.308	0.02398	5.24	0.0120	0.501
Боксит	1550	0.22	60	10	0.7	1.110	0.02539	17.666	0.0030	0.503
Неогени седименти	236	0.30	60	20	0.7	2.221	0.0268	30.63	0.0030	0.503

У Табели 4.2. су приказане максималне вриједности за параметре чврстоће m_b и s , са детаљнијим приказом података у Прилогу 4.А.2.

Наведени подаци ће се користити као основа за сва моделирања подземних просторија примјеном методе коначних елемената, у програмском пакету *Phase2*, (Rocscience, v 7.009).

4.5.2. Примарно напонско стање у рудном лежишту

У складу са подацима из Поглавља 2.4.1., и Мапе тектонских напона (*WSM*) ширег региона у подручју лежишта "Подбраћан" могу се уочити препознатљиви индикатори недавних земљотреса у близини разматраног лежишта са интезивнијим SS режимом (Strike-slip faulting). Приказ са положајем главних напона је дат на Слици 2.7. Наведено указује на то да су тектонски примарни напони условљени клизањем и потисцима приликом тектонских покрета, што је утицало на појаву расједа који пресецају рудна лежишта у бокситоносном подручју Милићи, што се може видјети на Сликама 4.3. и 4.5. Према положају слоја боксита у датом лежишту, приказ на карактеристичном профилу на Слици 4.3., извјесно је да би се просторија отварања радиле на релативно малим дубинама близу површине терена, између два расједа пошто се на приказу профила, у лијевом и десном дијелу налазе велике наслага неогених седимената. У том случају да би се утврдила вриједност односа коефицијената напона у лежишту, по дијаграму (по Sheorey-у, 1994), Слика 2.10. из Поглавља 2.4.1., за подземне просторије отварања на дубини до 100m, вриједност коефицијента

односа за даљи ток истраживања након избора оптималне подземне просторије се усваја да је $k= 1.3$.

То би значило да је вриједност хоризонталног напона већи од вертикалног напона у масиву, што се у пракси показало да такав однос напонских стања може да утиче на појаву деформација у крову подземних просторија.

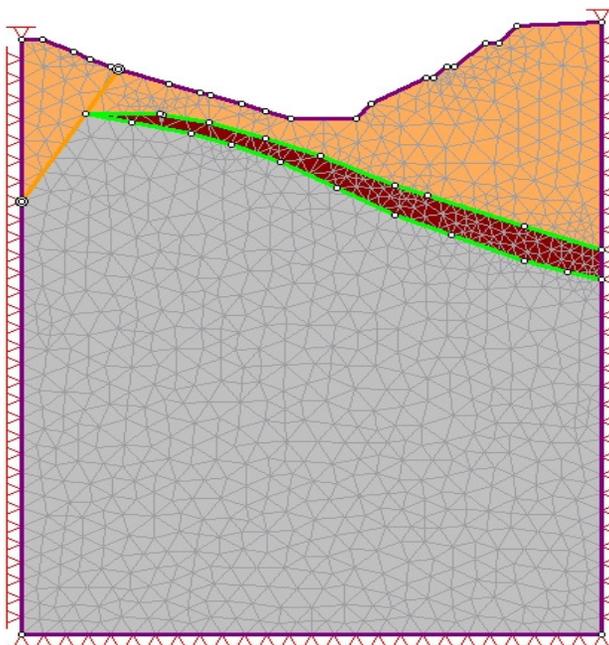
4.5.3. Преглед кориштених података у напонско-деформационој анализи

На основу досада приказаних модела код избора оптималне радне средине, оптималног облика и величине подземне просторије по критеријуму минималних напона и деформација ток кориштених података у анализи је приказан на Слици 4.6.



Слика 4.6. Примјењени процес рада са подацима у напонско-деформационој анализи

Моделирана је област до површине терена у дијелу лежишта "Подбраћан" између два расједа, тако да је површина терена слободна а лијева и десна страна модела не могу имати кретање лијево и десно и помјерање према вертикали.



Слика 4.7. Модел коначних елемената са граничним условима прије израде подземних просторија

У анализама напона и деформација стијенске масе нису разматране варијанте подземних просторија у кровинском дијелу лежишта због састава стијенског материјала кровине и пожељно би било избјегавати било какве радове у кровинском дијелу лежишта, пошто се кровина у датом лежишту може окарактерисати као крајње неповољна радна средина.

Утицај облика и величине подземних просторија на понашање околне стијенске масе, може се изразити добијеним вриједностима фактора сигурности по контури и околној стијенској маси, према развијеним деформацијама и величини σ_1 напона.

Да би се испитао утицај примарних напонских стања у масиву на избор облика и величина подземних просторија у погледу њихове стабилности у моделима су кориштене вриједности $k=0.5/1.0/1.5/2.0$.

4.5.4. Избор оптималне подземне просторије

Као што је раније наведено, димензионисање подземних просторија у рудницима са подземном експлоатацијом у неслојевитим рудним лежиштима се врши према

одређеним критеријумима, стога полазне основе за димензионисање подземних просторија отварања представљају димензије јамске механизације намјењене за транспорт руде и јаловине.

У складу са карактеристикама корисне минералне сировине и јаловине у датом лежишту и пројектованих резерви руде, капацитета рудника и других фактора, полази се од тога да би се транспорт и извоз руде и јаловине требао вршити јамским камионима.

Према димензијама јамског камиона приказаних у Табели 4.3., извршиће се димензионисање подземних просторија у рудном лежишту "Подбраћан".

Табела 4.3. Основне димензије јамске механизације

Карактеристике механизације	Јамски камион
Ширина камиона (mm)	2209
Висина камиона (mm)	2428
Дужина камиона (mm)	8940

Према изразима 3.1. до 3.10. добијене су основне димензије подземних просторија различитог попречног пресека, чије вриједности су дате у Табели 4.4.

У Прилогу 4.А.3. су приказани различити облици подземних просторија које ће се користити за анализу избора оптималне подземне просторије за дато рудно лежиште.

4.5.4.1. Просторије типа А

Према критеријуму примјење јамске механизације и сигурносно-техничким прописима у рудницима са подземном експлоатацијом у Табели 4.4. је дат преглед основних димензија подземних просторија које су разматране у напонско-деформационој анализи за рудно лежиште "Подбраћан".

Табела 4.4. Основне димензије подземних просторија типа *A*

Врста просторије	Ширина просторије (mm)	Висина просторије (mm)	Површина попречног пресека (m ²)
Кружна просторија	3400	3400	11.40
Нискозасвођена просторија	3400	3450	11.60
Правоугаона просторија	3400	3450	11.73
Високзасвођена просторија	3400	3500	11.80

Према подацима из Табеле 4.4. може се видјети да су површине попречног пресека разматраних подземних просторија око 12 m², па ће се наведена површина попречног пресека просторије користити у анализи.

Из разлога што се у подземне просторије отварања могу убројити и просторије које се раде кроз корисну минералну сировину, углавном извозни ходници стога је у анализама било потребно као радну средину узети у разматрање и слој боксита. Са становишта раније примјењених метода откопавања у истим условима и лоцирања просторије отварања у подинском дијелу лежишта, подински кречњак се показао као стабилна радна средина.

Резултати интерпретације нумеричких модела просторија тип *A* у подинским кречњацима и у слоју боксита су дати у Прилозима 4.А.4.1-4.А.4.8. У Табели 4.5. је дат приказ броја сломљених коначних елемената у стијенској маси око разматраних просторија типа *A*, за различите услове напона у бокситу и кречњаку.

Табела 4.5. Резултати нумеричких прорачуна за број сломљених коначних елемената за тип *A*

Радна средина	Врста просторије	Коефицијент односа напона у масиву <i>k</i>			
		0.5	1.0	1.5	2.0
Боксит	Кружна	397	1049	1414	1592
	Нискозасвођена	184	197	254	322
	Правоугаона	110	121	205	287
	Високзасвођена	247	378	503	615
Подински кречњак	Кружна	181	188	204	236
	Нискозасвођена	160	171	202	268
	Правоугаона	98	100	106	123
	Високзасвођена	161	170	269	355

Поред броја ослабљених елемената стијенске масе по контури подземне просторије у оквиру граничних елемената модела, у Табели 4.6. су приказани подаци о добијеним минималним факторима сигурности и деформација у стијенској маси за поједине случајеве подземних просторија типа *A*.

Табела 4.6. Подаци добијени нумеричким прорачуном за F_s и u , за просторије типа *A*

Радна средина	Врста просторије	Коефицијент односа напона у масиву k	
		F_{Smin}	$U_{min-umax}$
Боксит	Кружна	0.95	0.005-0.015
	Нискозасвођена	1.26	0.003-0.015
	Правоугаона	0.95	0.006-0.015
	Високзасвођена	0.95	0.003-0.015
Подински кречњак	Кружна	1.26	0.006-0.015
	Нискозасвођена	1.26	0.003-0.015
	Правоугаона	0.95	0.005-0.015
	Високзасвођена	0.95	0.003-0.015

Важно је напоменути да су сви модели испитивани за двије радне средине према подацима из Табеле 4.2., што значи да су модели радне средине рађени за исте вриједности Poisson коефицијента μ и Модула еластичности E за боксит и кречњак.

По теоријским разматрањима, познато је да стање напона око подземне просторије није зависно од Poisson-ог коефицијента μ , али да су напони у стијенској маси и напони код примјене методе коначних елемената зависни од вриједности Poisson-ог коефицијента, док су деформације стијенске масе обрнуто пропорционалне модулу стијенске масе E .

У складу са интрепретираним подацима посебан фактор утицаја на расподјелу напона у стијенској маси после откопавања има облик подземне просториј, па је највећа концентрација напона евидентна на угловима зидова и крова просторије у зависности од дејства примарних напона у стијенском масиву. За веће вриједности коефицијента k концентарције напона на смицање су веће у крову засвођених дијела просторија подземних просторија док у квадратним на затезање.

4.5.4.2. Просторије типа В

Да би се испитао утицај величине подземних просторија на напонска стања у стијенској маси и извршио избор оптималне радне средине у погледу стабилности подземних просторија, у анализу ће се уврстити и просторије површине попречног пресека које се сматрају оптималних за руднике са подземном експлоатацијом у неслојевитим лежиштима, односно просторије површине попречног пресека око 16 m². То би значило да би се ширина свих подземних просторија тип А увећала за око 1 m.

У Прилозима 4.А.4.9-4.А.4.16, су приказани интерпретирани резултати за просторије типа В, у подинском кречњаку и слоју боксита а добијени подаци су приказани у Табели 4.7. и Табели 4.8.

Табела 4.7. Резултати добијени нумеричким прорачуном за број сломљених коначних елемената

Радна средина	Врста просторије	Коефицијент односа напона у масиву k			
		0.5	1.0	1.5	2.0
Боксит	Кружна	461	755	1023	1269
	Нискозасвођена	265	166	206	222
	Правоугаона	109	88	122	131
	Високзасвођена	145	242	505	663
Подински кречњак	Кружна	102	102	124	177
	Нискозасвођена	92	89	104	146
	Правоугаона	79	82	90	89
	Високзасвођена	90	88	152	235

Табела 4.8. Резултати добијени нумеричким прорачуном за f_s и u , за просторије типа B

Радна средина	Врста просторије	Коефицијент односа напона у масиву k	
		F_{Smin}	$U_{min-umax}$
Боксит	Кружна	0.95	0.005-0.015
	Нискозасвођена	0.95	0.003-0.015
	Правоугаона	0.95	0.006-0.015
	Високзасвођена	0.95	0.003-0.015
Подински кречњак	Кружна	1.58	0.006-0.015
	Нискозасвођена	1.26	0.003-0.015
	Правоугаона	1.26	0.005-0.015
	Високзасвођена	1.26	0.003-0.015

Према наведеним подацима, просторије великог попречног пресјека односно просторије типа B , показују велику стабилност у подинским кречњацима што се може потврдити на основу резултата у спроведеној анализи (Табела 4.8), (Прилози 4.А.4.10, 4.А.4.12, 4.А.4.14, 4.А.4.16).

4.5.5. Избор најповољније радне средине за лоцирање просторија отварања

Према предложеној методологији за избор оптималне радне средине у Поглављу 3.3, за лоцирање просторија отварања у неслојевитим лежиштима и добијеним резултатима нумеричким моделирањем датих конструкција, у анализама према критеријуму напона и деформација за радне услове у рудном лежишту "Подбраћан", као оптимална радна средина су се показали подински кречњаци. Под претпоставком да би подземна просторија пролазила кроз дионице са slabим физичко-механичким карактеристикама или кроз дијелове у слоју боксита, извршен је избор оптималне просторије у наведеним условима.

Према резултатима извршених анализе за нискозасвођену и правоугаону просторију типа A и типа B , за усвојену вриједност односа примарних напона $k=1$, приказаних у Прилозима 4.А.5-4.А.8, може се усвојити став да нискозасвођена подземна просторија тип A задовољава све наведене критеријуме у погледу стабилности у подинским кречњацима односно задовољава факторе сигурности и минималне деформације стијенске масе.

Све подземне просторије показују стабилност у подинским кречњацима, док се у бокситима у стијенској маси око просторије добија фактор сигурности $F_s < 1$, стога је потребно извршити правилан избор система за подграђивање просторија које би пролазиле кроз слабије дионице стијенске масе или се радиле у бокситу.

4.5.6. Предлог система подграђивања

Да би се извршио избор оптималног начина подграђивања, сваки модел просторије подграђивања просторије је извршен по методологији избора приказаној у Поглављу 4. 6., и у складу са тиме сви модели подземних просторија су рађени у шест стања рада. Од првог стања гдје је урађен модел непоремећеног стијенског масива са почетним напонским стањем, другог стања модела са израђено подземном просторијом различитог попречног пресека и стањим са уградњом 3, 5, 7 сидара и на крају модел са шестим стањем у коме је измоделирана подземна просторија са 7 сидара у комбинацији са мрежом и прсканим бетоном. Између стања је узето подјељено оптерећење (*Load split*), с тим да би свако стање са уградњом подграде могло симулирати стање да подграда послје уградње прима одређени проценат оптерећења стијенске масе. Број сидара је изабран у складу са ширином подземне просторије и положаја зоне пластификације око подземних просторија (детаљније објашњено у Поглављу 2.5.1.1.). За почетни корак анализе избора оптималног броја и дужине сидара предложена су сидра са основним карактеристикама датим у Табели 4.9.

Табела 4.9. Карактеристике сидара пречника 19 mm кориштених у моделу

Bolt type	<i>Fully bonded</i>
Bolt diameter (mm)	19
Bolt Modulus, E (MPa)	200000
Tensile Capacity, (MN)	0.1
Out-of-plane spacing (m)	1

У анализи избора су уврштена и сидра различитог пречника и затезне чврстоће, са подацима приказаних у Табели 4.10. у циљу да би се испитао утицај одређених карактеристика сидара на стање напона стијенске масе око просторије.

Табела 4.10. Карактеристике сидара пречника 22 mm кориштених у моделу

Bolt type	<i>Fully bonded</i>
Bolt diameter (mm)	22
Bolt Modulus, E (MPa)	200000
Tensile Capacity, (MN)	0.4
Out-of-plane spacing (m)	1

Према подацима у наведеним табелама кориштена су *Fully bonded* сидра, а за карактеристике сидра узете различите вриједности носивости сидра. Подаци о носивости сидра је од велике важности с тим што сидро у условима кад постигне своју максималну носивост и даље има функцију подграде извјесно вријеме.

Анализа подграђивања изабране просторије отварања сидрима је првенствено базирана на различитим дужинама сидара. У моделе подграђених подземних просторија уврштени су четири случаја подграђивања сидрима за различите дужине сидра и то 1,1.5,1.8 и 2.1 m.

Најмања дужина сидра од 1 m је усвојена пошто радна средина у којој би се подземна просторија израђивала према класификацији стијенске масе спада у групу чврстих стијена, и по напонско-деформационој анализи за одређене случајеве је напонско стање око подземне просторије такво да би се сидра само користила за очување контуре подземне просторије. За случај највеће разматране дужине сидра у анализи, дужина сидра од 2,1 m је одређена на основу распона подземне просторије, односно прорачуном преко израза (1.50), (у Поглављу 2.5.1.1.) и служила би за ојачавање стијенског масива око подземне просторије и смањене зоне пластификације у стијенској маси [31].

За почетни корак анализе узето је растојање између сидара 1 m, са 3,5, и 7 сидара у реду и 7 сидара у комбинацији са мрежом и бетоном (за просторије типа *A*). У просторијама типа *B* за исти број сидара у појединим стањима, растојања између сидара су већа од 1 m.

Да би се разматрао и случај подграђивања комбинацијом сидара, мрежа и бетон узет је у обзир највећи број сидара, мрежа и бетон са најмањом дебљином слоја.

Основне карактеристике бетона и мреже која је кориштена у шестом стању модела сваке подземне просторије, су дате у Табели 4.11.

Табела 4.11. Карактеристике за бетон и мрежу у моделима

Torkret	
Young's modulus (MPa)	30000
Poisson ratio	0.15
Wire Mesh (Canada) #4	
Diameter (mm)	4
Young's modulus (MPa)	200000
Poisson ratio	0.25

4.5.6.1. Улазни подаци за дефинисање алгоритма

Подаци уврштени у моделима конструкција просторија отварања у рудном лежишту "Подбраћан" су приказани у Табели 4.12.

Табела 4.12. Преглед кориштених података у анализи за просторије тип *A* и *B*

Врста просторије	Радна средина	Системи подграђивања														
		Сидра			Мрежа	Бетон										
		Пречник (mm)	Дужина (m)	Растојање (m)	Растојање (m)	Дебљина (m)										
Кружна просторија	Боксит	19	1.5	1	0.6	0.1										
	Кречњак															
Нискозасвођена просторија	Боксит						22	1.8	≠1	0.6	0.1					
	Кречњак															
Правоугаона просторија	Боксит											22	2.1	≠1	0.6	0.1
	Кречњак															
Високзасвођена просторија	Боксит	22	2.1	≠1	0.6	0.1										
	Кречњак															

У складу са приказаним подацима из Табеле 4.12. и приказа процеса избора оптималног броја, дужине и пречника сидра на основу очитаних максималних вриједности аксијалних сила у сидрима који одговара датим условима, за даљу обраду података кориштен је математички програм *Matlab*.

На основу алгоритма математичких зависности свих наведених параметара након резултата нумеричког моделирања у *Phase2*, и обраде истих у *Matlab*, у складу са алгоритмом приказан у Прилогу 3.А.1., формиран је алгоритам математичких зависности за параметре у моделима контрукција просторија отварања за рудно лежиште "Подбраћан", Прилог 4.А.12, са табеларним приказом једним дијелом математичких израза зависности у Прилогу 4.А.13.

Избор одговарајућих система подграђивања се може лако вршити на основу датог алгоритма, тако да се за случај подграђивања сидрима може вршити избор дужине, распореда и пречника сидара који могу да утичу на смањење зоне пластификације око подземне просторије и повећање фактора сигурности стијенске масе око просторије.

Добијене вриједности максималних аксијалних сила са једначинама функционалне зависности за различите дужина сидара, при усвојеном површини попречног пресека на основу одређених критеријума и оптималном облику подземне просторије за дате услове у лежишту, и вриједности односа примарних напона $k=1.3$, су дати у Прилогу 4.А.2.

Са добијеним вриједностима максималних аксијалних сила са бројем сидара у одређеном распореду и избором функције узависности могу да се размотре сви случајеви избора сидара за дате услове рада, када су дужина сидра, растојање између сидара и k промјенљиве функције за случајеве познатих облика просторије, величине просторије и радну средину у којој би се просторија израђивала. Све наведено представља улазне податке за формирање алгоритма функционалних зависности појединих параметара, тако да се са постављеним критеријуми фактора стабилности $F_s > 1$ и добијеним математичким изразима може утицати на избор система подграђивања усвојене оптималне просторије.

Према приказаним подацима у Табели 4.12. уврштених у анализи за потребе израде алгоритма математичких зависности изведено је по 256 модела подземних просторија за тип просторија *A* (са површином 12m^2), за четири стања распореда сидара односно за 3,5,7 сидара у реду и 7 сидара у комбинацијом са мрежом и прсканим бетоном. За тип просторије *B* је урађено исто 256 модела просторија.

Практично за различите услове коефицијента напона k у анализи, за тип просторије *A* и *B* је укупно извршено 2048 стања модела.

У Прилогу 4.А.3., је дат табеларни приказ свих кориштених података у анализи, вриједности читаних аксијалних сила у сидру, и добијени математички изрази за одређењи број сидара распоређених по контури подземне просторије. Математички изрази добијени прорачунима у математичком програму су изражени у облику полинома трећег степена, из разлога што се са полиномима трећег степена могу добити најприближније апроксимације већег броја чворних тачака са малим грешкама при читању.

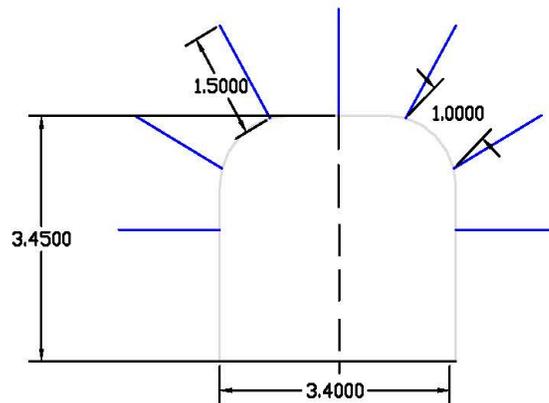
Готови математички изрази могу послужити као основа за прорачун за сличне услове избора система подграђивања за просторију одређеног облика, усвојене величине, услове k и дужине сидра, односно да се прорачуном одреди колика је вриједност аксијалних сила која одговара за изабрани број сидара по контури подземне просторије или која дужина сидра би одговарала за очување контуре подземне просторије за добијене вриједности аксијалних сила.

4.5.6.2. Избор оптималног система подграђивања

Избор оптималног система подграђивања за рудно лежиште "Подбраћан" вршиће се према предложеној методологији избора за подземну просторију нискозасвођеног попречног пресјека у подинским кречњацим и бокситу.

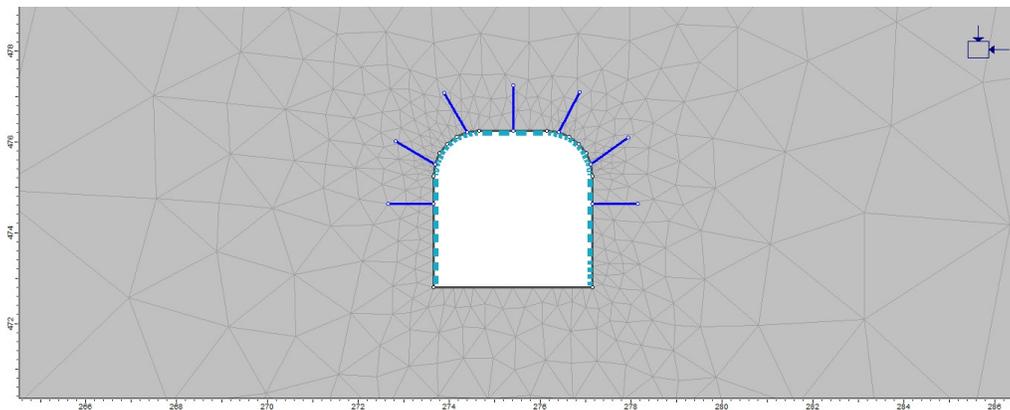
Да би се испитао утицај постављања подграде у подинским кречњацима по контури подземне просторије постављена су сидра у већ наведеном распореду са 3, 5, 7 сидара и у шестој фази израде са 7 сидара у комбинацији са мрежом и прсканим бетоном. Како је већ наведено кориштене су све наведене дужине сидара у појединим стањима уградње, према Табели 4.12.

На Слици 4.8. дат је пресјек подземне просторије нискозасвођеног профила (Прилог 4.А.4.2) са уграђеним сидрима по контури просторије.



Слика 4.8. Пресјек подземне просторије са уграђеним сидрима по контури просторије (11.60m²)

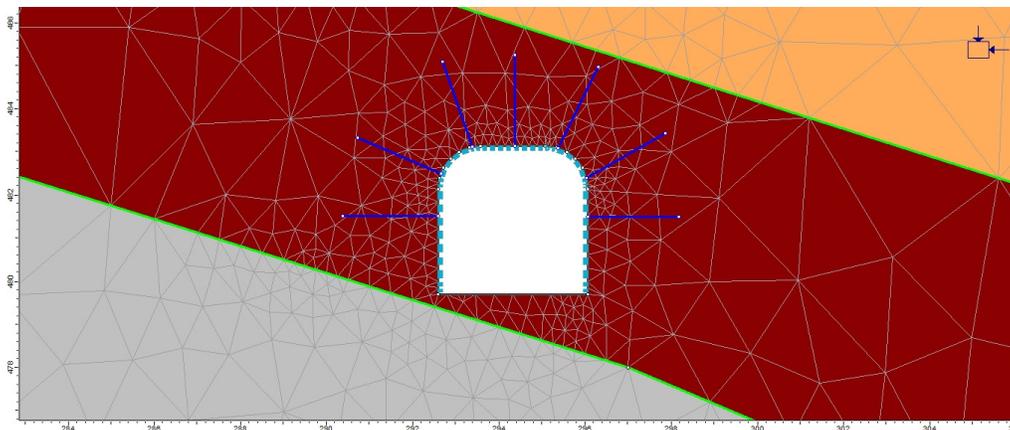
Примјер модела подземне просторије нискозасвођеног попречног пресјека у кречњаку за вриједност напонских стања са $k=1.3$, са распоредом 7 сидара пречника 19mm, дужине 1 m по контури подземне просторије, мрежом и прсканим бетоном дебљине 0.1 m, у шестој фази постављања подграде је дат на Слици 4.9.



Слика 4.9. Примјер нискозасвођене подземне просторије у кречњаку за $k= 1.3$ и дужину сидра 1m

Да би се испитао утицај постављања подграде у подинским кречњацима по контури подземне просторије постављена су сидра у већ наведеном распореду са 3,5,7 сидара и у шестој фази рада и 7 сидара у комбинацији са мрежом. Следећи корак избора система за подграђивање сидрима би се односио на утврђивању утицаја примјене сидара у слоју боксита. Примјер модела уградње

система подграде по контури подземне просторије у слоју боксита, са дужинама сидара 2.1 m је кориштен као у претходном случају и приказан на Слици 4.10.



Слика 4.10. Примјер нискозасвођене подземне просторије у бокситу за $k= 1.3$ и дужину сидра 2.1m

Резултати модела за предложене системе подграђивања за наведену просторију у бокситу ће бити у даљем тексту објашњени и приказани само карактеристични случајеви на основу више критеријума избора броја и распореда сидара.

4.5.6.3. Резултати анализе

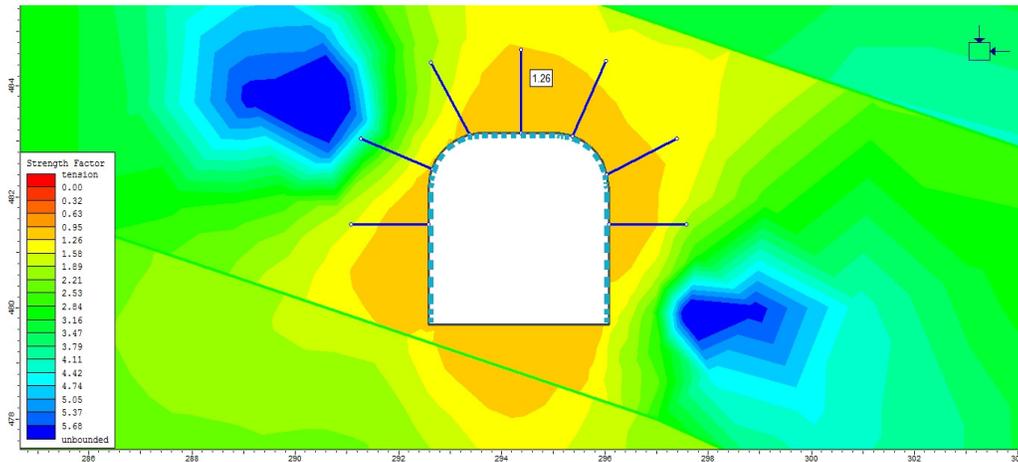
Први ефекти постављања сидара се огледају у промјени напона с тим да је сидра утичу на повећање тангенционалних напона посебно у крову просторије.

Према приказима у Прилогу 4.А.9. се може видјети утицај постављених сидара на главни напон у односу на неподграђену просторију, тако да се да се вриједности главног напона повећавају до стања са 5 сидара у распону независно од дужине сидра. За распоређених 7 сидара и 7 сидара у комбинацији са мрежом не долази до промјене индукованих напона, док су вриједности напона за мање за распон од 3 сидра.

Други важан утицај уградње сидра се огледа на ефектима смањена деформација стијенске масе око подземне просторије. Деформације стијенске масе и помјерања стијенске масе по контури подземних просторија би се требале смањивати у односу на деформације по контури неподграђене подземне

просторије. За подземне просторије у рудном лежишту "Подбраћан" евидентно је повећање деформација приликом уградње сидара што би могао бити важан параметар да није адекватно извршен избор растојања између сидара јер сидра са већим дужинама показују мање деформације у односу на краћа сидра при истим растојањима.

Поред наведених критеријума за правилан избор система подграђивања сидрима најважнији критеријуми су смањене зоне пластификације, ефекти повећања фактора сигурности стијенске масе који треба да се повећава у зони постављања сидара и зони изнад сидара и ефекти смањења аксијалних сила у анкерима. За предложене системе подграђивања највеће вриједности фактора сигурности у стијенској маси се постижу при уградњи сидара дужине 1.5m, Прилог 4.А.10.



Слика 4.11. Зона пластификације са уграђених 7 сидара на растојању од 1m

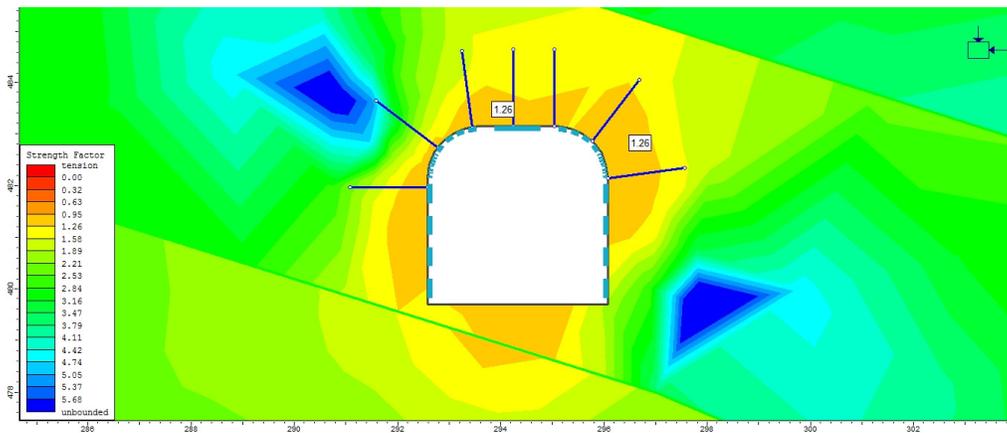
Према критеријуму смањења аксијалних сила за исте дужине сидара у Прилогу 4.А.2. се могу уочити мање вриједности аксијалних сила за стања са распоредом 3 сидра у односу на сидра са распоредом од 7 сидара за исте дужине сидара, што указује на то да се са смањењем броја сидара смањују и вриједности аксијалних сила у сидрима.

Карактеристично је према предложеном начину подграђивања да се најмање вриједности аксијалних сила постижу у сидрима дужине 1,5m и пречника 22 mm (Табела 4.13).

Табела 4. 13. Вриједности аксијалних сила за сидра са растојањем 1m

Пречник сидра (mm)	Број сидара	Вриједности максималних аксијалних сила у сидрима (MN)			
		L=1m	L=1.5m	L=1.8m	L=2.1m
19	3	0.0460772	0.033991	0.0368337	0.0368169
	5	0.0881569	0.0720973	0.0816582	0.0813286
	7	0.0759533	0.0888434	0.0781075	0.078211
	7+м+б	0.0759533	0.0878921	0.0812334	0.0811662
22	3	0.056456	0.0284962	0.0449622	0.0450168
	5	0.103512	0.0513629	0.0957588	0.0958866
	7	0.131834	0.069509	0.124872	0.124965
	7+м+б	0.131001	0.0694252	0.12401	0.124097

У складу са општим алгоритмом у Прилогу 3.А.1. када изабрани систем не задовољава критеријуме сигурности и деформације стијенске масе онда се врши нови избор система подграђивања са већим бројем сидара и мањим растојањима између сидара. Ако се претпостави да би се такав систем подграђивања са већим бројем сидара и мањим растојањима између сидара сматрао адекватним, онда се преко система једначина и добијених вриједности аксијалних сила може утицати на број сидара по контури просторије. Као контрола наведеног може послужити, примјер подграђивања за подземну просторију у бокситу са истим бројем и дужином сидара али растојањем сидара 0.8m, је дат на Слици 4.12.



Слика 4.12. Зона пластификације са уграђених 7 сидара на растојању од 0.8m

Према подацима са Сlike 4.12. се може видјети да се фактор сигурности око подземне просторије нискозасвођеног попречног пресјека у бокситу са уграђених 7 сидара на растојању од 0.8 m повећава до 1.26. Трајекторије напона и зона пластификације у наведеном случају имају мањи радијус око подземне просторије.

Према свему наведеном предложени систем подграђивања просторије у бокситу за рудно лежиште "Подбраћан " може задовољити критеријуме аксијалних сила тако да сидра трпе оптерећења у крову просторија а према критеријуму фактора сигурности предложени систем подграђивања би се требао допунити са одређеним бројем сидара или усвојити мања односно већа растојања између распоређених сидара. Подаци за максималне аксијалне силе у сидрима са растојањем од 0.8m, су приказани у Табели 4.14.

Табела 4.14. Вриједности аксијалних сила за сидра са растојањем 0.8 m

Пречник сидра (mm)	Број сидара	Вриједности максималних аксијалних сила у сидрима (MN)			
		L=1m	L=1.5m	L=1.8m	L=2.1m
19	3	0.0212837	0.0212884	0.0212903	0.0212929
	5	0.0394905	0.0395444	0.0395446	0.0395397
	7	0.0610377	0.611114	0.0611094	0.0611005
	7+м+б	0.0588639	0.0589419	0.0589399	0.0589305
22	3	0.0262958	0.0263053	0.0263095	0.0263134
	5	0.0488002	0.0488048	0.0488103	0.0488133
	7	0.0685596	0.0686412	0.0680771	0.0682105
	7+м+б	0.0656102	0.0657009	0.06535	0.0654716

Према подацима из Табеле 4.14. видљиво је да најмање аксијалне силе за растојање сидара од 0.8 m имају сидра дужине 1m.

Као показатељ адекватног избора подграђивања оптималне просторије отварања може послужити интерпретација резултата свих модела подземних просторија и разматраних систем за подграђивање, за случај вертикалне деформације око подземне просторије, тако да је у Прилогу 4.А.11. дат приказ развоја вертикалних деформација за најповољнији случај подграђивања.

4.6. Коментар добијених резултата

Према подацима из Прилога 4.А.6., се могу видјети да подземна просторија нискозавођеног попречног пресека у кречњаку може да стоји самостално након израде, и вриједностима фактора сигурности $F_s=1,26$. То указује да се оптималном радном средином у складу са нумеричким приступом процјене стијенске масе за дато лежиште могу сматрати подински кречњаци. Тачније, у наведеним случајевима приликом уградње сидара и при најмањем броју уграђених сидара би дошло до ослабљења стијенске масе и нарушавања стабилности подземне просторијем пошто са уградњом сидара долази до проширења зоне палстификације са мањом вриједности фактора сигурности.

Важно је напоменути да дужина сидара у овом случају не игра важну улогу нити би у случају кориштења већег пречника сидара дошло до одређених промјена у вриједностима фактора сигурности и промјена у трајекторијам напона. Према свему наведеном може се закључити да просторију која би се радила кроз подински кречњак неби било неопходно подграђивати.

Са становишта облика и величина подземних просторија се према интерпретираним резултатима напонско-деформационе анализе најповољније факторе сигурности и минималне деформације су показале подземне просторије нискозасвођеног облика типа *A* односно површине попречног пресека до 12m². Практично и просторије већег профила показују стабилност у подинским кречњацима. Важно је напоменути подземна просторија отварања нискозасвођеног попречног пресека задовољава и критеријум провјетравања.

Да би се испитала стабилност усвојене просторије под претпоставком да се подземна просторија односно извозни ходник ради кроз слој боксита у Прилогу 4.А.5, у складу са резултатима напонско-деформационе анализе, најбоље резултате према датим критеријума фактора стабилности у стијенској маси око подземне просторије су показали случаји подграђивања подземних просторија сидрима дужине 1.5m и пречника 22 mm.

Пошто за наведени случај није дошло до смањења зоне пластификације у односу на неподграђену просторију и уз повољан фактор сигурности, стога алгоритам у Прилогу 3.А.1., може да послужи својој сврси за избор одговарајућег система

подграђивања на основу одређених зависности и постигне задовољавајући фактор сигурности стијенске масе око подземне просторије.

Према томе, за познату површину подземне просторије и одабраних дужина сидара уз познати пречник сидра и вриједности аксијалних сила у сидрима за познате вриједности k може се преко израза математичких функција утицати на избор броја, дужине и растојања између сидара.

У условима повољних фактора сигурности стијенске масе просторије већег профила показују бољу стабилност, односно већи распон просторије у масивној и хомогеној стијенској маси не утиче на стабилност околне стијенске масе.

Примјеном сидара усвојених дужина и пречника уз избор мањег растојања између броја сидара у конкретно случају 0.8m за исту дужину сидра од 1,5m , постигнут је већи фактор сигурности у стијенској маси око подземне просторије у бокситу односно $F_s = 1.26$, уз смањене зоне пластификације и мање аксијалне силе у сидрима.

Према томе, однос између параметара сидара тачније његове дужине и растојања у реду по контури просторије се може добити прорачунима и избором у предложено агоритму математичких зависности.

Мање растојање између сидара смањује зону пластичности стијенске масе око подземне просторије а повећава фактор сигурности стијенске масе. Такође, уз мање растојање између сидара важан је и број сидара по контури подземне просторије.

Поред наведених коментара, важно је напоменути да и аксијалне силе у сидрима такође зависе од дужине сидра и растојања између сидара.

Као потврда правилног избора сидра за дате радне услове у погледу стабилности контрукција подземних просторија отварања би једино послужили *in situ* резултати добијени опитима чупања сидара како би се утврдило да ли предложени тип сидара са свим параметрима задовољава све наведене критеријуме у реалним условима.

5. ЗАКЉУЧЦИ И ПРЕПОРУКЕ ЗА ДАЉА ИСТРАЖИВАЊА

5.1. Закључци истраживања

Примјена развијеног интегралног нумеричког модела у фази пројектовања рудника са подземном експлоатацијом у односу на емпиријске приступе или аналитичке прорачуне се показао као поуздан и ефикасан начин за процјену понашања стијенске масе при изради откопа и међусобног односа између стијенске масе и система за подграђивање. Наведено се првенствено односи на предности примјене нумеричког моделирања у односу на велик број аналитичких техника у погледу детаљног сагледавања одређених проблема, посебно у веома комплексним условима стијенске масе са великим бројем различитих параметара и критеријума лома стијенске масе. То значи да се примјеном модела из ове дисертације може до детаља истражити понашање стијенске масе било да се ради у хетерогеној стијенској маси са више слојева, било у хомогеној, изотропној и анизотропној стијенској маси, нетакнутој и испуцалој стијенској маси са појавама великог броја дисконтинуитета, код избора облика и величина подземне просторије и избора система подграђивања.

Резултати добијени интерпретацијом модела при чему је коришћено нумеричко моделирање и дефинисање математичких зависности појединих параметара односно симулација стања стијенске масе у различитим условима, могу послужити као основа за пројектовање рудника са подземном експлоатацијом, због тога је истраживање у овој дисертацији обављено са циљем да се на основу класификације стијенске масе и нумеричког моделирања изврши избор оптималне просторије отварања у неслојевитим лежиштима и са становишта стабилности предложи систем подграђивања у нестабилним условима кровине. Наведени модели могу послужити код коришћења подграде сидрима у свим привременим и трајним просторијама у руднику с тим да се у зонама са слабијим геомеханичким карактеристикама материјала могу користити и други начини подграђивања, односно примјена анкера и мреже или комбинација бетона и мреже.

Примјењена методологија је предложена са циљем да се на основу расположивих података за неслојевита лежишта изабере оптимална просторија отварања и начин

њеног подгађивања а на основу различитих варијанти облика, величина и броја сидара добију и функционалне зависности одређених параметара са аспекта подграђивања на рачун већег броја других параметара. За предложени системе подграде засноване на геомеханичким карактеристикама стијенске масе за дато лежиште, напона у масиву, на параметрима чврстоће стијенске масе и облика и величина усвојених просторија отварања истраживање се обављало у следећим фазама рада:

- Моделирање радне средине односно одређивање параметара стијенске масе на основу *GSI* класификације:

-У раду су детаљно наведене класификације стијенске масе које се примјењују у рударству, а за потребе израде модела напонско-деформационе анализе за услове у датом лежишту кориштени су подаци из *GSI* класификације стијенске масе. Према подацима *GSI* класификације боксити и подински кречњаци су класификовани као добра радан средина а кровински неогени седименти као неповољна радна средина. Параметри чврстоће за стијенски материјал за неслојевита рудна лежиште се могу одредити на основу чврстоће и деформабилности стијенских материјала примјерном софтверског програма *Roclab*.

- Избором одговарајућег облика и величине подземне просторије, и система за подграђивање постављањем нумеричких модела са геолошким односно геомеханичким карактеристикама у реалним условима:

- Да би се утврдио избор адекватне подземне просторије кориштени су одређени критеријуми избора и у складу са изабраном подземном просторијом и стањем напона око просторије вршен избор оптималне подземне просторије за отварање лежишта.

- Прорачун и интерпретација модела различитих облика подземних просторија без постављене подграде уз праћења стања и деформација стијенске масе око контуре подземне просторије:
 - За потребе нумеричког моделирања да би се одредила оптерећења, деформације и напонска стања око израђене подземне просторије и пратио однос између постављене подграде и стијенске масе кориштен је дводимензионални софтверски програм Phase² примјеном методе коначних елемената. За потребе израде геомеханичког и нумеричког модела кориштен је карактеристичан попречни пресјек лежишта са стијенским материјалима који су присутни у рудном лежишту, који служи као основ за сва даља истраживање.
- Инсталирање различитих сидара по контурама подземних просторија у нумеричким моделима и пратићење интерпретације резултата у погледу напона, фактора сигурности и деформација стијенске масе и аксијалних сила у инсталираним сидрима у просторији са циљем упоређивања датих резултата са осталим рјешењима.
- Дефинисање алгоритама и математичке зависности величина појединих параметара просторије, подграде и конкретних радних услова:
 - За потребе стабилности и избора осигуравања подземних просторија подаци добијени нумеричким моделирањем се могу увести у математички програм *MatLab* и системом једначина могу добити математичке зависности појединих група улазних параметара у модел и избором одређених промјењивих утицати на коначан избор односно на испуњене свих постављених критеријума у погледу стабилности конструкција подземних просторија

- Као резултат претходних фаза могуће је дефинисати приједлог избора просторије отварања и начина њеног подграђивања.

Код резултата модела конструкција подземних просторија у појединим случајевима без постављене подграде са вриједностима фактора сигурности у стијенској маси око просторије ($F_s \leq 1$), просторије се могу сматрати нестабилним са појавом ослабљених елемената по контури просторије што може довести до колапса и рушења просторије.

За процјену понашања стијенске масе око подземне просторије поред критеријума фактора сигурности и деформација стијенске масе у нестабилној стијенској маси, могу се примјенити критеријуми оптимизације система подграђивања, да би се обезбједио сигуран рад у подземним просторијама отварања и смањеила потреба за реконструкцијама таквих просторија у нестабилним условима рада.

У складу са процјеном понашања стијенске масе у масиву или око подземне просторије са аспекта уграђене подграде по контури подземне просторије израдом нумеричких модела за предложени систем подграђивања сидрима се може утицати на избор дужине сидра, пречника сидра и растојања између сидара.

Резултати понашања стијенске масе око откопа су добри показатељи да се примјеном нумеричких модела и кориштених параметара могу добити резултати о понашању стијенске масе у реалним условима.

Као резултат тога избором дужине, броја и пречника сидара у конкретним радним условима се може утицати на смањење зоне пластификације стијенске масе око подземне просторије и деформација по контури подземне просторије. Значи да би се одабиром сидара веће дужине у одређеним радним условима на примјер са мањим растојањем између сидара и одређеним бројем сидара могло утицати на смањење деформација по контури подземне просторије.

У конкретном примјеру приказаном у докторској дисертацији анализом напонских стања за варијанте подграђивања подземне просторије у подинском кречњаку може се констатовати да је интезитет напонских стања најмањи, па из тог разлога просторије у кречњаку могу да стоје самостално и могу се сматрати стабилним радним срединама. Исто тако за просторије у нестабилним радним срединама (боксити) резултати анализа су показали да се подграђивање може

извршити преложеним системом подграђивања али да би се утицало на повећање фактора сигурности у стијенској маси око подземне просторије потребно је увести већи број сидара на мањим растојањима или користити друге типове сидара.

Прецизна процјена и потврда оправданост примјене сидара као оптималног начина подграђивања у рудницима са подземном експлоатацијом, се употребом предметног алгоритма може утврдити утицај увођења сидара у зависности од конкретних резултата *in situ* и лабораторијских истраживања, планиране резултате производње, услова транспорта, вентилације и одводњавања као и других конкретних реалних података и фактора за поједине руднике.

Конструкција просторија отварања у рудницима са подземном експлоатацијом и њиховог подграђивања највеће је важности, а употреба појединих система подграђивања (сидра, мрежа- бетон, и друго) ће зависити, поред горе наведених анализа напонских стања, и од техно-економских аспеката производње што није био конкретно предмет истраживања у овој дисертацији.

5.2. Препоруке за даља истраживања

Пошто су истраживања у дисертацији базирана на основним критеријума са аспекта стабилности подземних просторија, при чему је неопходно вршити што детаљнију анализу свих могућих утицајних фактора на понашање стијенске масе у датом лежишту око просторија отварања, ово истраживање је било дијелом ограничено у смислу недостајућих фактора за процјену стања напона у стијенској маси.

То се првенствено односи на локацију просторија отварања, дубину просторија, структурне карактеристике стијенске масе (положај, број система пукотина и испуњености пукотина одређеним материјалима), присуство вода, вриједности напона и праваца и интезитета њихових дјеловања.

Даља истраживања би требала да садрже моделе са примјеном других система подграђивања (челични профили, типови сидра,) при чему нумеричке анализе и математичке симулације односа између стијенске масе и система подграђивања буду засноване на математичким анализама сензитивитета и оптимизације, како за

просторије отварања различитих облика тако и површина попречног пресека просторија.

У складу са тим приједлог је да се формирани алгоритам може дорађивати са новим математичким зависностима појединих параметара и величина у системима за подграђивање у нестабилној стијенској маси при дефинисању просторија отварања. Постављањем другачијих односа између познатих и непознатих параметара система подграђивања могуће је вршити анализу и избор оптималних облика, површина попречног пресека, врсте и система подграђивања.

Зато би увођење алгоритма функционалних зависности појединих параметара оправдала своју сврху у случајевима када су познате три или четири промјењљиве које се разматрају у конкретно лежишту са становишта контрукције подземних просторија отварања, а да нису познате двије или више промјењљивих. Избором одређених параметара и калкулацијама се могу постићи и задовољити основни критеријуми стабилности и функционисања подземних просторија. Према томе, препорука је да се у детаљније анализе иде са одређеним бројем познатих промјењљивих (које могу бити резултата истраживања или емпириски одређене вриједности на основу аналогije) а да се прорачуни врше са више непознатих промјењљивих уз варирање површине попречних пресека и облици подземних просторија који нису уобичајени за просторије отварања у неслојевитим лежиштима.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] R. D. Hart., 2003. Enhancing rock stress understanding through numerical modeling, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science* 40 (7-8): 1089 - 1097.
- [2] E. Hoek, P.K., Kaiser, W.F., Bawden, 1995. *Support of Underground Excavations in Hard Rock*, A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, 217 p.
- [3] B.H.G. Brady, E.T. Brown, 2005. *Rock mechanics for underground mining*, Springer Science+Business Media, Inc. Third edition. e-book
- [4] J. Harrison, J. Hudson. 2000. *Engineering rock mechanics- An introduction to the principles*, Elsevier Science
- [5] E. Hoek, 2005. *Practical Rock Engineering*, стр. 27- 59.
- [6] R.E. Hammah, J.H. Curran University of Toronto, ON, Canada.
- [7] N. Barton, F. Loset, R. Lien, J. Lunde, 1980. Application of the Q System in Design Decisions Concerning Dimensions and Appropriate Support for Underground Installations. *Int. Conf. Subsurface Space, Rockstore, Stockholm, Subsurface Space, Vol.2, pp. 553-561.*
- [8] J. A. Hudson, J.P. Harrison, 1997. *Engineering rock mechanics: An introduction to the principles*, Imperial College of Science, Technology and Medicine, University of London, UK
- [9] E. Hoek, E.T. Brown. 1980. Empirical strength criterion for rock masses. *J. Geotech. Engng Div., ASCE* 106(GT9), 1013-1035.
- [10] E. Hoek., M.S. Diederichs. Empirical estimation of rock mass modulus. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science* 43, 2006, 2013-215.
- [11] Z.T. Bieniawski. *Engineering classification of rock masses*. 1973
- [12] E. Hoek., E.T. Brown, 1997. Practical estimates of rock strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science* 34 (8).
- [13] A. Palmström., R. Singh. 2001. The deformation modulus of rock masses: Comparison between in situ tests and indirect estimates. *Tunneling Underground Space Technology* 16.
- [14] E. Hoek., C.T. Carranza-Torres, B. Corkum. Hoek-Brown failure criterion. 2002

- [15] C. Edelbro. Rock Mass Strength, Technical Report, 2003.
- [17] T. Scheldt, 2002. Comparison of Continuous and Discontinuous Modelling for Computational Rock Mechanics, Norwegian University
- [18] M. S. Khan, 2010. Investigation of Discontinuous Deformation Analysis for Application in Jointed Rock Masses, Department of Civil Engineering, University of Toronto, стр 9-20.
- [19] P. R. Sheorey. 1994. A theory for in situ stresses in isotropic and transversely isotropic rock. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, Geomechanics Abstract
- [20] П. Јовановић. 1994. Пројектовање и прорачун подграде хоризонталних подземних просторија, Књига 2. Рударско-геолошки факултет Београд.
- [21] E. Hoek, E.T. Brown. 1980. Underground Excavation in Rock, Institut of Mining and Metallurgy, London.
- [22] B. Foo., A. Lima., B.Vries, H.Ozturk. 2011. Practical application of support systems to address weak rock mass in underground mines, Studia Geotechnica et Mechanica, no 3. vol. XXXIII
- [23] М. Мемић., Е. Хаџић., С. Софтић. 1999. Методологија пројектовања и изградње подземних просторија, Рударски институт, Универзитет у Тузли.
- [24] Љ. Реџић, 1997. Основи пројектовања рудника са подземном експлоатацијом, Рударско металуршки факултет Косовска Митровица, Универзитет у Приштини, стр 154-174
- [25] N.S. Bulyčev, 1989. Mehanika podzemnyh soorūženij, Nedra, Moskva.
- [26] J.Z. Zaslavskij. V.M. Mostkov. 1979. Kreplenie podzemnyh soorūženij, Nedra, Moskva.
- [27] П. Јовановић., 1995. Пројектовање и прорачун подграде хоризонталних подземних просторија, Књига 3, РГФ Београд
- [28] С. Мајсторовић, 2013. Израда подземних просторија, Рударски факултет Приједор, Универзитет у Бањој Луци
- [29] Главни рударски пројекат подземне експлоатације преосталих рудних резерви боксита у западном и јужном ободу површиског копа до К+420 у лежишту "Подбраћан", Књига 3, 2008 год

- [30] A. Bobet, 2010. Numerical Methods in Geomechanics, The Arabian Journal for Science and engineering, V. 35, N. 1B
- [31] T. Lang, J. Bischoff, 1982. Stabilization of Rock Excavations Using Rock Reinforcement, Proceedings 23rd U.S. Symposium on Rock Mechanics, AIME, New York, pp. 935-944.
- [32] M. Tavakoli M, 1994. Underground metal mine crown pillar stability, Department of Civil and Mining Engineering, University of Wollongong.
- [33] O. Heidbach, M. Tingay, A. Barth, J. Reinecker, D. Kurfes, and B. Müller, 2008. The World Stress Map database release 2008 doi:10.1594/GFZ.WSM.Rel2008.
- [34] M. L. Vestad, 2014. Analysis of the Deformation Behavior at the Underground Caverns of Neelum Jhelum HPP, Pakistan, Department of Geology and Mineral Resources Engineering, Norwegian University of Science and Technology.
- [35] C.S. Gundewar, 2014. Application of Rock Mechanics in Surface and Underground Mining, Indian Bureau of Mines, Njagpur, Maharashtra, India
- [36] Л. Стојановић, 2000. Технички параметри израде поземних просторија у неметаличним минералним сировинама, Збирка прописа, Зворник
- [37] S. Peng, J. Zhang, 2007. Engineering Geology for Underground Rocks
- [38] M. L. Zoback, M. D. Zoback, J. Adams, M. Assumpção, S. Bell, E.A. Bergman, P. Blümling, N.R. Brereton, D. Denham, J. Ding, K. Fuchs, N. Gay, S. Gregersen, H. K. Gupta, A. Gvishiani, K. Jacob, R. Klein, P. Knoll, M. Magee, J.L. Mercier, B.C. Müller, C. Paquin, K. Rajendran, O. Stephanson, G. Suarez, M. Suter, A. Udias, Y. H. Xu & M. Zhizhin, 1989: Global pattern of tectonic stress, Nature, Volume 341, pg 291-298.
- [39] M. Cai, P.K. Kaiser, Y. Tasaka, M. Minami, 2007. Determination of residual strength parameters of jointed rock masses using GSI system, International Journal of Rock Mechanics & Mining Science 44, pg 247-265.
- [40] I. F. Vicenzi, 2000. Numerical modeling of Underground Openings in Bedded Rock, Department of Mining and Metallurgical Engineering Mc Gill University, Montreal, Quebec, Canada
- [41] В. Чокорило, 1995. Машине за утовар и транспорт у подземној експлоатацији, РГФ Београд, Универзитет у Београду, страна 180-181.

- [42] M. Cai, P.K. Kaiser, Y. Tasaka, M. Minami, 2003. Estimation of rock mass deformation modulus and strength of jointed hard rock masses using the GSI system, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Science* 41, pg 3-9.
- [43] A. Elyasi, K. Koshtasbi, O. Saeidi, S. R. Torabi, 2013. Stress determination and geomechanical stability analysis of an oil well of Iran. *Sadhana* Vol. 39, Part 1, February 2014, pp. 207–220. Indian Academy of Sciences.
- [44] C. Huang, W. Ren, и L. Kong 2013. New Mathematical Modelling of Stabilizing Pile with Prestressed Tieback Anchors, Hindawi Publishing Corporation *Mathematical Problems in Engineering* Volume 2013, Article ID 601508, 12 p.
- [45] E. H. Zúñiga, P. O. Fernández, F. R. Frez. 2007. Some applications to mine geotechnical design using *MatLab*, VI Congreso Chileno de Geotecnia.
- [46] Н.Гојковић, Р. Обрадовић Р, В. Чебашек, 2004. Стабилност косина површинских копова, РГФ Београд

ДОДАЦИ

Додатак А.1. Параметри и прорачун оцјене стијенске масе према условима по RMR-у (Bieniawski, 1989) ISRM

Параметар			Вриједности						
I	Чврстоћа нетакнуте стијенске масе	Једноаксијална притисна чврстоћа	>250MPa	250-100MPa	100-50MPa	50-25MPa	25-5 5-1 <1		
		Број бодова	15	12	7	4	2 1 0		
2	RQD по Деер-у		100-90%	90-75%	75-50%	50-25%	<25%		
	Број бодова		20	17	13	8	3		
3	Растојање дисконтинуитета		>2m	2-0.6 m	0.6-0.2 m	0,2-0.06 m	<0.06 m		
	Број бодова		20	15	10	8	5		
4	Стање дисконтинуитета		Веома храпаве површине, неконтуриране, површине пукотина нерастрошене	Незнатно храпаве површине, размак <1 mm, зидови незнатно растрошени	Незнатно храпаве површине, <1 mm, зидови знатно растрошени	Глатке површине или испуна <5mm, или размак пукотина 1-5 mm, непрекинуте.	Мека испуна >5 mm дебљине или размак пукотина већи од 5 mm. Непрекинуте.		
	Број бодова		30	25	20	10	0		
5	Утицај подземних вода	Прилив воде на дужини од 10m Притисак воде у пукотини Опште стање	Никакав 0 bar Сасвим суво	10 l/min 0.0-0.1 bar Влажно	10-25 l/min 0.1-0.2 bar Мокро	25-125 l/min 0.2-0.5 bar Капљање	>125 l/min >0.5 bar Течење		
		Број бодова	15	10	7	4	0		
6	Орјентација дисконтинуитета		Пружање пукотина управно на осу просторије		Пружање пукотина паралелно са осом просторије		Пад 0-20° без обзира на пружање		
			Израда у смјеру пада пукотина (°)		Израда супротно смјеру пада пукотина (°)				
			45-90	20-45	45-90	20-40		Пад 45-90°	Пад 20-45°
			Веома повољно	Повољно	Добро	Неповољно			
	Пружање и пад		Веома повољно		Повољно	Добро	Неповољно	Веома неповољно	
	Бодови	Подземне просторије Темељи Косине	0 0 0	-2 -2 -5	-3 -7 -25	-10 -15 -50	-12 -25 -60		
II	Збир бодова		100-81	80-60	60-41	40-21	<21		
	Класа стијене		I	II	III	IV	V		
	Опис		Веома добра стијена	Добра стијена	Повољна стијена	Слаба стијена	Веома слаба стијена		
	Просјечно вријеме стајања неподрађене просторије		10 година за распон 15m	6 мјесеци за распон од 8 m	1 седмица за распон од 5 m	10 сати за распон од 2.5m	30 минута за распон од 1 m		
	Кохезија стијенске масе		>400kPa	300-400 kPa	200-300 kPa	100-200 kPa	<100 kPa		
	Угао унутрашњег трења		>45°	35°-45°	25°-35°	15°-25°	<15°		

Додатак А.2. Карактеристике параметара за Показатељ квалитета стијенске масе Q [2]

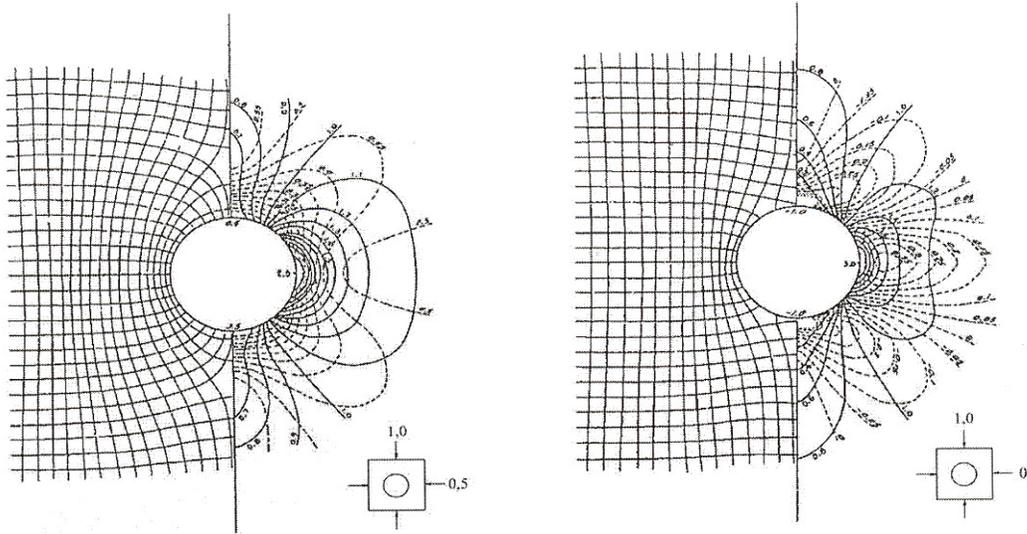
Опис	Вриједност	Карактеристике
<i>2. Број стијена у пукотини</i> J_n		
А. Масивна, са или без пукотина	0.5-1,0	
Б. Један систем пукотина	2	
Ц. Један систем пукотина уз присуство појединих пукотина	3	
Д. Два система пукотина	4	
Е. Два система пукотина уз присуство појединих пукотина	6	
Ф. Три система пукотина	9	1. За раскршћа се користе ($3.0 \times J_n$)
Г. Три система пукотина уз присуство случајних пукотина	12	
Х. Четири и више система пукотина са случајним пукотинама, јако испуцале стијене и захваћене са густим пукотинама	15	2. За улазе (портале у јаму) користи се ($2.0 \times J_n$)
Ј. Здробљена стијена	20	
<i>3. Храпавост и квалитет површина пукотина</i> J_r		
А. Испрекидане пукотине.	4	
Б. Храпаве или неправилне, таласасте.	3	
Ц. Глатке, таласасте.	2	
Д. Клизаве, таласасте.	1.5	
Е. Храпаве или неправилне, равне.	1.5	
Ф. Глатке, равне.	1.0	
Г. Клизаве, равне.	0.5	
Х. Отворене пукотине испуњене глиненим материјалом довољно да спречи контакт између пукотина.	1.0	1. Додати 1.0 ако је средње растојање између пукотина веће од 3.0m.
Ј. Пјесковита, шљунковита, или здробљена зона довољно дебела да спријечи контакт између површина пукотина.	1.0	2. $J_r=0.5$ се може користити за равне и клизаве површине и ако су пукотине орјентисане да смањују чврстоћу стијене
<i>4. Стање између пукотина</i> J_a φ°		
а. Површине пукотина се додирују		
А. Чврсто срасла, тврда, неомекшана, непропусна испуна.	0.75	-
Б. Неизмјењени зидови пукотина, само површине измјењене.	1.0	25-35
Ц. Слабо измјењени зидови пукотина испуна од неомекшаних минерала пјесковите честице, распаднута стијена без глина итд.	2.0	25-30

Наставак Табеле А.2.

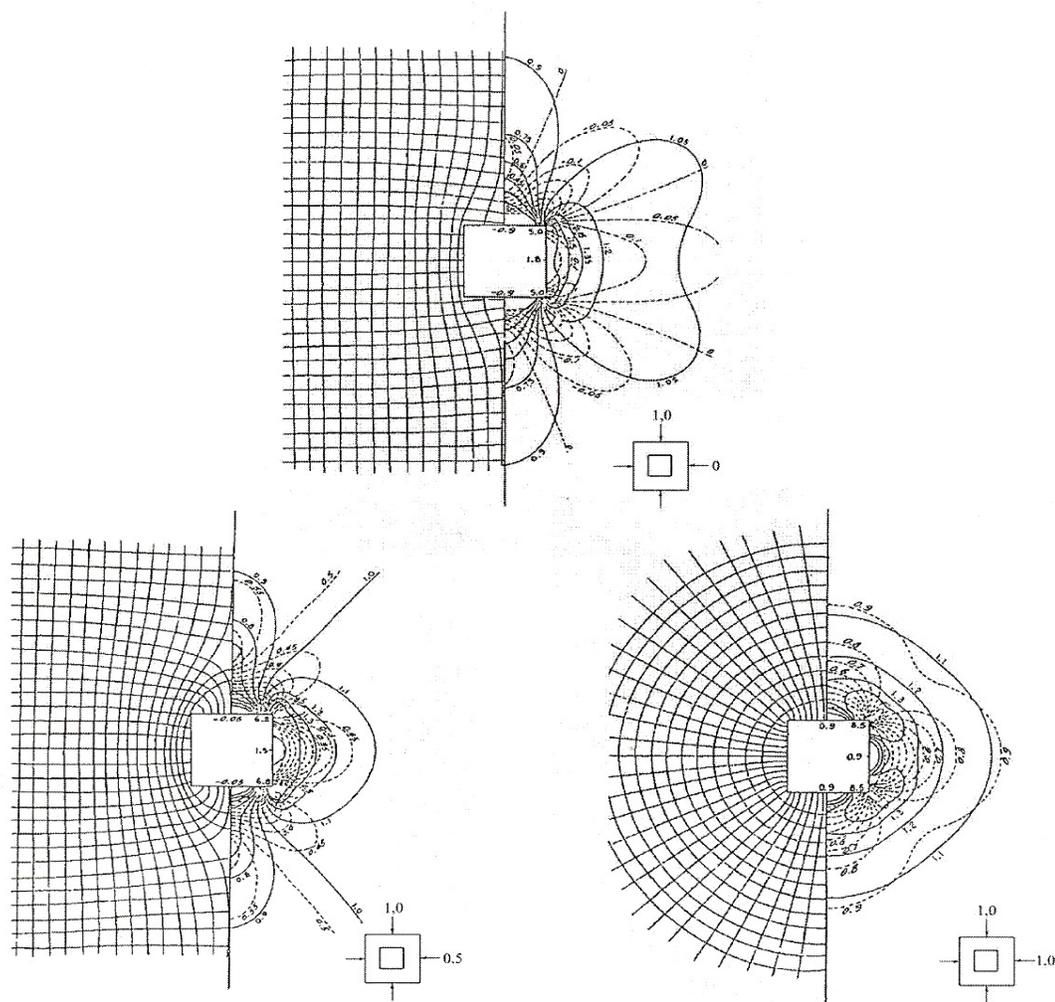
Д. Пресвлаке од шкриљаве или пјесковите глине.	3.0	20-25	
Е. Превлаке на површинама пукотина од омекшалих минерала глина, каолина и лискуна, хлорит, талк, гипс и графит, и мале количине глине склоне бујању. б. Растојање између пукотина	4.0	8-16	
Ф. Пукотина испуњена пјесковитим честицама, дјеловима распаднуте стијене без глине и сл.	4.0	25-30	
Г. Претјерано консолидоване неомекшане испуне од минерала глина (непрекидне < 5mm).	4.0	25-30	
Н. Умјерено или слабо консолидоване, омекшале глине (непрекидне <5mm).	8.0	12-16	
Ј. Испуне од глине склоне бубрењу нпр. монтморионит (непрекидне <5 mm). Вриједност J_a зависи од процента бубрења глине, процента воде и др.	8.0-12.0	6-12	
ц. Нема контактна између пукотина последије смицања			
К. Зоне или слојеви распаднуте или смрвљене глине или	6.0;8.0	6-24	
Л. и М. видјети (Г,Х и Ј за услове глине).	8.0-12.0		
Н. Зоне или појасеви прашинасте или пјесковите глине, мало учешће глина, неразмекшавајућа.	5.0		
О. Дебеле непрекинуте зоне или појаси глине	10-13	6-24	
П. и Р. (видјети Г, Х и Ј за услове глина).	13-20		
5. Фактор редукције воде			
А. Суве просторије или мањи доток	J_w 1.0	Приближни притисак воде (МПа) <0.1 (<5l/m, локално).	
Б. Средњи прилив или притисак, понекад испрана испуна из пукотина.	0.66	0.10-0.25	
Ц. Велики прилив или високи притисак у здравиј стијени са пукотинама без испуне.	0.5	0.25-1.0	1. Фактори Ц и Ф су грубо процјењени; ако је инсталирано
Д. Велики прилив или високи притисак.	0.33	0.25-1.0	дренирање увећати J_w .
Е. Изузетно велики прилив или притисак при минарању уз опадање са временом.	0.2-0.1	>1.0	2. Нису разматрани посебни
Ф. Изузетно висок доток воде или притисак	0.1-0.05	>1.0.	услови који изазивају формирање леда.

<i>б. Фактор редуције напона</i>	<i>SRF</i>	
а. Ослабљене зоне пресецају подземне просторије што може узроковати растерећење стијенске масе прилом израде просторије		
А. Појава већег броја ослабљених зона садрже иловачу или хемијски разграђену стијену, врло растресена околна стијена на свакој дубини.	10.0	1. Потребно је смањити вриједности које SRF за 25-50%једино ако ослабљене зоне утицаја на подземну просторију али је не пресецају.
Б. Једна ослабљена зона која садржи глину или хемијски разграђену стијену на дубини <50m.	5.0	
Ц. Једна ослабљена зона која садржи глину или хемијски разграђену стијену >50 m.	2.5	
Д. Више пукотинских зона у компактној стијени (без глине), растресена околна стијена за сваку дубину.	7.5	
Е. Појединачне зоне смицања у компактној стијени (без глине) за дубину откопавања <50 m.	5.0	
Ф. Појединачне зоне смицања у кмпактној стијени (без глине) за дубине >50 m.	2.5	
Г. Растресене отворене пукотине, јако испуцала стијена, на свим дубинама.	5.0	
б. Здрава стијена, проблеми са подземним притиском		
Х. Мали напон, близу површине.	2.5	
Ј. Средњи напон.	1.0	
К. Високи напон, врло чврста структура (повољна за стабилност, неповољна за стабилност зидова).	0.5-2.0	
Л. Јамски удар слабог интезитета (масивна стијена).	5-10	
М. Јамски удар јаког интезитета (масина стијена).	10-20	
ц. Пластичне стијене и стијене под притиском		
Н. Подземни притисак слабијег интезитета (здробљене и нехомогене стијене).	5-10	
О. Подземни притисак великог интезитета (нехомогене стијене).	10-20	
д. Стијене склоне бубрењу		
П. Стијене под малим притиском.	5-10	
Р. Стијене под великим притиском.	10-20	

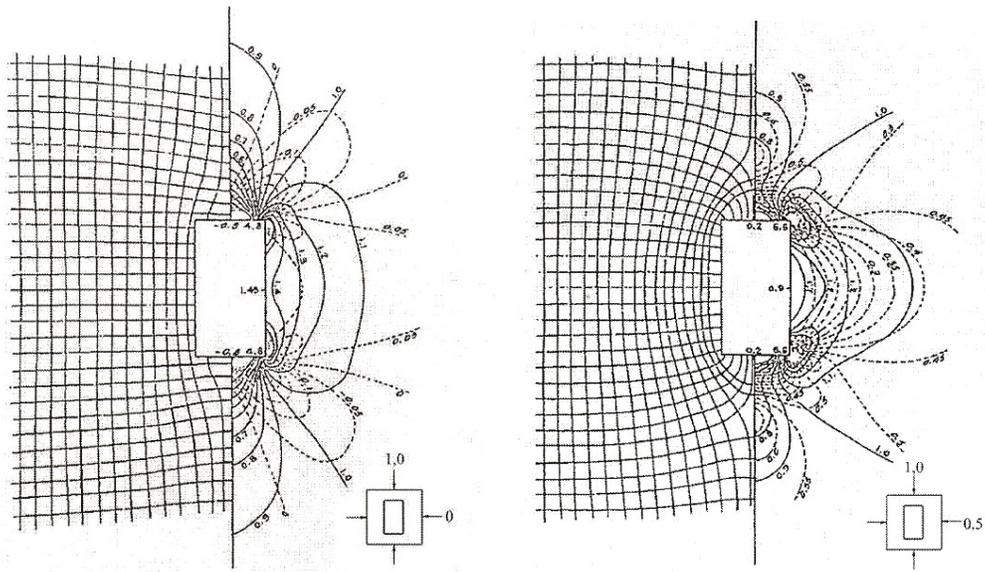
Додатак А.3. Изолиније главних напона и трајекторије напона у стијенском материјалу који окружује подземне просторије различитих профила у еластичном раванском стању са различитим условима примарих напона



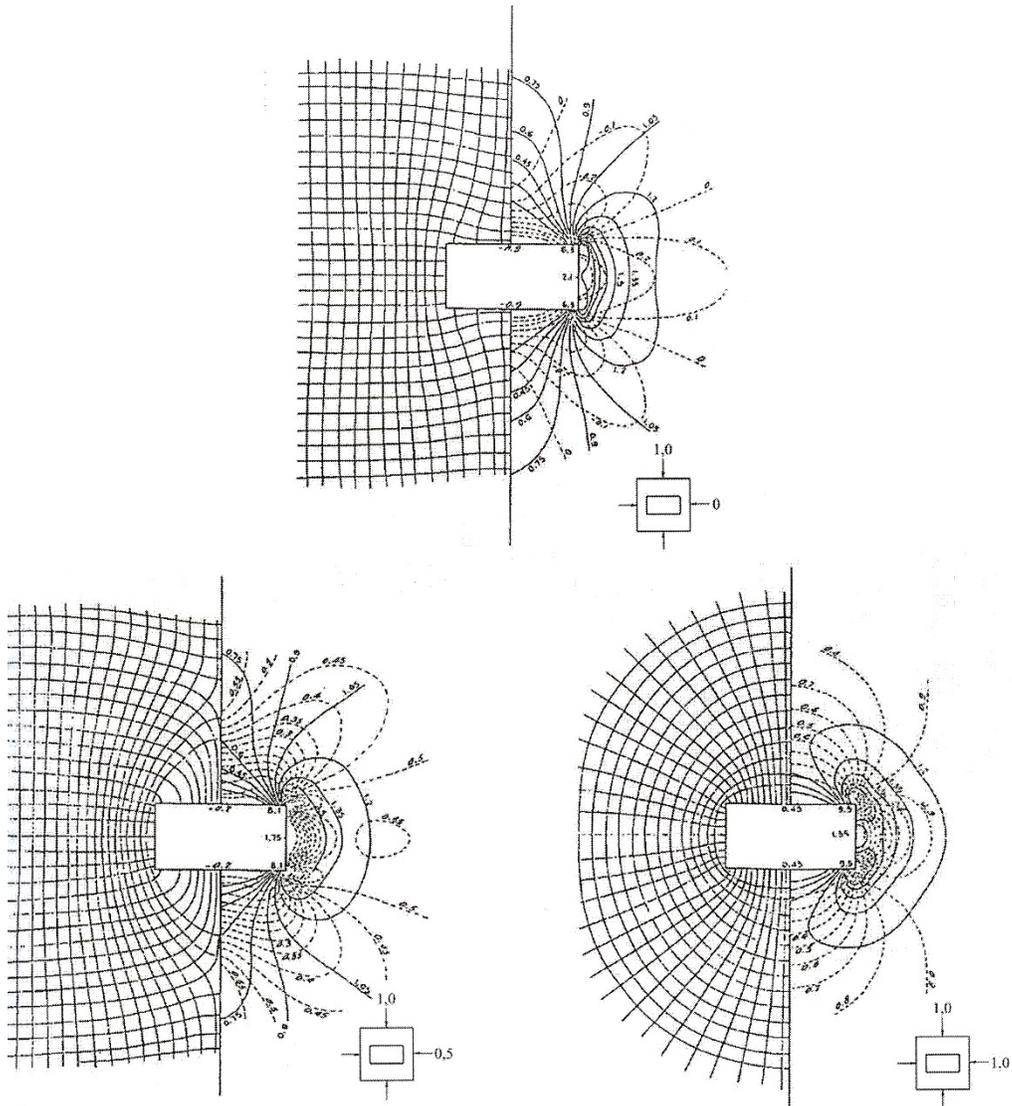
А.3.1. Изолиније главних напона и трајекторије напона у стијенском материјалу који окружује подземну просторију кружног профила у еластичном раванском стању са различитим условима примарих напона: примарни напони са $k=0.5$ и $k=0$.



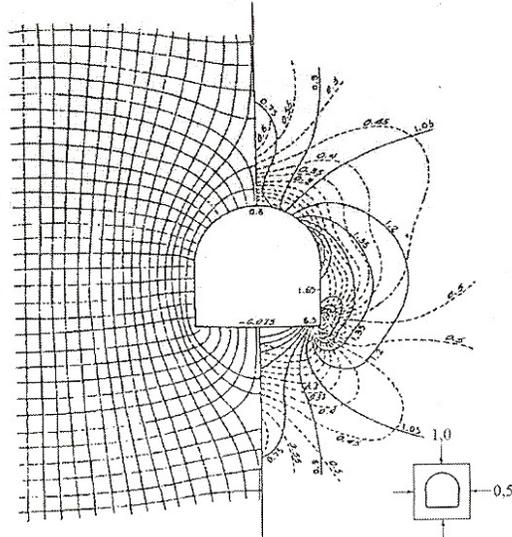
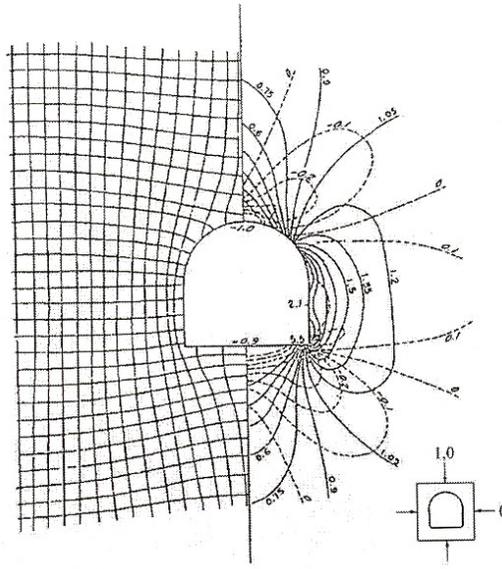
A.3.2. Приказ изолинија главних напона и трајекторија напона у стијенском материјалу који окружује подземну просторију квадратног профила у еластичном раванском стању са различитим условима примарних напона који дјелују са $k=0$, $k=0.5$ и $k=1$.



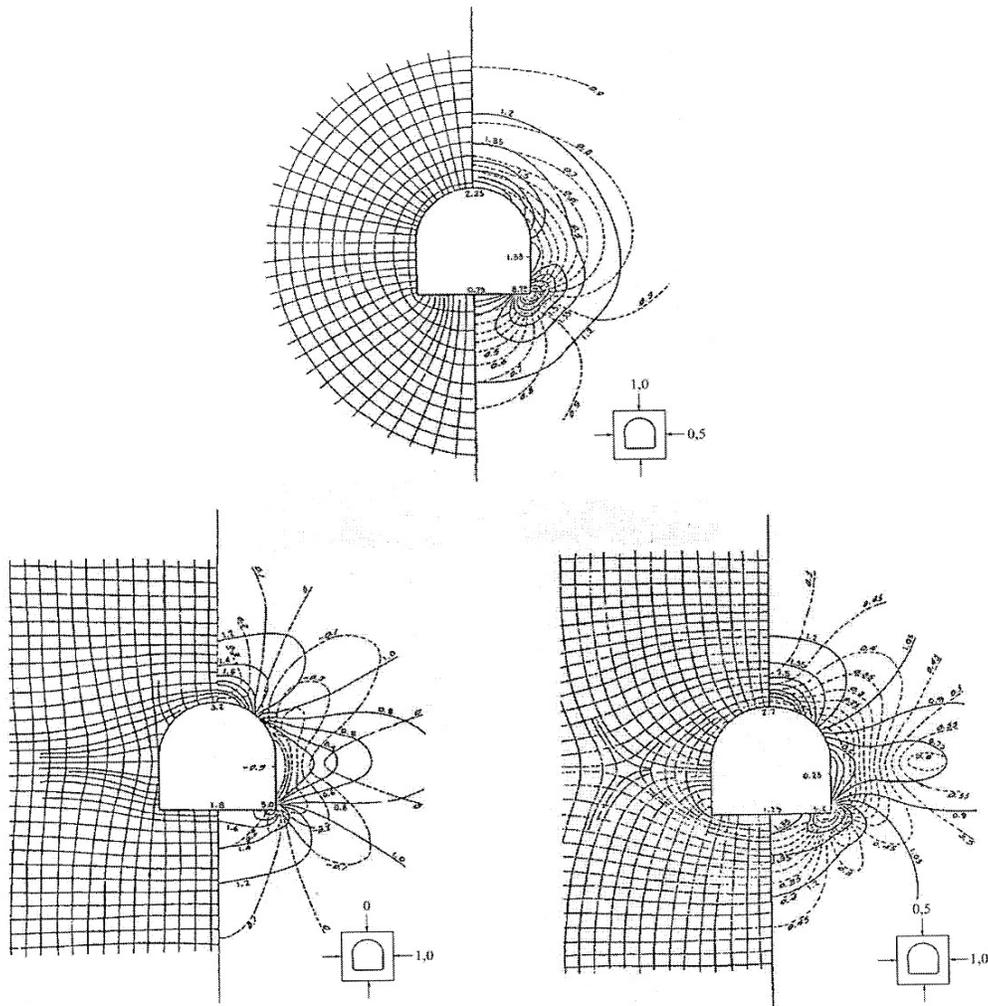
A.3.3. Приказ изолинија главних napona и трајекторија napona у стијенском материјалу који окружује подземну просторију правоугаоног профила ($h=2b$), у еластичном равном стању са различитим условима примарних napона који дјелују са $k=0$, $k=0.5$.



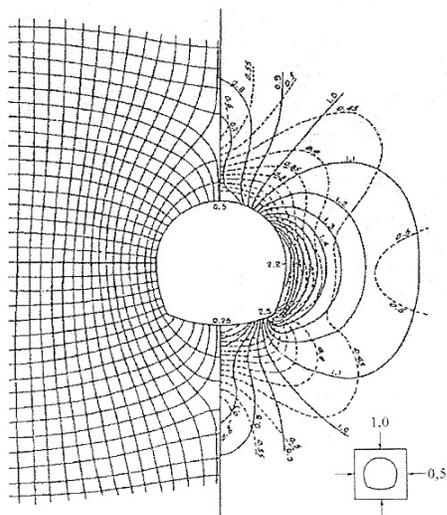
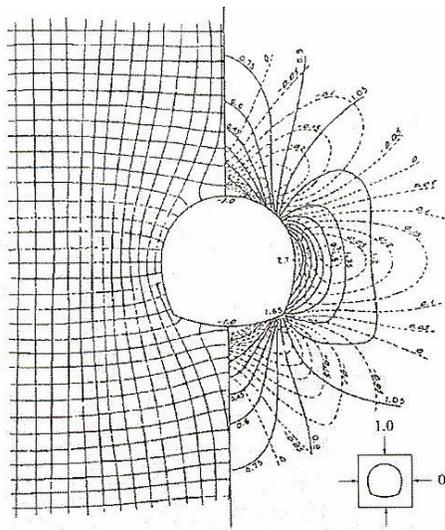
А.3.4. Приказ изолинија главних напона и трајекторије напона у стијенском материјалу који окружује подземну просторију правоугаоног профила ($b=2h$), у еластичном раванском стању са различитим условима примарних напона који дјелују са $k=0$, $k=0.5$ и $k=1$.



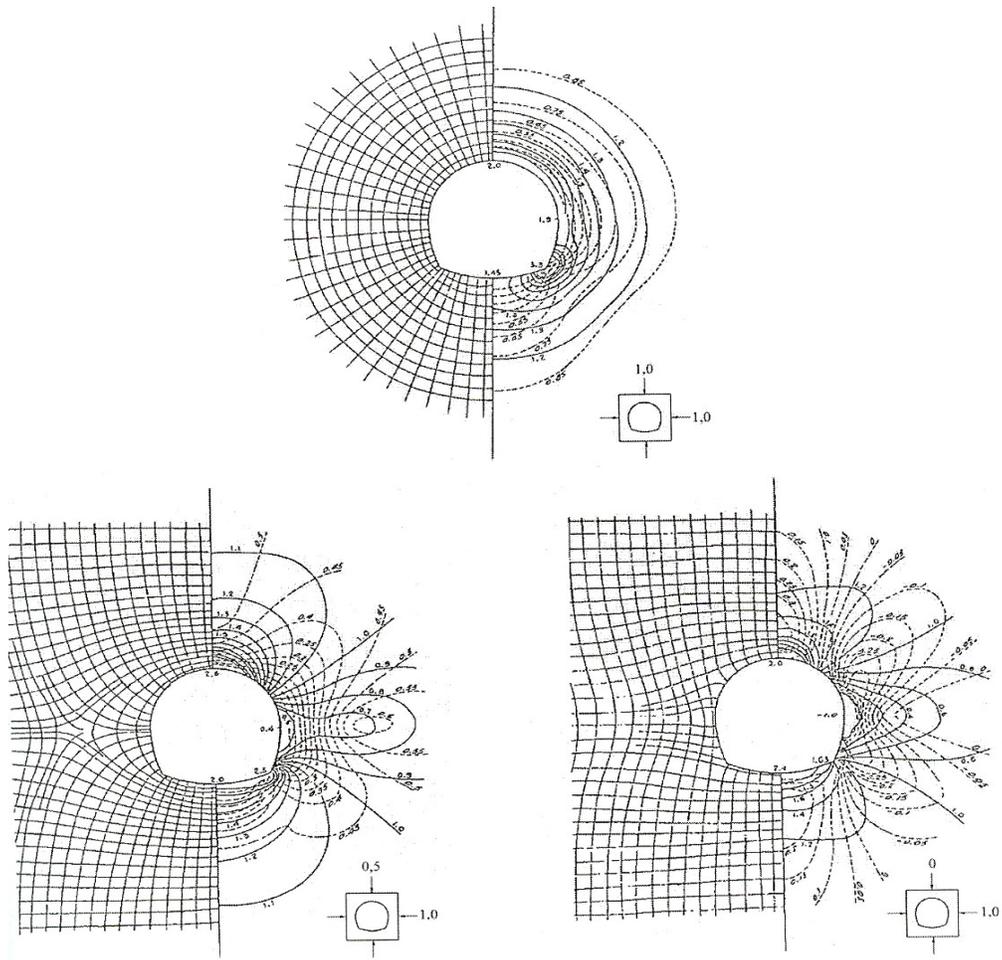
A.3.5. Приказ изолинија главних напона и трајекторија напона у стијенском материјалу који окружује подземну просторију нискозасвођеног попречног пресека, у еластичном раванском стању са различитим условима примарих напона који дјелују са $k=0$, $k=0.5$.



A.3.6. Изолиније главних напона и трајекторије напона у стијенском материјалу који окружује подземну просторију нискозасвођеног попречног пресека, у еластичном раванском стању са различитим условима примарних напона.



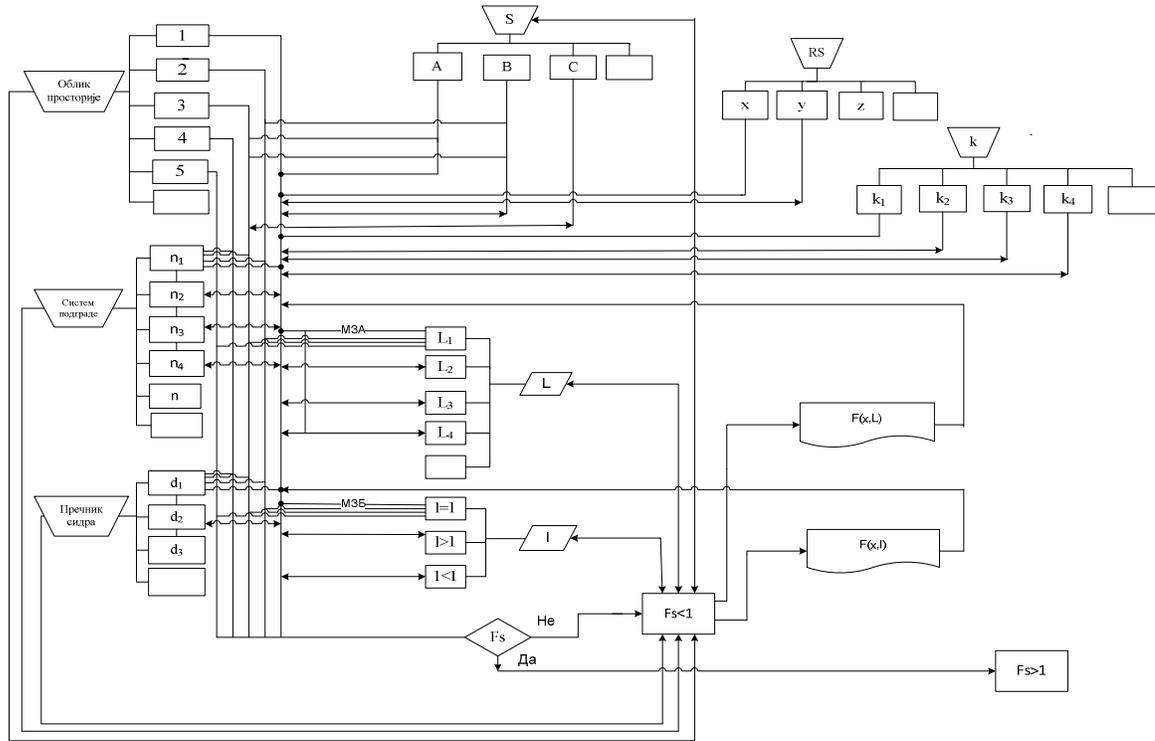
А.3.7. Изолиније главних напона и трајекторије напона у стијенском материјалу који окружује подземну просторију потковичастог попречног пресеја, у еластичном раванском стању са различитим условима примарих напона, хоризонтални напони са $k=0$, $k=0.5$



A.3.8. Изолитије главних напона и трајекторије напона у стијенском материјалу који окружује подземну просторију потковичастог попречног пресеја, у еластичном раванском стању са различитим условима примарих напона.

ПРИЛОЗИ

Прилог 3.A.1. Алгоритам математичких зависности параметара у моделу конструкција подземних просторија



ЛЕГЕНДА

- 1,2,3,4,5- просторије различитог попречног пресека,
- RS- ознака за радну средину: x, y, z- више радних средина.
- n₁, n₂, n₃, n₄- број сидара, сидра у комбинацији са мрежом,
- k- коефицијенти односа хоризонталних и вертикалних напона.
- n- други системи подгађивања
- L₁, L₂, L₃, L₄- различите дужине сидара,
- d₁, d₂- пречници сидара,
- l- растојање подградних елемената: l=растојање 1 m, l≠1 m
- S- ознака за површину попречног пресека просторије:
- F_s- фактор сигурности, F_s>1, и F_s<1,
- A, B, C- просторије различитих површина попречног пресека
- f(x,y)- математичка функција зависности појединих параметара.
- MЗА- математичка зависност дужине сидра у односу на максимална напрезања у сидрима, при познатом облику подземне просторије познатих величина попречног пресека, пречника и броја сидара.
- MЗБ- математичка зависност растојања сидара при познатој дужини сидра.

Прилог 3.А.2. Извод дијела добијених математичких израза

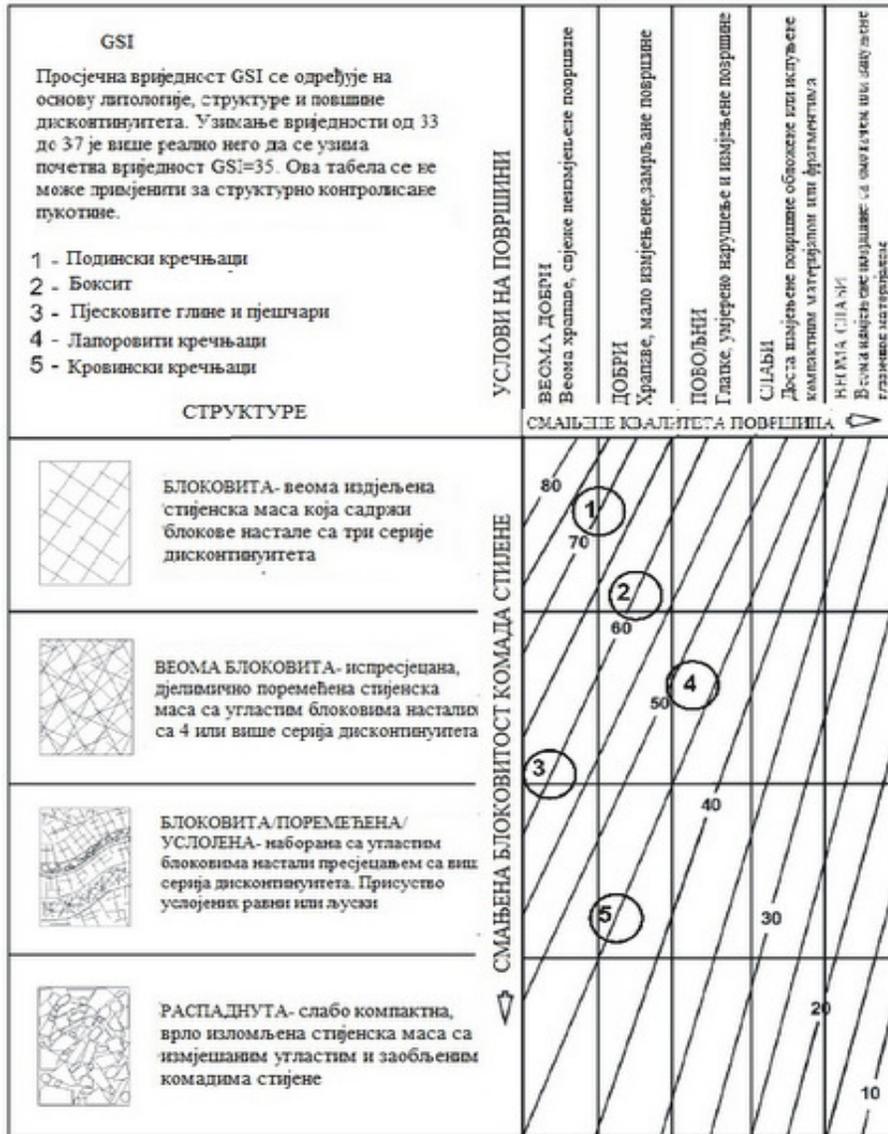
3.А.2.1. Приказ дијела табела са добијеним математичким изразима за поједине случајеве подземних просторија у бокситу и пречнике сидара 19 mm

Fmax											Ознака једначине
Тип	Средина	Облик	d	ns	L	k=0.5	k=1	k=1.5	k=2.1	Једначина F=f(L)	
A	Б	1	19	3	1	0.00945556	0.028787	0.0535797	0.049598899	$y = - 0.046x^3 + 0.15x^2 - 0.1x + 0.03$	1
A	Б	1	19	5	1	0.0170536	0.055423	0.0872462	0.0876471	$y = - 0.033x^3 + 0.086x^2 + 0.0052x - 0.003$	2
A	Б	1	19	7	1	0.0259219	0.0759041	0.091139	0.08644	$y = 0.02x^3 - 0.13x^2 + 0.26x - 0.074$	3
A	Б	1	19	7+	1	0.0261825	0.0765595	0.0909874	0.0863941	$y = 0.023 x^3 - 0.14x^2 + 0.27x - 0.077$	4
A	Б	1	19	3	1.5	0.00957041	0.0302358	0.0496535	0.0460016	$y = - 0.029x^3 + 0.085x^2 - 0.035x + 0.0095$	5
A	Б	1	19	5	1.5	0.0213138	0.0540271	0.0842533	0.087666	$y = - 0.032x^3 + 0.092x^2 - 0.016x + 0.01$	6
A	Б	1	19	7	1.5	0.0371084	0.0736481	0.0951524	0.0863068	$y = - 0.02x^3 + 0.031 x^2 + 0.062x + 0.00085$	7
A	Б	1	19	7+	1.5	0.0372155	0.0742891	0.0943784	0.0862524	$y = - 0.015x^3 + 0.011x^2 + 0.084x - 0.0056$	8
A	Б	1	19	3	1.8	0.00943374	0.0285517	0.0537763	0.0460038	$y = - 0.052x^3 + 0.17 x^2 - 0.12x + 0.036$	9
A	Б	1	19	5	1.8	0.0169896	0.0540064	0.0881495	0.0876776	$y = - 0.042x^3 + 0.12x^2 - 0.034x + 0.0088$	10
A	Б	1	19	7	1.8	0.0251904	0.0759166	0.0921824	0.0864874	$y = 0.017x^3 - 0.12 x^2 + 0.25x - 0.072$	11
A	Б	1	19	7+	1.8	0.0252055	0.0759166	0.0913935	0.0864162	$y = 0.02x^3 - 0.13x^2 + 0.26x - 0.076$	12
A	Б	1	19	3	2.1	0.00940496	0.0294216	0.0389389	0.0460051	$y = 0.011x^3 - 0.053x^2 + 0.1x - 0.029$	13
A	Б	1	19	5	2.1	0.0171208	0.0542916	0.0743231	0.0877282	$y = 0.014x^3 - 0.076x^2 + 0.16x - 0.048$	14
A	Б	1	19	7	2.1	0.0269329	0.0737974	0.0943204	0.086291	$y = - 0.0029x^3 - 0.044x^2 + 0.16x - 0.044$	15
A	Б	1	19	7+	2.1	0.0270119	0.0743556	0.095344	0.0862357	$y = - 0.005x^3 - 0.038x^2 + 0.16x - 0.043$	16
A	Б	2	19	3	1	0.00944337	0.0333404	0.0599425	0.0893365	$y = 0.00012x^3 + 0.0051x^2 + 0.04x - 0.012$	17
A	Б	2	19	5	1	0.0160995	0.0571879	0.0737337	0.0851428	$y = 0.026x^3 - 0.13 x^2 + 0.23x - 0.069$	18
A	Б	2	19	7	1	0.0234512	0.0791955	0.0915548	0.0960517	$y = 0.047x^3 - 0.23 x^2 + 0.37x - 0.11$	19
A	Б	2	19	7+	1	0.0229864	0.0789841	0.0947301	0.0993296	$y = 0.039 x^3 - 0.2x^2 + 0.34x - 0.1$	20
A	Б	2	19	3	1.5	0.00902645	0.0234863	0.0409634	0.0750735	$y = 0.018 x^3 - 0.048 x^2 + 0.07x - 0.016$	21
A	Б	2	19	5	1.5	0.0154513	0.0420886	0.08594	0.0733476	$y = - 0.098 x^3 + 0.33 x^2 - 0.27x + 0.08$	22
A	Б	2	19	7	1.5	0.0226206	0.0562097	0.0880726	0.0954546	$y = - 0.03 x^3 + 0.088 x^2 - 0.011x + 0.01$	23
A	Б	2	19	7+	1.5	0.0224172	0.0563716	0.0917692	0.0934562	$y = - 0.047x^3 + 0.14x^2 - 0.065x + 0.025$	24
A	Б	2	19	3	1.8	0.00956173	0.030722	0.0506208	0.0791991	$y = 0.013x^3 - 0.042x^2 + 0.083x - 0.023$	25
A	Б	2	19	5	1.8	0.0168977	0.0536736	0.0779318	0.0883522	$y = - 0.0018 x^3 - 0.02 x^2 + 0.11x - 0.031$	26
A	Б	2	19	7	1.8	0.0232563	0.0656507	0.0776231	0.0908967	$y = 0.042 x^3 - 0.19 x^2 + 0.29x - 0.081$	27
A	Б	2	19	7+	1.8	0.0226673	0.065208	0.0786263	0.0868336	$y = 0.032 x^3 - 0.15x^2 + 0.26x - 0.073$	28
A	Б	2	19	3	2.1	0.00943836	0.0308834	0.051674	0.0791306	$y = 0.0098x^3 - 0.031x^2 + 0.072x - 0.02$	29
A	Б	2	19	5	2.1	0.0165931	0.0537535	0.0776544	0.0885166	$y = 0.00029 x^3 - 0.027 x^2 + 0.11x - 0.034$	30
A	Б	2	19	7	2.1	0.0240582	0.0659696	0.0830853	0.0995311	$y = 0.032x^3 - 0.15x^2 + 0.25x - 0.067$	31
A	Б	2	19	7+	2.1	0.0235745	0.0656066	0.078643	0.0960799	$y = 0.045 x^3 - 0.19x^2 + 0.29x - 0.081$	32

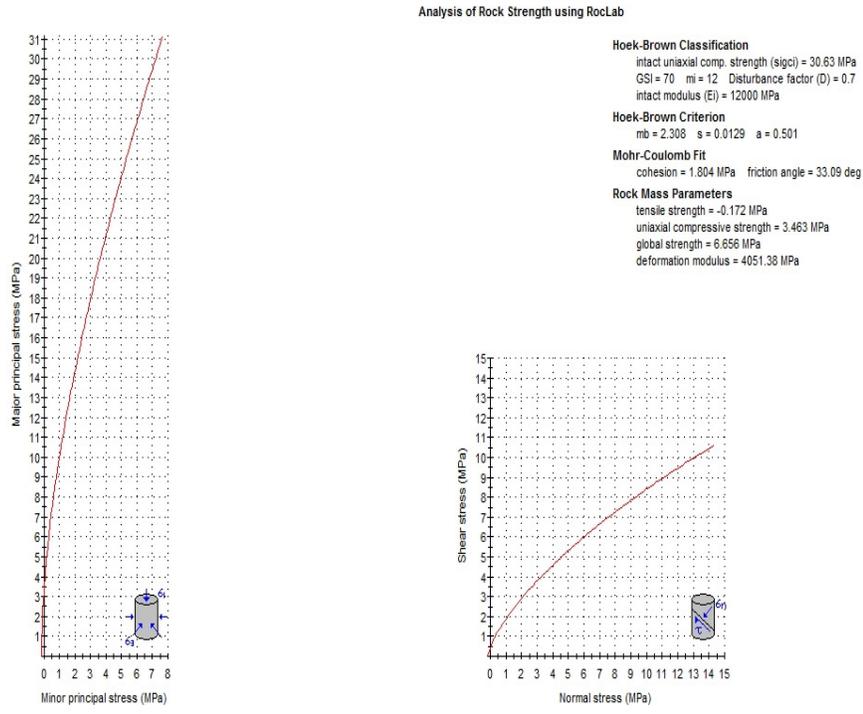
3.A.2.2. Приказ дијела табела са добијеним математичким изразима за поједине случајеве подземних просторија кречњаку и пречнике сидра 22 mm

Fmax											
Тип	Средина	Облик	d	ns	L	k=0.5	k=1	k=1.5	k=2.1	Једначина F=f(L)	Ошак једначине
B	K	1	22	3	1	0.00663012	0.0098626	0.0351835	0.061224	$y = - 0.028 x^3 + 0.13 x^2 - 0.14x + 0.047$	451
B	K	1	22	5	1	0.0113708	0.0230188	0.0648805	0.113207	$y = - 0.032 x^3 + 0.16 x^2 - 0.15x + 0.054$	452
B	K	1	22	7	1	0.014219	0.0328569	0.0928214	0.157257	$y = - 0.049 x^3 + 0.23 x^2 - 0.22x + 0.074$	453
B	K	1	22	7+	1	0.0149536	0.0344163	0.0964376	0.161238	$y = - 0.053 x^3 + 0.24 x^2 - 0.23x + 0.078$	454
B	K	1	22	3	1.5	0.00663154	0.00986624	0.0351917	0.0612234	$y = - 0.029 x^3 + 0.13 x^2 - 0.14x + 0.047$	455
B	K	1	22	5	1.5	0.0113732	0.0230253	0.0649747	0.112983	$y = - 0.032 x^3 + 0.16 x^2 - 0.16x + 0.054$	456
B	K	1	22	7	1.5	0.014222	0.0337013	0.0927607	0.15748	$y = - 0.045 x^3 + 0.21 x^2 - 0.2x + 0.068$	457
B	K	1	22	7+	1.5	0.0149568	0.0353094	0.0970294	0.161384	$y = - 0.052 x^3 + 0.24 x^2 - 0.23x + 0.075$	458
B	K	1	22	3	1.8	0.00663185	0.00986684	0.0351883	0.0612282	$y = - 0.028 x^3 + 0.13 x^2 - 0.14x + 0.047$	459
B	K	1	22	5	1.8	0.0113736	0.0230257	0.0648889	0.113205	$y = - 0.032 x^3 + 0.16 x^2 - 0.15x + 0.054$	460
B	K	1	22	7	1.8	0.0142226	0.0329909	0.0928167	0.157205	$y = - 0.049 x^3 + 0.23 x^2 - 0.22x + 0.073$	461
B	K	1	22	7+	1.8	0.0149574	0.0345548	0.0964348	0.161158	$y = - 0.053 x^3 + 0.24 x^2 - 0.23x + 0.077$	462
B	K	1	22	3	2.1	0.00663218	0.0098675	0.0350777	0.0612184	$y = - 0.028 x^3 + 0.13 x^2 - 0.14x + 0.046$	463
B	K	1	22	5	2.1	0.0113742	0.0230262	0.0649674	0.113175	$y = - 0.032 x^3 + 0.16 x^2 - 0.16x + 0.054$	464
B	K	1	22	7	2.1	0.0142233	0.0323286	0.0930202	0.151602	$y = - 0.06 x^3 + 0.26 x^2 - 0.26x + 0.083$	465
B	K	1	22	7+	2.1	0.0149582	0.0338337	0.0967028	0.15258	$y = - 0.068 x^3 + 0.29 x^2 - 0.28x + 0.091$	466
B	K	2	22	3	1	0.00624274	0.0123823	0.0251059	0.0726935	$y = 0.038 x^3 - 0.1 x^2 + 0.096x - 0.022$	467
B	K	2	22	5	1	0.0107012	0.0254725	0.0435264	0.130566	$y = 0.088 x^3 - 0.26 x^2 + 0.26x - 0.066$	468
B	K	2	22	7	1	0.0133808	0.0420852	0.0530318	0.17272	$y = 0.17 x^3 - 0.54 x^2 + 0.57x - 0.16$	469
B	K	2	22	7+	1	0.0142485	0.0436635	0.0539501	0.173333	$y = 0.17 x^3 - 0.55 x^2 + 0.59x - 0.16$	470
B	K	2	22	3	1.5	0.00607509	0.0168384	0.0260426	0.0493999	$y = 0.021 x^3 - 0.066 x^2 + 0.084x - 0.022$	471
B	K	2	22	5	1.5	0.010416	0.0366355	0.045074	0.0903501	$y = 0.073 x^3 - 0.25 x^2 + 0.31x - 0.088$	472
B	K	2	22	7	1.5	0.013037	0.0566368	0.0589604	0.123801	$y = 0.14 x^3 - 0.5 x^2 + 0.59x - 0.18$	473
B	K	2	22	7+	1.5	0.0138779	0.0592232	0.0619724	0.12694	$y = 0.14 x^3 - 0.5 x^2 + 0.6x - 0.18$	474
B	K	2	22	3	1.8	0.00624274	0.0067596	0.0226187	0.0733155	$y = 0.026 x^3 - 0.047 x^2 + 0.026x + 0.0016$	475
B	K	2	22	5	1.8	0.0107012	0.0143361	0.0394408	0.132422	$y = 0.062 x^3 - 0.14 x^2 + 0.11x - 0.018$	476
B	K	2	22	7	1.8	0.0133808	0.0219537	0.065749	0.165795	$y = 0.028 x^3 - 0.014 x^2 - 0.011x + 0.019$	477
B	K	2	22	7+	1.8	0.0142485	0.0230865	0.0692845	0.167074	$y = 0.019 x^3 + 0.018 x^2 - 0.042x + 0.029$	478
B	K	2	22	3	2.1	0.00548469	0.0129675	0.021007	0.067804	$y = 0.051 x^3 - 0.15 x^2 + 0.15x - 0.04$	479
B	K	2	22	5	2.1	0.00953768	0.0275029	0.0385864	0.12838	$y = 0.11 x^3 - 0.36 x^2 + 0.37x - 0.1$	480

Прилог 4.A.1 Вриједности геолошког индекса чврстоће за поједине литолошке чланове у рудном лежишту "Подбраћан" на основу дијаграма (по Ноек-у, 2003).

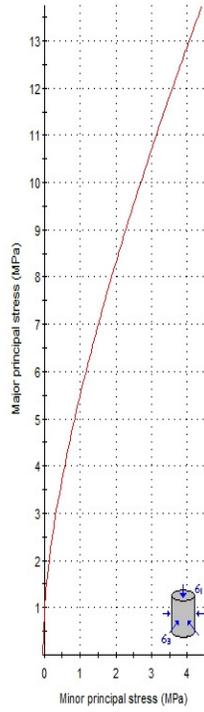


Прилог 4. А. 2. Параметри чврстоће стијенске масе за потребе анализе напонских стања



4.A.2.1. Одређивање параметара стијенског масива за Подински кречњак

Analysis of Rock Strength using RocLab



Hoek-Brown Classification

intact uniaxial comp. strength (σ_{ci}) = 17.668 MPa
GSI = 60 m_i = 10 Disturbance factor (D) = 0.7
intact modulus (Ei) = 12000 MPa

Hoek-Brown Criterion

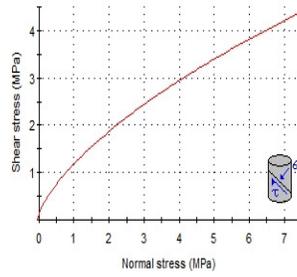
m_b = 1.110 s = 0.0030 a = 0.503

Mohr-Coulomb Fit

cohesion = 0.778 MPa friction angle = 27.12 deg

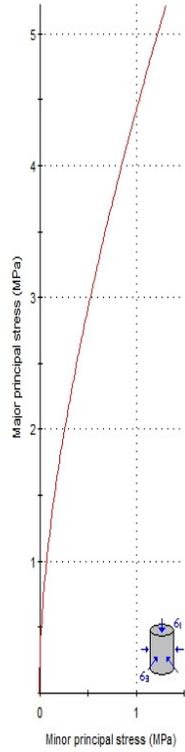
Rock Mass Parameters

tensile strength = -0.048 MPa
uniaxial compressive strength = 0.958 MPa
global strength = 2.546 MPa
deformation modulus = 2408.18 MPa



4.A.2.2. Одређивање параметара стијенског масива за Боксит

Analysis of Rock Strength using RocLab



Hoek-Brown Classification

intact uniaxial comp. strength (σ_{ci}) = 5.24 MPa
GSI = 60 $m_i = 20$ Disturbance factor (D) = 0.7
intact modulus (Ei) = 12000 MPa

Hoek-Brown Criterion

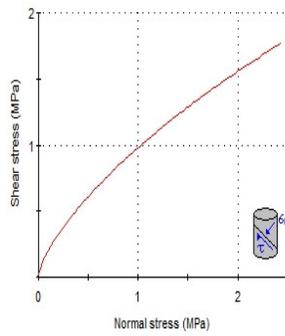
$m_b = 2.221$ $s = 0.0030$ $a = 0.503$

Mohr-Coulomb Fit

cohesion = 0.286 MPa friction angle = 32.92 deg

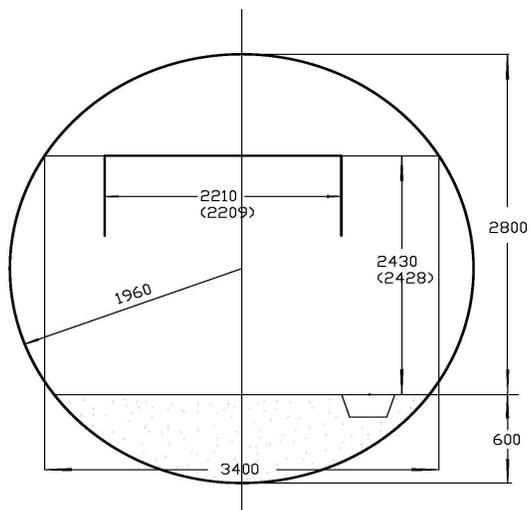
Rock Mass Parameters

tensile strength = -0.007 MPa
uniaxial compressive strength = 0.284 MPa
global strength = 1.050 MPa
deformation modulus = 2408.18 MPa

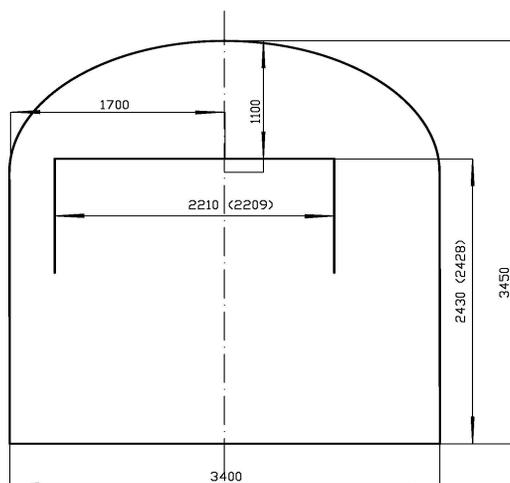


4.A.2.3. Odręđivanje parametara stiјenskog masiva za Neogene sedimente

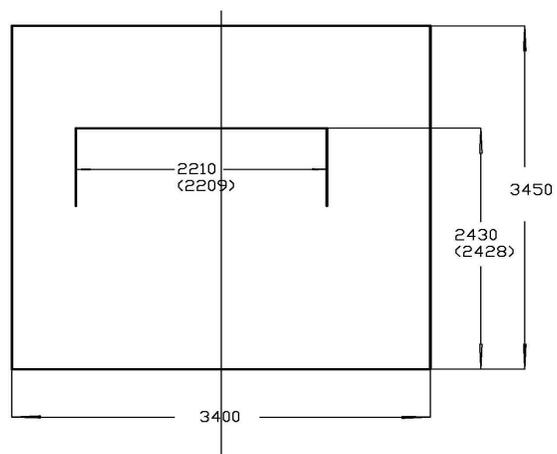
Прилог 4.А.3. Димензије попречног пресека подземних просторија у анализи избора оптималне подземне просторије за рудно лежиште "Подбраћан", према критеријуму јамске механизације и сигурносно-техничких прописа



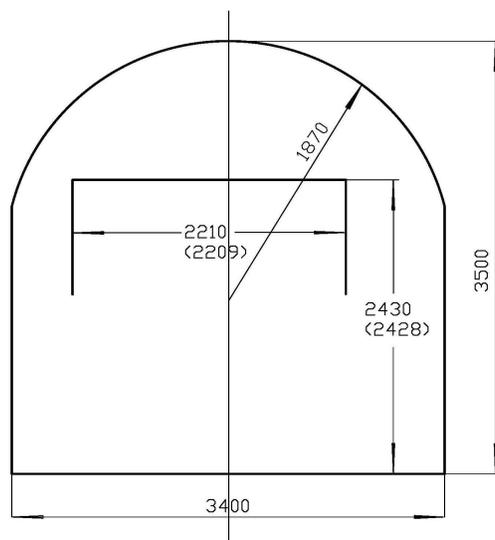
4.А.3.1. Попречни пресјек кружне подземне просторије према димензијама механизације



4.А.3.2. Попречни пресјек нискозасвођене подземне просторије према димензијама механизације

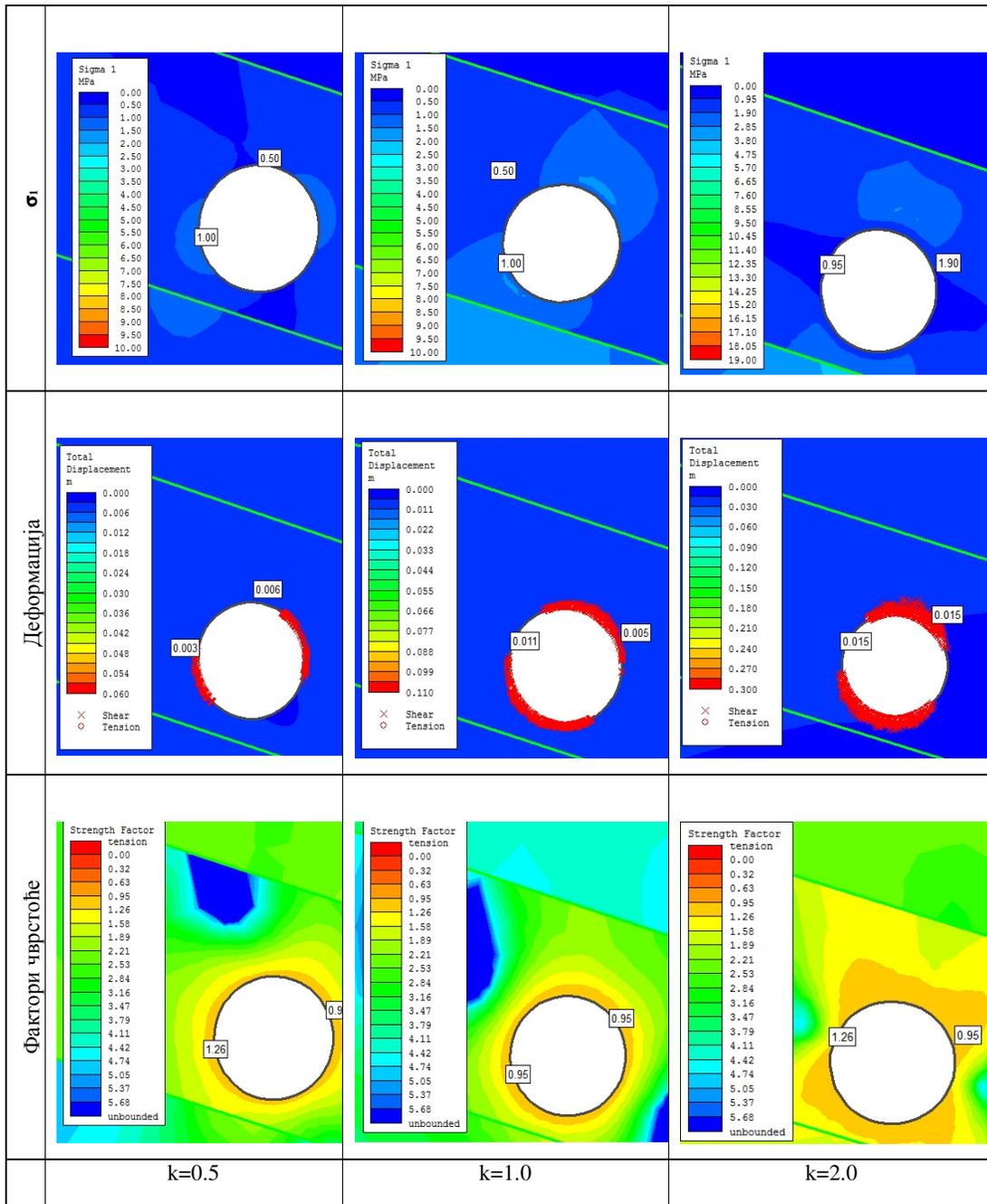


4.A.3.3. Попречни пресјек правоугаоне подземне просторије према димензијама механизације

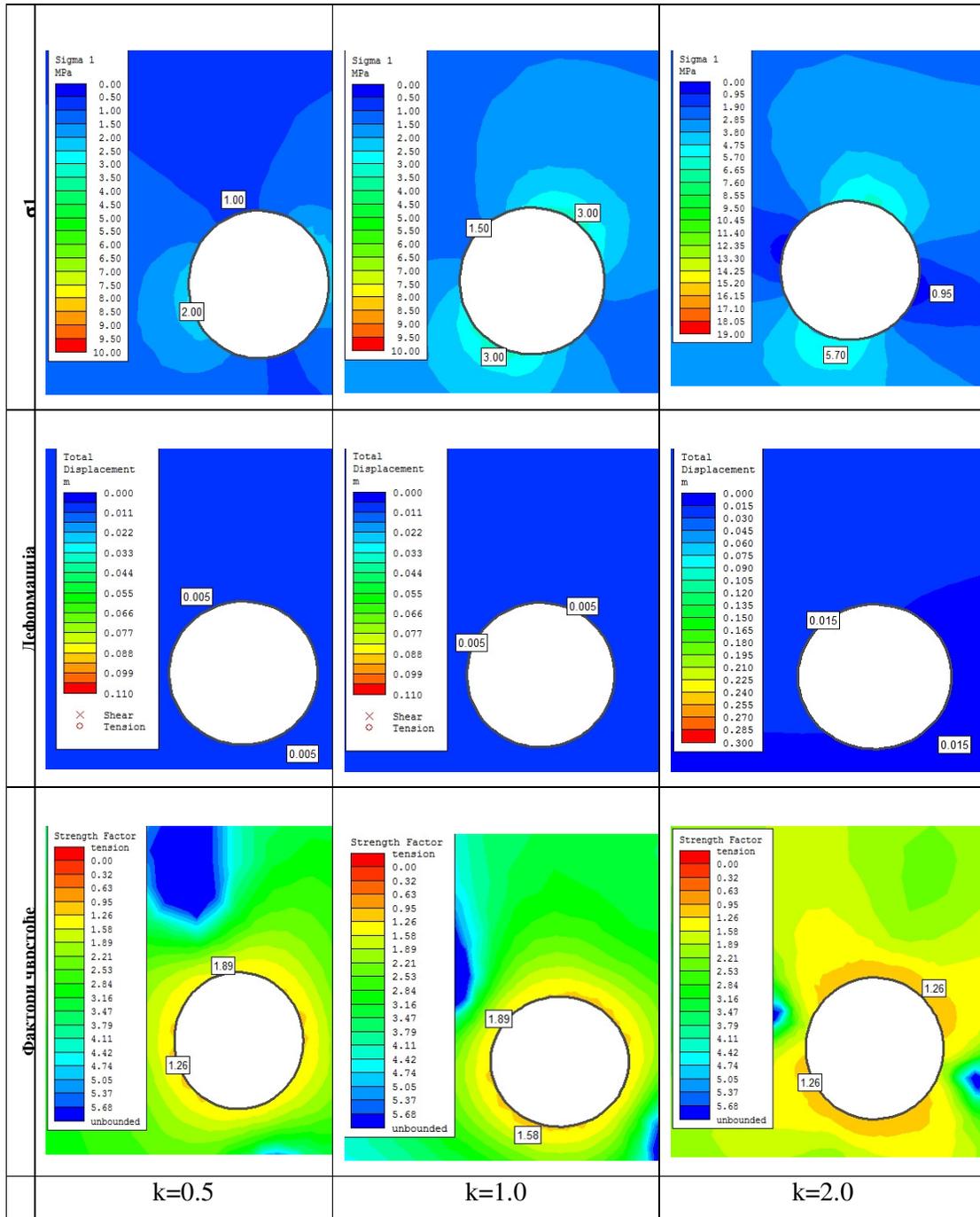


4.A.3.4. Попречни пресјек високозасвођене подземне просторије према димензијама механизације

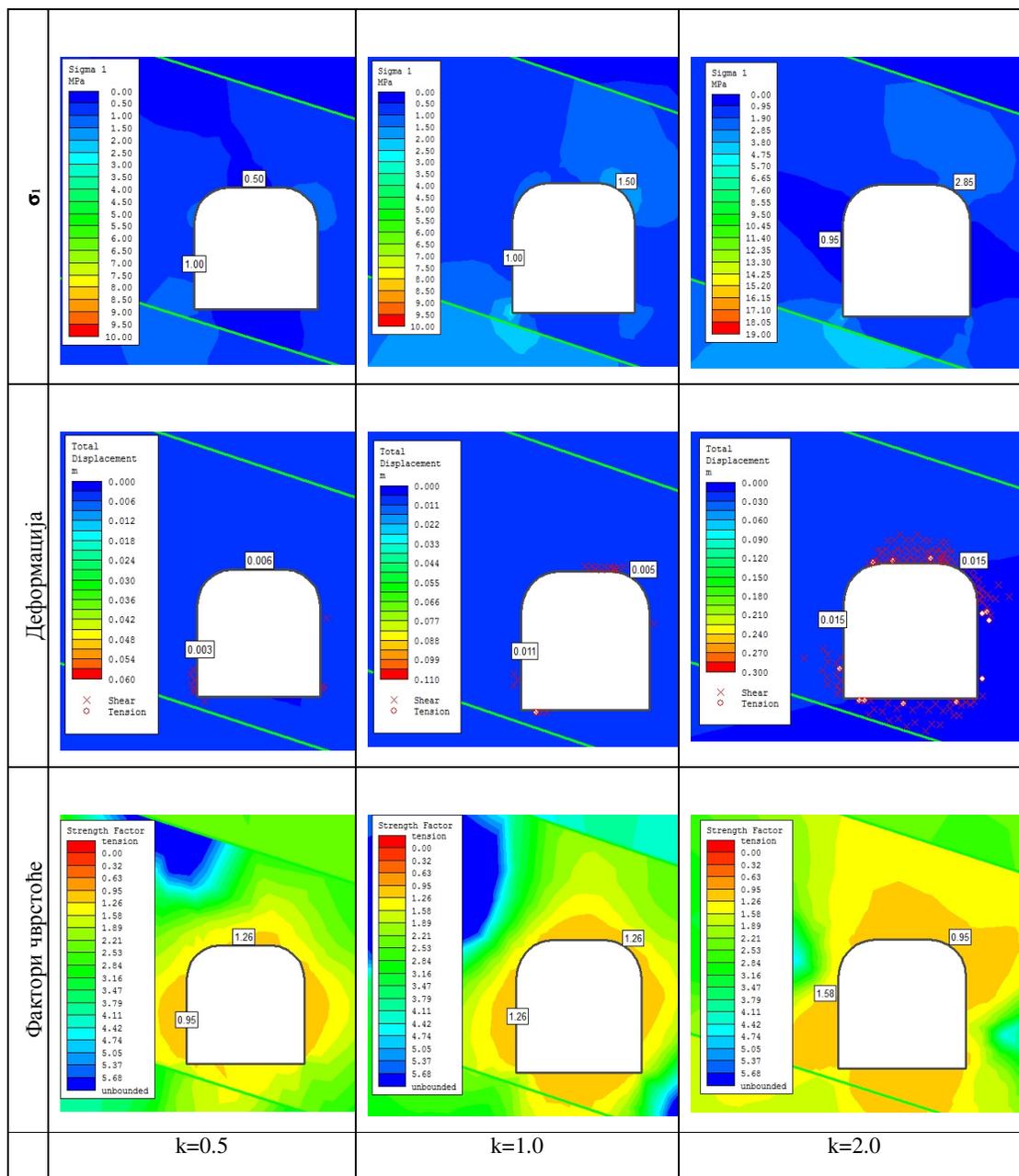
Прилог 4.A.4.1. Резултати нумеричког модела за просторију кружног попречног пресека у бокситу, просторије типа А (до 12 m²)



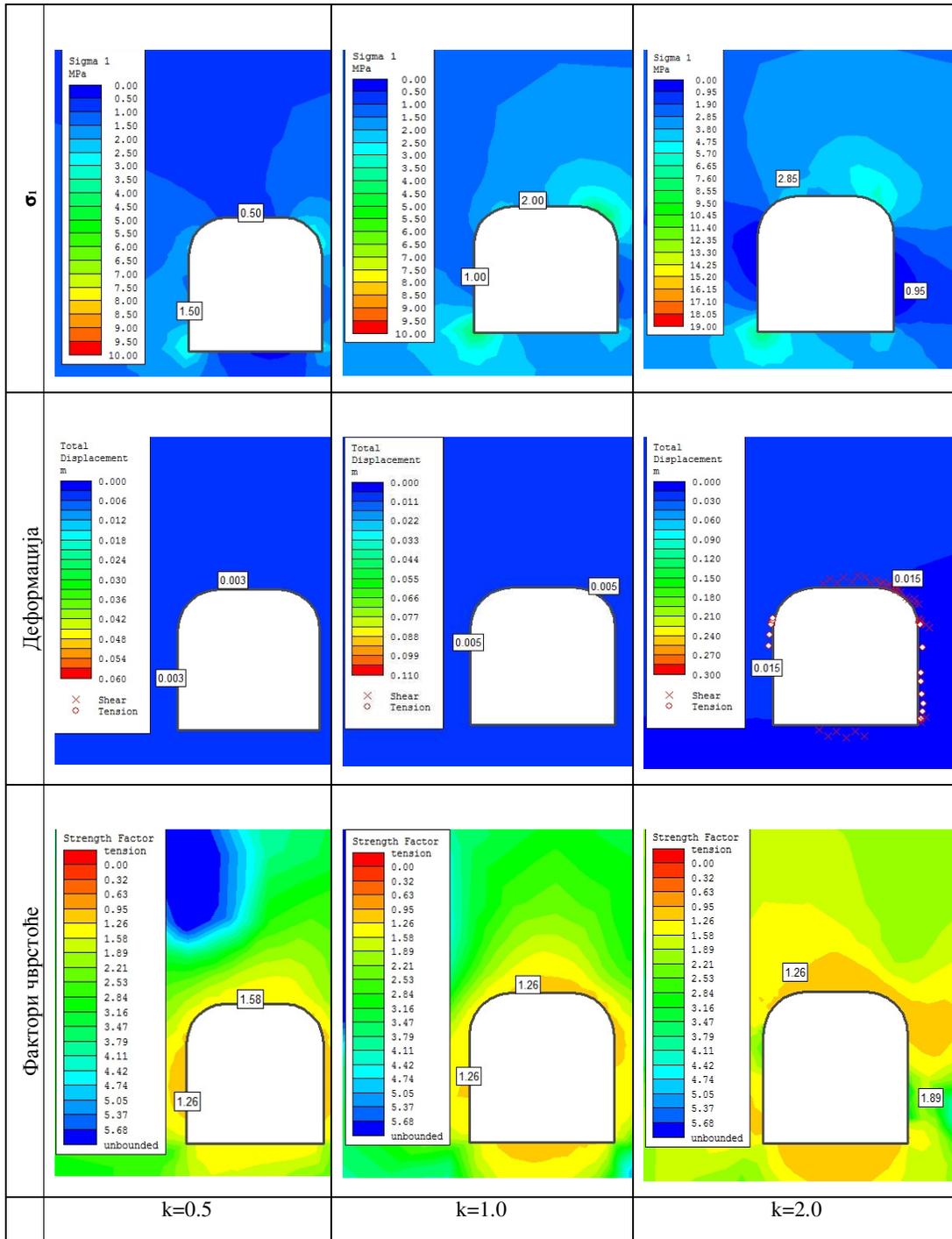
Прилог 4.А.4.2. Резултати нумеричких модела за просторију кружног попречног пресека у подинском кречњаку, просторије типа А (до 12 m²)



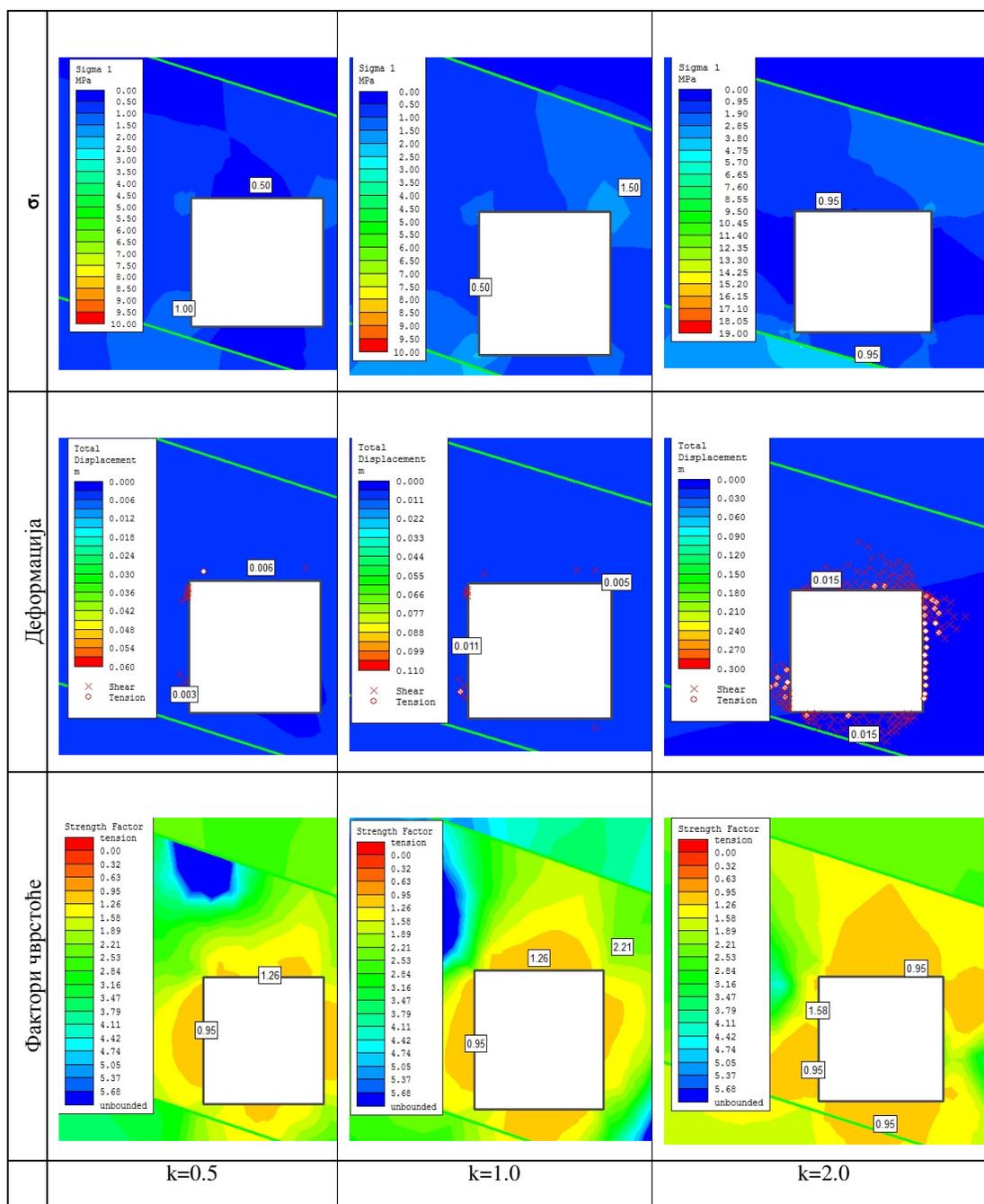
Прилог 4.A.4.3. Резултати нумеричких модела за просторију нискозасвођеног попречног пресека у слоју боксита, просторије типа *A* (до 12 м²)



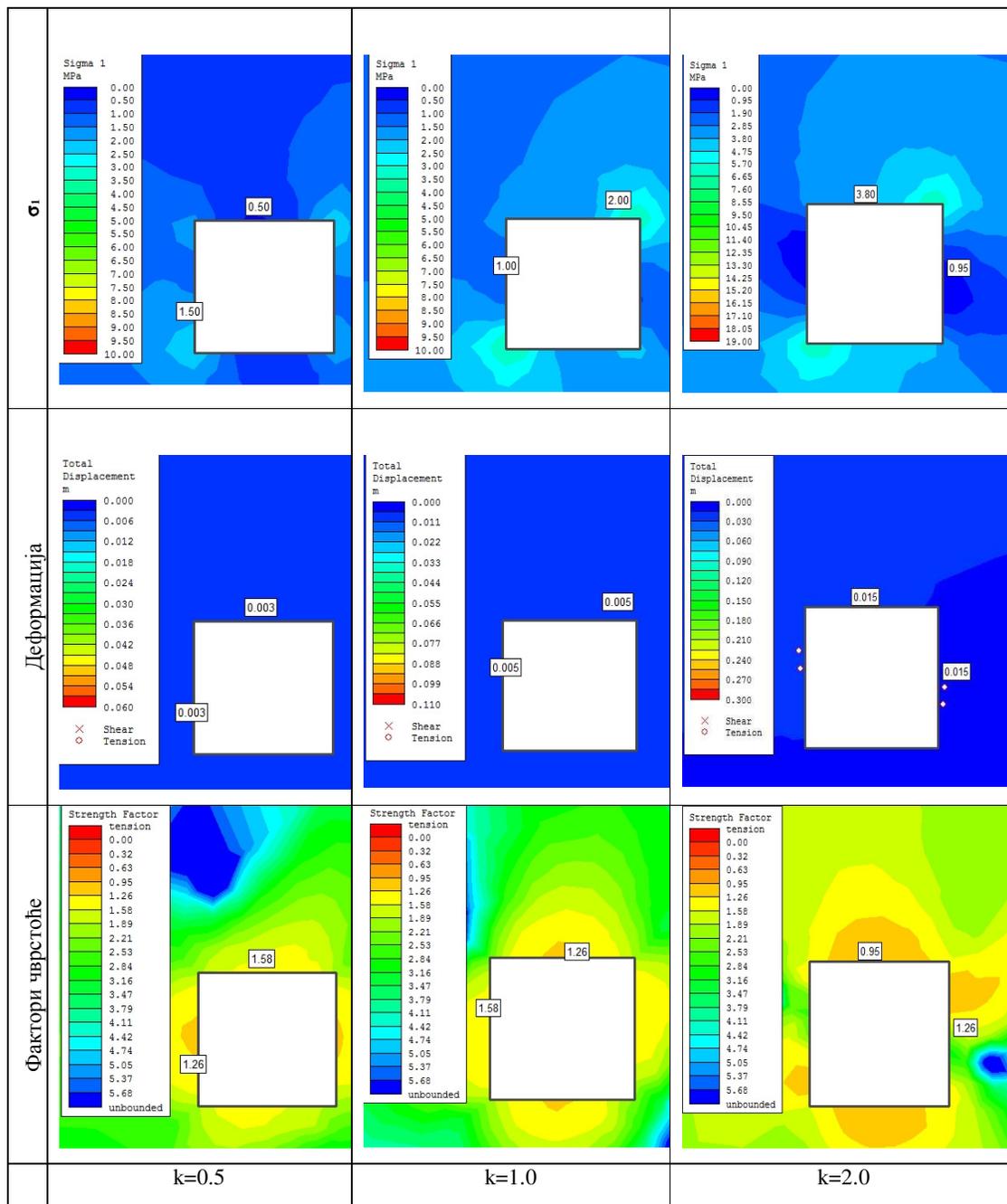
Прилог 4.A.4.4. Резултати нумеричких модела за просторију нискозасвођеног попречног пресека у подинским кречњацима, просторије типа *A* (до 12 m²)



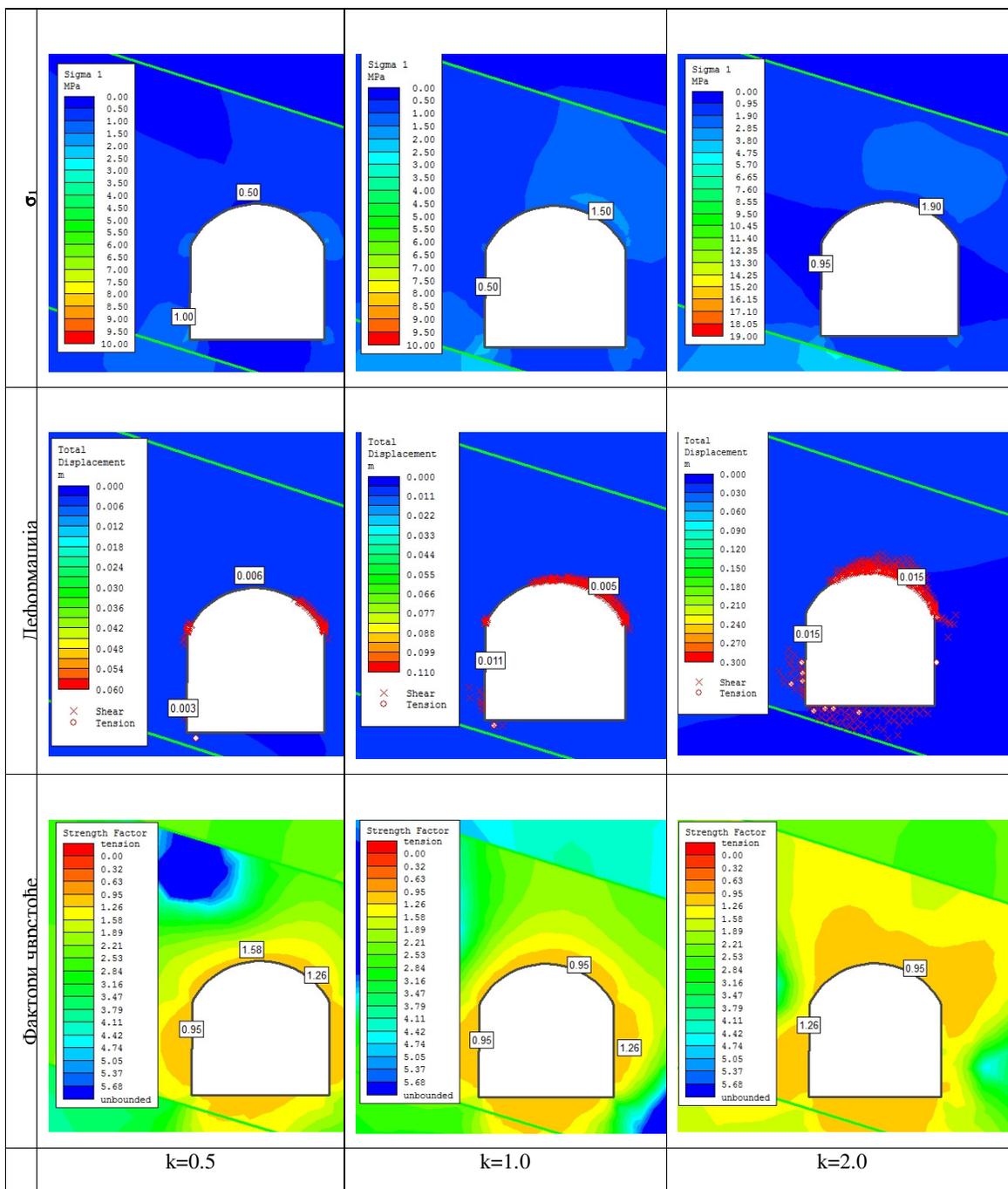
Прилог 4.A.4.5. Резултати нумеричких модела за просторију правоугаоног попречног пресека у слоју боксита, просторије типа А (до 12 м²)



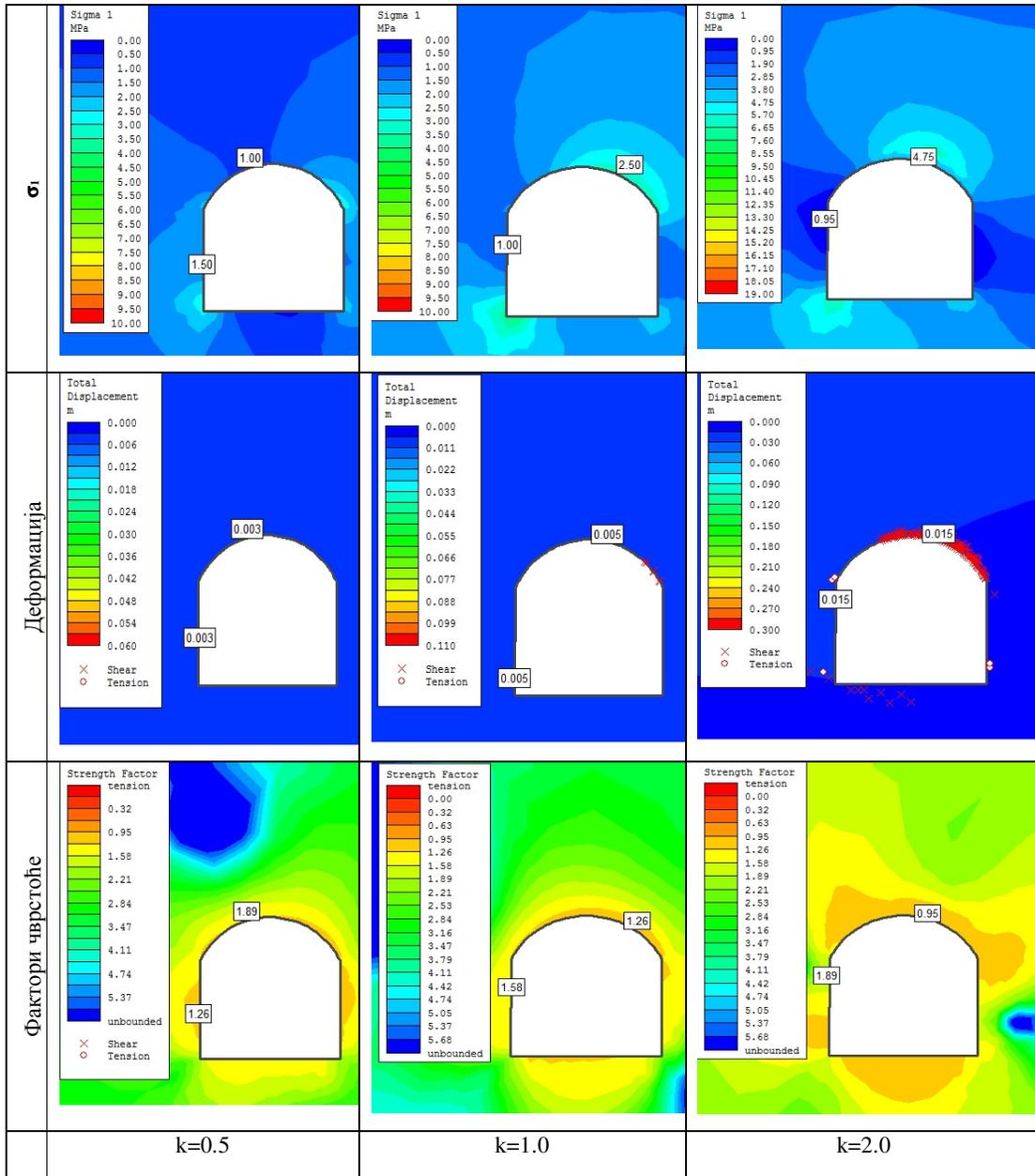
Прилог 4.A.4.6. Резултати нумеричких модела за просторију правоугаоног попречног пресека у подинском кречњаку, просторије типа А (до 12 m²)



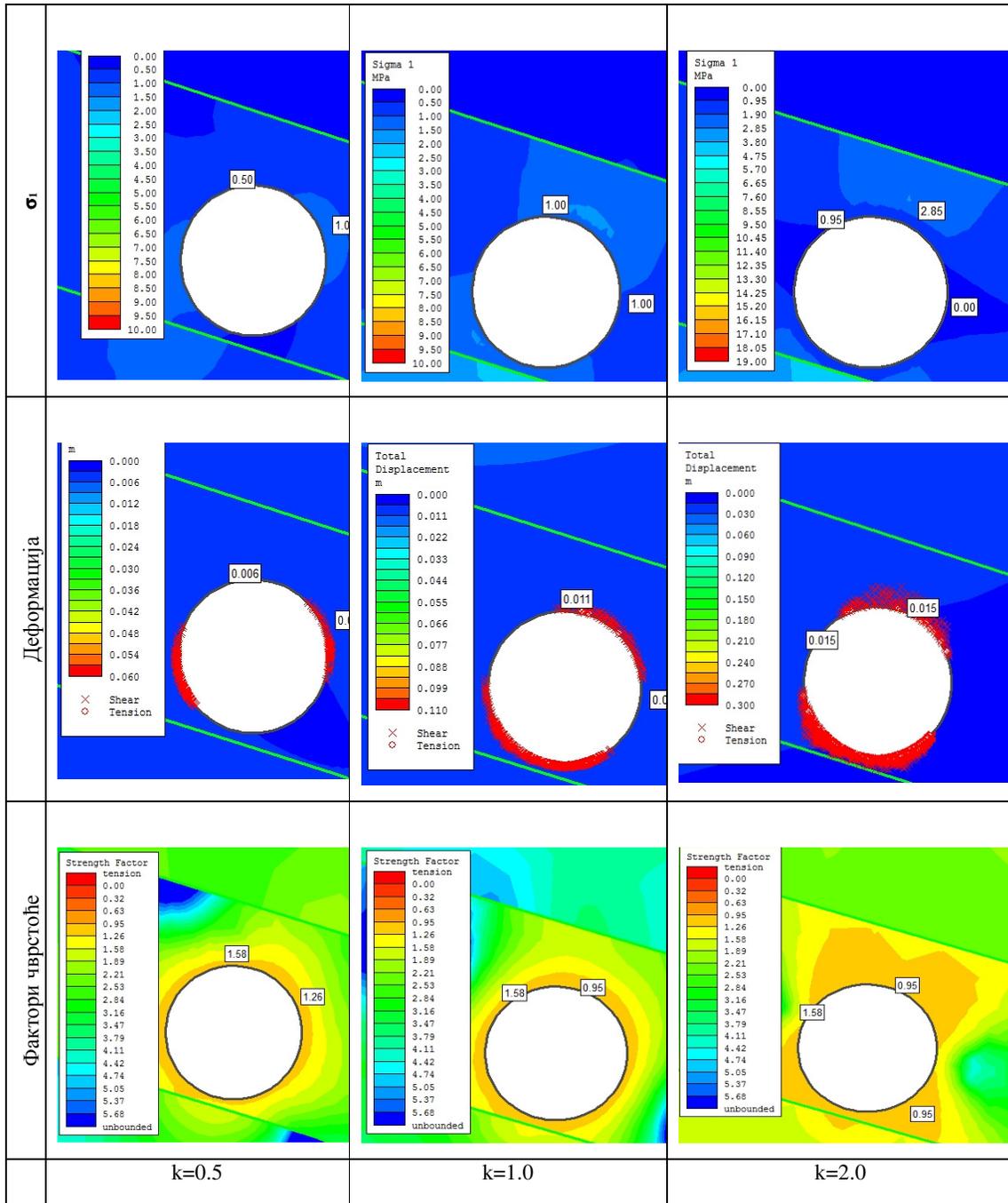
Прилог 4.A.4.7. Резултати нумеричких модела за просторију високозасвођеног попречног пресека у слоју боксита, просторије типа А (до 12 м²)



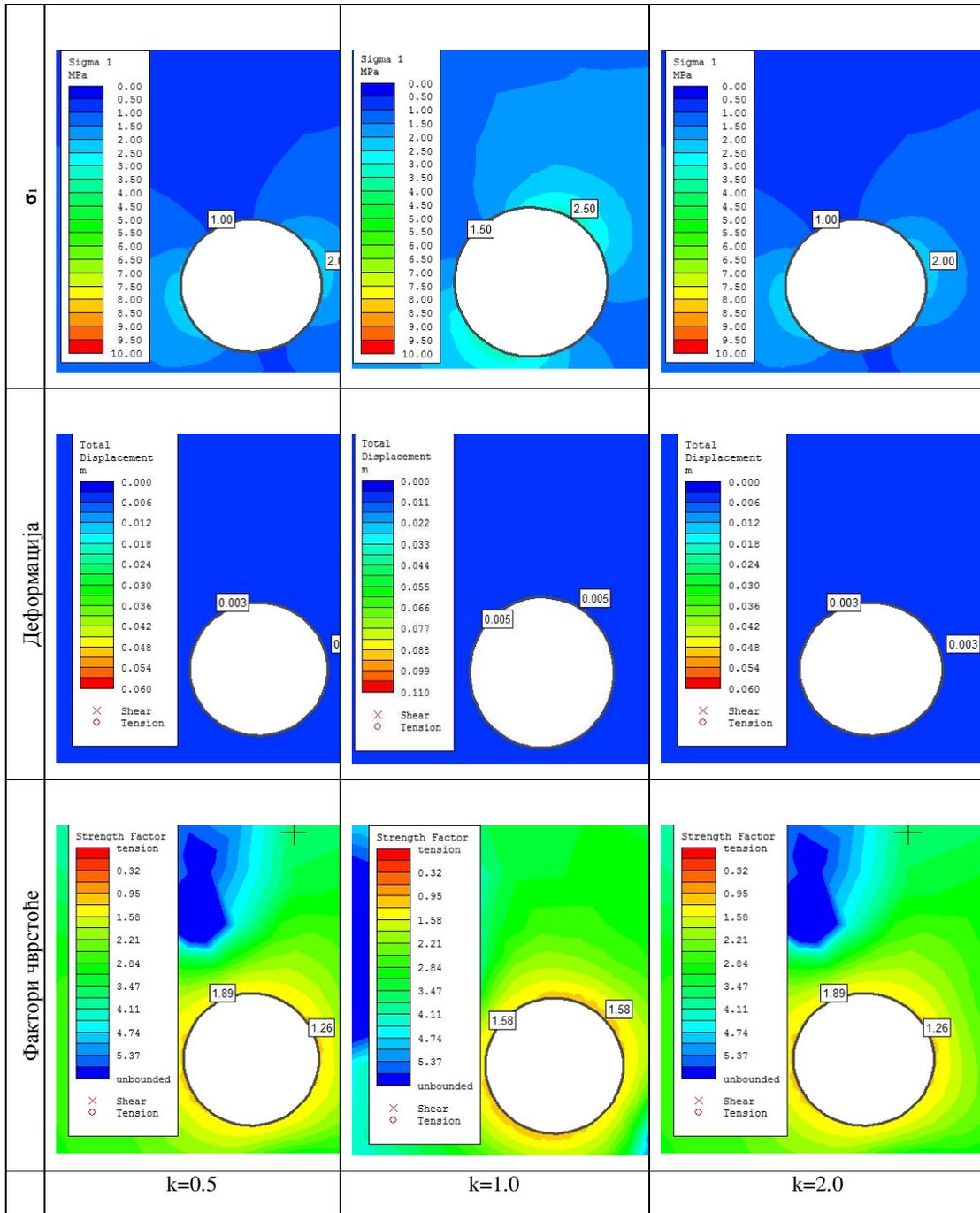
Прилог 4.A.4.8. Резултати нумеричких модела за просторију високозасвођеног попречног пресека у подинском кречњаку, просторије типа А (до 12 m²)



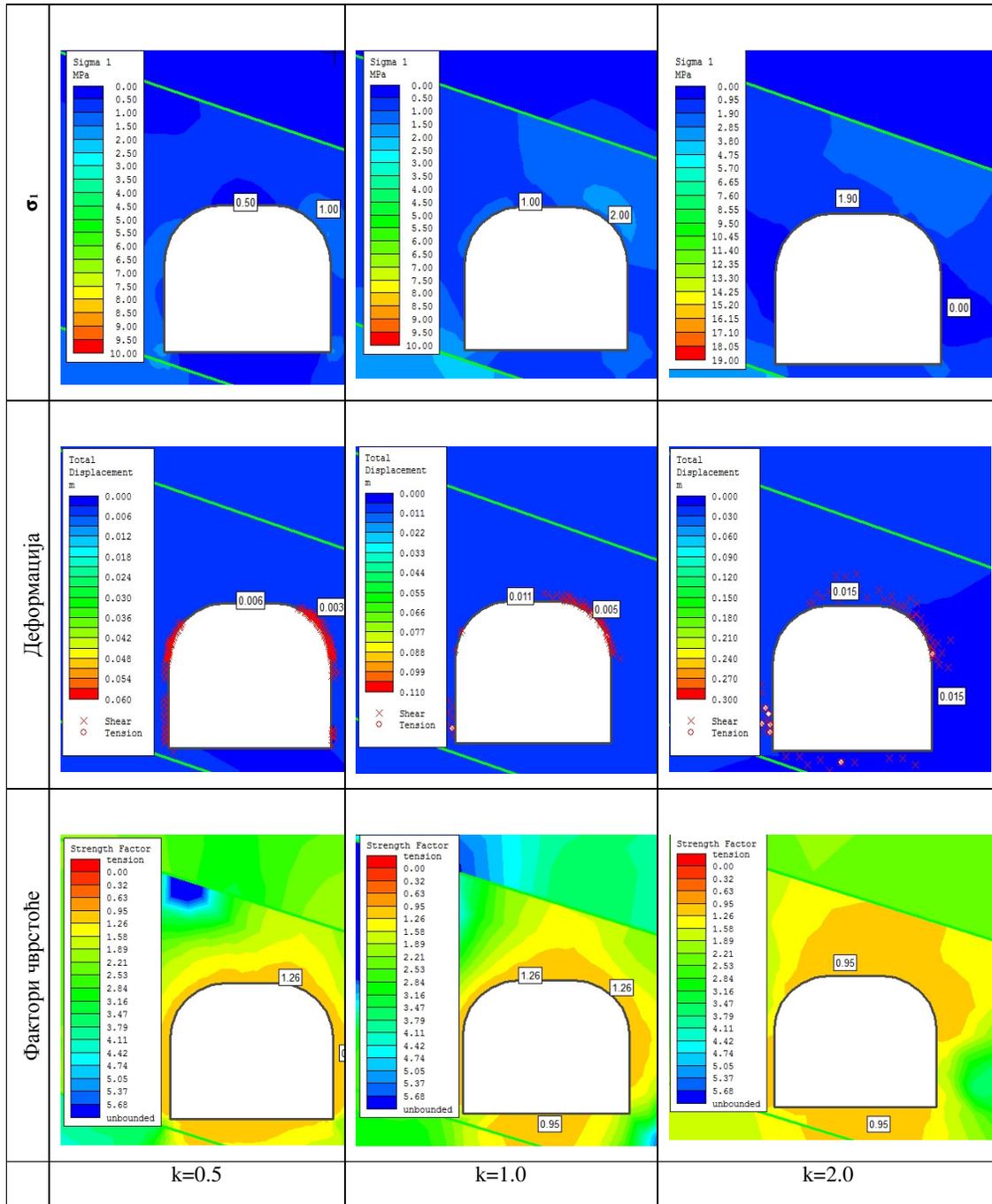
Прилог 4.A.4.9. Резултати нумеричких модела за просторију кружног попречног пресека у бокситу, просторије типа *B* (до 16 m²)



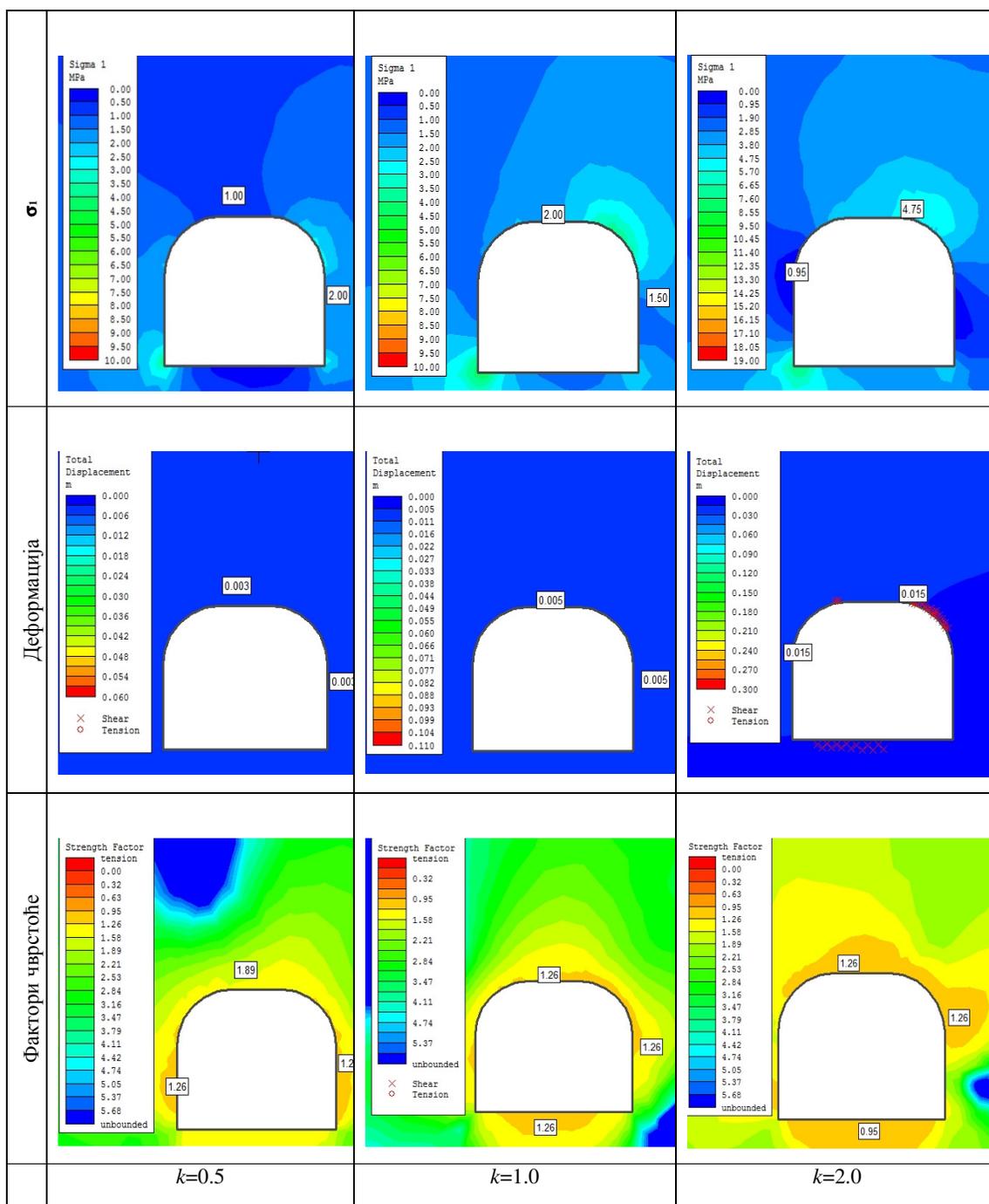
Прилог 4.A.4.10. Резултати нумеричких модела за просторију кружног попречног пресека у подинском кречњаку, просторије типа *B* (до 16 m²)



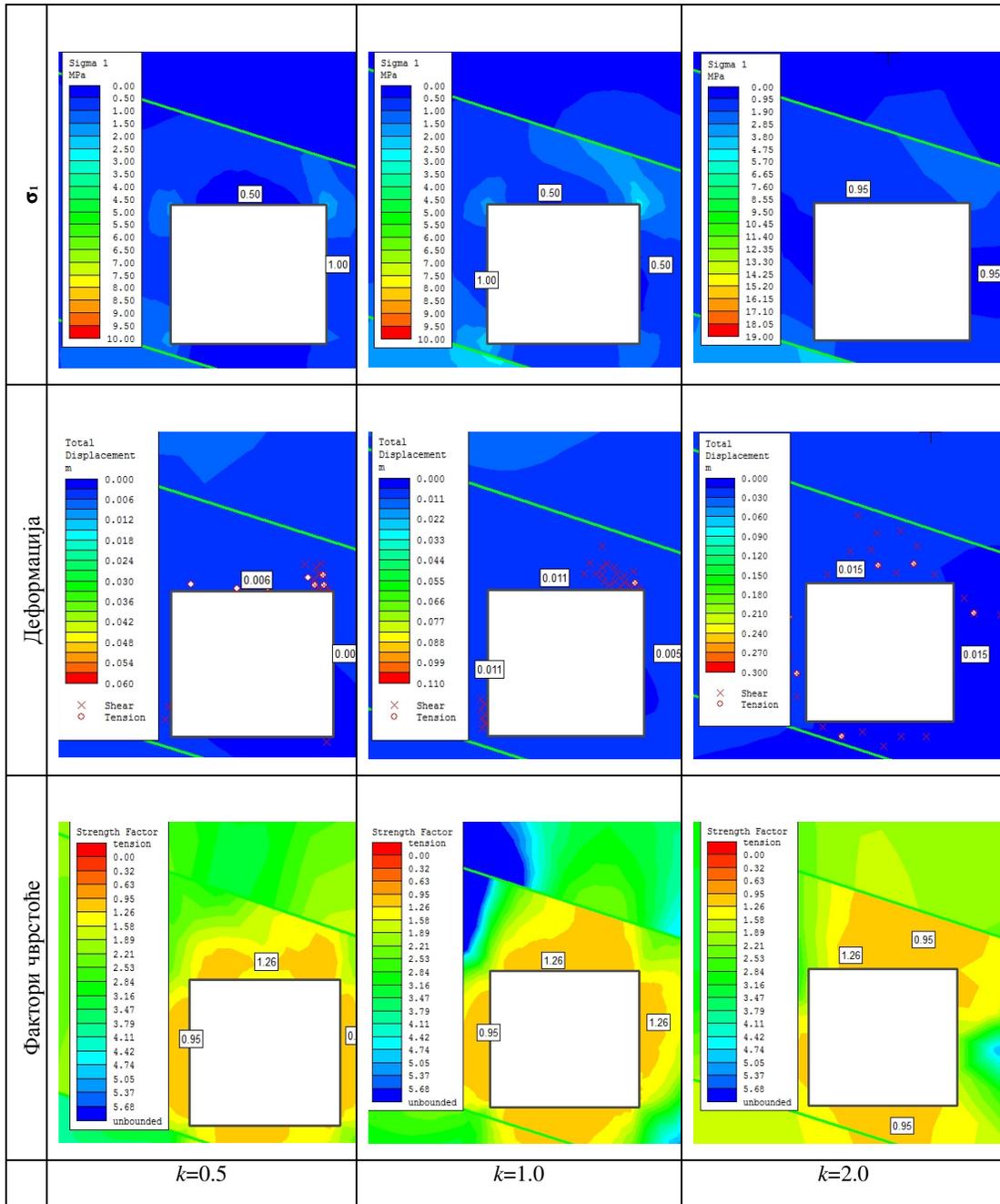
Прилог 4.A.4.11. Резултати нумеричких модела за просторију нискозасвођеног попречног пресека у слоју боксита, просторије типа *B* (до 16 m²)



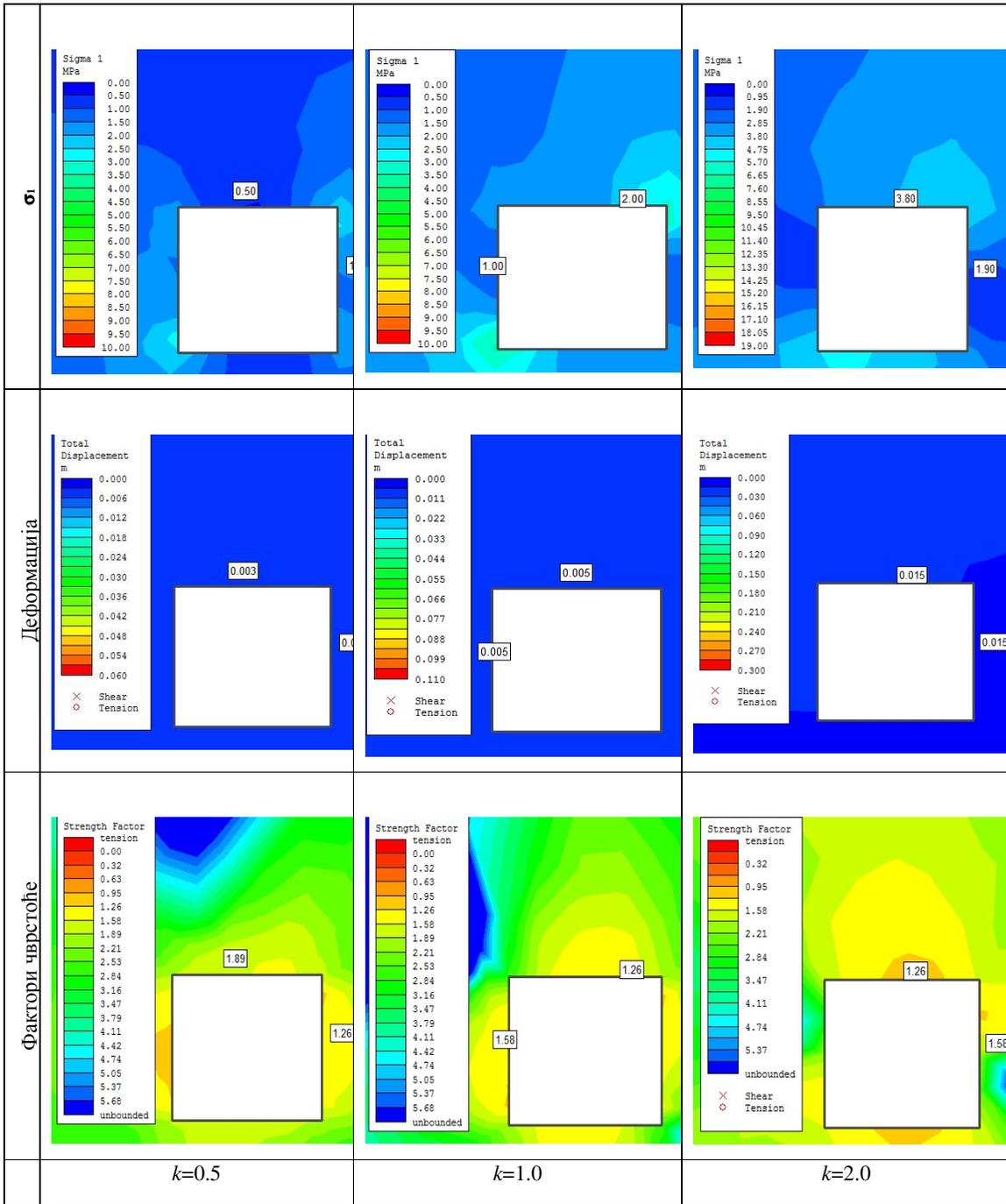
Прилог 4.A.4.12. Резултати нумеричких модела за просторију нискозасвођеног попречног пресека у подинским кречњацима, просторије типа *B* (до 16 m²)



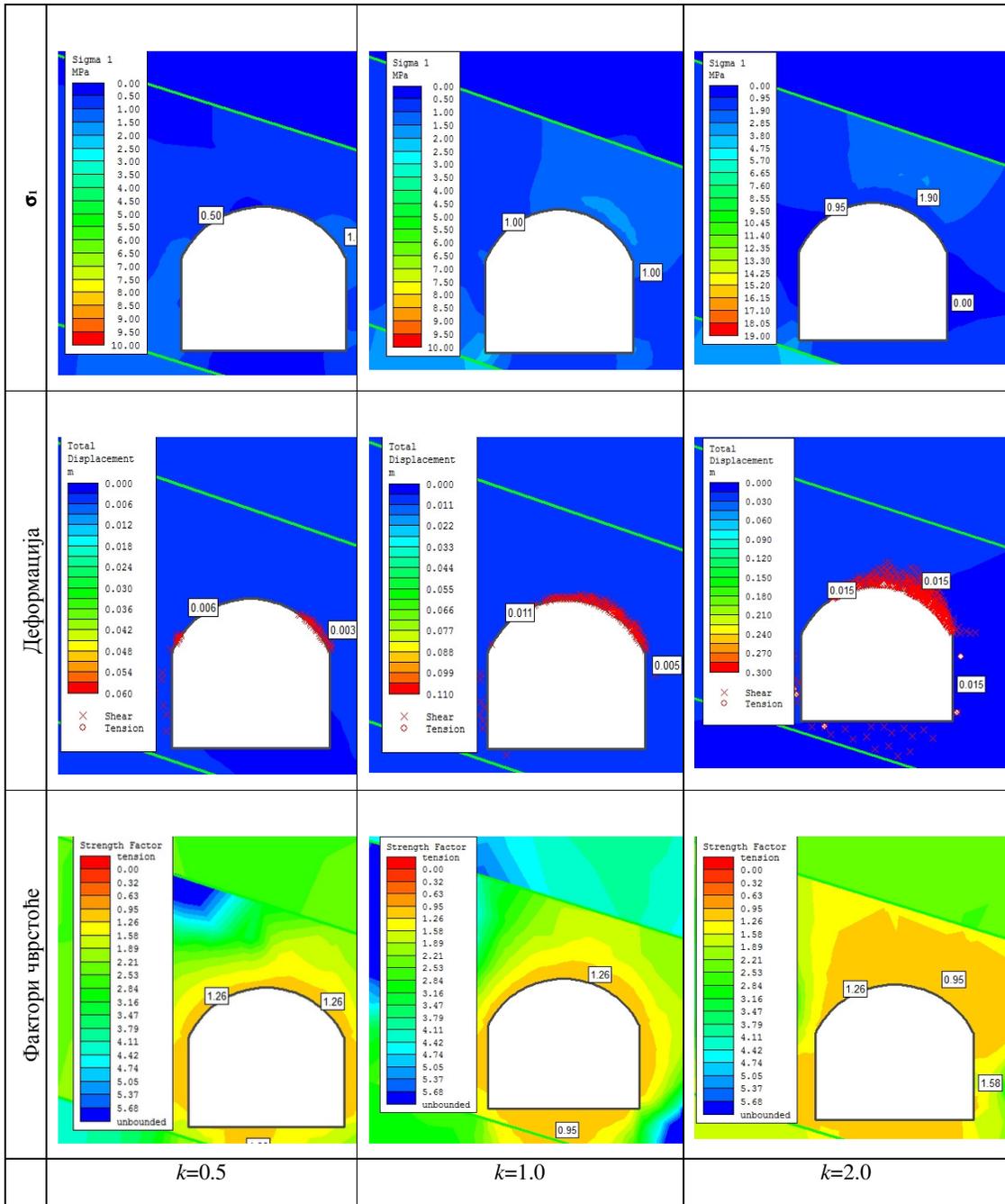
Прилог 4.A.4.13. Резултати нумеричких модела за просторију правоугаоног попречног пресека у слоју боксита, просторије типа *B* (до 16 m²)



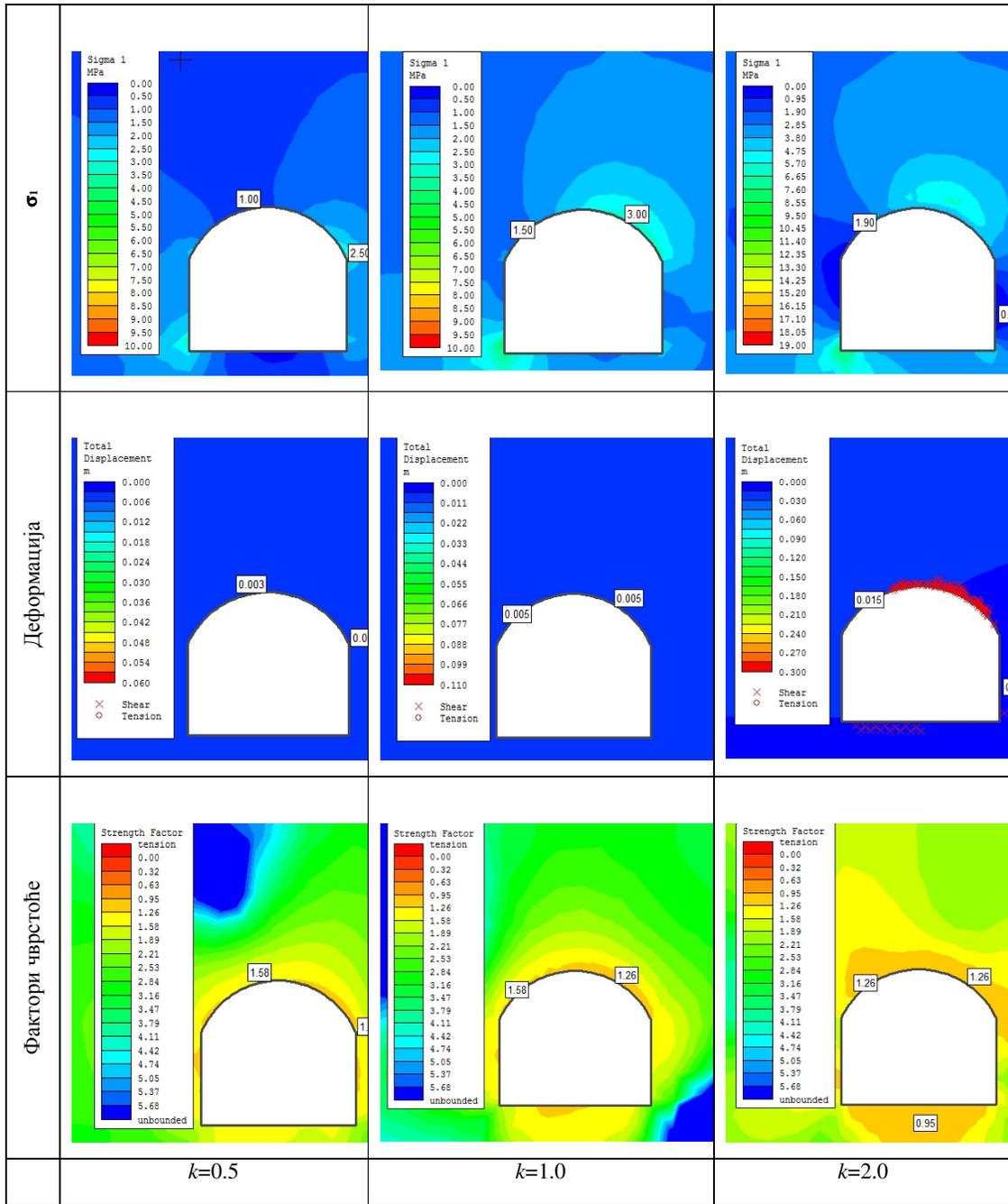
Прилог 4.A.4.14. Резултати нумеричких модела за просторију правоугаоног попречног пресека у подинским кречњацима, просторије типа *B* (до 16 m²)



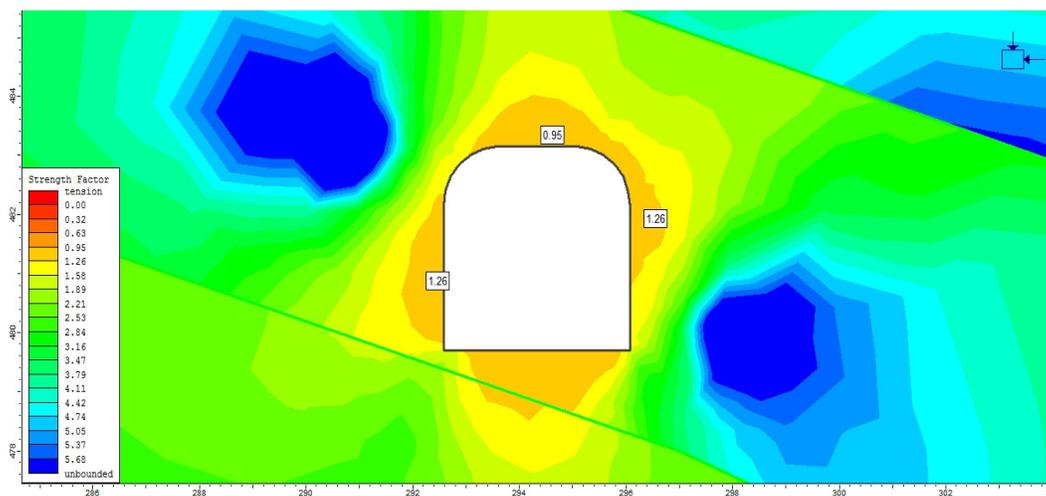
Прилог 4.A.4.15. Резултати нумеричких модела за просторију високозасвођеног попречног пресека у слоју боксита, просторије типа *B* (до 16 m²)



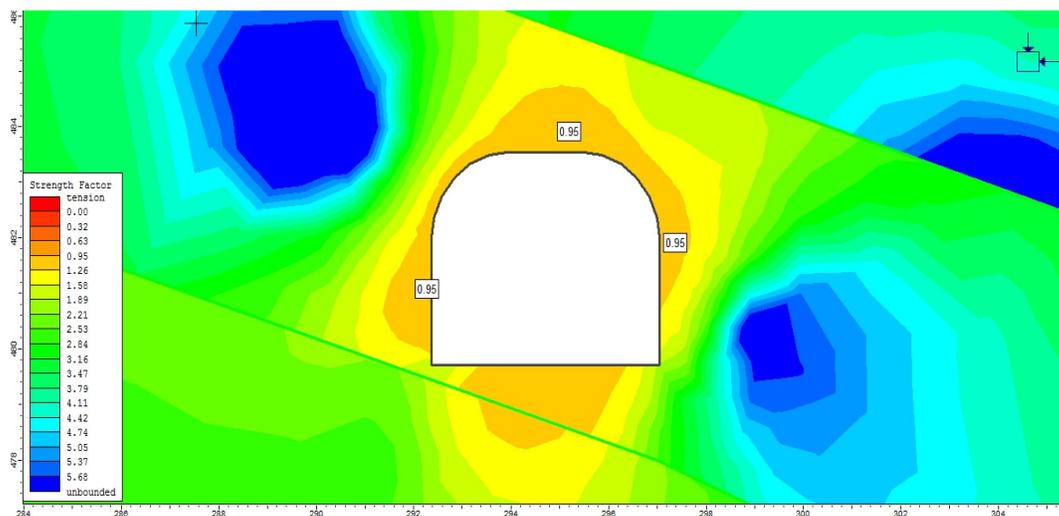
Прилог 4.A.4.16. Резултати нумеричких модела за просторију високозасвођеног попречног пресека у подинском кречњаку, просторије типа *B* (до 16 m²)



Прилог 4.A.5. Резултати нумеричког модела за просторију нискозасвођеног попречног пресека у бокситу, (приказ трајекторија напона за просторије типа *A* и *B*), у условима $k=1.3$.

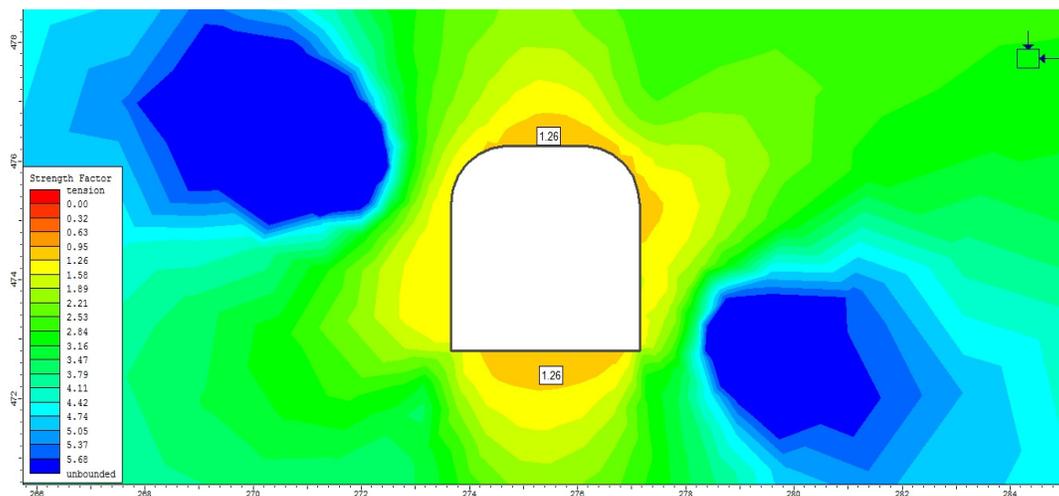


4.A.5.1. Просторије типа *A*

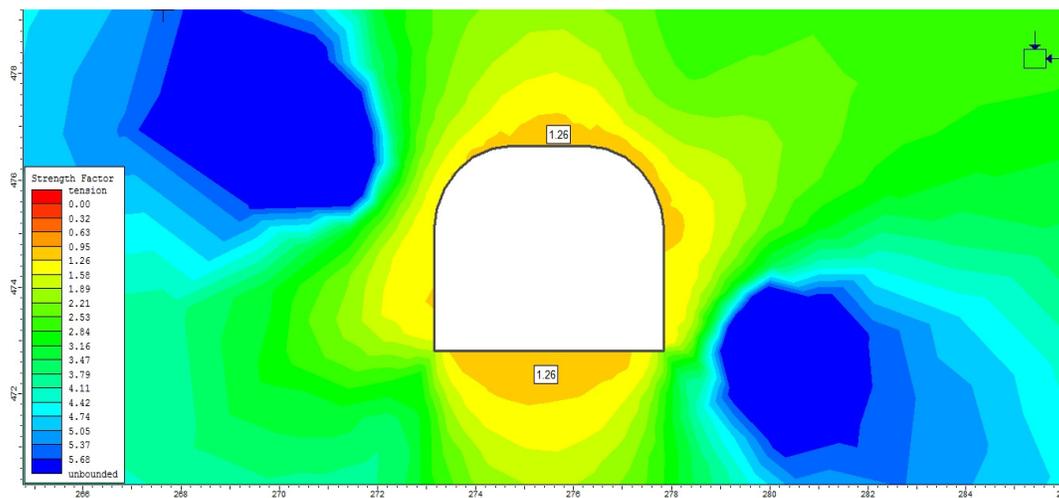


4.A.5.2. Просторије типа *B*

Прилог 4.A.6. Резултати нумеричког модела за просторију нискозасвођеног попречног пресјека у подинском кречњаку, (приказ трајекторија напона за просторије типа *A* и *B*), у условима $k=1.3$.

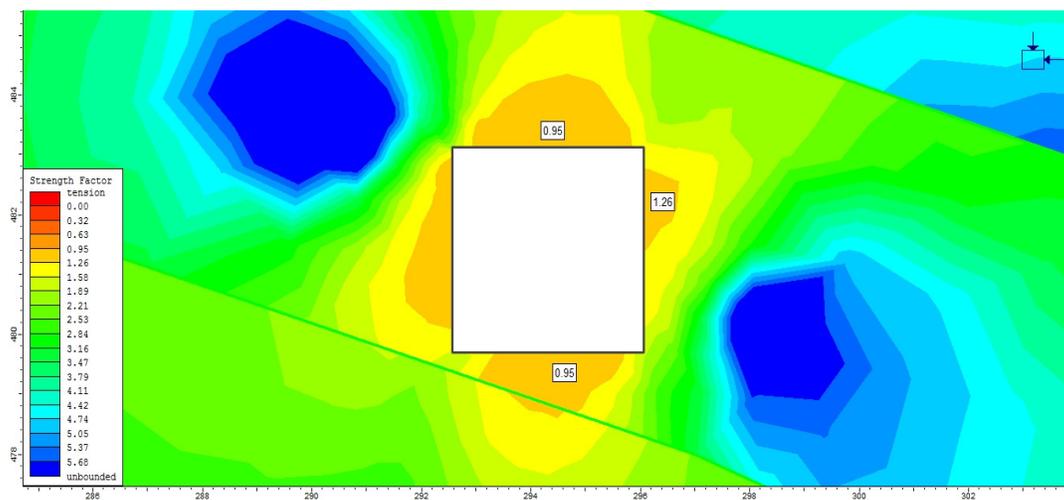


4.A.6.1. Просторија тип *A*

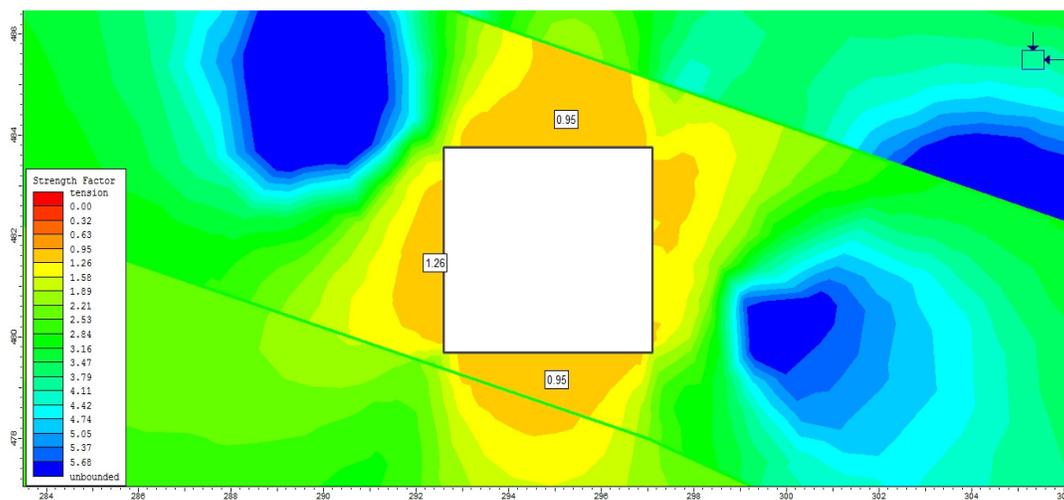


4.A.6.2. Просторија тип *B*

Прилог 4.A.7. Резултати нумеричког модела за просторију правоугаоног попречног пресека у бокситу, (приказ трајекторија напона за просторије типа *A* и *B*), у условима $k=1.3$.

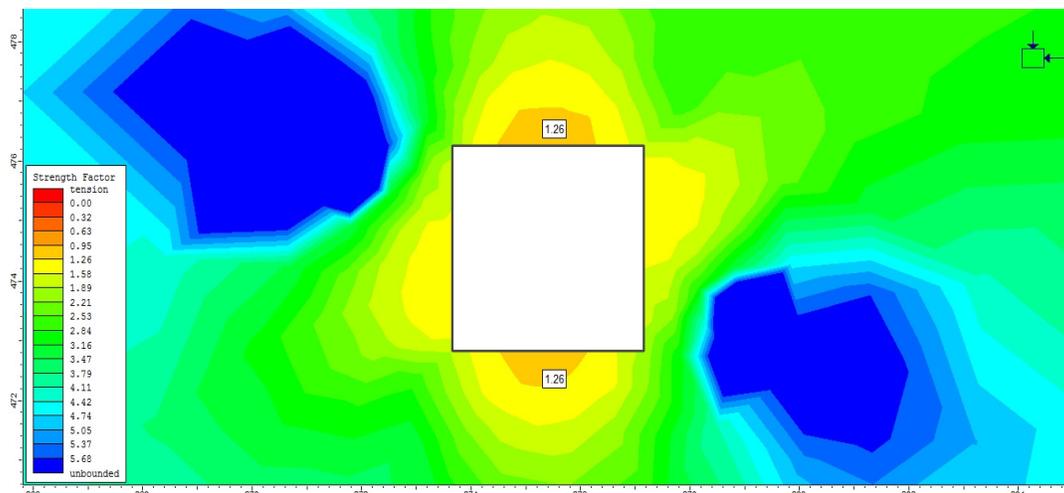


4.A.7.1. Просторије типа *A*

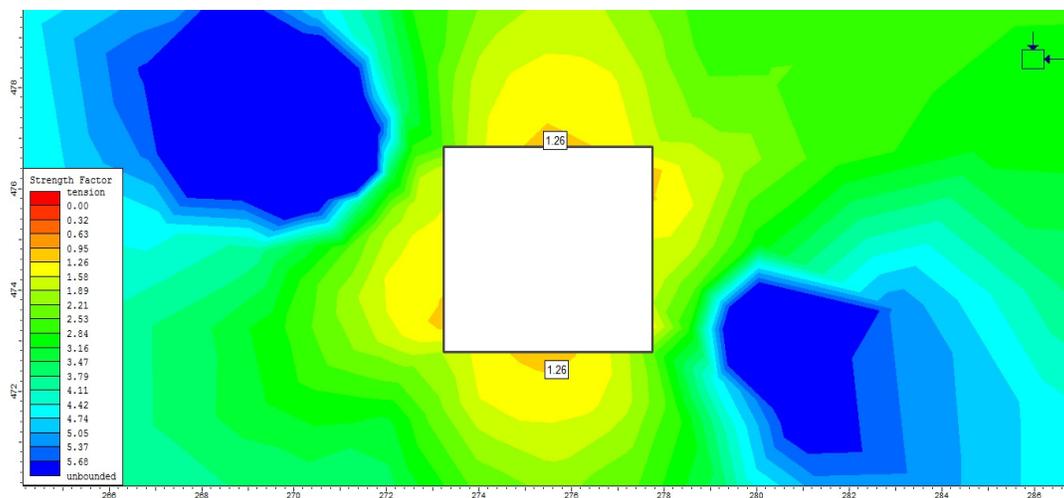


4.A.7.2. Просторије типа *B*

Прилог 4.A.8. Резултати нумеричког модела за просторију правоугаоног попречног пресјека у подинском кречњаку, (приказ трајекторија напона за просторије типа *A* и *B*), у условима $k=1.3$.

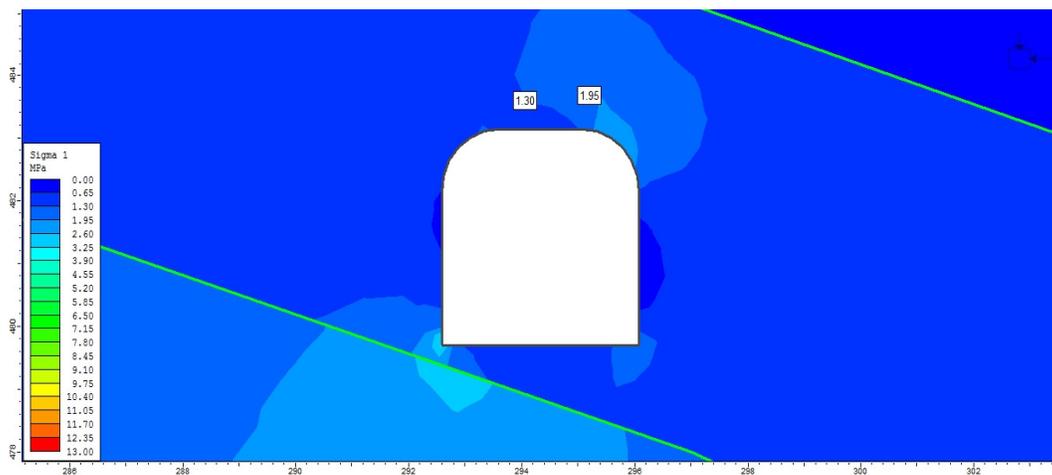


4.A.8.1. Просторије типа *A*

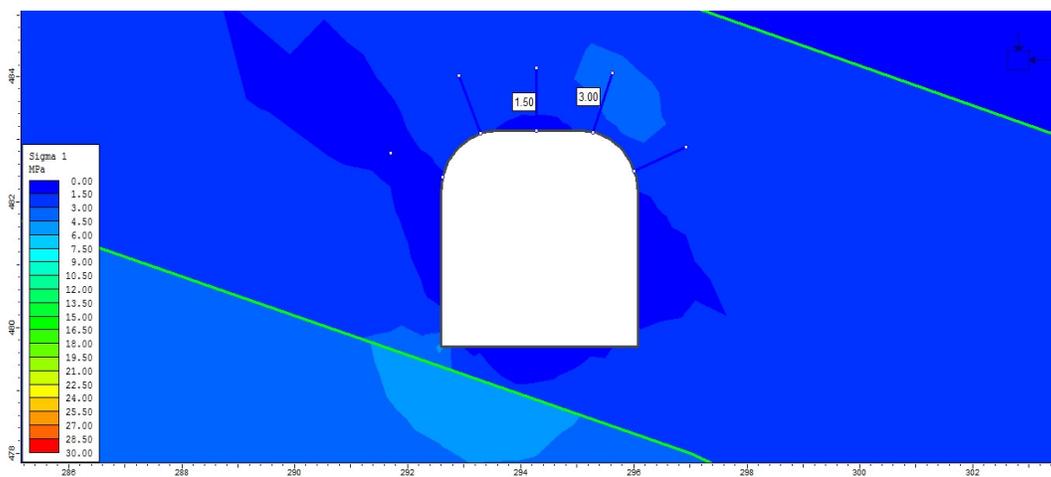


4.A.8.2. Просторије типа *B*

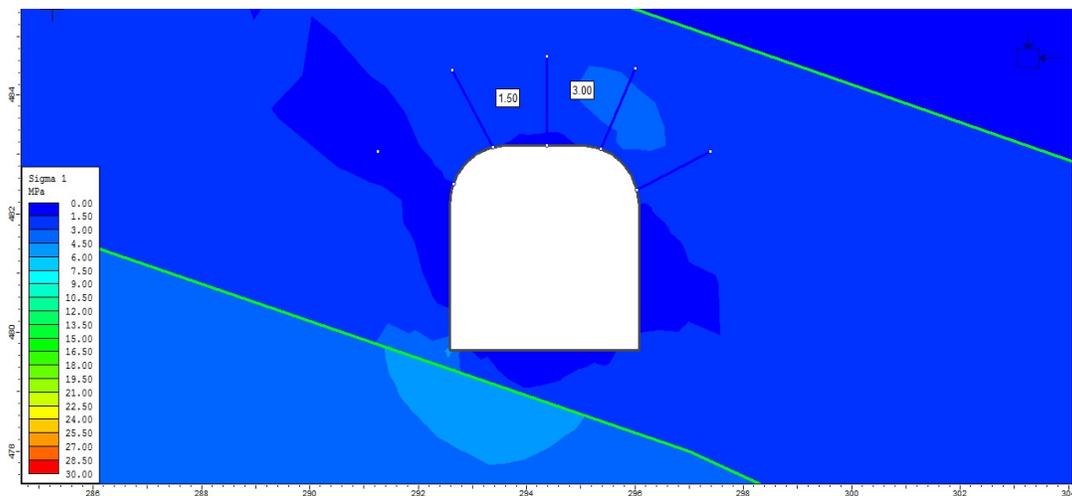
Прилог 4.A.9. Резултати анализе утицаја дужине сидра на напоне у стијенској маси око подземне просторије за случај неподграђене просторије и пет уграђених сидара



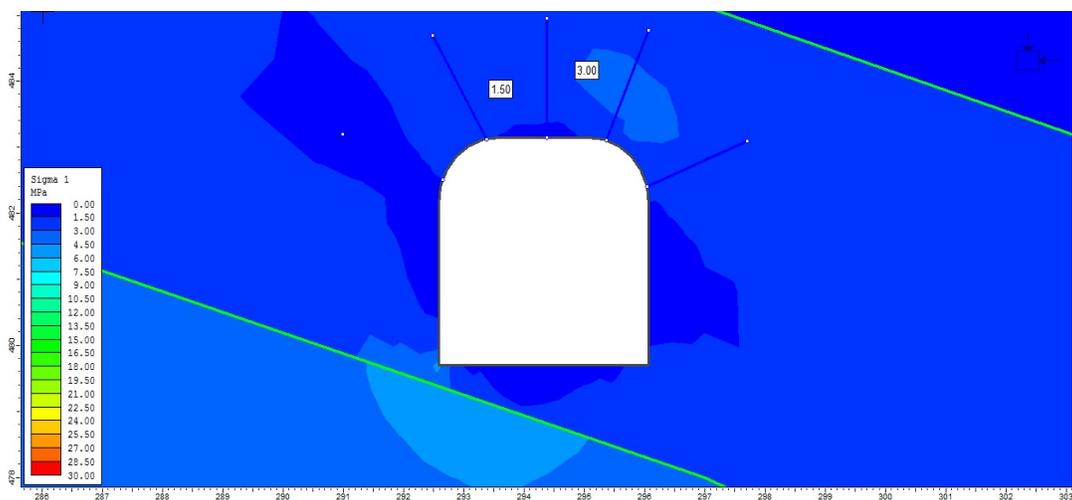
4.A.9.1. Вриједности главног напона неподграђене подземне просторије у бокситу



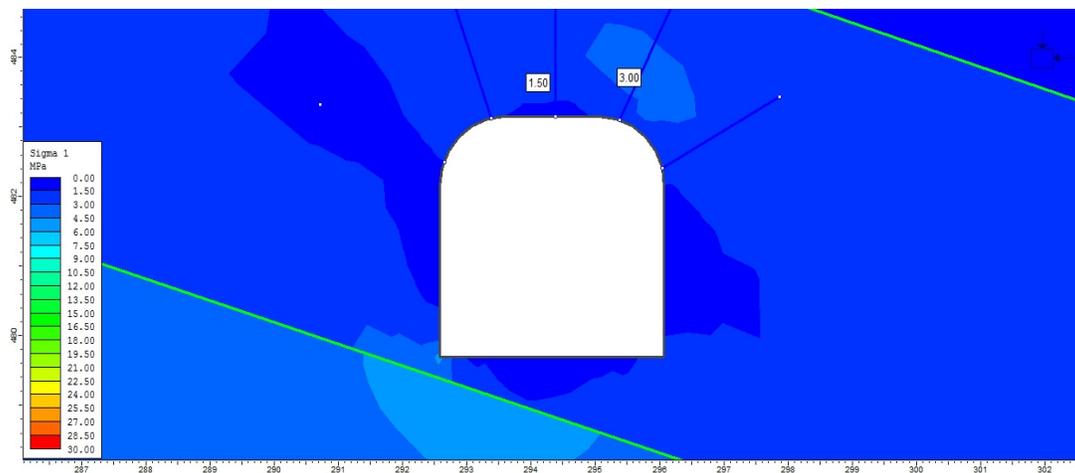
4.A.9.2. Вриједности главног напона за подграђену просторију са уграђеним сидрима дужине 1m



4.4.9.3. Вриједности главног напона за подграђену просторију са уграђеним сидрима дужине 1.5m

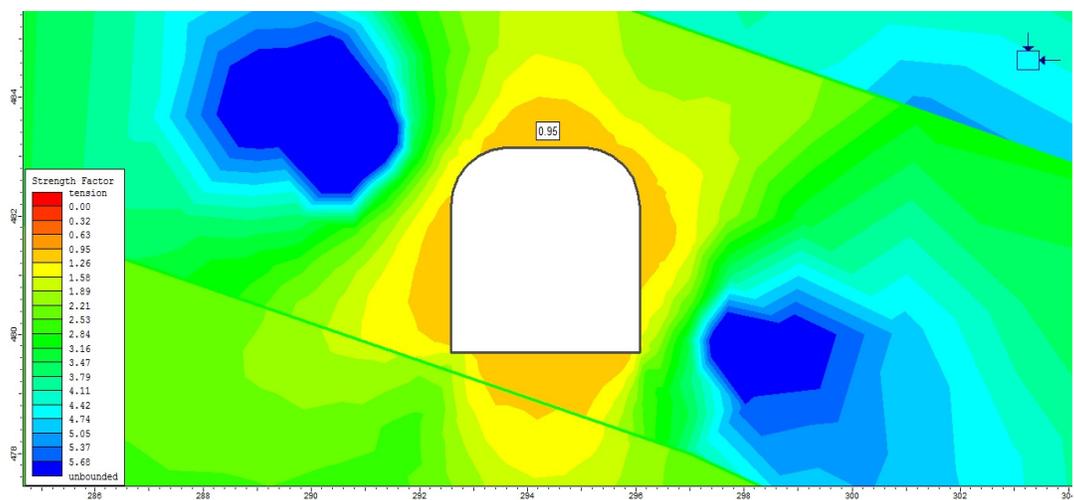


4.4.9.4. Вриједности главног напона за подграђену просторију са уграђеним сидрима дужине 1.8m

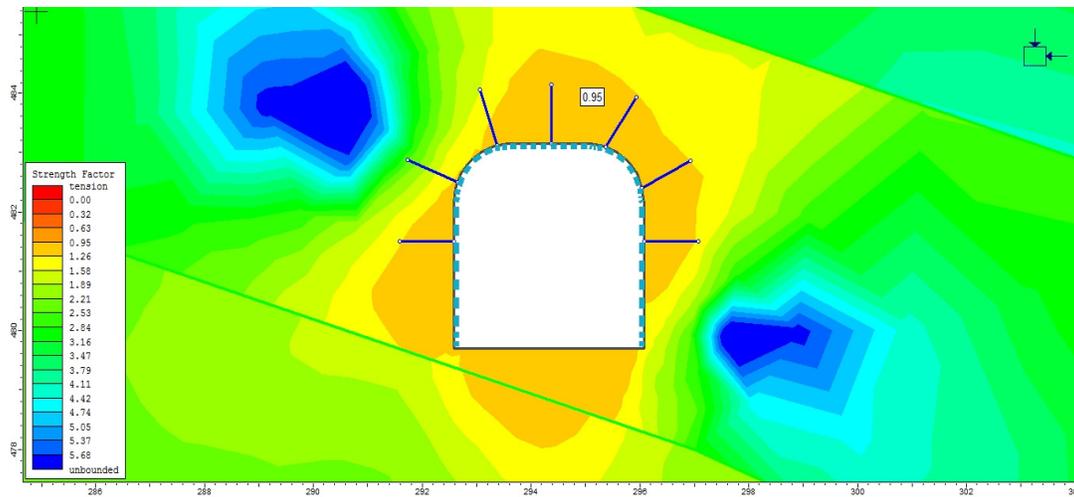


4.A.9.5. Вриједности главног напона за подграђену просторију са уграђеним сидрима дужине 2.1m

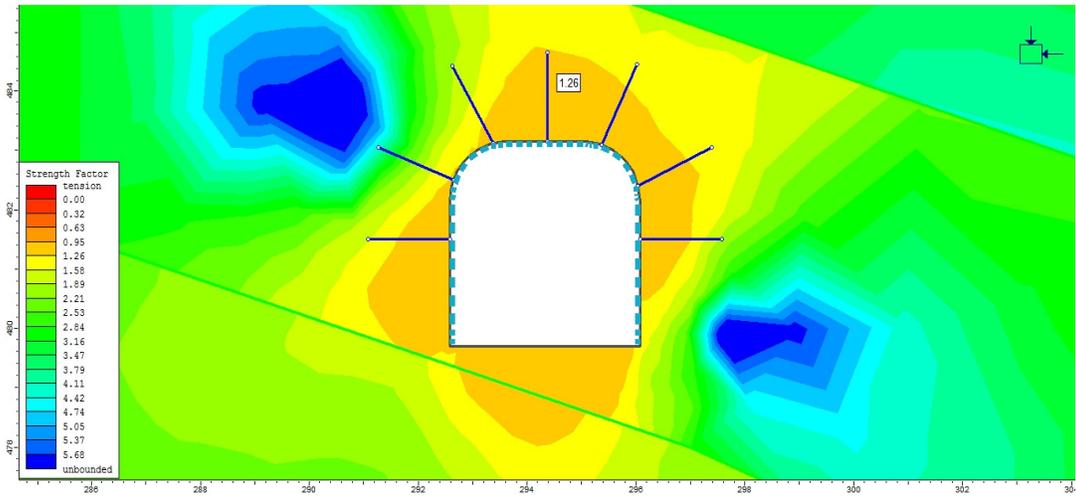
Прилог 4.A.10. Приказ добијених вриједности фактора сигурности за неподграђену просторију и постављеним сидрима са растојањем од 1m



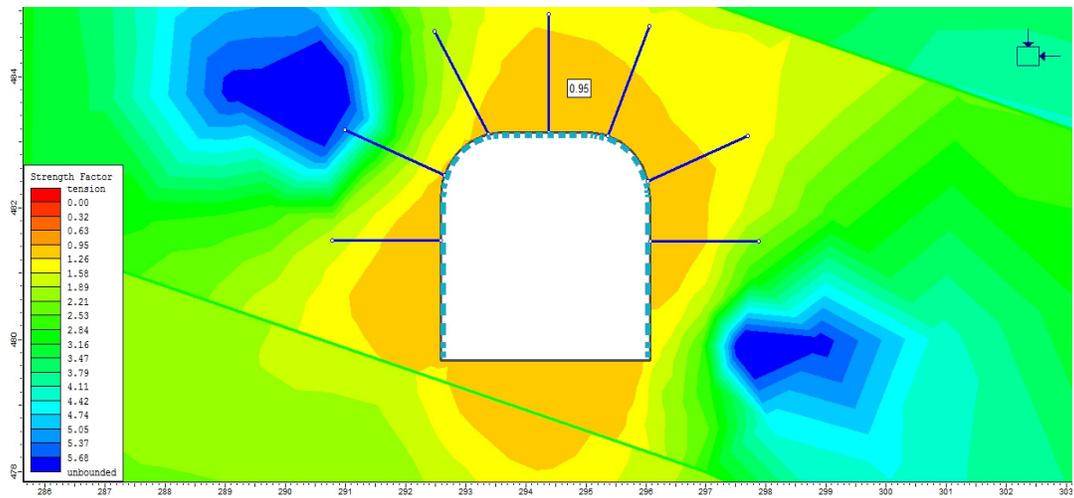
4.A.10.1. Вриједности фактора сигурности у стијенској маси за неподграђену подземне просторије у бокситу



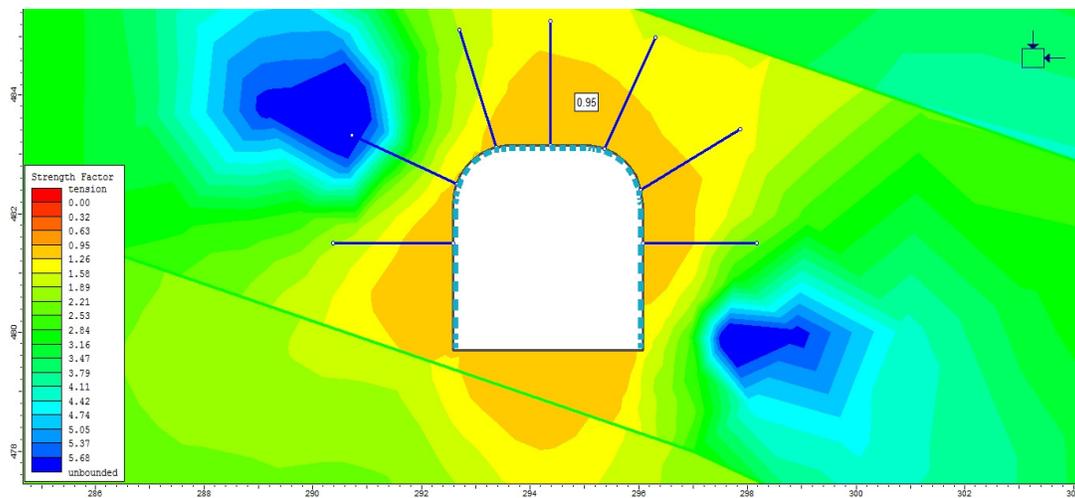
4.A.10.2. Вриједности фактора сигурности у стијенској маси за сидра дужине 1m



4.A.10.3. Вриједности фактора сигурности у стијенској маси за сидра дужине 1.5m

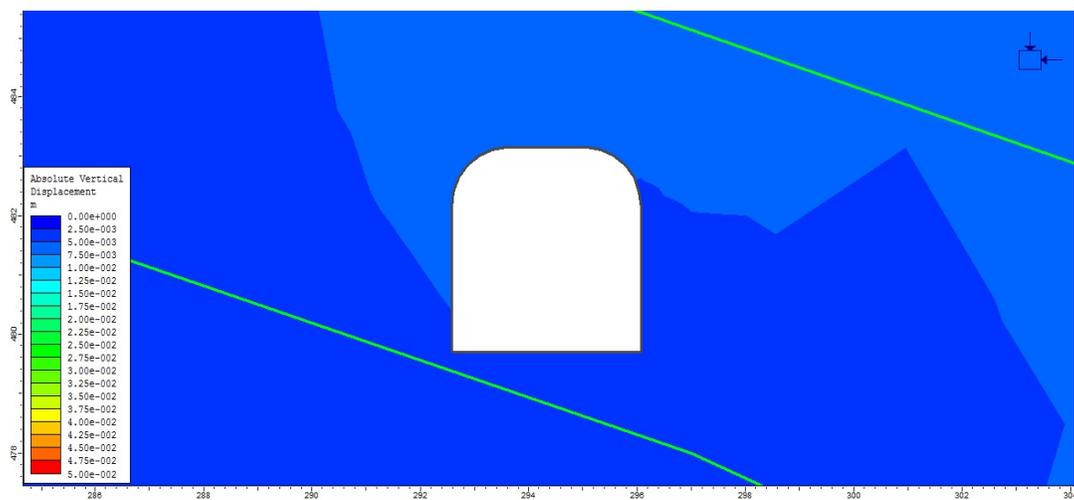


4.A.10.4. Вриједности фактора сигурности у стијенској маси за сидра дужине 1.8 m

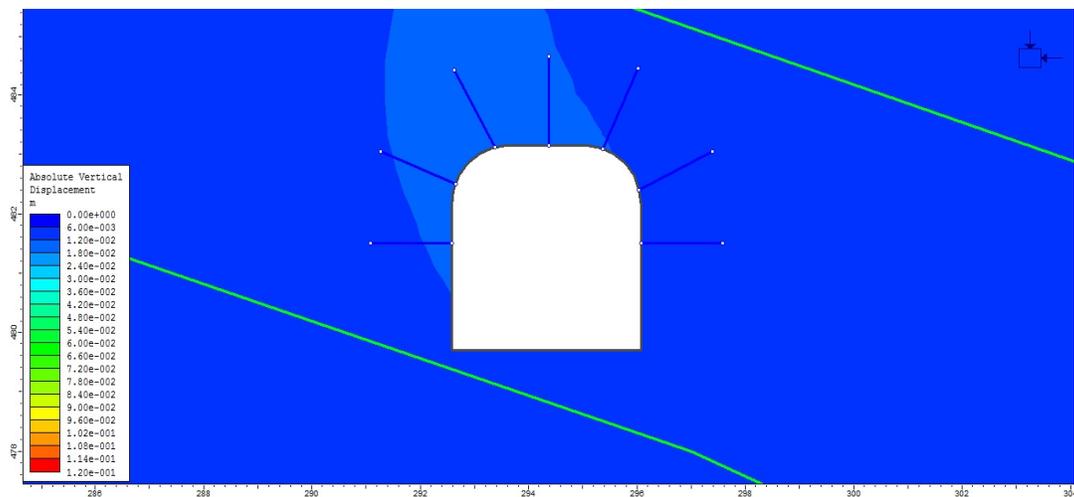


4.A.10.5. Вриједности фактора сигурности у стијенској маси за сидра дужине 2.1 m

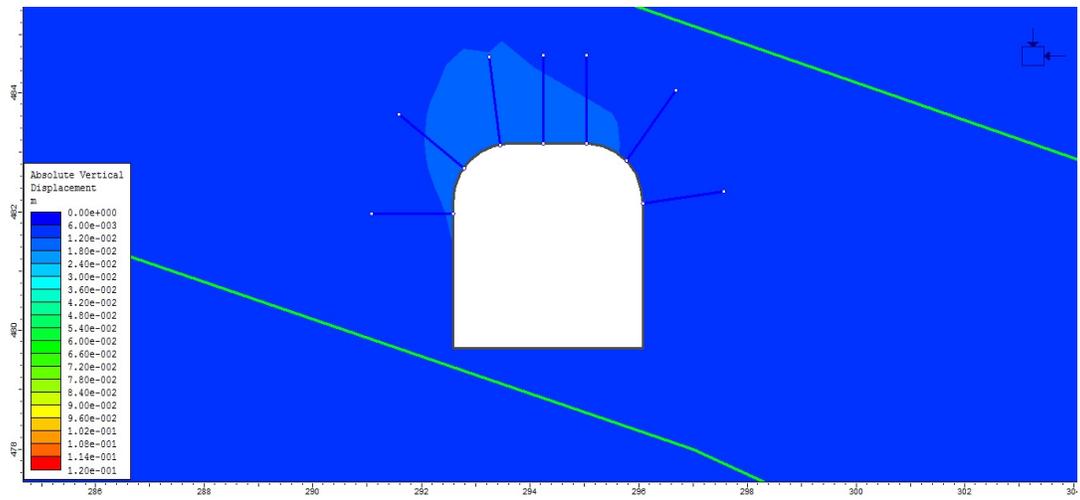
Прилог 4.A.11. Приказ вертикалних деформација за неподграђену просторију и просторију подграђену сидрима дужине 1.5m



4.A.11.1. Вертикалне деформације за неподграђену подземне просторије у бокситу

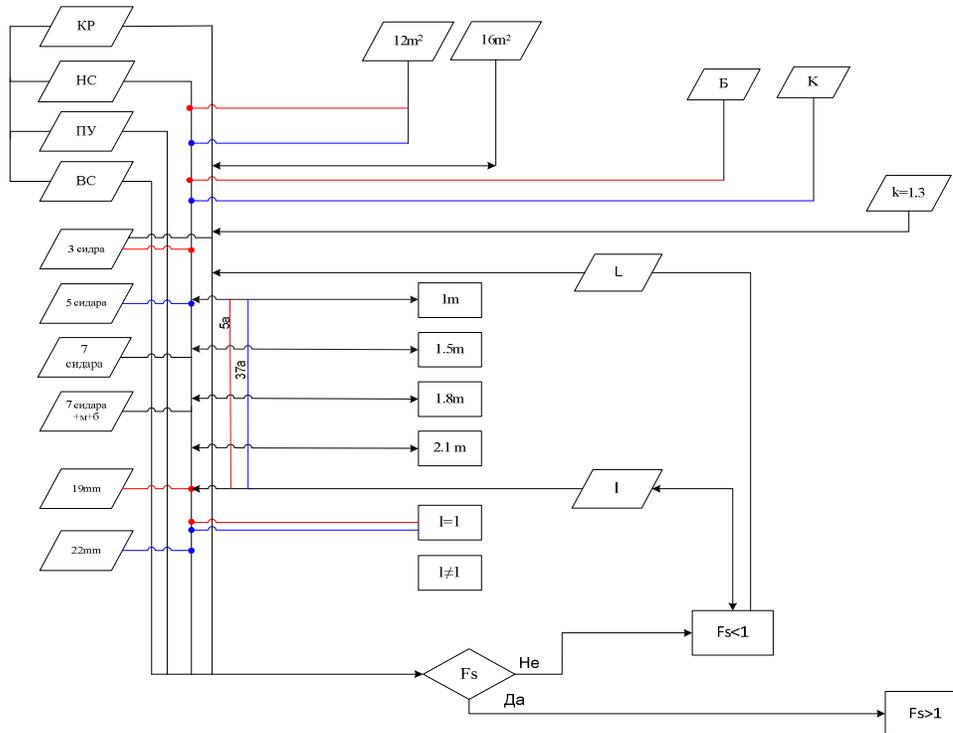


4.A.11.2. Вертикалне деформације за подграђену просторију са растојањем сидара 1m



4.A.11.3. Вертикалне деформације за подграђену просторију са растојањем сидара 0.8m

Прилог 4.A.12. Алгоритам математичких зависности за модел просторија отварања у рудном лежишту "Подбраћан"



ЛЕГЕНДА

- КР- кружна просторија, НС- нискозасвођена просторија, ПУ- правоугаона просторија, ВС- високозасвођена просторија
- А- просторије површине попречног пресека до 12m²,
- В- просторије површине попречног пресека до 16m²,
- RS- ознака за радну средину:
- Б- боксит,
- К- кречњак,
- к- коефицијент односа примарних напона, k=1.3
- n₁-ознака за број сидара, 3 сидара,
- L₁- дужина сидара 1 m,
- n₂- ознака за број сидара, 5 сидара
- L₂- дужина сидара 1.5 m,
- n₃- ознака за број сидара, 7 сидара,
- L₃- дужина сидара 1.8 m,
- n₄- ознака за број сидара, 7 сидара са мрежом и прсканим бетоном
- L₄- дужина сидара 2.1 m.
- l- растојање између сидара: растојање 1 m, l≠1.
- d₁- ознака за пречник сидара, 19mm
- F_s- фактор сигурности, F_s>1, и F_s<1,
- d₂- ознака за пречник сидара, 22mm

Прилогу 4.А.13. Извод једног дијела табеларног приказа добијених математичких израза за избор зависности за оптималму просторију отварања

Fmax											
Тип	Средина	Облик	d(mm)	ns	k	L = 1m	L=1,5m	L=1,8m	L=2,1m	Једначина F=f(L)	Ознака једначине
A	Б	КР	19	3	1.3	0.0382217	0.0388442	0.0378778	0.0389389	$y = 0.015 x^3 - 0.071x^2 + 0.11x - 0.013$	1a
A	Б	КР	19	5	1.3	0.0774355	0.0724961	0.0776202	0.0743231	$y = - 0.073 x^3 + 0.35 x^2 - 0.53x + 0.34$	2a
A	Б	КР	19	7	1.3	0.0948043	0.0914101	0.0950774	0.0943204	$y = - 0.044 x^3 + 0.21 x^2 - 0.33x + 0.26$	3a
A	Б	КР	19	7+	1.3	0.0950976	0.0924613	0.095278	0.095344	$y = - 0.031 x^3 + 0.15 x^2 - 0.23x + 0.21$	4a
A	Б	НС	19	3	1.3	0.035813	0.0360446	0.0368337	0.0368169	$y = - 0.053 x^3 + 0.27 x^2 - 0.45x + 0.28$	5a
A	Б	НС	19	5	1.3	0.0794777	0.0720973	0.0816582	0.0813286	$y = - 0.12 x^3 + 0.61 x^2 - 0.97x + 0.57$	6a
A	Б	НС	19	7	1.3	0.0759533	0.0888434	0.0781075	0.078211	$y = 0.12 x^3 - 0.61 x^2 + 0.97x - 0.4$	7a
A	Б	НС	19	7+	1.3	0.0759533	0.0878921	0.0812334	0.0811662	$y = 0.086 x^3 - 0.43 x^2 + 0.68x - 0.27$	8a
A	Б	ПУ	19	3	1.3	0.0405174	0.0402569	0.037008	0.0401476	$y = 0.044 x^3 - 0.2 x^2 + 0.3x - 0.097$	9a
A	Б	ПУ	19	5	1.3	0.0751861	0.0750105	0.0762203	0.07522278	$y = - 0.016 x^3 + 0.075 x^2 - 0.11x + 0.13$	10a
A	Б	ПУ	19	7	1.3	0.095895	0.0974274	0.0836581	0.0976901	$y = 0.2 x^3 - 0.9 x^2 + 1.3x - 0.53$	11a
A	Б	ПУ	19	7+	1.3	0.0914355	0.0883983	0.0944291	0.0885056	$y = - 0.09 x^3 + 0.42 x^2 - 0.63x + 0.39$	12a
A	Б	ВС	19	3	1.3	0.0422432	0.0401702	0.035518	0.0360675	$y = 0.039 x^3 - 0.18 x^2 + 0.27x - 0.081$	13a
A	Б	ВС	19	5	1.3	0.0840994	0.0771911	0.0758163	0.0744396	$y = - 0.011 x^3 + 0.057 x^2 - 0.11x + 0.14$	14a
A	Б	ВС	19	7	1.3	0.090465	0.0954521	0.0933585	0.0926733	$y = 0.026 x^3 - 0.13 x^2 + 0.22x - 0.023$	15a
A	Б	ВС	19	7+	1.3	0.0882002	0.0926564	0.0885541	0.0880451	$y = 0.044 x^3 - 0.22 x^2 + 0.34x - 0.081$	16a
A	К	ПУ	19	5	1.3	0.0114075	0.0114057	0.0114075	0.0114093	$y = - 1.1e-05 x^3 + 5.9e-05 x^2 - 9.9e-05x + 0.011$	26a
A	К	ПУ	19	7	1.3	0.0174797	0.0174783	0.0174813	0.0174843	$y = - 1.5e-05 x^3 + 7.9e-05 x^2 - 0.00013x + 0.018$	27a
A	К	ПУ	19	7+	1.3	0.0186533	0.0186661	0.0186692	0.0186724	$y = 1.8e-05 x^3 - 9.6e-05 x^2 + 0.00018x + 0.019$	28a
A	К	ВС	19	3	1.3	0.0236886	0.022903	0.0233574	0.0234298	$y = - 0.0054 x^3 + 0.027 x^2 - 0.044x + 0.046$	29a
A	К	ВС	19	5	1.3	0.0440264	0.0419462	0.044001	0.0441588	$y = - 0.022 x^3 + 0.11 x^2 - 0.17x + 0.13$	30a
A	К	ВС	19	7	1.3	0.059901	0.0593895	0.060166	0.0605838	$y = - 0.0059 x^3 + 0.03 x^2 - 0.048x + 0.084$	31a
A	К	ВС	19	7+	1.3	0.0600901	0.0594799	0.059424	0.0597641	$y = 0.00082 x^3 - 0.0023 x^2 + 0.0005x + 0.061$	32a
A	Б	КР	22	3	1.3	0.0454548	0.0414392	0.0451607	0.0493035	$y = - 0.021 x^3 + 0.12 x^2 - 0.2x + 0.15$	33a
A	Б	КР	22	5	1.3	0.0950309	0.0876182	0.0946886	0.0884254	$y = - 0.11 x^3 + 0.53 x^2 - 0.8x + 0.48$	34a
A	Б	КР	22	7	1.3	0.115115	0.113516	0.113825	0.116764	$y = 0.0085 x^3 - 0.031 x^2 + 0.034x + 0.1$	35a
A	Б	КР	22	7+	1.3	0.115664	0.114374	0.11427	0.117402	$y = 0.014 x^3 - 0.057 x^2 + 0.073x + 0.085$	36a
A	Б	НС	22	3	1.3	0.056456	0.0408614	0.0449622	0.0450168	$y = - 0.071 x^3 + 0.36 x^2 - 0.6x + 0.36$	37a

БИОГРАФИЈА АУТОРА

Дражана Гошић, дипл. инж. рударства, рођена 29. октобра 1976 године у Приједору и држављанка Републике Српске. Живи у Приједору, гдје је одрасла и завршила основну школу. Средњу геолошко-хидрометеоролошку школу је завршила у Београду 1995 године и стекла звање геолошког техничара за геотехнику и хидрогеологију. Технолошки факултет у Бањалуци, Рударски одејек у Приједору уписала је 1997 године, гдје је 2003 године и дипломирала на тему "Могућност експлоатације пратећих минералних сировина (глина и кварцног пијеска) на површинском копу "Омарска" са оцјеном десет (10). Стекла је звање дипломирани инжењер рударства општег смјера. Две године касније се запослила на тада Рударском одејек у Приједору, Технолошког факултета у Бањој Луци, на мјесто асистента за научну област Површинска експлоатација у рударству. Пет година касније јој је повјерен посао вишег асистента из области Подземна експлоатација, на предметима "Технологија и механизација подземне експлоатације", "Израда подземних просторија", и "Пројектовање у подземној експлоатацији".

Поред послова асистента на наведеним предметима обављала је послове руководиоца постдипломских студија на Рударском факултету. Школске 2007/08 године наставила је редовно школовање по Болоњском процесу на докторским студијама на Рударско-геолошком факултету у Београду, студијски програм Рударско и геолошко инжењерство, односно завршене академске студије са најмање 300 ЕСПБ бодова и просјечну оцјену на основним академским студијама најмање осам (8), као и знање једног свјетског језика (енглеског) и објављене научне и стручне радове.

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписани-а **Дражана М. Тошић**

број индекса Р 713/15

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Развој модела конструкције просторија отварања рудника са подземном експлоатацијом

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

Потпис докторанда

У Београду, 06.04.2016

Дражана Тошић

Прилог 2.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора **Дражана М. Тошић**

Број индекса Р 713/15

Студијски програм Рударско инжењерство

Наслов рада **Развој модела конструкције просторија отварања рудника са
подземном експлоатацијом**

Ментор Проф. др Војин Чокорило

Потписани/а **Дражана М. Тошић**

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

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

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

Потпис докторанда

У Београду, 06.04.2016

Дражана М. Тошић

Прилог 3.

Изјава о коришћењу

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

Развој модела конструкције просторија отварања рудника са подземном експлоатацијом

која је моје ауторско дело.

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

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанда

У Београду, 06.04.2016

Снежана Рашић

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