

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
РУДАРСКО-ГЕОЛОШКИ ФАКУЛТЕТ

Стефан В. Милановић

**МОДЕЛИРАЊЕ УТИЦАЈА ОДСТУПАЊА
ЛИНИЈЕ НАЈМАЊЕГ ОТПОРА ОД
ПРОЈЕКТОВАНЕ НА ИНТЕНЗИТЕТ
ПОТРЕСА ОД МИНИРАЊА**

докторска дисертација

Београд, 2024.

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MINING AND GEOLOGY

Stefan V. Milanović

**MODELING OF THE INFLUENCE OF THE
BURDEN DEVIATION FROM THE DESIGNED
ONE ON THE INTENSITY OF THE BLAST
VIBRATION**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2024.

КОМИСИЈА

Ментор:

др Лазар Кричак, редовни професор

Ужа научна област: Површинска експлоатација лежишта минералних сировина
Универзитет у Београду-Рударско геолошки факултет

Чланови комисије:

др Миланка Неговановић, ванредни професор

Ужа научна област: Површинска експлоатација лежишта минералних сировина
Универзитет у Београду-Рударско геолошки факултет

др Раде Токалић, редовни професор

Ужа научна област: Рударски радови, израда подземних просторија и рударски материјали
Универзитет у Београду-Рударско геолошки факултет

др Дејан Богдановић, редовни професор

Ужа научна област: Инжењерски менаџмент
Универзитет у Београду-Технички факултет у Бору

Датум одбране: _____

МОДЕЛИРАЊЕ УТИЦАЈА ОДСТУПАЊА ЛИНИЈЕ НАЈМАЊЕГ ОТПОРА ОД ПРОЈЕКТОВАНЕ НА ИНТЕНЗИТЕТ ПОТРЕСА ОД МИНИРАЊА

САЖЕТАК

Према дефиницији линија најмањег отпора представља најкраће растојање од центра минског пуњења до слободне површине. Овим истраживањем представљен је утицај линије најмањег отпора, као и њеног одступања од пројектоване на интензитет потреса услед минирања. Проблем линије најмањег отпора је веома заступљен у пракси, где се занемарује изглед слободне површине, који може бити врло неправилан. Линију најмањег отпора је потребно мерити целом дужином минске бушотине према слободној површини, иако је у пракси случај да се мери најчешће као растојање од осе минског пуњења до врха етаже. Одступање линије најмањег отпора од пројектоване може бити веће или мање, што утиче на резултате минирања и стварање нежељених ефеката приликом минирања, као што су повећање потреса услед минирања или разлетање стенског материјала, лоша фрагментација. Кроз истраживање утицај одступања на интензитет потреса утврђен је на лабораторијском моделу, где су вршена иницирања једне бушотине, за пројектовану линију најмањег отпора, а свако одступање веће од пројектованог стања је узето као параметар за поређење. Приликом сваког минирања вршено је мерење потреса уз помоћ сеизмичког инструмента на одређеном растојању од места минирања, као и претходно фотографисање слободне површине испред минске бушотине, како би се за свако минирање урадио детаљан 3D модел. Свако мерење је представљено на дијаграму и разврстано у зависности од одступања линије најмањег отпора, тј. када је она једнака пројектованој вредности од 30 mm, као и свако њено одступање које је мање или веће од пројектоване. Статистичком анализом резултата установљен је модел зависности одступања линије најмањег отпора од пројектоване на интензитет потреса услед минирања у лабораторијским условима, који је верификован теренским испитивањем. Као додатна анализа коришћен је и метод раздвојених елемената (Discrete Element Method), где су за ову анализу коришћени лабораторијски подаци, пројектовани за различите услове и тиме се прецизније кроз овај модел установио утицај одступања линије најмањег отпора на интензитет потреса услед минирања.

Кључне речи: линија најмањег отпора; 3D модел; потреси услед минирања; минирање; слободна површина; метода раздвојених елемената;

Научна област:

Рударско инжењерство

Ужа научна област:

Површинска експлоатација лежишта минералних сировина

УДК:

622.235:556.023(043.3)

MODELING OF THE INFLUENCE OF THE BURDEN DEVIATION FROM THE DESIGNED ONE ON THE INTENSITY OF THE BLAST VIBRATION

ABSTRACT

Burden size according to the definition represents the shortest distance from the center of the blasthole charge to the free surface. This research presents the influence of the burden deviation from the designed one and its influence on the intensity of blasting vibration. The problem of burden deviation is very frequent in practice, where the appearance of the free surface, which can be very irregular, is not enough examined. The burden must be measured along the entire blasthole length in the direction of the free surface, although in practice it is usually measured as the distance from the axis of the blasthole to the crest of the bench. The deviation of the burden size from the designed one can be greater or less, which affects the results of blasting and creates unwanted side effects during blasting such as an increase in blasting vibration or fly rock, fragmentation. Through research, the impact of deviations on the intensity of the blasting vibration was confirmed on a laboratory model where one blasthole was initiated, for the designed burden size, and any deviation greater than the designed one was taken as a parameter for comparison. During each initiation, blasting vibrations measurements were made with the use of a seismic instrument at the same distance from the blasthole, before each initiation we took photography of the free surface in front of the blasthole, to create a detailed 3D model for each initiation. Each measurement is presented on a diagram and classified according to the deviation of the burden, i.e. when it is equal to the designed value of 30 mm, and as well as any deviation that is smaller or larger than the designed one. The results were statistically analyzed and established a dependence model of the burden deviation from the designed one on the intensity of the blasting vibration in laboratory conditions, which was verified by a test on the terrain. As an additional analysis, the discrete element method (Discrete Element Method) was used, where laboratory data, designed for the same conditions, was used for this analysis, and thus more precisely through this model, the influence of the burden deviation on blasting vibration was established.

Key words: burden; 3D model; blast vibration; blasting; free face; discrete element method;

Scientific field:

Mining engineering

Scientific subfield:

Surface exploitation of mineral deposits

UDC:

622.235:556.023(043.3)

САДРЖАЈ

1. УВОД.....	1
1.1. Предмет и циљ истраживања	1
1.2. Полазне хипотезе.....	1
1.3. Научне методе истраживања	2
1.4. Приказ ранијих истраживања.....	2
1.5. Преглед поглавља и структура дисертације	4
2. ПАРАМЕТРИ БУШЕЊА И МИНИРАЊА	6
2.1. Пречник бушотине	6
2.2. Висина етаже	7
2.3. Линија најмањег отпора.....	8
2.4. Дужина пробушења минске бушотине	10
2.5. Распоред минских бушотина.....	11
2.6. Дужина минске бушотине	12
2.7. Дужина минског чепа и минског (експлозивног) пуњења	12
2.8. Шема иницирања.....	13
2.9. Време успорења.....	14
3. СЕИЗМИЧКИ ЕФЕКТИ УСЛЕД МИНИРАЊА.....	15
3.1. Врсте сеизмичких таласа	15
3.2. Карактеристике и параметри осциловања	17
3.3. Фактори који утичу на потресе услед минирања	18
3.3.1. Карактеристике радне средине	18
3.3.2. Количина експлозивног пуњења по интервалу успорења	19
3.3.3. Растојање од места минирања.....	20
3.3.4. Девијација бушотине и пречник минске бушотине.....	20
3.3.5. Време успорења и шема иницирања минских бушотина	21
3.3.6. Линија најмањег отпора и запремина одминираног материјала	22
3.4. Мерење потреса услед минирања	23
3.4.1. Врсте сеизмографских система	24
3.4.2. Дигитални сеизмографи и начин мерења	25
3.4.3. Карактеристике сеизмографа “Instantel Micromate”	26
3.5. Методе у циљу смањења потреса услед минирања	27
3.5.1. Шема иницирања и време успорења између минских пуњења.....	27
3.5.2. Количина експлозива по интервалу успорења.....	28
3.5.3. Примена раздвојених пуњења	28
3.5.4. Смањење висине етаже и дубине бушења.....	28
3.5.5. Дужина пробушења и угао минске бушотине.....	28
3.5.6. Смањење пречника минске бушотине	29
3.5.7. Израда екрана као метода за смањење потреса услед минирања.....	29
3.6. Стандарди за оцену сеизмичких потреса	30
3.6.1. Немачки DIN-4150 стандард.....	30
4. ОПТИМИЗАЦИЈА ПАРАМЕТАРА БУШЕЊА И МИНИРАЊА ПРИМЕНОМ МОДЕРНИХ ТЕХНОЛОГИЈА.....	32
4.1. Израда модела, обрада података и математички модел одређивања 3D координата	32
4.2. Анализа и оптимизација параметара бушења и минирања на 3D моделу.....	35
5. МЕТОДОЛОГИЈА ЛАБОРАТОРИЈСКИХ И ТЕРЕНСКИХ ИСПИТИВАЊА.....	38
5.1. Лабораторијски модел	40
5.2. Резултати лабораторијских испитивања	47
5.3. Теренска испитивања	51

6. АНАЛИЗА УТИЦАЈА ОДСТУПАЊА ЛИНИЈЕ НАЈМАЊЕГ ОТПОРА МЕТОДОМ РАЗДВОЈЕНИХ ЕЛЕМЕНАТА (DEM).....	56
6.1. Развој и област примене методе раздвојених елемената.....	56
6.2. Основне поставке методе раздвојених елемената.....	57
6.3. Софтверски пакет YADE за нумеричку анализу.....	60
6.4. Процена интензитета потреса услед минирања на основу одступања линије најмањег отпора применом (DEM) методе.....	60
7. ДИСКУСИЈА.....	68
8. ЗАКЉУЧАК.....	69
9. ЛИТЕРАТУРА.....	71
10. ПРИЛОЗИ.....	I

СПИСАК СЛИКА

Слика 2.1 Шематски приказ минског поља на етажи са параметрима етаже, бушења и минирања [33].....	6
Слика 2.2 Крупноћа минираног материјала у зависности од пречника бушотине; 1-тешко дробљиве стене, 2-средње тешко дробљиве стене, 3-лако дробљиве стене [35].....	7
Слика 2.3 Шематски приказ параметара минирања на етажи [39]	8
Слика 2.4 Различите могућности разлетања стенског материјала приликом минирања; а) разлетање из косине етаже, б) изнад зоне минског чепа, в) из зоне минског чепа [20].....	9
Слика 2.5 Шематски приказ поступка одређивања дужине пробушења [36].....	10
Слика 2.6 Зона дробљења код малог растојања између бушотина у реду [40].....	11
Слика 2.7 Дејство експлозивног пуњења; а) тренутно иницирање, б) милисекундно иницирање [34]	14
Слика 3.1 Врсте сеизмичких таласа у зависности од кретања честица средине; а) уздужни (лонгитудинални) талас, б) попречни (трансверзални) талас, в) Рејлијев талас [43].....	16
Слика 3.2 Хармонијско осциловање [44].....	18
Слика 3.3 Приказ растојања објекта од места минирања [37].....	20
Слика 3.4 Приказ девијације при бушењу минских бушотина [49].....	21
Слика 3.5 Приказ дејства времена успорења и стварање нове слободне површине; а) недовољно време успорења, б) одговарајуће време успорења [50]	22
Слика 3.6 Приказ запремине призме обрушавања; а) запремина једне минске бушотине, б) запремина више минских бушотина [35].....	23
Слика 3.7 Положај сензора унутар кућишта сеизмографа [34].....	24
Слика 3.8 Механизам унутар сензора [51]	24
Слика 3.9 Изглед кућишта дигиталног сеизмографа “Instantel Micromate” [52]	25
Слика 3.10 Шематски приказ мерења потреса тла у односу на место минирања [53].....	26
Слика 3.11 Модел “Instantel Micromate” сеизмографа за мерење потреса услед минирања [54]	26
Слика 3.12 Шематски приказ бушотина за израду екрана у циљу заштите објеката у непосредној околини од места минирања [57].....	30
Слика 3.13 Прагови осциловања за брзине већих грађевинских објеката у функцији фреквенције у DIN-4150 стандарду [59]	31
Слика 4.1 SFM метода или метода структуре из покрета (шематски приказ) [63]	33
Слика 4.2 Приказ блока триангулација [64]	34
Слика 4.3 3D модел етаже на којој се врши пројектовање радова на бушењу и минирању	35
Слика 4.4 Шема иницирања и анализа величине комада одминираног материјала	36
Слика 4.5 Приказ пресека на коме се види детаљна анализа линије најмањег отпора.....	37
Слика 5.1 Приказ девијације линије најмањег отпора у односу на слободну површину етаже; а) бушотина са пројектованом линијом најмањег отпора, б) бушотина са већим вредностима линије најмањег отпора од пројектоване услед неравнина на челу етаже, в) бушотина са мањим вредностима од пројектоване [1]	38
Слика 5.2 Тродимензионални модел слободне површине са терена, зелена боја када је вредност линије најмањег отпора приближна пројектованој, плава боја су већа одступања линије најмањег отпора од пројектоване, а црвене зоне су мање вредности линије најмањег отпора од пројектоване (O-Pitblast алат за расподелу вредности линије најмањег отпора по зонама на челу етаже [71]).....	39
Слика 5.3 Површина материјала који се минира, коришћена у истраживању [1].....	40
Слика 5.4 Приказ мерења брзине уздужних таласа на блоковима са инструментом [1].....	41
Слика 5.5 Приказ измерених вредности лонгитудиналних таласа са записом сигнала у Proseq PL-Link софтверу, плава линија представља уздужни талас, а црвена линија време одзива сигнала кроз материјал [1]	42

Слика 5.6 Измерене вредности максималне брзине осциловања честица тла за три компоненте (лонгитудинални, плава боја; вертикални, зелена боја; трансверзални, црвена боја) у софтверу Thor (верзија 1.0.0.37) [1]	43
Слика 5.7 Модели блокова за различите вредности линије најмањег отпора са позицијама мерних места у односу на бушотине [1]	44
Слика 5.8 Процес добијања података о вредностима линије најмањег отпора и површини минираниог материјала са модела обрађеног кроз O-Pitblast софтвер [1]	45
Слика 5.9 3D модел блока, изглед пре и после иницирања минске бушотине [1]	46
Слика 5.10 Поступак мерења потреса и стање слободне површине пре (а) и после (б) иницирања минске бушотине [1].....	46
Слика 5.11 Зависност брзине осциловања честица (PPV) и површине минираниог материјала за различите вредности линије најмањег отпора [1].....	48
Слика 5.12 Зависност максималне брзине осциловања честица (PPV) у односу на вредност одступања линије најмањег отпора [1]	48
Слика 5.13 Профил 3D модела минске бушотине представљен кроз O-Pitblast софтвер са различитим вредностима линије најмањег отпора [1]	51
Слика 5.14 Зависност максималне брзине осциловања честица (PPV) према вредности одступања линије најмањег отпора од пројектоване при теренским испитивањима [1].....	52
Слика 5.15 Дијаграм зависности увећања брзине осциловања честица у односу на запремину призме обрушавања	54
Слика 6.1 Улегнуће које се јавља при контакту између партикула [85]	57
Слика 6.2 Геометрија модела раздвојених елемената изражена у метрима, са позицијом минске бушотине и тачке опажања; а) модел 1, б) модел 2	61
Слика 6.3 Модел раздвојених елемената са позицијом минске бушотине и фиксним контурним условима.....	61
Слика 6.4 Шематски приказ наношења оптерећења у оквиру модела [101].....	62
Слика 6.5 Модел и деформација крива симулираног опита једноаксијалне чврстоће	63
Слика 6.6 Простирање притисног таласа услед иницирања минске бушотине, модел 1	65
Слика 6.7 Простирање притисног таласа услед иницирања минске бушотине, модел 2	66
Слика 6.8 Брзина простирања лонгитудиналних таласа за моделе 1 и 2	67
Слика 10.1 Запис инструмента када је линија најмањег отпора била једнака пројектованој линији најмањег отпора од 30 mm, модел бр.1	I
Слика 10.2 Запис инструмента када је линија најмањег отпора имала одступања од пројектоване, модел бр.1	II
Слика 10.3 Запис инструмента када је линија најмањег отпора била једнака пројектованој линији најмањег отпора од 30 mm, модел бр. 5	III
Слика 10.4 Запис инструмента када је линија најмањег отпора имала одступања од пројектоване, модел бр.5	IV
Слика 10.5 Запис инструмента када је линија најмањег отпора била једнака пројектованој линији најмањег отпора од 30 mm, модел бр. 8	V
Слика 10.6 Запис инструмента када је линија најмањег отпора имала одступања од пројектоване, модел бр.8	VI
Слика 10.7 Запис инструмента приликом мерења брзине простирања лонгитудиналних таласа	VII

СПИСАК ТАБЕЛА

Табела 2.1 Параметри висине етажe и пречника минске бушотине, према утоварној механизацији [37].....	8
Табела 3.1 Карактеристике мерног инструмента “Instantel Micromate” [55]	27
Табела 3.2 Ограничења брзине осциловања честица тла у mm/s DIN-4150 стандард [58].....	31
Табела 5.1 Карактеристике мерног инструмента “Proceq Pundit PL200” [75]	41
Табела 5.2 Резултати лабораторијског теста за утицај линије најмањег отпора при вредностима $W = 20 \text{ mm}$, 30 mm и 40 mm на интензитет потреса [1]	47
Табела 5.3 Резултати мерења утицаја линије најмањег отпора за вредности $W = 30 \text{ mm}$ и $W > 30 \text{ mm}$ [1].....	49
Табела 5.4 Резултати мерења утицаја линије најмањег отпора за вредности $W = 3 \text{ m}$ и $W > 3 \text{ m}$ [1]	52
Табела 5.5 Резултати мерења брзине осциловања честица тла према запремини одминираниог материјала за вредности $W = 3 \text{ m}$ и $W > 3 \text{ m}$	53
Табела 5.6 Резултати прорачуна за различите вредности одступања запремине и увећања брзине осциловања честица	55

1. УВОД

1.1. Предмет и циљ истраживања

Предмет овог истраживања представља проблематику везану за утицај сеизмичког дејства приликом минирања на површинским коповима, интензитета потреса и његовог утицаја на околне објекте, као и утицаја одступања линије најмањег отпора на интензитет потреса. У току детонације експлозива јавља се нагло ослобађање енергије, која се троши делом на корисне облике рада (дробљење стенске масе, разбацивање издробљене масе, стварање сеизмичких таласа), као и друге облике некорисног рада. Када сеизмички талас наиђе на неку тачку терена (тла), он честице тла у тој тачки избаци из равнотежног положаја, при чему оне осцилују одређено време, док се поново не врате у почетно стање.

Интензитет сеизмичког потреса зависи од многобројних фактора, као што су карактеристике радне средине, количина експлозива која се иницира по временском интервалу, растојање од места минирања, линија најмањег отпора, начин повезивања минског поља и др. Потреси настали услед минирања могу представљати велики проблем, поготово ако се у близини површинског копа налазе стамбени објекти или други објекти од посебног значаја. Проблем потреса је још израженији уколико при почетку минирања на неком копу није познато колике су дозвољене количине експлозива које треба иницирати на одређеном растојању, како би се заштитили објекти.

Линија најмањег отпора има велики утицај на ефекте минирања, али и на сеизмичко дејство које настаје услед минирања. Одступање линије најмањег отпора од пројектоване значајно утиче на резултате минирања. У инжењерској пракси, при производном минирању, често имамо случај да косина етаже која се минира има одређене неравнине на самој косини, нарочито у поду етаже, што значајно утиче на величину линије најмањег отпора.

Циљ истраживања је израда модела за процену утицаја одступања линије најмањег отпора од пројектоване, како би се на време уочили проблеми који касније могу утицати на интензитет потреса насталих услед минирања и смањено ниво потреса кориговањем линије најмањег отпора. У свету су рађена многобројна различита теоријска, лабораторијска и теренска истраживања, која су допринела да се у одређеној мери, представи процес узајамног деловања напрезања сеизмичких таласа, али и механизам дробљења стенског материјала употребом експлозива коришћењем различитих шема и зависности од линије најмањег отпора.

У току истраживања и израде докторске дисертације, примењене су напредна технологија и тренутно савремени софтвери у свету, који су помогли у прецизном одређивању одступања линије најмањег отпора од пројектоване. Циљ истраживања је да се кроз лабораторијска испитивања и теренска мерења, као и анализом добијених података изради модел процене и смањења интензитета потреса од минирања кориговањем линије најмањег отпора, чиме би се постојећи проблем решавао новим приступом. Приликом израде модела као метода за верификацију утицаја одступања линије најмањег отпора користила се нумеричка анализа, и то метода раздвојених елемената (Discrete Element Method), где се посматрају све партикуле (честице) гранулисаног материјала, као и интеракције тих партикула са околним. Ова метода се најчешће користи за нумеричку анализу и потврду теоријских претпоставки.

1.2. Полазне хипотезе

Основни проблем одступања линије најмањег отпора од пројектоване је што се при пројектовању параметара бушења и минирања, косина посматра као равна површина са уједначеном линијом најмањег отпора целом дужином етаже, што често у пракси није случај.

Растојање од центра минског пуњења бушотине до слободне површине није исто дуж минског поља, што значајно утиче на величину линије најмањег отпора, а самим тим и интензитет потреса. У циљу корекције линије најмањег отпора, у свету је развијена опрема на самим бушилицама, како би се ови проблеми решили при самом процесу бушења. Квалитетније бушење минских бушотина доприноси квалитетнијем процесу пуњења минских бушотина, што утиче на добијање бољих резултата минирања и смањење нежељених ефеката минирања, као што су потреси услед минирања, разлетање комада одминираниог материјала и сл. Међутим, проблеми у пракси и даље постоје. Утицај одступања линије најмањег отпора на резултате минирања представља проблематику која је веома актуелна. Разматрањем постојеће литературе и досадашњих сазнања из ове комплексне области, наметнула се идеја да би се могла извршити надоградња постојећих модела у погледу генерализације и проширења применљивости за решавање карактеристичних проблема. Утицај одступања линије најмањег отпора од пројектоване на интензитет потреса може се представити применом нумеричког модела, који је развијен применом измерених података са лабораторијског модела, као и анализом утицаја линије најмањег отпора на интензитет потреса и применом новог модела на решавање конкретних проблема на терену.

1.3. Научне методе истраживања

Поред општих научних метода (опсервација, статистичке методе приликом обраде података, математичке методе), методе које су примењене заснивају се на досадашњим сазнањима у области сеизмичких ефеката минирања, детаљним разматрањем фактора који могу утицати на интензитет потреса услед минирања, измереним подацима у лабораторијским условима, верификацијом лабораторијских мерења на терену, анализи добијених података, применом нумеричког модела, и анализом новог модела.

Циљ овог истраживања јесте да се пронађе зависност одступања линије најмањег отпора од пројектоване, као и њен утицај на интензитет потреса услед минирања обрадом ранијих истраживања и применом савремених софтверских пакета. Израдом нумеричког модела, као и обрадом лабораторијских и теренских испитивања допринели би побољшању анализе и могућности процене утицаја одступања линије најмањег отпора од пројектоване на интензитет потреса који настају приликом минирања, али и других фактора на које та одступања могу утицати као што су разлетање стенског материјала и величина одминираниог материјала.

1.4. Приказ ранијих истраживања

Линија најмањег отпора је један од битних фактора код минирања који се раније није могао толико детаљно измерити. Међутим увођењем савремених технологија у рударство омогућено је прецизније пројектовање реалне ситуације са терена. Приликом пројектовања радова на бушењу и минирању, односно одређивања линије најмањег отпора њено одступање од пројектованог стања може довести до нежељених ефеката минирања. Истраживања ове проблематике су рађена, на тему утицаја потреса услед минирања и ефеката минирања у односу на различите вредности линије најмањег отпора, али не и на њена одступања од пројектованих и утицаја одступања на интензитет потреса услед минирања, што је представљено кроз различита истраживања [1].

Simangunsong et al. [2], експериментом на терену су вршили испитивања да ли линија најмањег отпора приликом минирања има утицај на ниво вибрација. Поред главне теме рада, истраживање је проширено на мерење величине комада одминираниог стенског материјала. Однос између брзине осциловања честица тла (PPV) и редукованог растојања, открива три односа за три различите вредности линије најмањег отпора, што указује да линија најмањег отпора утиче на ниво потреса који настају при минирању, тако што при већој линији најмањег отпора долази до повећања потреса. Sighn и Sastry [3], као и Sighn et al. [4] у својим радовима

дају појашњење да на резултате минирања значајан утицај има линија најмањег отпора. Uysal et al. [5], објавио је студију у којој је истраживање такође вршено за утицај потреса услед минирања у односу на различите величине линије најмањег отпора на два различита површинска копа. Choudhary и Arora [6] у свом раду испитују утицај величине линије најмањег отпора на неколико фактора који су: величина одминираниог материјала, облик одминиране масе, циклус утовара одминираниог материјала и распуцалост стене иза минског поља. Како би ефекти минирања били што бољи потребно је ускладити њихове параметре, где је линија најмањег отпора један од битних фактора. У свом истраживању Hagan [7] објашњава колико је важан први ред код вишеродног минирања у минском пољу, као и да је линија најмањег отпора пројектована на мању вредност од вредности растојања између редова, ради бољих ефеката минирања. Rustan et al. [8] дефинише критичну линију најмањег отпора као ону, где се пукотине стварају без померања стенске масе, док Hagan [9] у свом ранијем истраживању даје појашњење како линију најмањег отпора треба држати у оптималним границама, али у зависности од пречника бушотина. Konya [10], Jenkins [11] и Konya [12] такође дају образложење да распуцалост стенског материјала иза минског поља услед минирања повећава, када су вредности линије најмањег отпора и минског чепа веће. Ghiasi et al. [13], Khandelwal и Monjezi [14], кроз више студија приказују како може утицати распуцалост стенског материјала од повратног удара иза минског поља и стварати пукотине у стенском материјалу на косини етаже, лошу фрагментацију и повећати трошкове минирања, такође су то описали Monjezi et al. [15] и Sharma et al. [16].

Како је на самом терену немогуће уочити све неправилности на челу косине дела који се минира, изградом 3D модела добија се могућност детаљне анализе сваке бушотине, између осталог и профил где се види растојање између бушотине и чела косине дуж целе бушотине. Кроз истраживање докторске дисертације ће бити детаљно обрађен утицај одступања линије најмањег отпора од пројектоване, конкретно њено повећање дуж бушотине, али са упоредном анализом када је она већа, мања или приближно једнака пројектованој [1]. Од тога како је линија најмањег отпора пројектована зависе ефекти минирања, кроз истраживање Langefors и Kihlstrom [17] развили су технику у којој се смањењем линије најмањег отпора, повећава растојање између редова, са истим бројем бушотина, количином експлозива по бушотини и односом линије најмањег отпора и растојања између бушотина, а као резултат добија се боља гранулација. Rai [18] кроз своје истраживање сматра да линија најмањег отпора један од веома значајних параметара приликом радова на бушењу и минирању за величину одминираниог стенског материјала.

Линија најмањег отпора има утицај дакле и на величину одминираниог стенског материјала, где Prasad [19] кроз своју студију случаја даје пример где се може видети утицај минског чепа у односу на величину линије најмањег отпора и како то утиче на одминирани материјал. Према Dumakor-Dupey et al. [20], постоје три механизма преко којих може настати разлетање одминираниог материјала разлетање минског чепа у минској бушотини (где у случају лошег минског чепа и притиска гасова из бушотине долази до разлетања материјала), разлетање у зони чепа (овде долази најчешће до ослобађања гасова), и разлетање у зони слободне површине. До разлетања на челу етаже (у зони слободне површине) долази када су експлозивна пуњења у близини зона пукотина, омогућавајући гасовима под високим притиском продирање кроз те пукотине, као и зонама где је линија најмањег отпора мања од пројектоване. Уколико се јавља мања вредност линије најмањег отпора од пројектоване, поред потреса од минирања акценат се ставља на разлетање комада, где је и на ову тему извршено доста истраживања. Разлетање одминираних комада представља разлетање стенског материјала током процеса минирања где комади тог одминираниог материјала могу летети до велике удаљености од зоне утицаја експлозивног пуњења [1]. Armaghadi et al. [21], применом ANN даје симулацију растојања приликом разлетања комада и брзине осциловања честица тла

приликом минирања. Erten et al. [22], у свом истраживању дају објашњење да слободна површина има утицај на раст и стварање деформација при рефлексији еластичних таласа.

Применом софтвера и савремених технологија могуће је детаљно сагледати ситуацију на терену и приступити анализи одступања линије најмањег отпора од пројектоване, као и њеном утицају на интензитет потреса насталих услед минирања. Тренутно у свету постоји мноштво софтвера за анализу параметара бушења и минирања, симулације иницирања минског поља, анализе гранулометријског састава, детаљне анализе линије најмањег отпора, као и других битних параметара везаних за област бушења и минирања. Коришћењем савремених технологија, израде модела самог минског поља и обрадом кроз специјализоване софтвере за минирање, дошло се до идеје за овом врстом истраживања [1]. Софтвери намењени у ове сврхе веома су заступљени и развиле су их неке од следећих компанија као нпр. O-Pitblast [23], који уз примену савремених технологија (дронска, фотограмetriје) може израдити 3D модел за свако минско поље. Strayos [24] представља још напреднију верзију где поред наведених могућности, може и вршити анализу гранулометријског састава, док је компанија 3GSM развила софтвер Blastmetrix [25] искључиво за анализу параметара бушења.

Ранија истраживања кроз примену софтвера за анализу параметара бушења и минирања рађена су преко нумеричких анализа, где је Lu et al. [26] својим експериментом и нумеричком анализом истраживао утицај броја слободних површина на потресе који настају услед минирања. Mortazavi et al. [27] на моделу који је рађен кроз DDA код, представља симулацију минирања, са утицајем пукотина, ослобађања гасова и притиска задњег реда минског поља за више различитих вредности линије најмањег отпора. Кроз истраживање утицаја одступања линије најмањег отпора од пројектоване на интензитет потреса услед минирања вршићемо анализу кроз модел методом раздвојених елемената (Discrete Element Method). Досадашња истраживања овом методом рађена су везано за утицај параметара бушења и минирања на величину одминираних материјала, анализу дејства експлозивног пуњења, разлетање стенског материјала. Sazid [28] у свом истраживању даје анализу односа линије најмањег отпора и растојања између бушотина у реду, где кроз више различитих односа посматра утицај на енергију експлозива. Gao et al. [29] у својој студији представља анализу различитих параметара минирања, али и дејство експлозије, као и формирање кратера услед експлозије кроз поређење теренских испитивања и нумеричке анализе. Кроз своју студију Huo et al. [30] приказује утицај и спроводи истраживање карактеристика оштећења изазваних експлозијом на бочну слободну површину у високо напругнутој стенској маси, где је калибрација нумеричког модела вршена на основу резултата минирања на тестираном узорку и нумеричке симулације. Hausteин et al. [31] кроз своје истраживање приказује значај нумеричке методе тј. методе раздвојених елемената (DEM), где се сложено понашање материјала може описати као интеракција дискретних честица и кроз софтверски пакет YADE, што је описано у овом раду. Нумеричком анализом кроз софтвер LS DYNA, Hosseini et al. [32] је анализирао параметре бушења и минирања, као и утицај пречника бушења на резултате минирања и јачину потреса услед минирања.

1.5. Преглед поглавља и структура дисертације

Дисертација је базирана према редоследу који читаоцима омогућава увид у проблематику, анализу и обраду резултата предметног истраживања, где је кроз поглавља дат опис параметара бушења и минирања, као и проблема који се могу јавити са методологијом лабораторијских и теренских испитивања, нумеричким моделом, који дају анализу утицаја одступања линије најмањег отпора на интензитет потреса при минирању.

Прво поглавље представља увод, где је описан предмет, циљ истраживања, полазне хипотезе, као и научне методе које чине основу овог истраживања, са прегледом ранијих истраживања на ову тему.

Друго поглавље даје преглед основних параметара бушења и минирања који могу утицати на резултате приликом минирања. Посебно је дат осврт на линију најмањег отпора која представља један од најбитнијих параметра који може утицати на резултате минирања, где се и кроз ово истраживање врши анализа и моделирање њеног утицаја на потресе услед минирања.

Треће поглавље је теоријски део о сеизмици минирања чији се утицај посматра кроз ово истраживање. Дат је преглед о врстама таласа, параметрима који утичу на јачину потреса услед минирања, начину мерења и методама за снижавање потреса, као и стандардима за оцену њиховог дејства на стамбене објекте.

Четврто поглавље представља процес оптимизације параметра бушења и минирања применом модерних технологија, за израду 3D модела за детаљну анализу параметара преко специјализованих софтвера. Такође, дат је и кратак опис израде модела, који на основу прецизних улазних података омогућава добијање детаљних резултата за даљу анализу.

Пето поглавље је оригинални рад аутора, где је кроз лабораторијска истраживања дата прегледна статистичка анализа утицаја одступања линије најмањег отпора од пројектоване на интензитет потреса услед минирања на основу мерења на лабораторијском моделу. Резултати су верификовани теренским испитивањем, где је дат прегледан приказ резултата кроз ово поглавље.

Шесто поглавље даје преглед могућности нумеричких анализа применом методе раздвојених елемената која се последњих година веома користи у рударству. Ово поглавље је такође оригиналан рад аутора, где је извршено моделирање утицаја потреса услед одступања линије најмањег отпора од пројектоване, са приказом резултата и изгледа самог модела.

Седмо поглавље чини дискусија у којој је дат детаљан преглед свих истраживања кроз ову дисертацију са образложењима и анализама обављених мерења и резултата.

Осмо поглавље представља закључна разматрања о анализи и утицају потреса при минирању услед одступања линије најмањег отпора од пројектоване, са освртом на могућности даљих истраживања и примене постојећег модела.

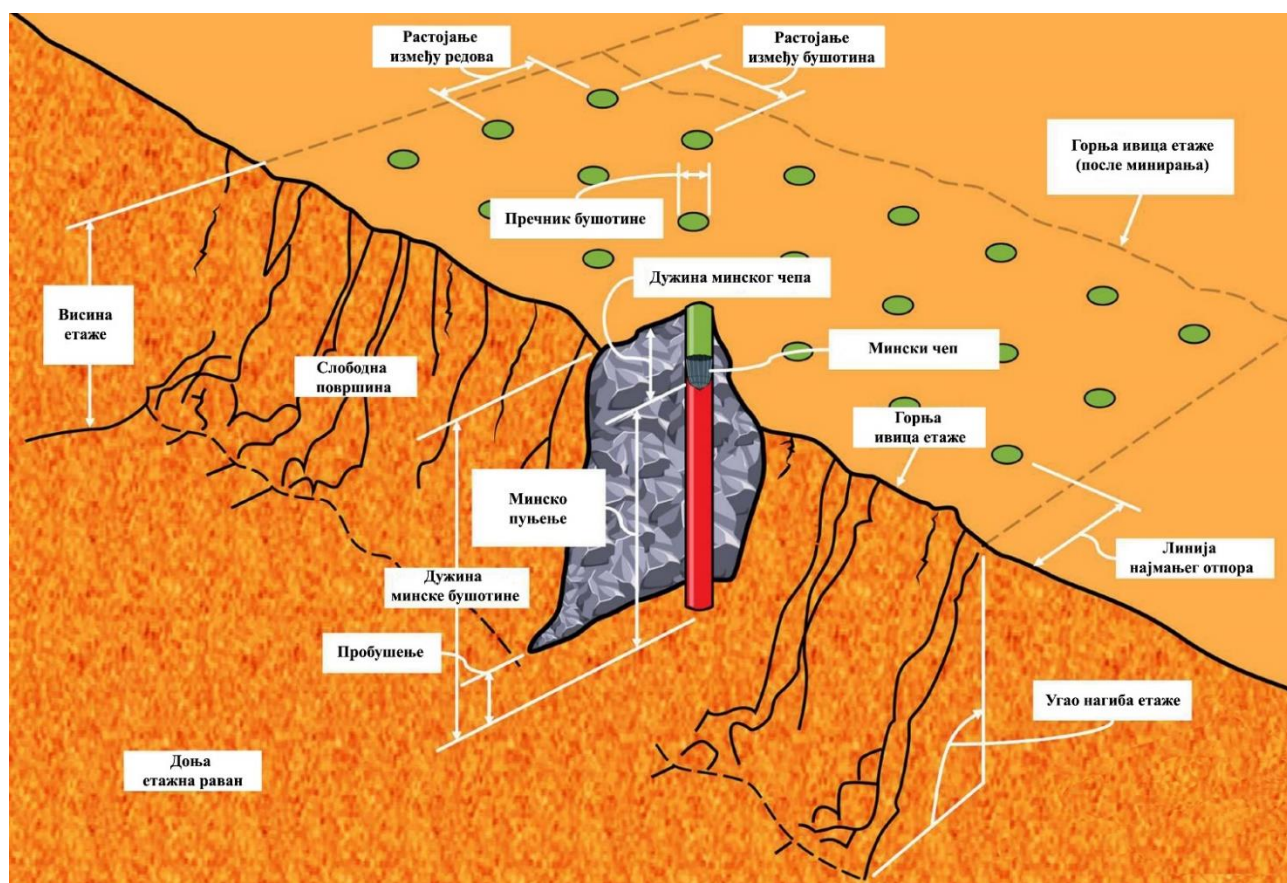
Девето поглавље чини списак и преглед коришћене литературе приликом израде ове дисертације.

Десето поглавље су прилози који дају преглед резултата мерења потреса при истраживању, као и програмски код за креирање и калибрацију модела код нумеричке анализе.

2. ПАРАМЕТРИ БУШЕЊА И МИНИРАЊА

Минирање представља процес уситњавања стенске масе, где се при детонацији експлозива ствара велика количина енергије која се ослобађа и троши на корисне облике рада, као што су дробљење стенске масе, разбацавање одминераног материјала, стварање вештачки изазваних сеизмичких таласа. Самом процесу минирања претходе радови на бушењу минских бушотина, израдом вертикалних или косих цилиндричних бушотина у које се касније стављају експлозивна и иницијална средства. Радове на бушењу и минирању потребно је пажљиво планирати, пројектовати и оптимизовати како би ефекти и резултати минирања били што бољи у погледу величине одминераног материјала, производње и економске исплативости. Поред позитивних ефеката, потребно је ускладити и умањити негативне ефекте који се могу десити, као неконтролисано разлетање стенског материјала, емисије штетних гасова и сеизмичких ефеката минирања.

Пројектовање радова на минирању укључује разматрање више параметара, а резултати минирања зависе од међусобног дејства и зависности ових параметара, како би се избегли негативни ефекти минирања [33]. Слика 2.1. даје прегледан шематски приказ минског поља са параметрима етаже као и параметрима бушења и минирања.

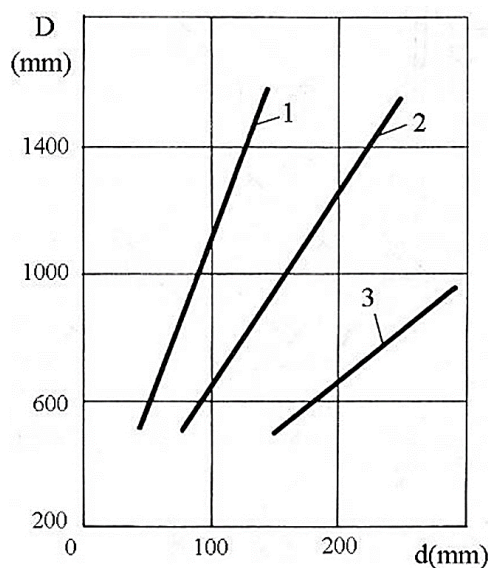


Слика 2.1 Шематски приказ минског поља на етажи са параметрима етаже, бушења и минирања [33]

2.1. Пречник бушотине

Пречник минске бушотине представља битан параметар код минирања, где поред дужине минске бушотине и густине експлозива чини фактор који утиче на количину експлозива која се може сместити у бушотину. Количина експлозива у бушотини по метру дужном пропорционална је квадрату пречника бушотине [34]. У зависности од смештене количине експлозива по бушотини, зависи и степен уситњености стенског материјала који се минира,

нпр. ако се пречник бушотине повећава, самим тим се количина експлозива повећа, што утиче на боље дробљење стенске масе. Повећањем пречника бушотине, као и повећањем количине експлозива могу се створити и негативни ефекти у погледу потреса услед минирања, због тога је потребно поштовати ограничења и све параметре оптимизовати.



Слика 2.2 Крупноћа минираниог материјала у зависности од пречника бушотине; 1-тешко дробљиве стене, 2-средње тешко дробљиве стене, 3-лако дробљиве стене [35]

Слика 2.2. приказује дијаграм на коме је представљена зависност, између пречника минске бушотине (d) и максималне дозвољене величине комада (D), која се може изразити преко наредног обрасца [35]:

$$d = k \cdot D, (mm) \quad (2.1)$$

Најповољнији пречник минске бушотине који се може тумачити као пречник који омогућава најбоље уситњавање стенске масе и најмање изазива штетних утицаја по околину, могуће је израчунати преко следећег обрасца, где је (H) висина етажe [36]:

$$d = \frac{H}{120}, (m) \quad (2.2)$$

2.2. Висина етажe

Висина етажe (рационална висина етажe) се бира у зависности од услова сигурности рада утоварно-транспортне механизације, начина минирања односно од облика, висине и угла гомиле одминираниог материјала и такође је у директној зависности од физичко-механичких карактеристика радне средине [35]. При одабиру рационалне висине етажe, врши се даљи прорачун осталих параметара бушења и минирања, као што је дужина минске бушотине која зависи од висине етажe и дужине пробушења код минске бушотине. Табела 2.1 даје преглед препоручених димензија висине етажe и пречника бушења у зависности од карактеристика утоварне механзације.

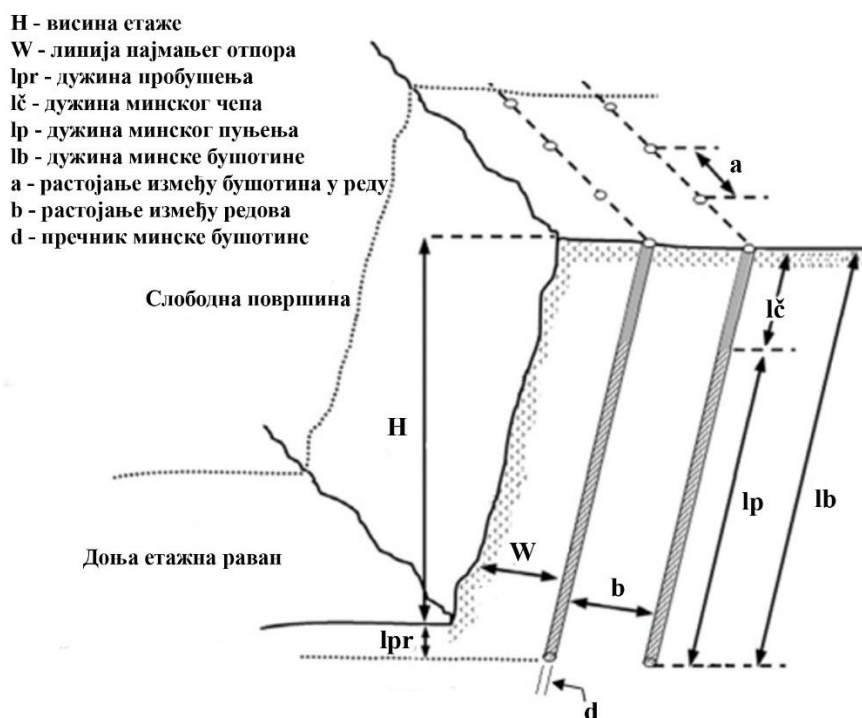
Табела 2.1 Параметри висине етаже и пречника минске бушотине, према утоварној механизацији [37]

Висина етаже H (m)	Пречника минске бушотине D (mm)	Препоручена утоварна опрема
8-10	65-90	Утоварач
10-15	100-150	Хидраулични или ужетни багер кашикар

2.3. Линија најмањег отпора

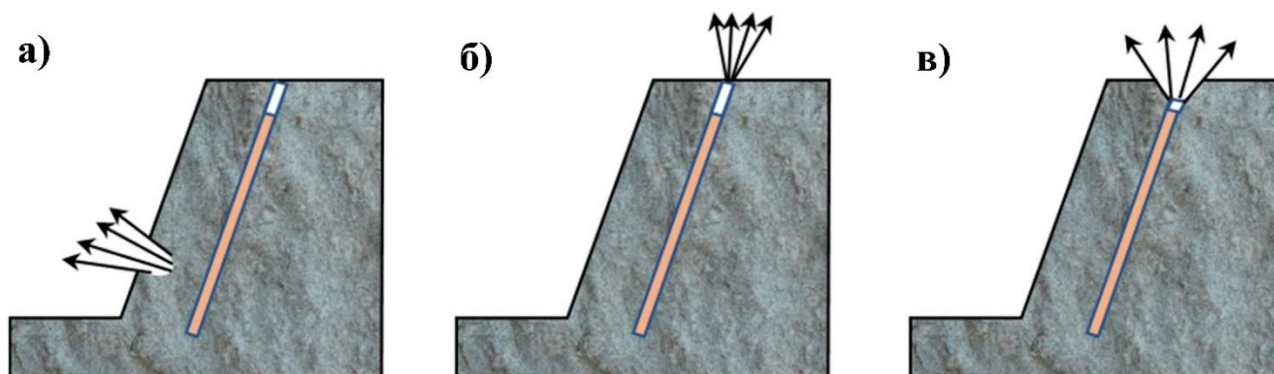
Линија најмањег отпора се дефинише као најкраће растојање од минског пуњења до слободне површине, где код нагиба етаже мањег од 90^0 и код вертикалних бушотина ово растојање представља промелјиву величину и највеће је у ножици етаже [35]. Одређивање одговарајуће вредности линије најмањег отпора представља један од најважнијих параметара у свим врстама мињања, али од свих параметара је најкритичнији [38]. Ово је параметар од кога зависе многи параметри и ефекти мињања, као што је гранулација односно величина одмираних комада, геометрија минског поља, утицај на потресе од мињања, као и могућност разлетања стенског материјала.

Кроз ово истраживање ће бити детаљно обрађен утицај одступања линије најмањег отпора од пројектоване, конкретно њено повећање дуж бушотине, али са упоредном анализом када је она већа, мања или приближно једнака пројектованој. На основу досадашњих истраживања и закључака може се узети у разматрање како повећање линије најмањег отпора утиче на потрес услед мињања, односно теоретски повећањем линије најмањег отпора повећава се запремина призме обрушавања, што утиче на повећање потреса услед мињања [1]. Слика 2.3 даје шематски приказ на којој је приказана линија најмањег отпора са осталим параметрима мињања на једној етажи.



Слика 2.3 Шематски приказ параметара мињања на етажи [39]

Код случајева када је линија најмањег отпора велика ствара се вертикални кратер на горњој етажној равни што изазива дробљење стенске масе у врху етажне бушотине и издувавање гасова, које изазива ваздушне ударе и разлетање стенског материјала [36]. Када је линија најмањег отпора мала, дешава се јако дробљење стенске масе, која може бити далеко одбачена односно створити негативне ефекте разлетања материјала, а ваздушни удари ће бити најинтензивнији у правцу тог разлетања [36]. Слика 2.3 приказује различите врсте разлетања стенског материјала приликом минирања на површинским коповима.



Слика 2.4 Различите могућности разлетања стенског материјала приликом минирања; а) разлетање из косине етажне, б) изнад зоне минског чепа, в) из зоне минског чепа [20]

Прорачун линије најмањег отпора се врши на више начина, али приликом прорачуна треба водити рачуна и узети у обзир већи број фактора који могу утицати на величину линије најмањег отпора. Примери образаца за вертикалне и косе минске бушотине према формули Сојузвзривпрома, где је у прорачуну узето неколико фактора дати су следећим изразима [35]:

- за вертикалне минске бушотине:

$$W = \frac{\sqrt{0,56 p^2 + 4 \cdot q \cdot m \cdot p \cdot H \cdot l_b} - 0,75 p}{2 q \cdot m \cdot H}, (m) \quad (2.3)$$

- за косе минске бушотине:

$$W = \frac{\sqrt{0,25 p^2 + 4 \cdot q \cdot m \cdot p \cdot H \cdot l_b} - 0,5 p}{2 q \cdot m \cdot H}, (m) \quad (2.4)$$

где су: p - количина експлозива по m' дужном бушотине, $\left(\frac{kg}{m'}\right)$

$$p = \frac{\pi d^2}{4} \Delta, \left(\frac{kg}{m'}\right) \quad (2.5)$$

q - специфична потрошња експлозива, $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$

m - коефицијент зближења бушотина,

H - висина етажне, (m)

l_b - дужина бушотине, (m).

Према формули Конија, величина линије најмањег отпора се може израчунати узимајући у обзир карактеристике стенског материјала и експлозива [37]:

$$W = 0,012 \cdot \left(\frac{2 \cdot q}{q_s} + 1,5\right) \cdot d, (m) \quad (2.6)$$

где је: q - специфична потрошња експлозива, $\left(\frac{g}{cm^3}\right)$
 q_s - специфична густина стене, $\left(\frac{g}{cm^3}\right)$
 d - пречник минске бушотине, (mm) .

2.4. Дужина пробушења минске бушотине

Циљ пробушења минске бушотине је да обезбеди дробљење стенског материјала испод доње етажне равни, како би се након минирања и чишћења етаже добио раван ниво пода етаже [35]. Прорачун одговарајуће дужине пробушења минске бушотине, потребно је правилно извршити како би се смањили додатни трошкови бушења и корекције након минирања, али и оставили бољи услови на етажној равни за припрему наредног минирања. Приликом дејства експлозивног пуњења испод нивоа доње етажне равни формира се левак експлозије, где је линија најмањег отпора једнака радијусу дејства експлозије, а дужина пробушења је једнака висини левка, што представља суштину пробушења [35].

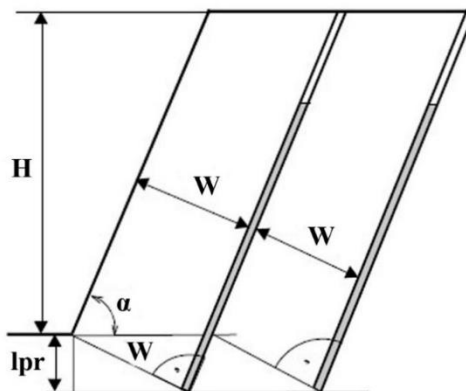
Дужина пробушења приказана је на слици 2.3, а на њену дужину утиче више фактора, од којих зависи и прорачун одговарајуће величине пробушења. Поред физичко-механичких и структурних карактеристика стенског материјала, на дужину пробушења утичу и висина етаже, величина линије најмањег отпора, пречник бушотине, врста експлозива и др. [35]. Према споменутим параметрима може се и вршити прорачун величине пробушења, односно она се може израчунати у односу на више параметара. Величина или дужина пробушења минске бушотине се може рачунати према [35]:

$$\text{висини етаже:} \quad l_{pr} = 10 - 15 \% \cdot H, (m) \quad (2.7)$$

$$\text{пречнику бушотине:} \quad l_{pr} = 10 - 15 \cdot d, (m) \quad (2.8)$$

$$\text{линији најмањег отпора:} \quad l_{pr} = 0,15 - 0,25 \cdot W, (m) \quad (2.9)$$

Постоје различита тумачења ефеката дужине минског пробушења, такође на основу тих тумачења и различити начини одређивања, где поред наведених имамо и приказ шеме и прорачуна за одређивање величине пробушења код косих минских бушотина [36]. Слика 2.5 даје шематски приказ поступка одређивања дужине пробушења код минске бушотине (ознаке су као на слици 2.3), односно косих минских бушотина.



Слика 2.5 Шематски приказ поступка одређивања дужине пробушења [36]

Образац за прорачун дужине пробушења код косих минских бушотина [36]:

$$l_{pr} = W \cdot \cos \alpha, (m) \quad (2.10)$$

2.5. Распоред минских бушотина

Ефекат минирања на површинским коповима зависи од распореда минских бушотина, односно у зависности од ширине и дужине фронта радова врши се пројектовање и постављање бушотина у једном или више редова [35]. Од распореда минских бушотина, односно геометрије минског поља зависе ефекти минирања у погледу гранулометријског састава одминираниог материјала. Корекцијом распореда при мењању вредности растојања између редова или између бушотина у реду може се утицати на величину одминираниог материјала, мада поред распореда минских бушотина на ово утичу и други фактори које је потребно ускладити.

Растојање првог реда од врха етажe, али и растојање између редова (b) које дефинише линија најмањег отпора (W) сваког наредног реда (растојање између редова је једнако линији најмањег отпора) може се одредити на следеће начине [36]:

- за вертикалне бушотине и вертикално чело етажe:

$$b = W, (m) \quad (2.11)$$

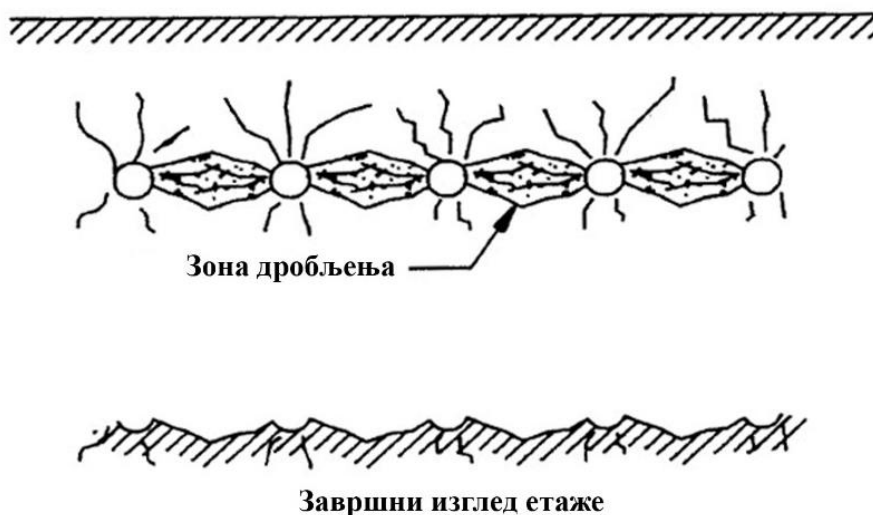
- за вертикалне бушотине и нагнуто чело етажe, у случају када је повећан отпор у ножици етажe:

$$b = W - H \cdot \operatorname{ctg} \alpha, (m) \quad (2.12)$$

- за косе минске бушотине:

$$b = \frac{W}{\sin \alpha}, (m) \quad (2.13)$$

Растојање између бушотина у реду карактерише величина зоне дробљења од једног бушотинског пуњења, где уколико је то растојање мање у односу на линију најмањег отпора долази до радијалних пукотина између бушотина, стварајући зону дробљења [36].



Слика 2.6 Зона дробљења код малог растојања између бушотина у реду [40]

После линије најмањег отпора, растојање између бушотина код минирања представља други битан фактор за успешну реализацију минирања [36]. Слика 2.6 даје приказ зоне дробљења у случају када је линија најмањег отпора већа од растојања између бушотина у реду, као и завршни изглед етаже.

Према следећем обрасцу може се израчунати растојање између бушотина у реду (а) [36]:

$$a = m \cdot W, (m) \quad (2.14)$$

где је: m - коефицијент зближења.

Код етажног минирања, где је циљ што боље уситњавање стенске масе искуствено се узима у обзир да је растојање између бушотина у реду веће од линије најмањег отпора, односно да је коефицијент зближења $m > 1$ и може се усвојити фиксна вредност $m = 1,25$ [36]. Коефицијент зближења се креће углавном за класичне шеме минирања од 0,8-1,6 у зависности од степена дробљивости стене [35].

2.6. Дужина минске бушотине

Дужина минске бушотине представља параметар који чине висина етаже и дужина минског пробушења [35]. Од дужине минске бушотине зависи колика ће количина експлозива бити смештена у бушотину, што утиче на ефекте минирања. Минске бушотине такође у зависности од угла бушења могу бити косе и вертикалне, што такође утиче на резултате минирања, али и на ефекте и технологију бушења. Дужина минске бушотине се може рачунати на следећи начин [35]:

$$l_b = H + l_{pr}, (m) \quad (2.15)$$

Ако су минске бушотине под углом, односно ако су у питању косе минске бушотине, рачуна се преко следећег обрасца [35]:

$$l_b = \frac{H}{\sin\alpha} + l_{pr}, (m) \quad (2.16)$$

где је: α - угао нагиба минске бушотине, ($^\circ$)
 H - висина етаже, (m)
 l_{pr} - дужина пробушења минске бушотине, (m)
 l_b - дужина минске бушотине, (m).

Минирање косим минским бушотинама има своје предности у погледу искоришћења енергије експлозива, смањења потреса услед минирања, као и постизање веће стабилности косина и безбеднијег рада, а недостаци су ти да се код константне висине етаже, са углом нагиба бушотине повећава и дужина бушења, такође тешко је одржавати паралелан положај минских бушотина [35].

2.7. Дужина минског чепа и минског (експлозивног) пуњења

Мински чеп представља горњи део минске бушотине, који је запуњен одређеном врстом материјала како би се ограничило дејство гасне енергије услед експлозије и усмерило на дробљење стенског материјала [38]. Да би експлозивно пуњење правилно функционисало и да би се контролисало дејство експлозивног пуњења, као и разлетање стенског материјала, минска бушотина мора бити адекватно затворена односно дужина минског чепа мора бити одговарајућа [38].

На дужину минског чепа утиче више параметара, а то су дужина минске бушотине, линије најмањег отпора, пречника бушотине и други, према томе потребно је добро ускладити и оптимизовати параметре са дужином минског чепа како би дробљење стенског материјала и ефекат дејства експлозије били позитивни. Квалитет минског чепа зависи од врсте материјала и дужине чепа, где се сматра да величина која је оптимална за зачепљење износи 5% од пречника бушотине, али зависи од облика и величине зрна који се користи при зачепљењу [36]. Дужина минског чепа зависи од доста параметара, али то су параметри слични као и код линије најмањег отпора, па се може израчунати помоћу следећег обрасца [36]:

$$l_{\zeta} = (0,7 - 1,3) \cdot W, (m) \quad (2.17)$$

Дужина минског пуњења у минској бушотини зависи од количине експлозива која се у бушотину смешта, као и од дужине минске бушотине и чепа, па се према томе може израчунати преко следећих израза [35]:

$$l_p = l_b - l_{\zeta}, (m) \quad (2.18)$$

или:

$$l_p = (H + l_{pr}) - l_{\zeta}, (m) \quad (2.19)$$

где је:
 l_p - дужина минског пуњења, (m)
 H - висина етажe, (m)
 l_{pr} - дужина пробушења минске бушотине, (m)
 l_b - дужина минске бушотине, (m)
 l_{ζ} - дужина минског чепа, (m).

У зависности од висине етажe, као и ограничења у погледу количине експлозива, експлозивно пуњење може бити раздвојено, а може бити и континуално, што такође утиче на дужину минског пуњења, а касније и на ефекте минирања.

2.8. Шема иницирања

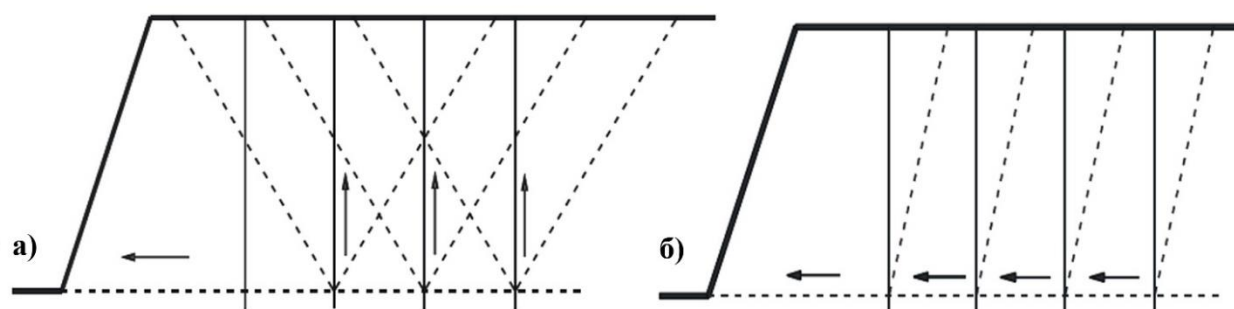
Шема иницирања код минирања представља план минирања, односно дефинише:

- начин отварања минског поља и приказ бушотине која се прва активира,
- одговарајући редослед иницирања минских бушотина, како би се постигао добар редослед у обрушавању стенског материјала при минирању на минском пољу и правац обрушавања материјала током минирања,
- могућност контролисања нивоа потреса услед минирања, контролом броја бушотина које се истовремено иницирају,
- укупно време трајања код минирања и време иницирања минских бушотина од почетног иницирања минског поља [36].

Приликом одабира одговарајуће шеме иницирања потребно је познавати модел обрушавања материјала који је потребно остварити, систем иницирања који се употребљава, као и време успорења које је потребно применити приликом минирања [36].

2.9. Време успорења

Време успорења представља иницирање минског поља са успорењем, где се минска пуњења иницирају свако посебно или се иницирају као група пуњења, што се манифестује као посебан потрес приликом мињања. Избор времена успорења омогућава да се интензитет потреса услед мињања смањи у односу када би се иницирање минских пуњења вршило истовремено. Избор оптималног времена успорења зависи од тога да приликом иницирања минског поља, експлозија у појединачним бушотинама треба да почне, пре него што ударни талас експлозије стигне од претходног пуњења [34].



Слика 2.7 Дејство експлозивног пуњења; а) тренутно иницирање, б) милсекундно иницирање [34]

Време успорења између минских бушотина односно ефективно време успорења је разлика времена долазног импулса насталог приликом детонације минских пуњења по узастопним временским интервалима [34].

3. СЕИЗМИЧКИ ЕФЕКТИ УСЛЕД МИНИРАЊА

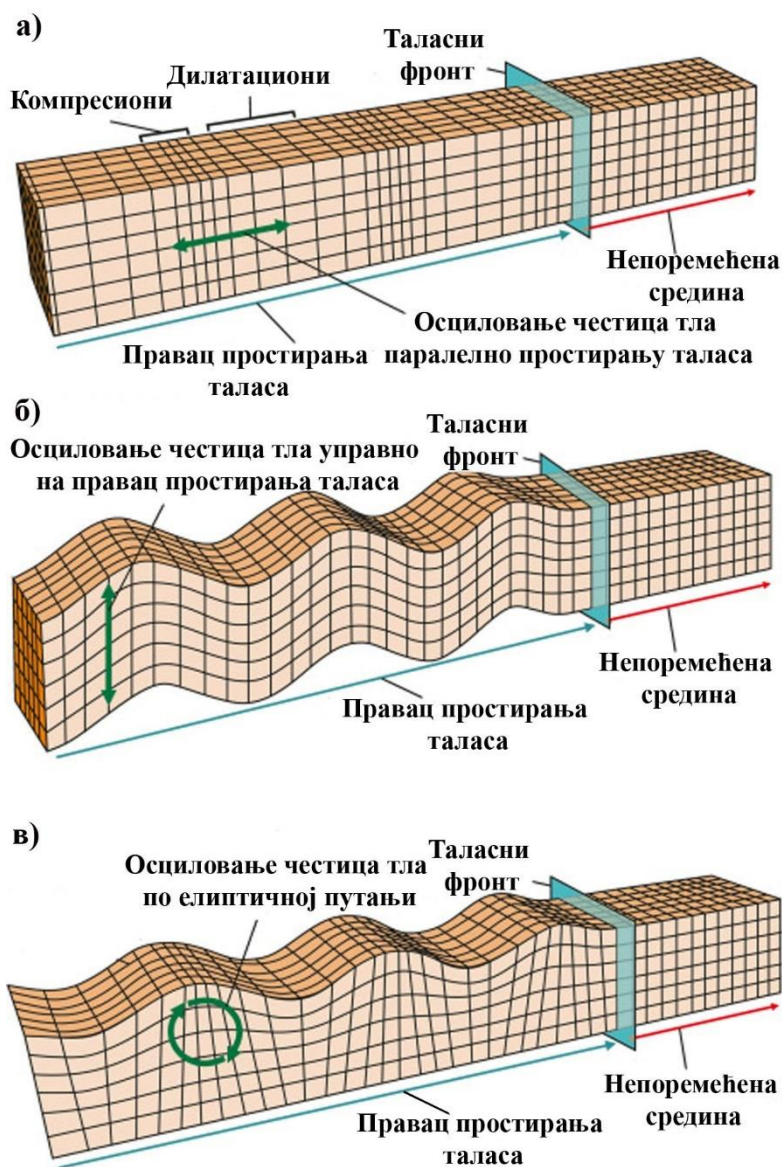
Приликом минирања настају сеизмички таласи који су слични таласима који се јављају приликом земљотреса, али су и различити па се према томе користе специјализоване скале за оцену таласа који настају приликом минирања [41]. Потреси који настају услед минирања и њихов интензитет зависе од параметара бушења и минирања, али и од растојања од места минирања до објеката у непосредној близини локације на којој се изводе радови на минирању. Развојем технологије и појавом многобројних врста сеизмичких инструмената, као и захваљујући достигнућима из области бушења и минирања допринела је и лакшем контролисању, али и праћењу потреса који настају услед минирања.

Данас се бушење и минирање изводи у различите сврхе, али најчешћи су у области рударства при експлоатацији чврстих минералних сировина површинским или подземним типом експлоатације, у грађевинарству при изградњи тунела, при уклањању остатака објеката или стенског материјала у циљу изградње темеља у урбаним срединама, приликом рушења објеката и сл. Минирање прати и појава потреса који настају услед минирања, а како се у већини случајева радови одвијају у близини објеката, потребно је контролисано праћење сеизмичких потреса, како не би било нежељених ефеката.

Приликом минирања енергија која се ослобађа од експлозива, ствара бушотински притисак који врши напрезања у материјалу око бушотине, где након извршеног рада и одбацивања стенског материјала, притисак у бушотини опада и нестаје сила која је вршила напрезање, док се стенски масив иза минског поља враћа у стање пре напрезања и настаје осциловање [41]. На сеизмичке ефекте утиче много параметара при бушењу и минирању, које је потребно ускладити како би се негативни ефекат појаве сеизмичких таласа свео на минимум. Кроз ово истраживање врши се анализа утицаја линије најмањег отпора као параметра који може утицати на потресе услед минирања, односно утицај њеног одступања од пројектованог. На основу претходних истраживања, али и лабораторијског модела који је рађен кроз истраживање докторске дисертације, установљено је да повећање потреса узрокује веће одступање линије најмањег отпора од пројектоване. Одступање приликом минирања на самом терену може се посматрати и као увећање призме обрушавања од сваке бушотине, где вишак материјала утиче на потресе, али и жељену гранулацију стенског материјала.

3.1. Врсте сеизмичких таласа

Сеизмички таласи могу бити запремински и површински, где код запреминских таласа разликујемо два основна типа, а то су уздужни таласи (лонгитудинални или компресиони таласи) и попречни таласи (трансверзални), док код површинских таласа имамо више типова зависно од трајекторије кретања честица средине [34]. Уздужни таласи представљају таласе где је осциловање честица у некој средини паралелно правцу простирању таласа, док се код попречних таласа честице средине осцилују управно на правац простирања таласа [42]. На слици 3.1а и 3.1б може се видети детаљан приказ правца простирања таласа и осциловања честица тла код уздужних таласа и попречних таласа.



Слика 3.1 Врсте сеизмичких таласа у зависности од кретања честица средине; а) уздужни (лонгитудинални) талас, б) попречни (трансверзални) талас, в) Рејлијев талас [43]

Површински таласи су назив добили према дебљини слоја по коме се простиру и у зависности од трајекторије осциловања честица тла има их више врста, као што су: Рејлијеви таласи или таласи типа R, где се осциловање честица тла врши по елиптичној путањи, кретање се одвија у вертикалној равни, затим Лав таласи или таласи типа Q, честице осцилују управно на правац простирања таласа, где се кретање одвија у хоризонталној равни и таласи типа С који представља комбинацију Рејлијевих и Лав таласа, а честице се померају по дијагоналној путањи [34]. Слика 3.1в даје приказ површинског типа таласа односно Рејлијевих таласа, где је приказано осциловање честица тла по елиптичној путањи.

Брзина запреминских и површинских таласа може се израчунати преко следећих израза [42]:

– уздужни (лонгитудинални) таласи (c_l):

$$c_l = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1-2\mu)(1+\mu)}}, \left(\frac{m}{s}\right) \quad (3.1)$$

- попречни (трансверзални) таласи (c_t):

$$c_t = \sqrt{\frac{E}{\rho^2(1+\mu)}}, \left(\frac{m}{s}\right) \quad (3.2)$$

- Рејлијеви таласи (c_R):

$$c_R = \frac{0,86+1,14\mu}{1+\mu}, \left(\frac{m}{s}\right) \quad (3.3)$$

где је: E - модул еластичности, $\left(\frac{N}{m^2}\right)$

ρ - густина стене, $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$

μ - Поасонов коефицијент.

3.2. Карактеристике и параметри осциловања

При изучавању сеизмичких таласа, односно потреса услед минирања одвојено третирамо зоне разарања, трајних и еластичних деформација, где уз помоћ низа поступака и емпиријских формула се могу раздвојити и предвидети поменуте зоне [41]. Зона еластичних деформација је највише распрострањена у области сеизмике минирања и при регистровању осцилација у овој зони могуће је вршити анализу:

- појединачних или укупних параметра минирања (количина експлозива, распоред бушотина, дубина и број бушотина, растојање од места минирања, врста експлозива и сл.),
- утицај геолошких услова,
- утицај спреге тло-објекат,
- утицај сеизмичких осцилација на тло и објекте [41].

Проучавање потреса услед минирања, који настају при простирању таласа кроз неку средину и тиме изазивају осциловање честица, може се поједноставити тако што се посматра као хармонијско осциловање таласа, где се могу анализирати следећи параметри као што су: померај, брзина и убрзање [37]. Слика 3.2 приказује хармонијско осциловање таласа, са означеним параметрима који карактеришу осциловање.

Прорачун параметара врши се помоћу следећих образаца [37]:

- за померај:

$$y = A \cdot \sin(\omega t) \quad (3.4)$$

- за брзину:

$$v = A \cdot \omega \cdot \cos(\omega t) \quad (3.5)$$

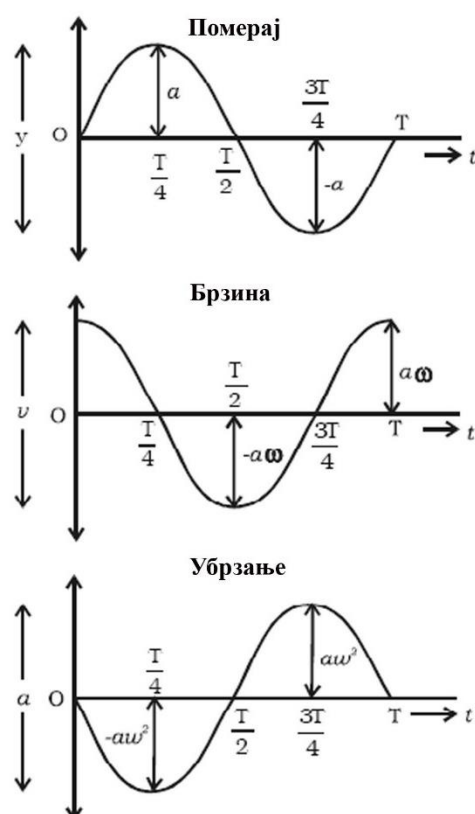
- за убрзање:

$$a = -A \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega t) \quad (3.6)$$

где је: A - амплитуда помераја, (m)

ω - угаона фреквенција, $\left(\frac{rad}{s}\right)$

t - време, (s).



Слика 3.2 Хармонијско осциловање [44]

3.3. Фактори који утичу на потресе услед минирања

Приликом минирања треба водити рачуна о два основна фактора који утичу на сеизмичке ефекте, односно на потресе услед минирања, а то су количина експлозивног пуњења по интервалу иницирања и растојања од места минирања [41]. Поред ова два фактора на потресе минирања утичу и фактори: линија најмањег отпора, време успорења, девијација приликом бушења, растојање између бушотина и сл.

3.3.1. Карактеристике радне средине

На простирање таласа знатно утиче литологија стенске масе, такође и чврстоћа, густина, порозност стенске масе значајно утичу на брзину простирања таласа, где је код чврстих стена виша фреквенција [45]. Потреси услед минирања су интензивнији у растреситом тлу него у чврстим стенама, а присуство дисконтинуитета у стенској маси утиче на промену правца ширења таласа [46]. Познато је да се при минирању угља стварају потреси са ниским фреквенцијама у поређењу са минирањем у каменоломима и грађевинарству, а разлог је што дебели слојеви јаловине на тлу које се обично сусрећу при експлоатацији угља погодују развоју површинских таласа ниске фреквенције [47].

Присуство слојева, пукотина и раседа приликом кретања таласа услед потреса делују на расипање осциловања честица тла [45]. Преласком таласа преко дисконтинуитета губе се неке од бочних компоненти кретања честица тла, а степен преусмеравања кретања честица тла је повезан са учесталашћу дисконтинуитета стенског материјала [45]. Расипање осциловања честица тла у стенском материјалу може се карактерисати помоћи три механизма:

- Вискозно пригушивање осциловања честица тла, ефекат који је израженији на вишим фреквенцијама и праћен трендом нижих фреквенција осциловања честица тла са повећањем удаљености од места минирања,
- Апсорпција енергије чврстог трења при осциловању честица тла, која је већа за стене са сложеном структуром и високом порозношћу,
- Расипање осциловања честица тла при рефлексији код дисконтинуитета и нехомогености слојева у стени, при чему су интеракције између рефлектованих импулса често праћене трендом селективног слабљења нижих фреквенција осциловања честица тла [45].

У области минирања, утицај карактеристика стенског материјала на брзину смањења осциловања честица тла са растојањем варира [45]. Због нехомогене природе стенског материјала, немогуће је направити поуздано теоријско предвиђање нивоа слабљења осциловања честица тла, која се очекује на локацији, где се радови одвијају [45].

Карактеристике стенског материјала спадају у факторе који утичу на интензитет потреса услед минирања, али се не могу контролисати, једино је могуће то кориговати контролисаним и прилагођеним параметрима минирања са условима у којима се минирање врши односно условима радне средине [34]. Радове на бушењу и минирању, као и карактеристике експлозива потребно је увек ускладити према одговарајућим прорачунима и условима радне средине, односно карактеристикама радне средине, како би и сами потреси били у границама прописаних.

3.3.2. Количина експлозивног пуњења по интервалу успорења

Приликом пуњења минских бушотина потребно је водити рачуна о количини експлозива која се иницира по интервалу успорења, нарочито при минирању у непосредном окружењу објеката, јер овај фактор веома утиче на јачину потреса који могу настати услед минирања. Количина експлозива по интервалу иницирања је фактор који се може контролисати, али и прилагодити за конкретне услове у којима се радови изводе [34]. Према различитим условима и прописима о јачини потреса према стању објеката, овај фактор треба ускладити и добро прорачунати како не би дошло до нежељених ефеката.

Време успорења и шема иницирања одређују количину експлозива по интервалу успорења, тако што се шемом иницирања може задати иницирање са различитим временом успорења између бушотина, а избором времена успорења може се подесити да у једном интервалу буде иницирана једна или више бушотина уколико је то потребно [34].

При испитивању односа количине експлозивног пуњења, растојања од места минирања и јачине потреса могуће је израчунати очекивану брзину честица преко следећег обрасца, што такође представља закон осциловања тла [48]:

$$V = K \cdot \frac{Q^\alpha}{r^\beta} \quad (3.7)$$

где је:

- V - очекивана брзина честица, $\left(\frac{m}{s}\right)$
- Q - максимална количина пуњења експлозива по интервалу иницирања, (kg)
- K - коефицијент пригушења брзине честица,
- r - растојање од позиције минирања до мерног места, (m)
- α - експонент количине пуњења,
- β - експонент фактора нагиба.

3.3.3. Растојање од места минирања

Зависно од места минирања растојање неког објекта на коме се региструју потреси утиче на јачину потреса услед минирања, где су потреси јачи уколико је мерно место у непосредној близини места минирања, док са повећањем тог растојања опада интензитет потреса. Променом растојања не мења се само интензитет потреса услед минирања, већ се мења и карактер тих потреса, на краћим растојањима су доминантне високе фреквенције, а на већим растојањима импулс који је настао као последица минирања се развија у нискофреквентни талас [34]. Слика 3.3 даје приказ растојања објекта од места минирања.

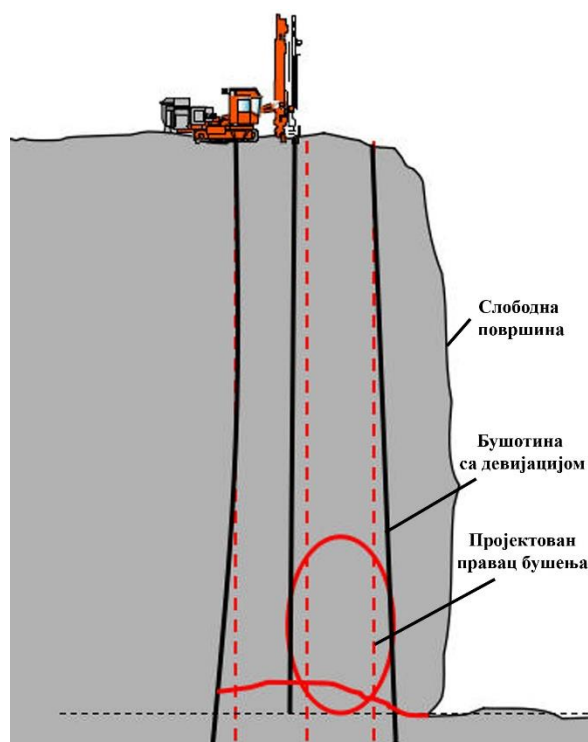


Слика 3.3 Приказ растојања објекта од места минирања [37]

3.3.4. Девијација бушотине и пречник минске бушотине

Приликом израде минских бушотина које су велике дужине може доћи до одступања бушења од жељеног правца, које доводи до повећања или смањења отпора у ножици етажe, што утиче и на одступање линије најмањег отпора од пројектованог стања. На девијацију поред велике дужине бушотине, утиче и пречник, тако што се девијација чешће јавља код мањих пречника, а израженија је код косих бушотина или бушотина под углом [34].

При девијацији могу се јавити већи потреси услед минирања, јер се повећава отпор у ножици етажe, као и величина линије најмањег отпора. Такође се може јавити лоша гранулација одминираниог материјала, као и стопа које могу настати на дну етажe након минирања. Девијација бушотине уколико она одступа од жељеног правца, када је близу слободне површине може довести и до разлетања стенског материјала. Развојем технологије и појавом разних уређаја могуће је вршити проверу правца бушења на терену, што може спречити појаву нежељених ефеката. На слици 3.4 приказан је поступак бушења са пројектованим правцем бушотина и са њеним одступањем тј. девијацијом у односу на пројектовану вредност и слободну површину.



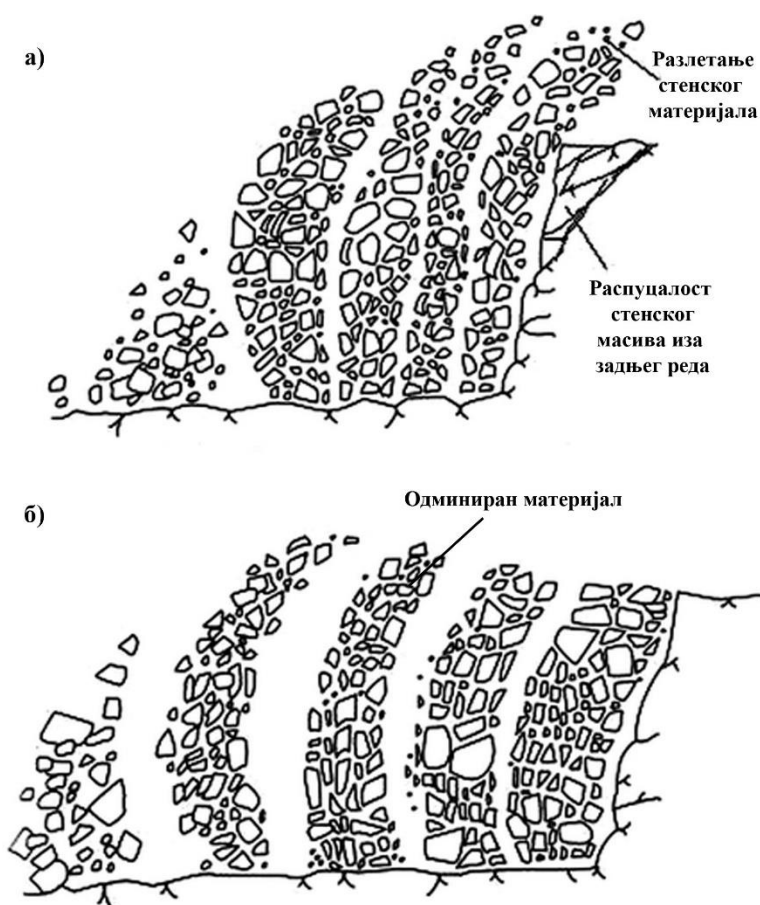
Слика 3.4 Приказ девијације при бушењу минских бушотина [49]

Одабиром одговарајућег пречника бушења и дужине минских бушотина, може се утицати на смањење девијације приликом бушења, али и на количину експлозива која се иницира. Код бушотина са великим пречником повећава се количина експлозива која стаје у бушотину што може утицати негативно у погледу потреса [34].

3.3.5. Време успорења и шема иницирања минских бушотина

Време успорења представља одређен временски интервал при ком се врши иницирање минске бушотине, од кога зависи колика ће количина експлозива бити иницирана, што утиче на интензитет потреса услед минирања. Са различитим врстама успорења у бушотини могуће је иницирати одређену количину експлозива по једној бушотини уколико је континуирано пуњење или ако је раздвојено пуњење могуће их је иницирати посебно или у једном временском интервалу (успорењу).

Одабиром одговарајућег времена успорења и при површинским везама, односно шемом иницирања може се утицати и у одређеној мери контролисати ниво потреса. Највећи утицај на смањење потреса је код примене раздвојеног пуњења, где се иницирањем у различитом временском интервалу између пуњења у једној бушотини може смањити ниво потреса, тако што се посебним иницирањем код раздвојеног пуњења дупло смањује количина експлозива или више пута. Одговарајуће време успорења између редова може довести до стварања слободне површине у наредном реду, исти случај је и код успорења између бушотина у реду, где се тако смањује количина експлозива која се иницира у једном временском интервалу [34]. Слика 3.5 даје шематски приказ како изгледа стенска маса при минирању са одговарајућом шемом минирања односно успорењем између редова и када то време успорења није одговарајуће.

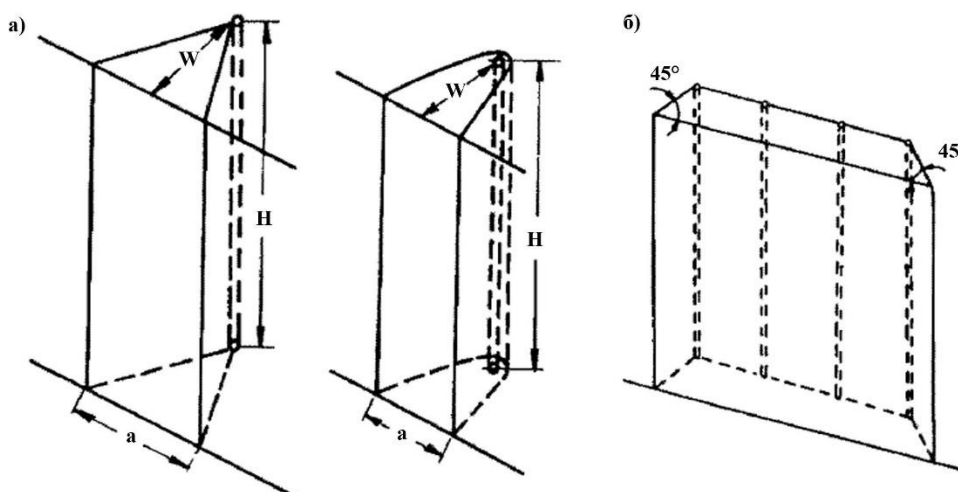


Слика 3.5 Приказ дејства времена успорења и стварање нове слободне површине; а) недовољно време успорења, б) одговарајуће време успорења [50]

3.3.6. Линија најмањег отпора и запремина одминираног материјала

Линија најмањег отпора утиче на потресе услед минирања тако што при великој линији најмањег отпора гасови експлозије имају велики отпор услед дробљења стенске масе, где се део енергије експлозије претвара у сеизмичку енергију и доводи до повећаних потреса услед минирања [34]. Свако одступање линије најмањег отпора од пројектованог стања може довести до негативних ефеката, па и у случају мале линије најмањег отпора енергија која се ослобађа услед минирања може довести до разлетања стенског материјала до великих удаљености.

Код већих одступања линије најмањег отпора као што је поменуто долази до повећаног интензитета потреса при минирању, што је и предмет истраживања докторске дисертације, али са већим одступањем долази и до повећања стенског материјала који се минира односно запремине призме обрушавања. Развојем технологије и применом софтвера могуће је детаљно анализирати овај утицај, односно добити тачне податке колико је бушотина у првом реду минског поља удаљена од слободне површине. Слободна површина у већини случајева није идеално равна већ постоје неравнине које могу утицати на ефекте минирања, на следећој слици 3.6 дат је приказ параметара призме обрушавања са идеалном слободном површином.



Слика 3.6 Приказ запремине призме обрушавања; а) запремина једне минске бушотине, б) запремина више минских бушотина [35]

Рачунање запремине призме обрушавања односно запремине одминираниог материјала од једне бушотине може се рачунати преко обрасца 3.8.

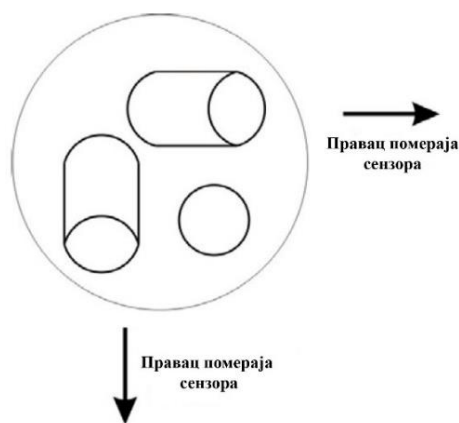
$$V = a \cdot W \cdot H, (m^3) \quad (3.8)$$

где је:
 H - висина етажe, (m)
 W - линија најмањег отпора, (m)
 a - растојање између минских бушотина, (m)

Применом софтвера за анализу параметара бушења и минирања, као и одговарајућим уређајима може се утицати на корекцију линије најмањег отпора приликом пројектовања, како би се негативни ефекти умањили. Израдом 3D модела, уз примену савремених технологија (беспилотних летелица, скенера и сл.) може се преко софтвера детаљно анализирати удаљеност сваке бушотине првог реда минског поља у односу на слободну површину, где са применом поменутих технологија и израдом модела добијамо стање и изглед слободне површине као што је и на терену.

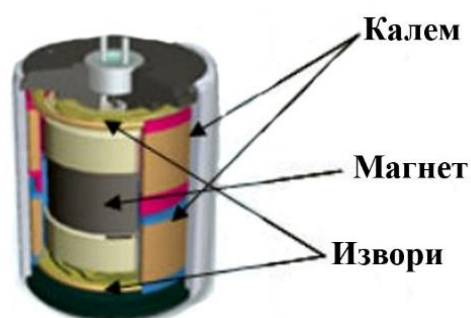
3.4. Мерење потреса услед минирања

Појава потреса услед минирања може се регистровати инструментима специјализованим у ту сврху који се називају сеизмографи, уређаји високе прецизности који су малих димензија, мобилни и лако преносиви тако да се могу постављати на било ком делу локације, где се радови одвијају. Сеизмографи се обично састоје од сензора који су осетљиви на кретање, блокова обраде сигнала и блокова који служе за приказ интензитета потреса [41]. Сензори који се налазе у инструменту, могу бити интегрисани унутар кућишта или екстерни, а за повезивање са кућиштем користи се кабл, напајање инструмента се врши помоћу батерија које су код савремених инструмената пуњиве. Осетљивост сензора омогућује адекватно регистровање потреса услед минирања, као и комплетан запис свих вредности брзине осциловања честица тла целокупног минирања. Слика 3.7 даје приказ изгледа сензора код сеизмографа, који врше мерење потреса према три компоненте и три одвојена записа за: лонгитудинални, трансверзални и вертикални талас.



Слика 3.7 Положај сензора унутар кућишта сеизмографа [34]

Унутар сеизмографа се налазе три независне сензорске јединице, које су једна у односу на другу постављене под правим углом, где је један сензор постављен вертикално, а два хоризонтално, а сваки реагује на покрете дуж своје осе [41]. Сензор представља трансдуктор који кретање тла претвара у електрични напон, а унутар сензора постоји намотај жице који виси у сталном магнетном пољу [41]. Сваки покрет се региструје тако што је магнет везан за кућиште сензора и он се не покреће, док намотај који виси у магнетном пољу је слободан и он се покреће у случају потреса [41]. Ови сензори су веома осетљиви и свако померање које настаје као потрес од минирања бележе у виду записа са кога се могу очитати детаљно подаци о параметрима потреса. На слици 3.8 приказан је шематски приказ делова сензора код сеизмографа.



Слика 3.8 Механизам унутар сензора [51]

Приликом регистровања података инструмент бележи запис, преглед записа и увид у вредности могуће је извести уз помоћ система за репродуковање, развојем технологије данас су најчешће дигитални записи који се врло лако могу анализирати и прегледати поново [41]. На тржишту данас постоји више произвођача инструмената за мерење потреса услед минирања, а то су: Instantel, АВЕМ Vibracloc, NOMIS Seismographs, GeoSonics-VibraTech и други, који су са развојем технологије углавном дигитални сеизмографи и са врло развијеном софтверском подршком за анализу података и записа.

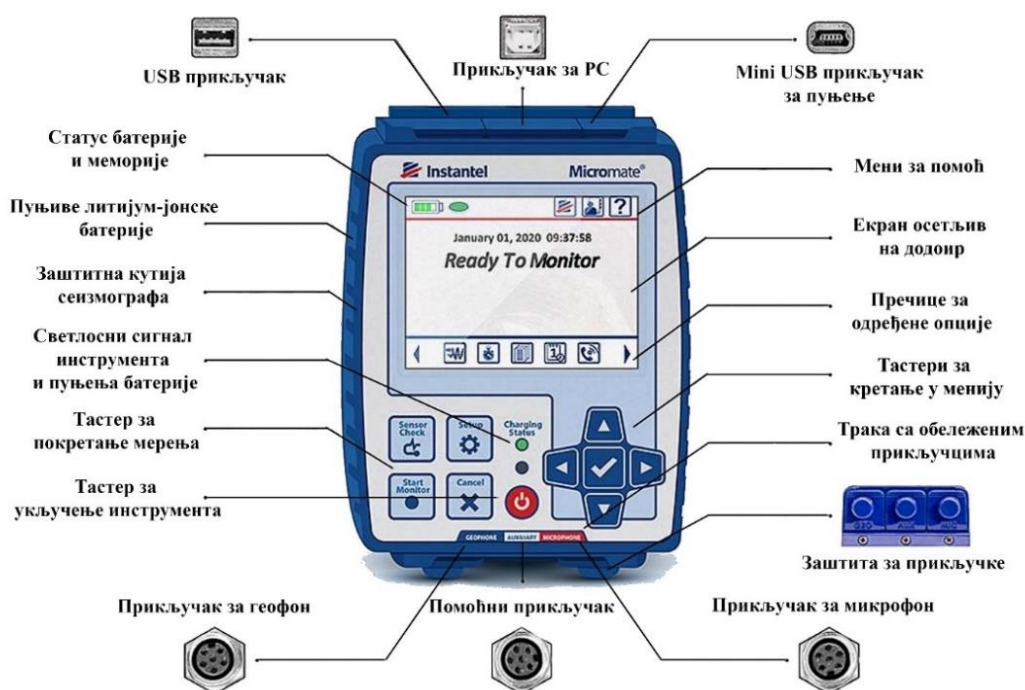
3.4.1. Врсте сеизмографских система

Постоји много врста сеизмографских система који се разликују према врсти бележења записа и мерења. Данас су неки од њих мање у употреби, док су тренутно дигитални сеизмографи највише у употреби. Врста сеизмографа који постоје су: аналогни сеизмограф, сеизмограф са магнетном траком, сеизмограф збира вектора, барографски сеизмограф, аутоstartујући сеизмограф и дигитални сеизмограф [41]. Принцип рада свих наведених сеизмографа је веома

сличан, где су основне разлике у прегледу и интерпретацији записа на основу потреса тла услед мињања.

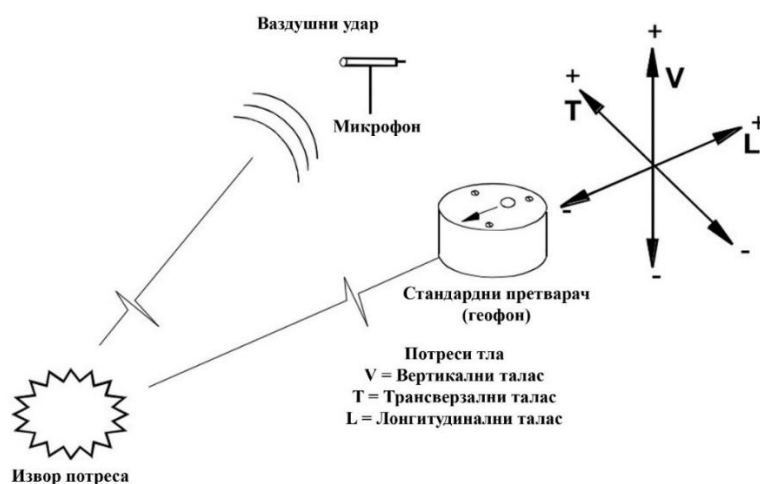
3.4.2. Дигитални сеизмографи и начин мерења

Ови уређаји представљају потпуно електронске инструменте за мерење потреса услед мињања и ваздушних ударних таласа насталих у рударству, саобраћају, грађевинарству, итд [41]. Тренутно је на тржишту више врста дигиталних инструмената који су веома практични за употребу. Поседују широк опсег температурних разлика (од -20°C до $+80^{\circ}\text{C}$), имају издржљиво и водоотпорно кућиште, као и могућност мерења четири канала и вредности помераја, брзине и убрзања честица тла, али и ваздушних ударних таласа [41]. Приказ резултата је веома прегледан на LCD дисплеју, где се исти могу прегледати и анализирати на рачунару, са могућношћу израде штампаних података [41]. На слици 3.9 приказан је изглед кућишта дигиталног сеизмографа “InstanTel Micromate”, Канадске производње са означеним деловима инструмента.



Слика 3.9 Изглед кућишта дигиталног сеизмографа “InstanTel Micromate” [52]

Дигитални сеизмографи врше снимање у временским тренуцима, семпловима односно интервалима узорковања, где по правилу резолуција снимака износи 2^n узорака или снимака по секунди [34]. Постављање инструмената врши се на одређеној локацији, где је потребно посматрање дејства потреса услед мињања. Постављање се врши учвршћивањем сензора за подлогу унутар самог објекта (подрум, прагови и други чврсти елементи објекта), укопавањем сензора у земљу до 15 cm дубине и убадањем ножица које се монтирају на дно сензора у земљу или постављањем истог на подлогу и прекривањем тешким теретом нпр. џак тежине 4,5 kg. Сензор инструмента може бити интегрисан у кућишту или ван њега где се додатно повезује са кућиштем уз помоћ кабла, сензори региструју свако померање и врши се бележење података у инструмент. Правац постављања сензора мора бити ка месту извора потреса тј. места мињања, а то се изводи тако што имамо означену стрелицу на сензору коју треба усмерити ка извору потреса, а може се видети на слици 3.10. Инструменти бележе максималне вредности за померај, брзину и убрзање, вредност фреквенције, али могу вршити мерење нивоа ваздушних удара и буке [34].



Слика 3.10 Шематски приказ мерења потреса тла у односу на место минирања [53]

3.4.3. Карактеристике сеизмографа “Instantel Micromate”

Дигитални сеизмограф “Micromate” од фирме “Instantel” Канадског произвођача састоји се од кућишта инструмента, екстерног сензора и микрофона. Ова компанија поред овог модела има и модел “Minimate Pro” са интегрисаним сензором, али и старији модел “Blastmate”. У току овог истраживања коришћен је поменути модел “Micromate”, чији делови и изглед су приказани на слици 3.11. Инструмент има вишеструку примену, може се користити за праћење потреса од минирања, ваздушних удара од минирања, праћење потреса код грађевинских радова, побијања шипова, мониторинга приликом рушења објеката, тешког транспорта, анализи конструкција и др. [34]. Делови инструмента са сензором и микрофоном су приказани на слици 3.11.

Развој ових инструмената и софтвера који служе за обраду података омогућили да се приликом приказа регистрованих осцилација појављују резултати анализа различитих параметара осциловања, такође омогућавају да се снимљени подаци конвертују и извозе у различите врсте фајлова, како би се могли даље обрађивати [34]. Већина дигиталних инструмената за анализу осциловања поседују и могућност брзе Фуријеове трансформације за анализу фреквенције осциловања.



Слика 3.11 Модел “Instantel Micromate” сеизмографа за мерење потреса услед минирања [54]

Међународно удружење инжењера за минирање развило је стандарде који су такође усвојени и које морају задовољавати инструменти (сеизмографи) за регистровање потреса услед минирања [41]. На основу прописаних стандарда и захтева за прецизност инструмената врши се и калибрација инструмената како би они испунили одговарајуће захтеве. Прецизност инструмената у фреквентном домену која се захтева је $\pm 5\%$ или $\pm 0,5 \frac{mm}{s}$ или већа за вибрације и $\pm 10\%$ или $\pm 1dB$ или већа, за ваздушне ударе, а минимална прецизност сензора је у фреквентном распону од 4 – 125 Hz. Техничке карактеристике мерног инструмента коришћеног у току истраживања су представљене у табели 3.1.

Табела 3.1 Карактеристике мерног инструмента “Instantel Micromate” [55]

Опис	Техничке карактеристике
Врсте сензора	ISEE Триаксијални сензор (2-250 Hz), DIN Триаксијални сензор (1-315 Hz), Шведски сензор за минирање (5-300 Hz), Шведски сензор за побијање шипова (2-150 Hz), ISEE Триаксијални бушотински сензор (2-250 Hz), DIN Триаксијални бушотински сензор (1-315 Hz), ISEE Линеарни микрофон (2-250 Hz), Микрофон за ниво буке (Класа 1)
Димензије	101,6 x 135,1 x 44,5 mm (4,15 x 5,32 x 1,75 in)
Тежина	0,5 kg (1,1 lbs)
Батерија	Пуњива литијум-јонска батерија (10 дана коришћења након пуњења)
Кориснички интерфејс	10 тастера за одвојене функције
Екран	QVGA, 320 x 240 у боји екран и осетљив на додир
РС Интерфејс	USB
Помоћни прикључци	Спољашњи окидач и даљински аларм
Радно окружење	LCD радна температура: -10 to 55 °C (14 to 131 °F), радна температура електронике: -40 to 45 °C (40 to 113 °F), радна температура: -40 to 45 °C (40 to 113 °F)
Даљинска комуникација	Подржани модеми: „Sierra Wireless™ Airlink® RV-50, GX-400, LS-300“
Опционе карактеристике	Штампач: Прецизан и високе резолуције, GPS: Временски синхронизован и могућност преузимања координата, Vision (софтвер за складиштење података)

3.5. Методе у циљу смањења потреса услед минирања

Приликом минирања на површинским коповима долази до појаве сеизмичких потреса који могу изазвати негативан ефекат на објекте који се налазе у непосредној околини копа. Како би се ти потреси и негативни утицај умањили могуће је, као што је већ поменуто кориговањем параметара бушења и минирања свести тај ефекат на минимум. Потреси услед минирања могу се умањити и методом израде екрана у циљу стварања вештачке баријере или дисконтинуитета у стенској маси што умањује утицај сеизмике.

3.5.1. Шема иницирања и време успорења између минских пуњења

Корекцијом шеме иницирања може се смањити количина експлозива у повезаним пуњењима тако што се може извести смањење броја пуњења које се иницира у истом временском интервалу [41].

Променом шеме иницирања најједноставније се постиже управљање дејства експлозије, а постиже се смањење сеизмичког дејства, повећање степена уситњавања стенског материјала, добијање потребног облика одминираних масе [34]. Код адекватне шеме иницирања такође је битно и отварање минског поља, односно да смер иницирања увек буде супротан од правца у ком се налазе објекти у непосредној околини, јер тако импулс који се ствара је слабији и потреси могу бити слабијег интензитета.

Време успорења омогућује да се код иницирања минских пуњења свако пуњење или група пуњења манифестује као посебан импулс потреса, што такође доприноси смањењу потреса услед минирања [34]. У погледу ограничења сеизмике када имамо прорачунату количину експлозива која се мора иницирати у једном временском интервалу, време успорења мора бити адекватно како би се у тачно одређеном временском интервалу активирала прорачуната количина експлозива.

3.5.2. Количина експлозива по интервалу успорења

Смањење количине експлозива по интервалу успорења представља један од начина за умањење сеизмичког ефекта приликом минирања, а количина се рачуна према ограничењима у погледу сеизмике која је прописана одговарајућим стандардима. Данас у свету постоји велики број модела који пружају могућност прорачуна максималне количине експлозиве по интервалу успорења. Смањење количине експлозива такође може се постићи:

- променом шеме иницирања,
- раздвајањем минског пуњења,
- смањењем пречника бушења,
- смањењем пречника минског пуњења,
- смањењем дужине минске бушотине [34].

3.5.3. Примена раздвојених пуњења

Применом раздвојених пуњења у бушотини можемо смањити и потресе који настају при минирању, уколико раздвојена пуњења иницирамо засебно са одговарајућим временом успорења. Према ограничењима потреса уколико није могуће извршити корекцију висине етажа, а минско пуњење по бушотини које иницирамо у једном временском интервалу није у оквиру ограничења, тада можемо применити раздвојено пуњење. Засебним иницирањем раздвојених пуњења односно по времену успорења смањује се количина експлозива, ниво тог смањења зависи да ли је пуњење раздвојено два или више пута. Раздвајање пуњења се врши међучеповима чије димензије морају бити прорачунате адекватно како се импулси између пуњења не би пренели и истовремено иницирали. Међучепови варирају од 0,4 m код бушотина 34-36 mm, до 2,0 m за минску бушотину од 150 mm пречника [41].

3.5.4. Смањење висине етаже и дубине бушења

Приликом минирања у непосредној околини објеката, у већини случајева методе са корекцијом шеме иницирања или раздвојеним пуњењем некад нису довољне па је потребно извршити и кориговање висине етаже [41]. Смањењем висине етаже утиче се и на смањење дубине бушотина, што значи да се може лакше контролисати минирање и само пуњење минских бушотина мањим количинама експлозива и тако умањити сеизмички ефекат при минирању.

Дубина бушења или дужина минских бушотина се одређује у функцији висине етаже, дубине пробушења и угла бушења, смањењем дужине минских бушотина смањује се и количина експлозива у бушотини [34].

3.5.5. Дужина пробушења и угао минске бушотине

Дужина пробушења мора бити оптималне дужине испод нивоа етаже како би се спречило слабо искоришћење енергије експлозива на дну бушотине или ножици етаже, мала дужина пробушења доводи до појаве прагова (неравнина), а већа може изазвати велике потресе услед

минирања [34]. Приликом бушења минских бушотина код вертикалних бушотина може доћи до чешће појаве оптерећења у ножици етажне, због тога је предност на страни косих минских бушотина, јер целом дужином прате и нагиб слободне површине.

Како би се смањили потреси услед минирања потребно је прорачунати и пројектовати одговарајући нагиб минских бушотина, како би оне што мањи отпор имале у ножици, а константан целом дужином бушотине. Употребом косих бушотина је расподела енергије такође уједначена, али има и друге предности, а то су: већа стабилност косина, већа количина одминираних масе, боље дробљење стенске масе и др. [34].

3.5.6. Смањење пречника минске бушотине

Смањењем пречника минске бушотине директно се смањује и количина експлозива која се смешта у бушотину, међутим при смањењу пречника и његовим кориговањем, мора се вршити нови прорачун осталих параметара бушења и минирања. При смањеном пречнику минске бушотине смањује се и геометрија минског поља, добија се бољи просторни распоред енергије и боље уситњавање стенске масе [34].

3.5.7. Израда екрана као метода за смањење потреса услед минирања

Једна од метода која се може користи као метода за снижење потреса услед минирања након обављених радова на бушењу и минирању, а где није могуће извршити смањење потреса неким од поменутих метода, представља метода израде екрана. Израда екрана у циљу заштите од минирања треба да обезбеди вештачки створену баријеру или дисконтинуитет у стенском масиву између извора потреса и објекта на коме се посматра утицај сеизмике. Приликом израде екрана успостављају се две зоне:

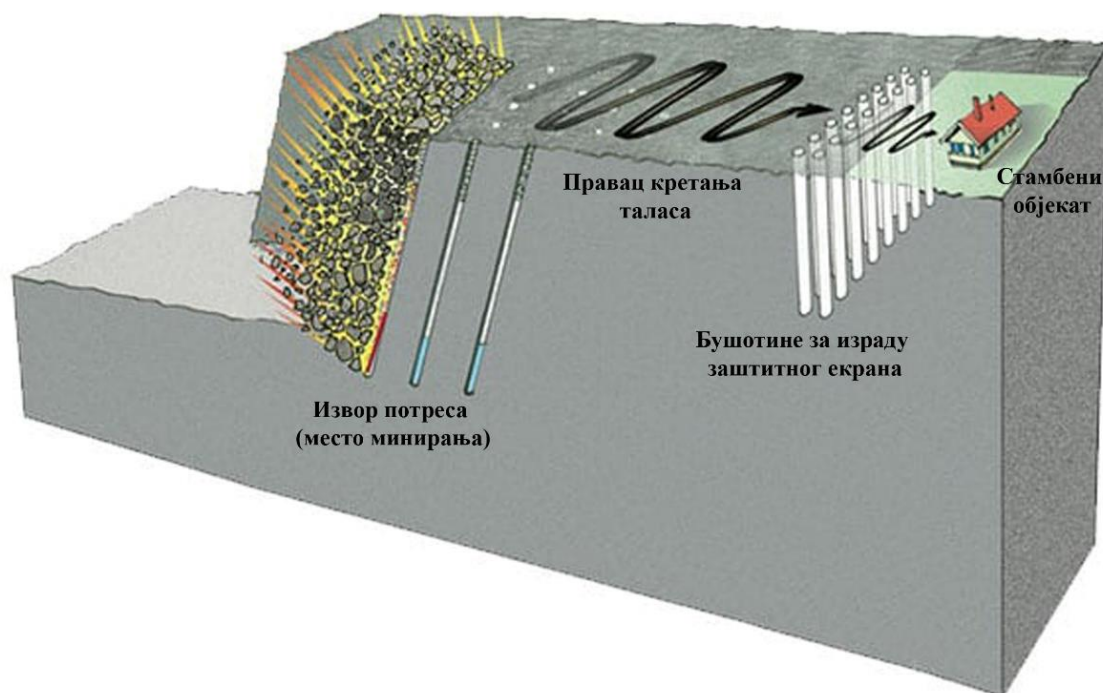
- зона која има сврху заштите од потреса услед минирања,
- зона у којој долази до повећања ефеката минирања [34].

Екрани захтевају већа улагања и они се изводе само када се минирање врши зонама које су осетљиве, а могу бити:

- екрани у виду пукотина,
- екрани у виду слоја растрешене стенске масе [34].

Екрани се најчешће користе као заштита околних објеката од ефеката минирања и од потреса јер се њиховом израдом потреси могу знатно умањити и тако спречити негативни сеизмички утицај. Минирање у градским срединама, као што су уклањање стенског материјала при изради темеља за будуће објекте захтева израду екрана у циљу заштите околних постојећих објеката. Екрани у виду пукотина је могуће извести употребом минирања или применом експанзивних смеша.

Експанзивне смеше настале за потребе грађевинске индустрије нашле су широку примену при чему се без употребе експлозива уклањају и уништавају разни делови бетонских конструкција и слично, али врло брзо су нашле примену и у рударству, при експлоатацији украсног камена, у сврху одвајања и цепања блокова [56]. Свакако израда екрана употребом експанзивних смеша захтева претходно израду бушотина, које се касније користе за сипање смеша и израду пукотинског система између бушотина. Пречници бушотина које треба избушити су углавном мањег пречника, као и употреба експлозива мањег пречника због ограничења количине експлозива који се иницира по интервалу успорења, јер се минирање са израдом екрана обично одвијају у урбаним срединама [56].



Слика 3.12 Шематски приказ бушотина за израду екрана у циљу заштите објеката у непосредној околини од места минирања [57]

3.6. Стандарди за оцену сеизмичких потреса

Стандарди за оцену потреса који су данас у употреби су резултат више од пола века испитивања и истраживања, где је прво значајно истраживање започео U. S. Биро рударства 1930. године, а достигао је врхунац 1942. године када је објављен Bilten 442 под називом „Сеизмички ефекти минирања у каменоломима“ [41]. Према новијим критеријумима из 1980. године U. S. Биро за рударство износи нова истраживања минирања површинских копова у R. I. 8507, где је установљено да при ниским фреквенцијама услед осциловања тла долази до резонанце објеката, што резултује повећању помераја и напрезања, а наглашава повезаност штете и фреквенције [41].

Данас у свету постоји више регулатива према којима се прописују стандарди за оцену сеизмичких потреса, где су за различите врсте објеката урађене прегледне табеле са прописаним брзинама осциловања честица тла услед минирања. За оцену се користе регулативе и стандарди као што су: амерички, немачки, руски, аустралијски, канадски, чешки, француски, аустријски, енглески и др. Сваки од ових стандарда прописани су за различите објекте који су грађени на различитим типовима тла. Тренутно је највише у употреби Немачки DIN стандард који је усвојен у већини земаља Европске уније, али је у употреби и код нас.

3.6.1. Немачки DIN-4150 стандард

Овај стандард је настао у бившој Савезној Републици Немачкој, где су прописане максимално дозвољене вредности брзине осциловања тла, према зависности од значаја и стања објеката, а у фреквентном опсегу 5 до 80 Hz за једно до два минирања дневно [41]. Дозвољене максималне брзине осциловања честица тла према DIN-4150 представљене су у табели 3.2.

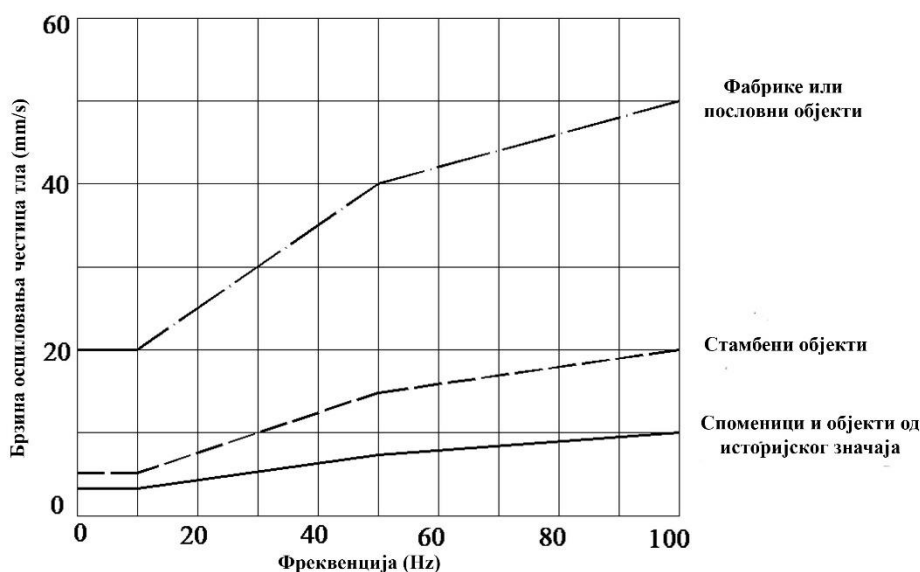
Табела 3.2 Ограничења брзине осциловања честица тла у mm/s DIN-4150 стандард [58]

Врста грађевине	Темељи			Подови на највишем спрату грађевине
	< 10 Hz	10-50 Hz	50-100 Hz	Све фреквенције
1. Фабрике или пословни објекти	20 mm/s	20-40 mm/s	40-50 mm/s	40 mm/s
2. Стамбени објекти	5 mm/s	5-15 mm/s	15-20 mm/s	15 mm/s
3. Споменици и објекти од историјског значаја	3 mm/s	3-8 mm/s	8-10 mm/s	8 mm/s

Брзине осциловања тла у фреквентном опсегу већем од 100Hz могу имати већу вредност

Захваљујући великом броју мерења брзине осциловања честица тла на темељима објеката добијене су искуствене вредности, које служе за процену краткотрајних осцилација, али од изузетног значаја су и оне у подручју високе таванице, где се узима највећа вредност хоризонталних појединачних компоненти и мерењем осцилација на том месту добија се реакција објекта на померај темеља [34].

Максималне дозвољене брзине осциловања тла које су приказане у табели 3.2 дају ограничења за три различите врсте објеката у зависности од фреквенције, док се према слици 3.13 може видети зависност брзине осциловања честица тла услед минирања и фреквенције са граничном вредности у виду дијаграма. Приказана зависност је такође означена за три различите врсте објеката, где се може уочити да са већом фреквенцијом, већи је и праг дозвољених брзина осциловања честица тла.



Слика 3.13 Прагови осциловања за брзине већих грађевинских објеката у функцији фреквенције у DIN-4150 стандарду [59]

4. ОПТИМИЗАЦИЈА ПАРАМЕТАРА БУШЕЊА И МИНИРАЊА ПРИМЕНОМ МОДЕРНИХ ТЕХНОЛОГИЈА

Потреба за применом софтвера у области рударства је све чешћа и доноси значајне предности како при пројектовању, тако и у самој експлоатацији лежишта минералних сировина. Како се широм света отвара велики број површинских и подземних рудника, захтева се брзо и ефикасно праћење процеса од припреме на отварању лежишта до крајњег производа. Примена софтвера у ове сврхе значајно даје предност у области пројектовања, оптимизације и праћења стања на терену, тако што скраћује време потребно за обављање ових операција и пружа могућност располагања прецизним подацима. Развој модерних технологија, као што су беспилотне летелице, омогућиле су брзо и ефикасно снимање различитих терена и помоћу фотограметрије израду 3D модела, који дају врло прецизну ситуацију са терена, за обраду у наменски предвиђеним софтверима и као резултат тога данас имамо могућност приступа, анализи и обради врло прецизних података [60].

Током процеса експлоатације лежишта чврстих минералних сировина веома битан сегмент представља бушење и минирање, које је најјефикаснији и најјефтинији вид уситњавања стенске масе. Представља веома сложен процес који захтева велику пажњу, како би се минимизовали нежељени ефекти, као што су сеизмички потреси, ваздушни удари, разлетање комада и слично. На резултате минирања утичу параметри као што су геометрија минског поља, линија најмањег отпора, дужина минске бушотине и чепа, висина етажне итд. Добром и прецизном оптимизацијом параметара бушења и минирања, могу се знатно побољшати ефекти и резултати минирања, спречити или свести негативне ефекте на минимум, а примена софтвера је то омогућила уз детаљну и лакшу анализу кроз визуелни приказ обрађених података. Коришћењем софтвера за праћење резултата бушења и минирања може се добити детаљан приказ стања минског поља и оптимизовати параметри како би се добили што бољи резултати минирања [60].

Појава великог броја софтвера у свету допринела је добијању што прецизнијих података и бољем прегледу стања пре радова на бушењу и минирању. Примена софтвера у комбинацији са модерним технологијама коју чине беспилотне летелице такође је значајна, јер софтвери коначно могу располагати са прецизним улазним подацима добијеним са терена. На светском тржишту тренутно постоји велики број софтвера специфичне намене тј. софтвера који се баве пројектовањем и оптимизацијом параметара бушења и минирања, а поступак рада им је углавном сличан и већина софтвера се заснива на снимцима са терена, изради модела, пројектовања минског поља, оптимизацији параметара бушења и минирања итд. [60].

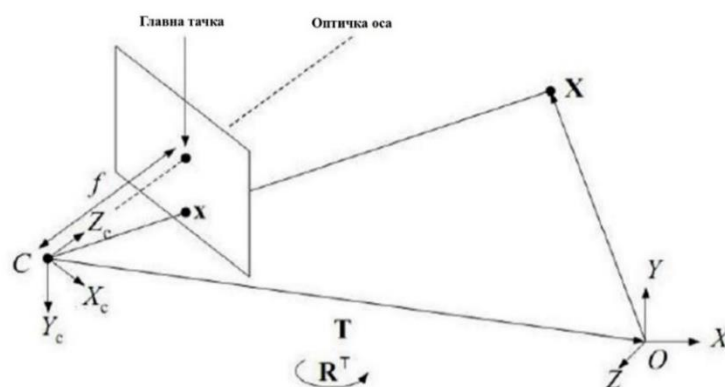
4.1. Израда модела, обрада података и математички модел одређивања 3D координата

Развој модерних технологија и софтвера омогућио је да тренутно у свету коришћењем беспилотних летелица, ласерских скенера и сл., могуће прикупити велики број просторних података и њиховом обрадом у специјализованим софтверима моделирати. Уз помоћ методе фотограметрије могуће је преко великог броја фотографија и њиховом обрадом добити као резултат облак тачака, који представља просторне податке са X, Y, Z координатама, који се користе за израду модела терена. Фотограметрија представља науку о добијању поузданих информација о карактеристика површине и објеката без физичког контакта са објектима, као и о мерењу и тумачењу ових информација [61]. У последње време велики је развој у области дигиталне фотограметрије применом беспилотних летелица UAV (Unmanned Aerial Vehicles), где

су повећане студије о верификацији и тачности резултата дигиталних снимака и дигиталних модела терена [62].

На основу забележених фотографија неког простора или локације врши се обрада истих у специјализованим софтверима за израду облака тачака и дигиталног модела терена, чији се подаци користе касније за специјализоване софтвере за оптимизацију параметара бушења и мињања. Прикупљање података о геометрији 3D из 2D снимка захтева додатне информације, што се може решити применом две методе, где једна метода захтева да се смањи број степени слободе коришћењем претходног знања о самој сцени, а друга метода је коришћење истих тачака које се јављају на два или више снимка и то реконструкција сцена се постиже триангулацијом [63]. Како је данас у свету рударство веома развијено и код нас тренутно постоји већи број површинских копова који заузимају велике површине, те површине захтевају доста времена за израду карти и планова класичним методама, где употреба беспилотних летелица и примена софтвера за обраду дигиталних слика скраћују време за израду планова и ситуационих карти копова.

Идентификоване тачке на фотографијама које се преклапају омогућују израду 3D модела и генерисање облака тачака, а SFM метода (Structure from Motion) омогућује аутоматску екстракцију тачака и у исто време одређује позиције и оријентације камере, координате 3D тачке сцене и калибрационе параметре камере, а MVS (Multi View Stereopsis) алгоритам на основу SFM повећава густину облака тачака и врши реконструкцију снимљене сцене [63]. На следећој слици 4.1 дат је приказ методе структуре из покрета, SFM методе.



Слика 4.1 SFM метода или метода структуре из покрета (шематски приказ) [63]

Релација која представља везу између тачака реалног координатног система и координатног система камере је [63]:

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \sim \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

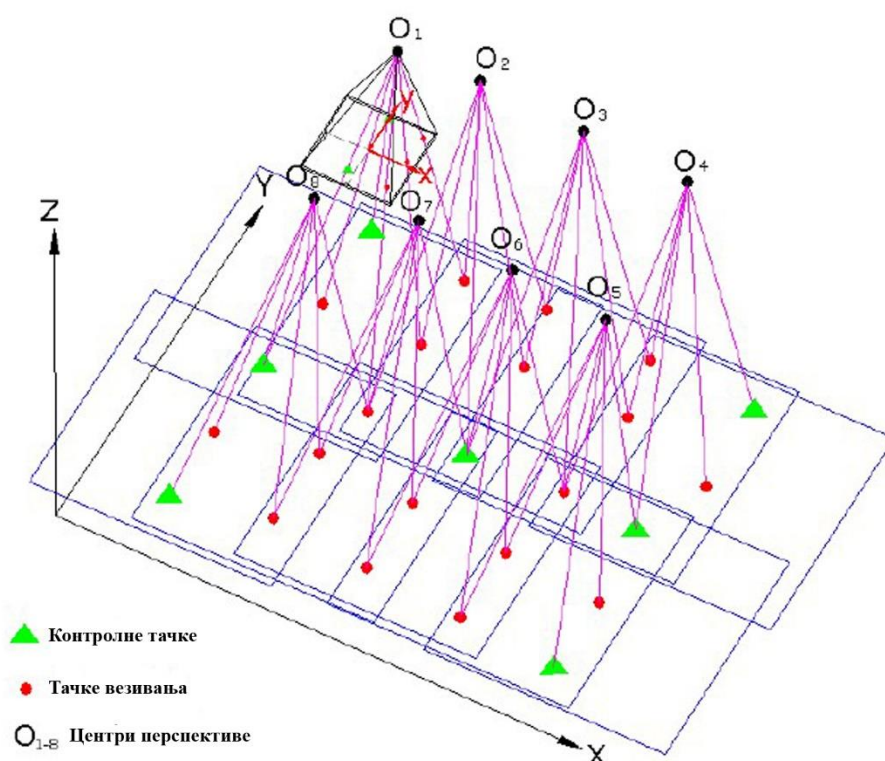
где је: R – ротациона матрица 3x3 која репрезентује ротацију камере,

T – translација камере.

Релације које дају везу 3D тачака у координатном систему камере и 2D равни фотографије су [63]:

$$X = f \frac{X_c}{Z_c} \quad Y = f \frac{Y_c}{Z_c} \quad (4.2)$$

где је f фокална дужина.



Слика 4.2 Приказ блока триангулација [64]

$$g(X, R, T) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n w_{ij} \left\| P(x_i, R_j, t_j) - \begin{bmatrix} u_{i,j} \\ v_{i,j} \end{bmatrix} \right\|^2 \quad (4.3)$$

$g(X, R, T)$, означава локацију тачке на земљи: где је w_{ij} индикатор променљиве, представља да ли је видљива тачка (i) на слици (j), док $P(x_i, R_j, t_j)$ означава предвиђену локацију фотографије, а последњи члан матрице ове формуле означава посматрану локацију фотографије [63].

Ради повећања тачности и прецизности израде модела уз помоћ дигиталних слика преко методе фотограметрије користе се и контролне тачке на површини локације коју снимамо. Контролне тачке на површини су неопходне за размену и нивелисање модела, како би се креирала позиција сваке фотографије у простору у односу на тло [65]. Контролне тачке се обележавају негде на површини са одговарајућим уређајима за позиционирање у простору, контролне тачке могу бити маркери нанети или неки већ постојећи детаљи у простору. Приликом обраде контролне тачке се означавају на фотографијама и коригују како би се тачност модела повећала или грешка модела у просторном позиционирању смањила.

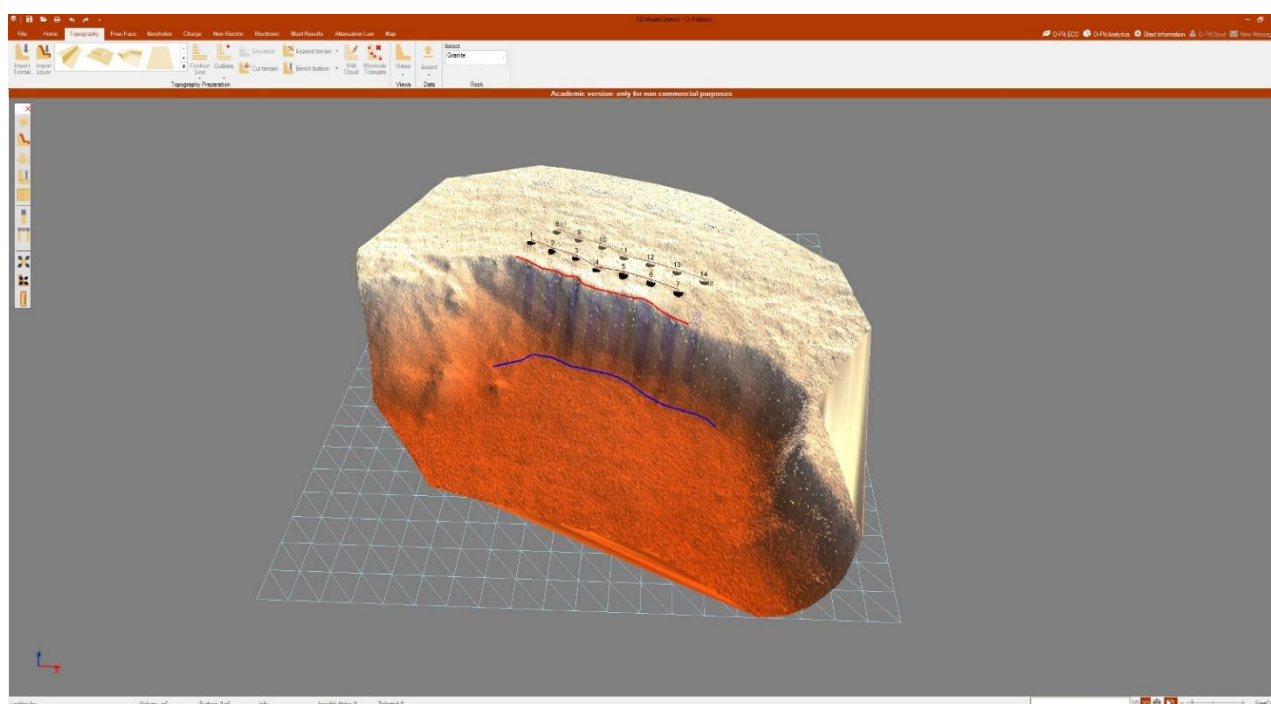
Обрада података на основу снимака врши се у специјализованим софтверима који су данас веома у употреби за израду дигиталних модела терена, облака тачака и сл., а најпопуларнији су: AgiSoft Metashape [66] и Pix4D [67]. Преко поменутих софтвера може се добити велики број тачака терена или дела терена и њиховом конверзијом подаци се могу користити у софтверима који су специјализовани за рударство односно бушења и минирања и њихову оптимизацију. Тачке на терену се добијају дакле обрадом дигиталних слика, где су оне састављене од пиксела, који су на компјутерском екрану сложени хоризонтално и вертикално, а сваки пиксел одговара одређеној локацији на Земљи и представља стварну површину коначних димензија [68].

4.2. Анализа и оптимизација параметара бушења и минирања на 3D моделу

Данашњи софтвери за анализу и оптимизацију параметара бушења и минирања користе за обраду података углавном просторних податке у виду тачака, које се могу добити снимањем терена применом беспилотних летелица, преко облака тачака или снимањем дела локације на којој се налази минско поље са ласерским скенерима који такође као податке дају тачке позициониране у простору по све три димензије. Њиховом обрадом у софтверу можемо добити дигитални модел терена са реалним приказом површине терена и слободне површине минског поља и кроз даљу анализу и оптимизацију добити прегледне податке и резултате могућих сценарија минирања. Наравно кориговањем параметара може се вршити промена и утицати на процену гранулометријског састава, трошкова бушења и минирања, процене сеизмичког утицаја и др.

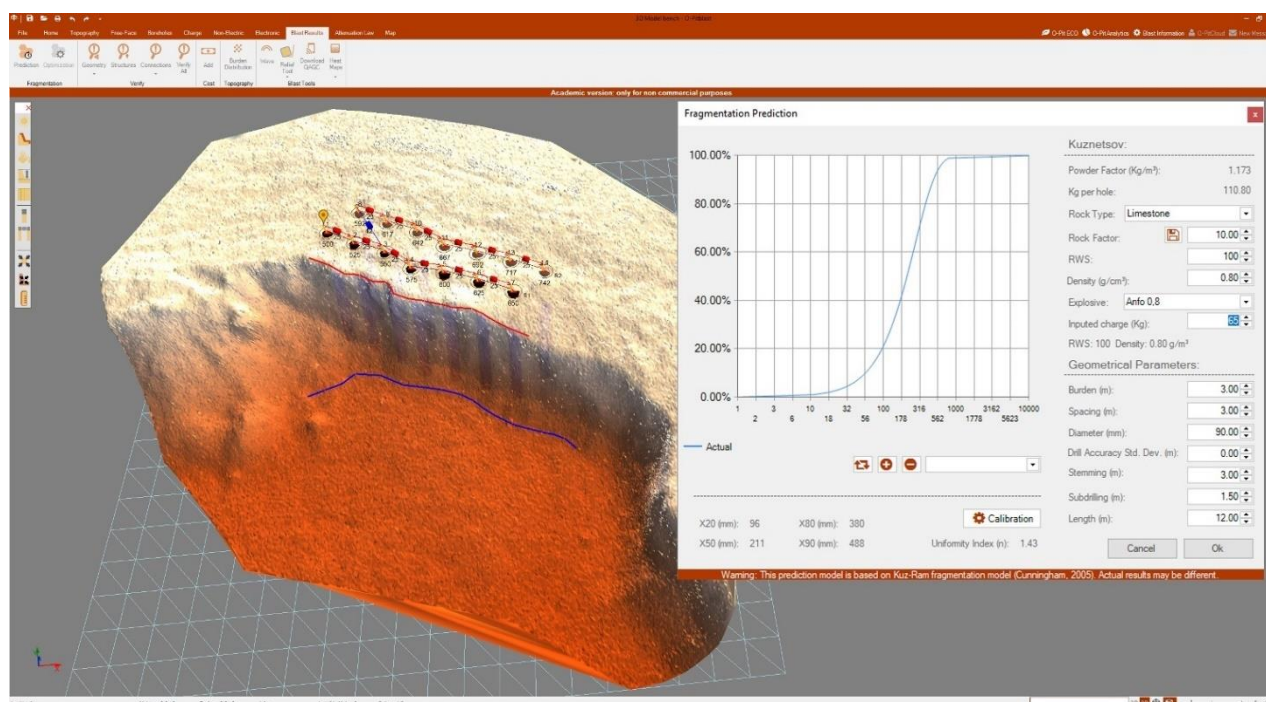
Постоји више софтвера специјализованих у сврху бушења и минирања радова, али кроз овај рад коришћен је софтвер O-Pitblast, истоимене компаније Португалског произвођача. O-Pitblast је софтвер за пројектовање, планирање, контролу и оптимизацију радова на бушењу и минирању, где испуњава све потребе инжењера да оптимизују, контролишу, смање трошкове и повећају безбедност током минирања. Ова платформа омогућава кориснику да увезе податке о површини терена, као што су топографија и карактеристике стенског материјала за пројектовање радова на бушењу [60].

Подаци о површини терена који се увозе су у виду тачака, где се на основу генерисања и обраде у софтверу може добити дигитални модел терена целог површинског копа, дела копа или самог минског поља. Поред дигиталног модела терена, на основу обраде податка могу се добити и изолиније терена. Слика 4.3 нам даје приказ изгледа модела минског поља спремног за пројектовање параметара бушења и минирања. Поред свих оперативних модула, постоје опције које омогућавају снимање података о минирању, израду планова и извештаја, графички приказ резултата, технологију праћења, корисничку контролу и вишеструко управљање пројектима [60].



Слика 4.3 3D модел етаже на којој се врши пројектовање радова на бушењу и минирању

O-Pitblast, софтвер омогућава праћење и анализу различитих параметара који утичу на резултате минирања, где многи параметри бушења и минирања, као што су шема минирања, количина експлозивних пуњења, утицај шеме бушења на фрагментацију стенског материјала, чија је анализа приказана на слици 4.4, односно Куз-Рам анализа [60].

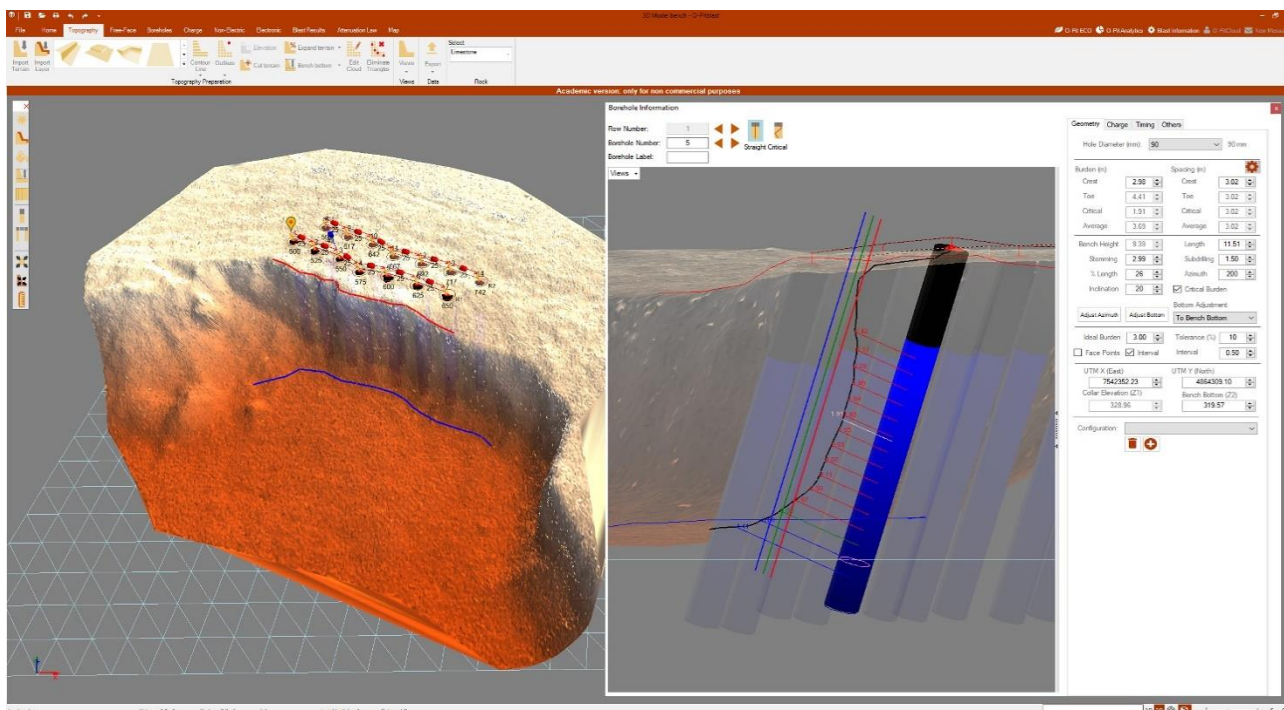


Слика 4.4 Шема иницирања и анализа величине комада одминирааног материјала

Софтвер поседује и алате за одређивање закона осциловања тла услед потреса који настају као последица минирања на површинским коповима. Алат омогућава предвиђање потреса тла приликом минирања, али и корекцију количине експлозива која се иницира по временском интервалу како би се смањио утицај сеизмике. Дијаграм дозвољених количина експлозива по интервалу иницирања, може се добити увозом података као што су брзине осциловања честица тла за све три компоненте (уздужни, вертикални и попречни таласи), растојање од мерне тачке до места минирања и сл. [60]. Такође, поред ових функција везаних за процену потреса услед минирања, софтвер пружа предикцију догађаја, али и накнадну анализу сеизмичких потреса.

Главна предност софтвера је могућност анализе и оптимизације параметара бушења и минирања са детаљним моделом терена и изгледом како целог копа, тако и дела копа, где се минирање врши. Модел омогућава реално стање са терена, где је могуће анализирати сваку бушотину појединачно, кориговати њене параметре како у првом реду бушотина, тако и у следећим. Софтвер поседује алат за приказ расподеле енергије на челу косине у зависности од угла бушотина и начина минског пуњења. Анализа појединачних бушотина по профилу, такође омогућава детаљан преглед вредности линије најмањег отпора дуж целе минске бушотине према слободној површини. Ове вредности треба да буду приближне пројектованој, али услед честе појаве да слободна површина или чело косине минског поља није равно, већ постоје неправилности дешава се да су те вредности веома различите. Овај алат у склопу софтвера даје упозорења где су линије најмањег отпора веће или мање од пројектованих, што може изазвати нежељене ефекте, као што су разлетање стенског материјала услед минирања или појава великих потреса услед минирања.

Предмет овог истраживања јесте да се употребом овог алата кроз лабораторијски модел и теренски утврди утицај одступања линије најмањег отпора, а потом израдом нумеричког модела такође потврди овај утицај на интензитет потреса услед минирања. Слика 4.5 даје приказ профила на коме се види могућност анализе линије најмањег отпора једне бушотине у првом реду минског поља.

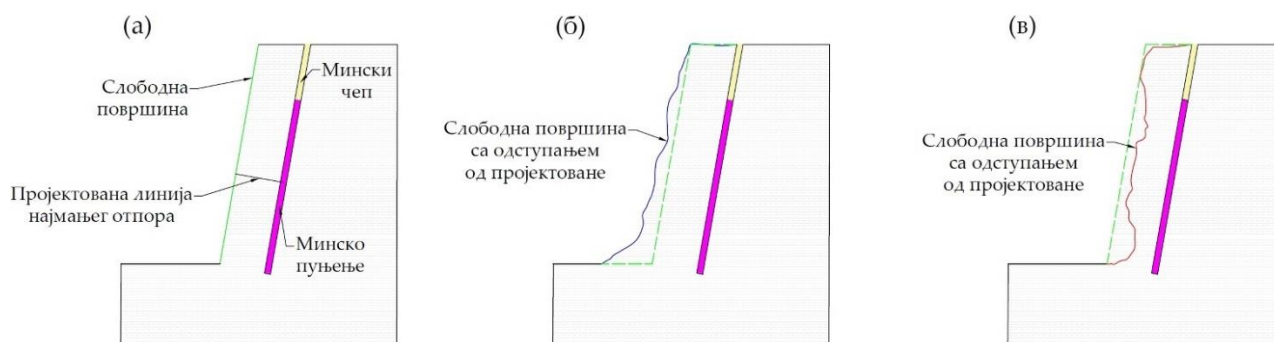


Слика 4.5 Приказ пресека на коме се види детаљна анализа линије најмањег отпора

5. МЕТОДОЛОГИЈА ЛАБОРАТОРИЈСКИХ И ТЕРЕНСКИХ ИСПИТИВАЊА

При изради минских бушотина на терену мора се водити рачуна о углу бушења како би се испратио нагиб етаже. Од параметара бушења зависи даљи ток радова, односно ефекти минирања. Често се на терену линија најмањег отпора не узима у детаљно разматрање, него у већини случајева бушотина прати нагиб етаже. Међутим на самом челу етаже увек постоје неравнине, које утичу на ефекте минирања. Развојем технологије и софтвера специјализованих за бушење и минирање много се напредовало у погледу анализе свих параметара бушења и минирања, а наравно и линије најмањег отпора која је у овом погледу веома битна. Изглед одступања линије најмањег отпора од пројектоване приликом бушења представљен је на слици 5.1 [1].

Утицај линије најмањег отпора на резултате минирања и нежељени ефекти минирања могу се објаснити кроз следећу слику, где су резултати минирања најповољнији када је линија најмањег отпора једнака пројектованој по целој дужини минске бушотине (зелена линија на слици 5.1а). Када је вредност линије најмањег отпора већа од пројектоване (плава линија на слици 5.1б), повећава се интензитет потреса услед минирања из минског поља, као и проценат негабарита у одминираним материјалу. Када је оптерећење мање од пројектованог, постоји ризик од разлетања стенског материјала који може неконтролисано излетети до већих удаљености, најчешће са чела етаже (црвена линија на слици 5.1в) [1].

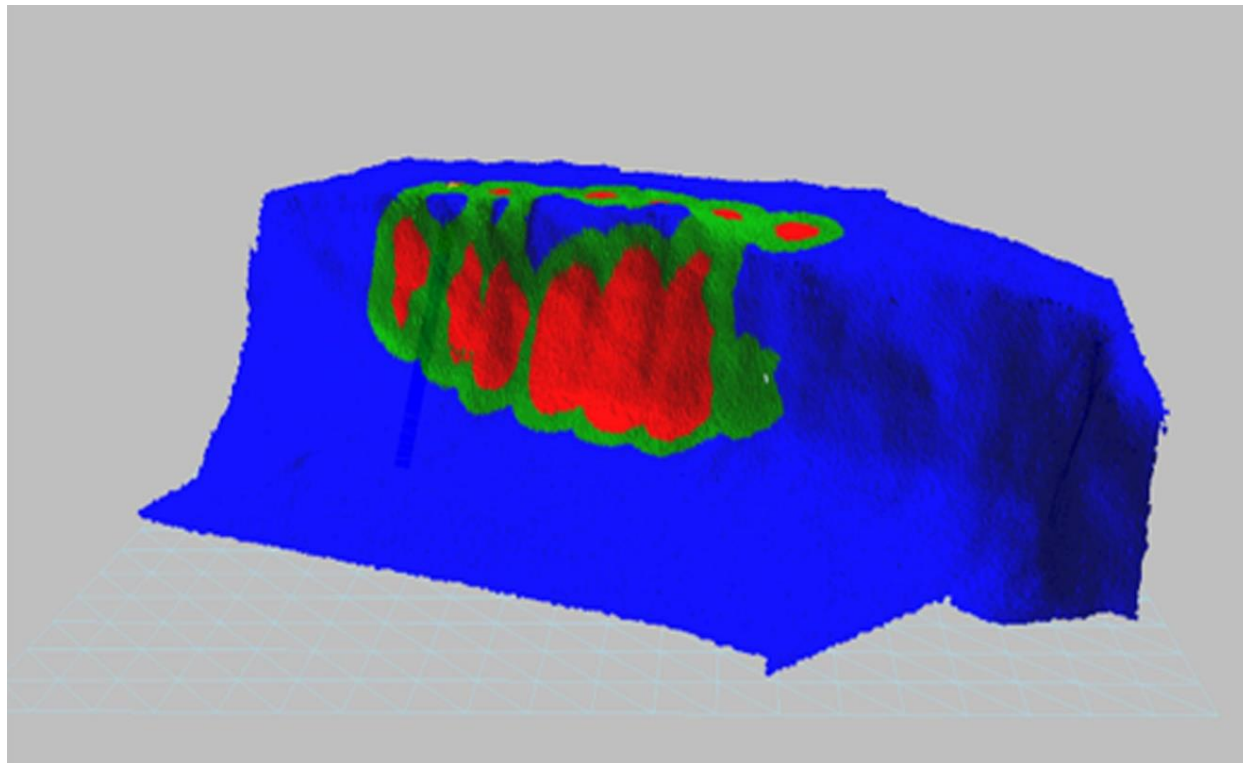


Слика 5.1 Приказ девијације линије најмањег отпора у односу на слободну површину етаже; а) бушотина са пројектованом линијом најмањег отпора, б) бушотина са већим вредностима линије најмањег отпора од пројектоване услед неравнина на челу етаже, в) бушотина са мањим вредностима од пројектоване [1]

Тренутно на тржишту постоји велики број специјализованих софтвера дизајнираних за бушење и минирање, који се могу користити за преглед и детаљну анализу параметара бушења и минирања [69]. У овом случају, за анализу величине линије најмањег отпора коришћен је софтвер O-Pitblast (верзија 1.5.62.0), производ истоимене компаније O-Pitblast, који се може користити за оптимизацију и анализу параметара бушења и минирања, али и резултата минирања.

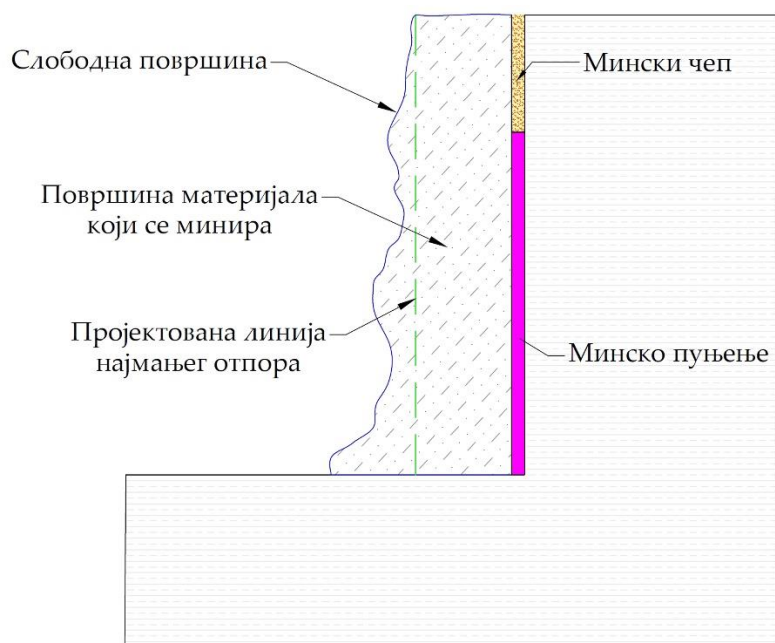
На моделу приказаном на слици 5.2 представљена је анализа вредности линије најмањег отпора у односу на слободну површину на челу етаже, где су одступања која су мања и већа од пројектоване линије најмањег отпора приказана различитим бојама. Зеленом бојом су означене зоне у којима је вредност линије најмањег отпора приближна пројектованој, а плавом бојом су зоне где постоје већа одступања линије најмањег отпора (вредност линије најмањег отпора је већа од пројектоване), док црвене зоне представљају зоне у којима постоје мање вредности линије најмањег отпора од пројектоване.

Због тога се може извршити корекција угла бушења како би се добила што већа зелена зона на моделу, побољшавајући ефекте минирања и смањујући нежељене ефекте, као што су разлетање материјала [70], потреси услед минирања и слично. Уз помоћ софтвера могуће је анализирати пресек сваке бушотине појединачно, што је резултирало идејом за оваквом врстом истраживања, где се разматра свако одступање величине линије најмањег отпора од пројектоване за сваку минску бушотину [1].



Слика 5.2 Тродимензионални модел слободне површине са терена, зелена боја када је вредност линије најмањег отпора приближна пројектованој, плава боја су већа одступања линије најмањег отпора од пројектоване, а црвене зоне су мање вредности линије најмањег отпора од пројектоване (O-Pitblast алат за расподелу вредности линије најмањег отпора по зонама на челу етаже [71])

Узимајући у обзир да је истраживање спроведено да би се испитао утицај девијације линије најмањег отпора на интензитет потреса услед минирања, посебно код већих одступања линије најмањег отпора, односно када је вредност линије најмањег отпора већа од оне која је пројектована приликом бушења. Лабораторијски модел ће показати како ова одступања утичу на интензитет потреса услед минирања, јер слободна површина на терену може бити неправилног облика. Како у већини случајева линија најмањег отпора није једнака у свим деловима на слободној површини чела косине, као и дуж бушотине, узима се у обзир и површина материјала који се минира. Површина минираног материјала, у овом случају, представља површину на попречном пресеку минске бушотине, која обухвата слободну површину и минску бушотину, како је то приказано и на слици 5.3 [1].



Слика 5.3 Површина материјала који се минира, коришћена у истраживању [1]

На основу закључака из претходних истраживања, може се узети у обзир да утицај повећања величине линије најмањег отпора утиче на повећање интензитета потреса услед минирања. Већа линије најмањег отпора утиче на повећање запремине призме обрушавања (запремине материјала који се минира), што утиче на расподелу енергија у делу слободне површине, као и на повећање интензитета потреса услед минирања [72]. Кроз истраживање представљено у овом раду врши се покушај доказивања ове зависност између лабораторијског модела кроз испитивање великог броја понављања минирања и тестирање модела на терену, као и израде модела за нумеричку анализу овог истраживања [1].

5.1. Лабораторијски модел

У раду са лабораторијским моделом спроведен је сличан поступак који би се одвијао на минском пољу код теренских радова, само мањих димензија, односно у блоку хомогеног састава са утврђеним механичким својствима и инструментално измереним брзинама простирања таласа кроз материјал. За лабораторијска испитивања коришћен је сипорекс блок димензија $250 \times 600 \times 250$ mm. Сипорекс блокови се користе као вештачки грађевински материјали и произведени су од квалитетног портланд цемента и финог кварцног песка [73]. Физичке и механичке карактеристике сипорекс блока су [1]:

- Чврстоћа на притисак $5 \frac{N}{mm^2}$;
- Запреминска маса $0,7 \frac{t}{m^3}$;
- Брзина ширења таласа $1900 \frac{m}{s}$.

Поступак мерења брзине уздужних и попречних таласа кроз материјал приказан је на слици 5.4, а мерења су вршена по дужини, ширини и висини блока.



Слика 5.4 Приказ мерења брзине уздужних таласа на блоковима са инструментом [1]

Током мерења коришћен је инструмент Швајцарског произвођача Proceq (Цирих, Швајцарска), Pundit PL200 [74], за испитивање и мерење брзине простирања таласа кроз сипорекс блокове. Техничке спецификације мерног инструмента Proceq Pundit PL200 су приказане у табели 5.1.

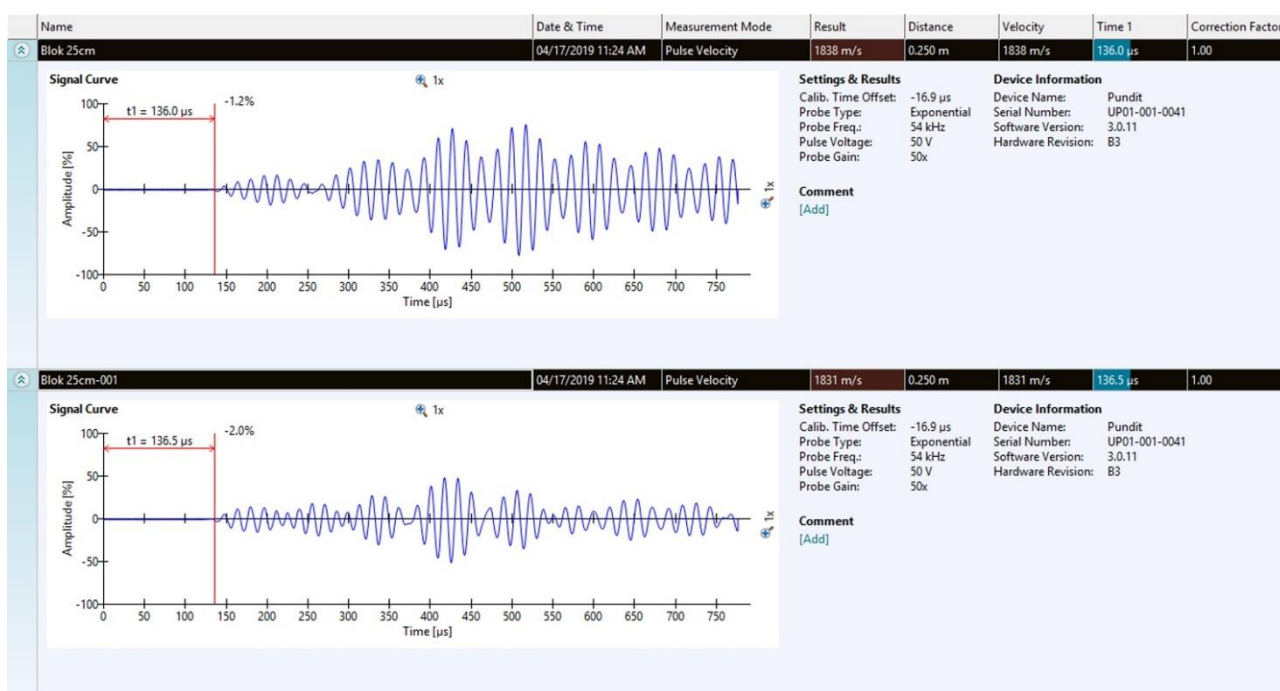
Табела 5.1 Карактеристике мерног инструмента “Proceq Pundit PL200” [75]

Опис	Техничке карактеристике
Пропусни опсег	20-250 kHz
Резолуција мерења	0,1 us
Напон	± 100 to ± 450 V (UPV)
Сигнал пријемника	1 to 10'000x (0 to 80 dB)
Фреквенција сигнала	24 – 500 kHz
Број канала	1
Монитор	7" екран у боји осетљив на додир (800 x 480 pixels) са процесором (два језгра)
Меморија	8 GB капацитет интерне меморије
Конекција	USB/Ethernet
Опције мерења	Брзина пулса, површинска брзина, дубина пукотина, линијско скенирање, површинско скенирање
Опсег мерења	До 15м у зависности од врсте материјала
Серијски број	UP01-001-0041
Произвођач	Proceq - Швајцарска, Цирих

Софтвер Proceq PL-Link (верзија 3.0) [76] се користи за извоз података са инструмента и приказ измерених вредности. Приликом извоза података, софтвер има опцију за анализу записа са инструмента и обраду података, као што је представљено на слици 5.5.

На блоку су бушене вертикалне бушотине, дужине 80 mm и пречника 8 mm, где су унутар бушотина постављане мале количине експлозивних пуњења (0,5 gr.), а дужина минског чепа износила је 30 mm. Иницирање минске бушотине вршено је електричним главицама који се користи као електрични упаљач у електричним детонаторима, а сваки пут је иницирана само једна минска бушотина. Пре сваког иницирања, направљена је фотографија блока, посебно слободне површине испред минске бушотине, како би се направио 3Д модел. Мерна тачка у односу на извор потреса (минску бушотину) била је за свако мерење на удаљености 150 mm од центра минског пуњења [1].

Након тога, софтверском обрадом је анализирана линија најмањег отпора дуж сваке минске бушотине (дуж бушотине постоји пар изведених вредности линије најмањег отпора, при чему се узима просек у обзир према процентуалном одступању од пројектованог стања). Вредности линије најмањег отпора унете у дијаграм, након чега је извршена упоредна анализа резултата на дијаграму. Упоређене су вредности линије најмањег отпора које су веће, једнаке и мање од пројектованих [1].



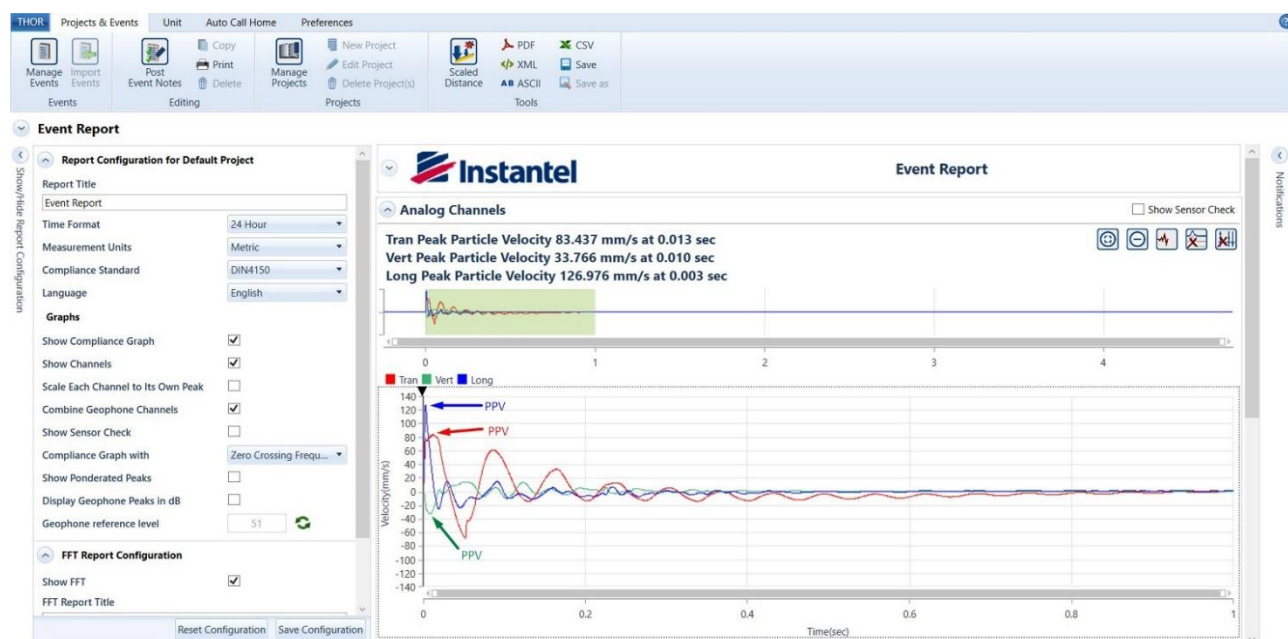
Слика 5.5 Приказ измерених вредности лонгитудиналних таласа са записом сигнала у Proseq PL-Link софтверу, плава линија представља уздужни талас, а црвена линија време одзива сигнала кроз материјал [1]

Мерење потреса услед иницирања сваке бушотине вршено је помоћу Micromate инструмента (Instantel, Отава, Канада) [77]. Micromate инструмент је намењен за праћење потреса услед мињања, нивоа буке и ваздушних удара. Резултати са инструмента Micromate су извезени и анализирани у специјализованом софтверу Thor [78], производ исте компаније. Пример мерења је приказан на слици 5.6. Micromate инструмент је опремљен са три канала, триаксијални сензор за праћење нивоа потреса и једним каналом за ниво ваздушних удара или микрофон за ниво буке [79]. Овај инструмент служи за прецизна мерења потреса тла (било да су потреси тла услед мињања, монтирања шипова, рушења или сл.).

На основу измерених података, овај инструмент обезбеђује као резултат запис целог потреса као таласа за све три компоненте (уздужне, вертикалне и попречне таласе), са могућношћу анализе максималне брзине осциловања честица тла (PPV), фреквенције, максималног убрзања и помераја [1].

У овом случају, Micromate је коришћен за мерење максималне брзине осциловања честица тла (PPV), параметар који се користи за мерење нивоа потреса услед минирања. PPV је такође важан параметар за контролу критеријума оштећења код грађевинских објеката приликом минирања [80]), као што су минирања на површинским коповима и представља максималну вредност забележену у једном временском интервалу. Максимална брзина осциловања честица (PPV) представља параметар за процену интензитета потреса услед минирања у зависности фреквенције осциловања, која се мери коришћењем сеизмографа током минирања на површинским коповима. Параметар (PPV) наведен је у многим стандардима који се користе за процену утицаја потреса услед минирања на објекте, као што је DIN 4150-3:1999 [81], приказано на слици 3.2.

Micromate је коришћен за мерење брзине осциловања честица тла за три компоненте помоћу триаксијалног сензора (геофона), где резултати мерења представљају уздужне, попречне и вертикалне компоненте потреса услед минирања. Према DIN стандарду, релевантан је максимум од три измерене компоненте који представља максималну брзину честица тла (PPV) [1]. Техничке карактеристике мерног инструмента Micromate InstanTel су представљене у табели 3.1.

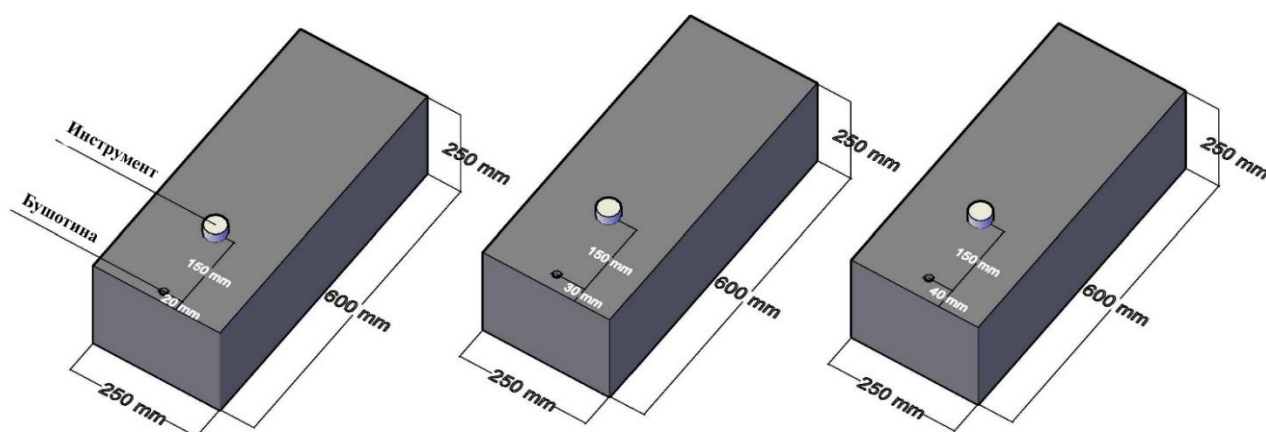


Слика 5.6 Измерене вредности максималне брзине осциловања честица тла за три компоненте (лонгитудинални, плава боја; вертикални, зелена боја; трансверзални, црвена боја) у софтверу Thor (верзија 1.0.0.37) [1]

Први тест са лабораторијским моделом спроведен је како би се показало да повећање величине линије најмањег отпора утиче на повећање потреса услед минирања. Мерења потреса су вршена при величини линије најмањег отпора $W = 20 \text{ mm}$, 30 mm и 40 mm , са истим углом бушења од 90 степени. Иницирање минске бушотине вршено је мерење потреса за све три вредности линије најмањег отпора и то за исту удаљеност мерног места од бушотине [1].

Приликом иницирања минске бушотине, инструмент бележи све потресе које се јављају у блоку, а касније се врши анализа записа тог таласа кроз специјализован софтвер Thor, где можемо да експортујемо податке из њега и читамо вредности за PPV, сви подаци узети са инструмента приказани су у табелама у поглављу 5.2 и 5.3. Пре сваког иницирања минске бушотине креиран је 3D модел блока како би се добили што тачнији подаци за анализу. 3D модел је креиран коришћењем фотографија лабораторијског модела, које се бележе пре сваког иницирања и коришћењем фотограметрије се спајају и креира се модел у O-Pitblast софтверу [1].

Иницирање је прво рађено за вредности линије најмањег отпора $W = 20 \text{ mm}$. За овај случај извршено је више мерења са пројектованом величином линије најмањег отпора и са њеним одступањима. Затим је линија најмањег отпора повећана на $W = 30 \text{ mm}$, где је извршено неколико мерења за пројектовано стање или приближно пројектованом. Свако наредно пуцање у блоку оставља неправилан облик слободне површине, при чему је оно са највећим одступањем коришћено као репер за анализу, што је у табелама приказано као параметар површине одминираниог материјала. Следећа вредност линије најмањег отпора $W = 40 \text{ mm}$, поновљен је исти тест као у претходним корацима, али је свако померање праћено поновним постављањем инструмента на исту удаљеност од $r = 150 \text{ mm}$ пре сваког иницирања. Димензије блока, као и положај инструмента у односу на минску бушотину, као позиција инструмента који је увек померен за исто растојање за свако наредно иницирање минске бушотине, приказани су на слици 5.7 [1].



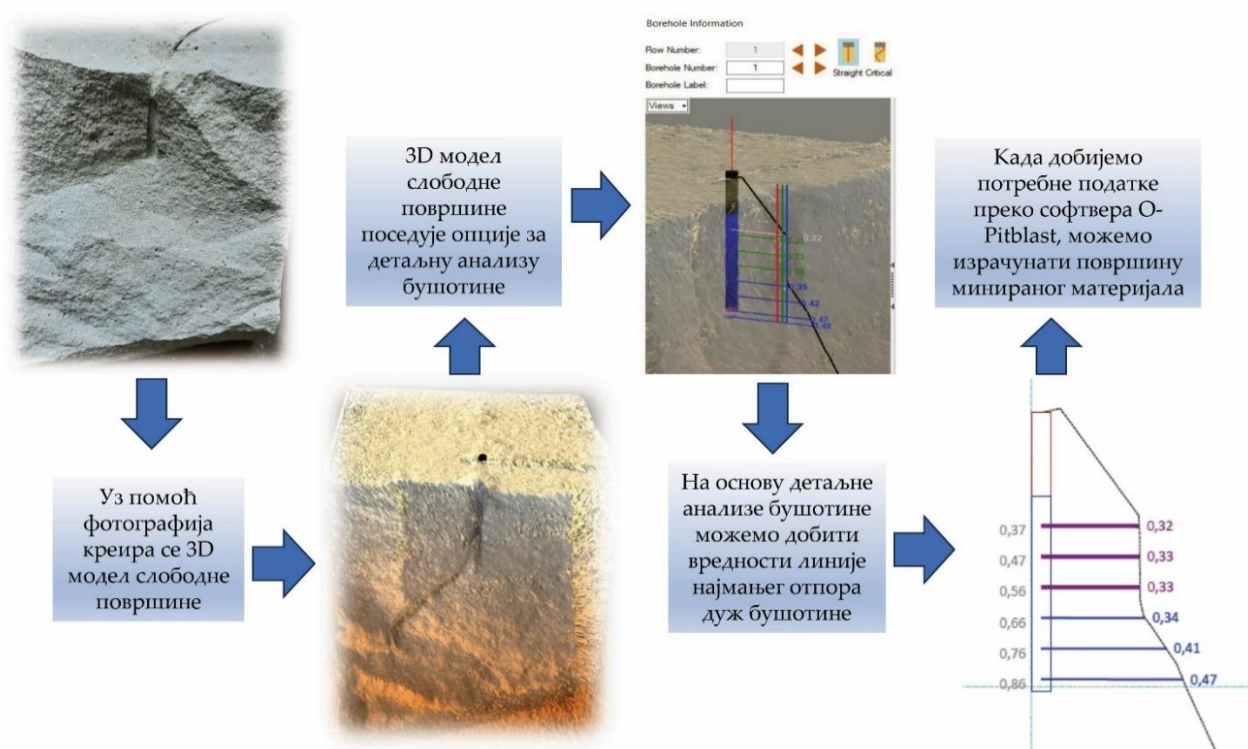
Слика 5.7 Модели блокова за различите вредности линије најмањег отпора са позицијама мерних места у односу на бушотине [1]

За сва три случаја приказана је величина линије најмањег отпора, где је извршено више мерења, при иницирању минске бушотине за три различите вредности величине линије најмањег отпора, како у пројектованим условима за сваку од њих, тако и за случајеве где постоје одступања од пројектованог стања [1].

Овај тест је урађен да би се показало колико пројектована линија најмањег отпора за три случаја где сваки од њих има нека мала одступања утиче на интензитет потреса услед мињања, што се може видети на дијаграму, слика 5.11 у даљем тексту. Повећањем величине линије најмањег отпора са 20 mm на 30 mm, а затим и на 40 mm, повећава се и површина мињаног материјала што утиче на потресе услед мињања [1].

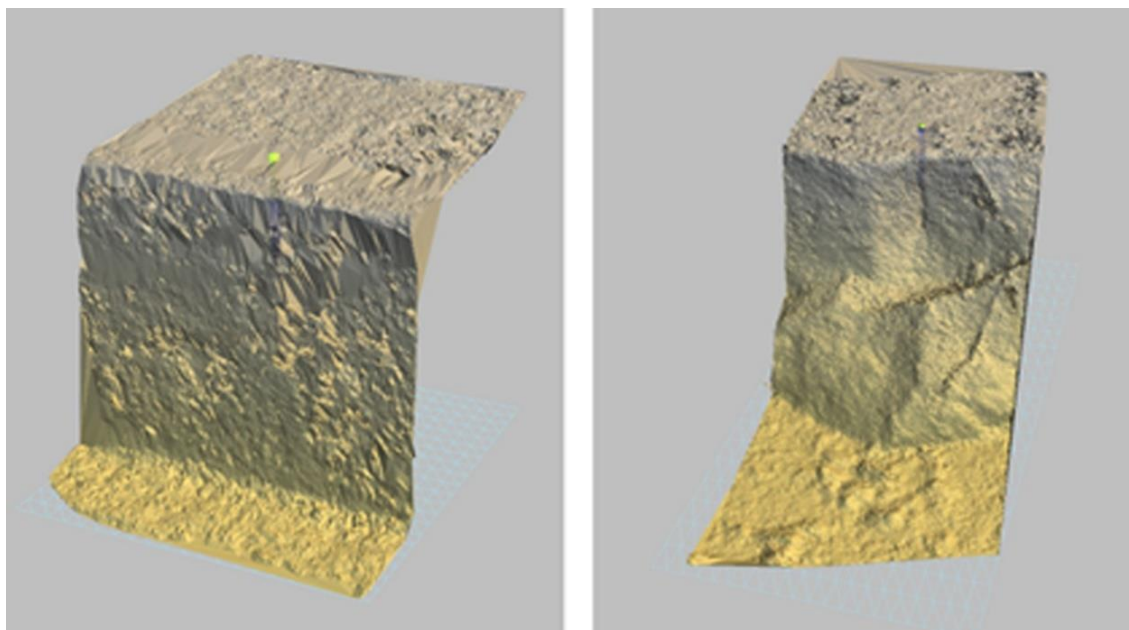
Други тест је изведен такође на блоковима како би се показало колико одступања линије најмањег отпора од пројектоване утиче на повећање потреса услед минирања, што је и предмет овог истраживања. Као и у претходном испитивању, иницирање је извршено за вредност оптерећења $W = 30 \text{ mm}$, али је додатно иницирање извршено у случају када је линија најмањег отпора једнака пројектованој и у случају када постоје одступања од пројектоване [1].

Одступања од значаја за обраду и анализу су она која представљају веће вредности линије најмањег отпора од пројектоване, јер на основу досадашњих истраживања повећање величине отпора утиче на повећање потреса услед минирања. Одступања од пројектованог стања се сматрају површином минираног материјала чије податке и вредности добијамо анализом и обрадом уз помоћ софтвера, приказане на слици 5.8 [1].



Слика 5.8 Процес добијања података о вредностима линије најмањег отпора и површини минираног материјала са модела обрађеног кроз O-Pitblast софтвер [1]

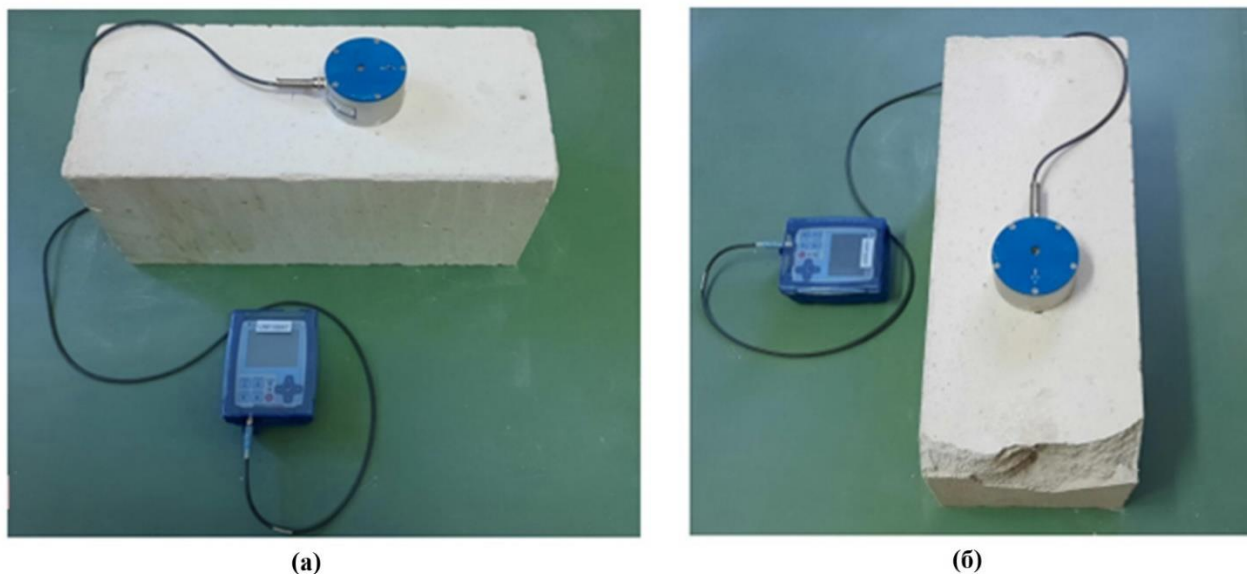
Теоретски, све неправилности на слободној површини блока које су изнад вредности пројектоване линије најмањег отпора утичу на интензитет вибрације. Детаљан приказ слободне површине која има неправилан облик, односно предње стране блока испред минске бушотине, као и упоредна стања пројектоване вредности отпора и оне са одступањима, слика 5.9 [1].



Слика 5.9 3D модел блока, изглед пре и после иницирања минске бушотине [1]

Одступања линије најмањег отпора која су већа од пројектоване вредности требало би да утичу на повећање потреса услед минирања. Повећање отпора аутоматски утиче на повећање површине и запремине одминираниог материјала, као и на интензитет потреса при минирању [1].

Позиције инструмената при мерењу потреса услед минирања и стање слободне површине пре и после иницирања је приказано на слици 5.10.



Слика 5.10 Поступак мерења потреса и стање слободне површине пре (а) и после (б) иницирања минске бушотине [1]

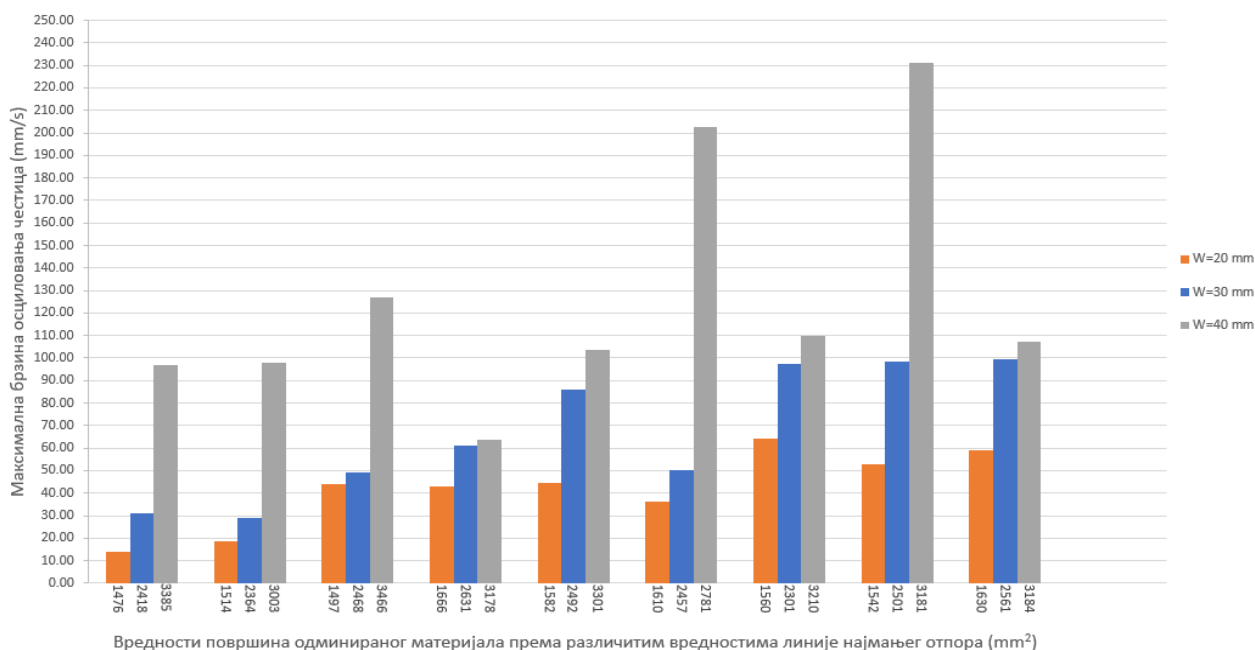
5.2. Резултати лабораторијских испитивања

Након спроведених испитивања за вредности линије најмањег отпора $W = 20 \text{ mm}$, 30 mm и 40 mm , извршено је 27 мерења у циљу утврђивања зависности повећања вредности линије најмањег отпора, која истовремено утиче на повећање површине минираног материјала, али и на повећање интензитета потреса [1]. Сви резултати мерења дати су у табели 5.2.

Резултати испитивања су статистички анализирани за три вредности линије најмањег отпора. На слици 5.11 приказана је зависност PPV од површине минираног материјала за различите вредности линије најмањег отпора [1].

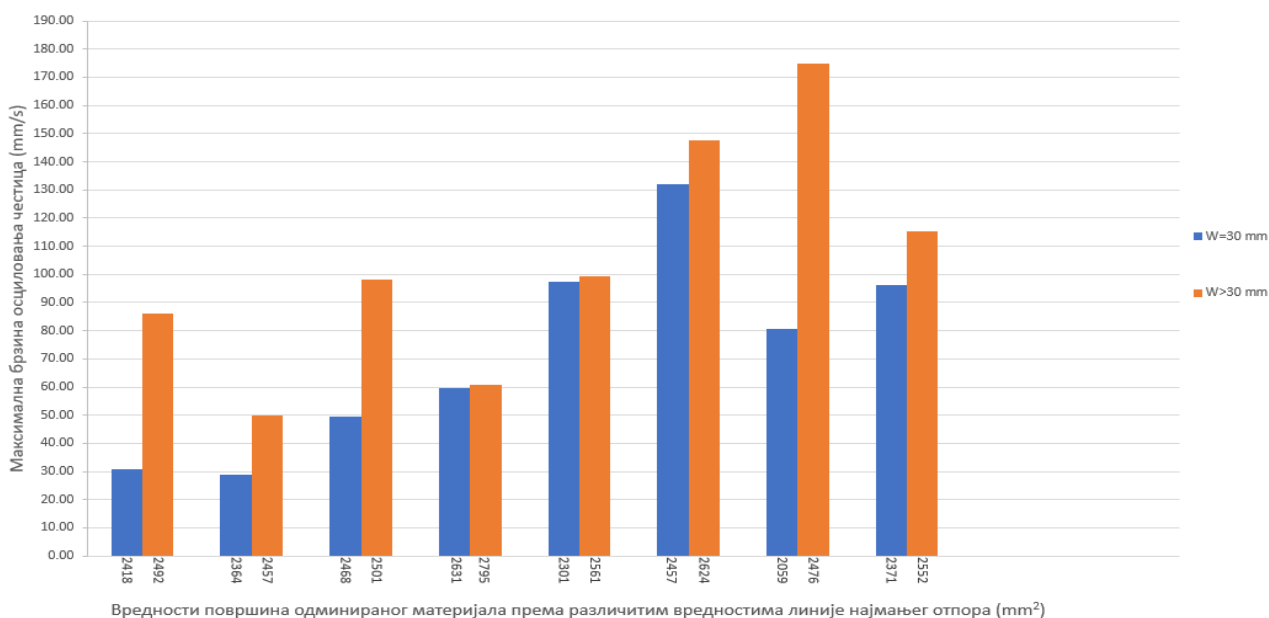
Табела 5.2 Резултати лабораторијског теста за утицај линије најмањег отпора при вредностима $W = 20 \text{ mm}$, 30 mm и 40 mm на интензитет потреса [1]

Линија најмањег отпора (mm)	Површина одминираног материјала (mm ²)	PPV (mm/s)
W=20	1476	13,80
W=30	2418	30,94
W=40	3385	96,95
W=20	1514	18,60
W=30	2364	28,99
W=40	3003	98,13
W=20	1497	44,11
W=30	2468	49,43
W=40	3466	127,00
W=20	1666	43,17
W=30	2631	60,88
W=40	3178	63,59
W=20	1582	44,47
W=30	2457	86,09
W=40	3301	103,60
W=20	1610	36,38
W=30	2457	50,03
W=40	2781	202,40
W=20	1560	64,23
W=30	2301	97,33
W=40	3210	110,00
W=20	1542	52,86
W=30	2301	98,33
W=40	3181	231,20
W=20	1630	58,91
W=30	2561	99,40
W=40	3148	107,10



Слика 5.11 Зависност брзине осциловања честица (PPV) и површине минираног материјала за различите вредности линије најмањег отпора [1]

Даљим истраживањем вршена су испитивања како та линија најмањег отпора за случај где је она рецимо пројектована да је $W = 30 \text{ mm}$ дуж целе бушотине, где би се могло рећи да су то оптимални услови, утиче на интензитет потреса у односу на линију најмањег отпора која има одступања од пројектоване, тј. није једнака дуж целе бушотине. Зависност максималне брзине осциловања честица (PPV) и одступања линије најмањег отпора од пројектоване за 16 мерења, приказано на слици 5.12 [1].



Слика 5.12 Зависност максималне брзине осциловања честица (PPV) у односу на вредност одступања линије најмањег отпора [1]

На слици 5.12 може се видети да одступање вредности линије најмањег отпора, представљено кроз површину одминираниог материјала од једне бушотине, утиче на повећање потреса услед мињања. За овај тест, резултати су представљени у табели 5.3 [1].

Табела 5.3 Резултати мерења утицаја линије најмањег отпора за вредности $W = 30 \text{ mm}$ и $W > 30 \text{ mm}$ [1]

Линија најмањег отпора (mm)	Површина одминираниог материјала (mm^2)	PPV (mm/s)
W=30	2418	30,94
W>30	2492	86,09
W=30	2364	28,99
W>30	2457	50,05
W=30	2468	49,43
W>30	2501	98,33
W=30	2631	59,54
W>30	2795	60,88
W=30	2301	97,33
W>30	2561	99,40
W=30	2457	131,90
W>30	2624	147,60
W=30	2059	80,69
W>30	2476	174,70
W=30	2371	96,06
W>30	2552	115,10

Да би се што прецизније утврдила зависност повећања потреса услед минирања при одступању линије најмањег отпора, измерени резултати ће бити обрађени математички и анализирани кроз статистичке податке. У овом случају, зависност се може изразити кроз коефицијент [1]:

$$K = \frac{\Delta v_{max}}{\Delta P} \quad (5.1)$$

где су,

- Δv_{max} , представља однос између максималне брзине осциловања честица тла за вредности линије најмањег отпора $W = 30 \text{ mm}$ и $W > 30 \text{ mm}$;
- ΔP , представља однос између површине одступања линије најмањег отпора за вредности $W = 30 \text{ mm}$ и $W > 30 \text{ mm}$.

Користећи податке са дијаграма приказаног на слици 5.12, могу се узети у прорачун површине које формира пројектована линија најмањег отпора и вредности њених одступања за свако мерење. Однос између ових површина ΔP може се израчунати из следећег обрасца [1]:

$$\Delta P = \frac{\Delta P_{des}}{\Delta P_{dev}} \quad (5.2)$$

где су,

- ΔP_{des} , површина са пројектованом линијом најмањег отпора (mm^2);
- ΔP_{dev} , површина са одступањем линије најмањег отпора од пројектоване (mm^2).

Површина одминираниог материјала за случај када линија најмањег отпора нема одступања и једнака је пројектованој ΔP_{des} , може се израчунати као збир површине одминираниог материјала сваке минске бушотине, као што је дато у обрасцу 5.3.

$$\Delta P_{des} = \Delta P_{des_1} + \Delta P_{des_2} + \dots + \Delta P_{des_8} = 19\,233 \text{ mm}^2 \quad (5.3)$$

На исти начин, површина одминираниог материјала за случај када постоји одступање линије најмањег отпора и када је њена вредност већа од пројектоване ΔP_{dev} , може се добити према обрасцу 5.4 [1].

$$\Delta P_{dev} = \Delta P_{dev_1} + \Delta P_{dev_2} + \dots + \Delta P_{dev_8} = 20\,494 \text{ mm}^2 \quad (5.4)$$

Убацавањем добијених вредности у образац 5.2, може се израчунати вредност ΔP :

$$\Delta P = \frac{\Delta P_{des}}{\Delta P_{dev}} = 0,94$$

Користећи сличан поступак, могу се израчунати за свако понављање вредности максималне брзине осциловања честица (PPV) за $W = 30 \text{ mm}$ и $W > 30 \text{ mm}$. Вредност променљиве Δv_{max} представља разлику у максималној брзини осциловања честица (PPV) за пројектовану линију најмањег отпора и са одступањима, за вредности оптерећења $W = 30 \text{ mm}$ и $W > 30 \text{ mm}$ [1].

$$\Delta v_{max} = \frac{\Delta v_{desmax}}{\Delta v_{devmax}} \quad (5.5)$$

где су,

- Δv_{desmax} , представља максималну брзину осциловања честица (PPV) мерену за $W = 30 \text{ mm}$, (mm/s);
- Δv_{devmax} , представља максималну брзину осциловања честица (PPV) мерену за $W > 30 \text{ mm}$, (mm/s).

Вредности Δv_{desmax} и Δv_{devmax} могу се израчунати на исти начин као код обрасца 5.3 и 5.4. Прорачун за обе вредности брзине осциловања честица представљен је кроз наредне обрасце за сваки испитан случај [1]. Када је линија најмањег отпора једнака пројектованој вредност максималне брзине осциловања честица рачуна се по обрасцу 5.6.

$$\Delta v_{desmax} = \Delta v_{desmax_1} + \Delta v_{desmax_2} + \dots + \Delta v_{desmax_8} = 574,9 \text{ mm/s} \quad (5.6)$$

Уколико линија најмањег отпора има одступања брзине осциловања честица могу се рачунати по следећем обрасцу 5.7.

$$\Delta v_{devmax} = \Delta v_{devmax_1} + \Delta v_{devmax_2} + \dots + \Delta v_{devmax_8} = 832,2 \text{ mm/s} \quad (5.7)$$

Добијене вредности за Δv_{desmax} и Δv_{devmax} се враћају у образац 5.5, а вредност Δv_{max} , се израчунава на следећи начин [1]:

$$\Delta v_{max} = \frac{\Delta v_{desmax}}{\Delta v_{devmax}} = 0,69$$

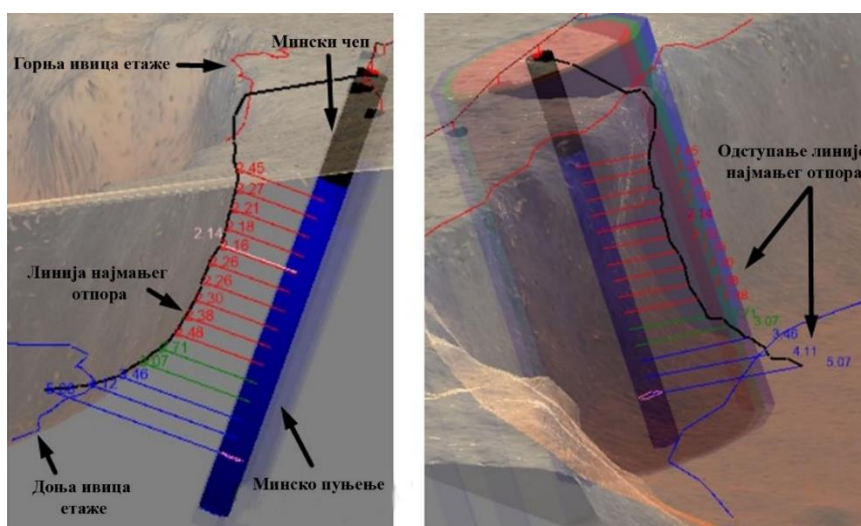
Такође, коефицијент из обрасца 5.1, за сваку од измерених вредности може се израчунати и приказати на дијаграму 5.12, што представља зависност максималне брзине осциловања честица (PPV) од вредности одступања линије најмањег отпора [1].

$$K = \frac{\Delta v_{max}}{\Delta P} = 0,73$$

5.3. Теренска испитивања

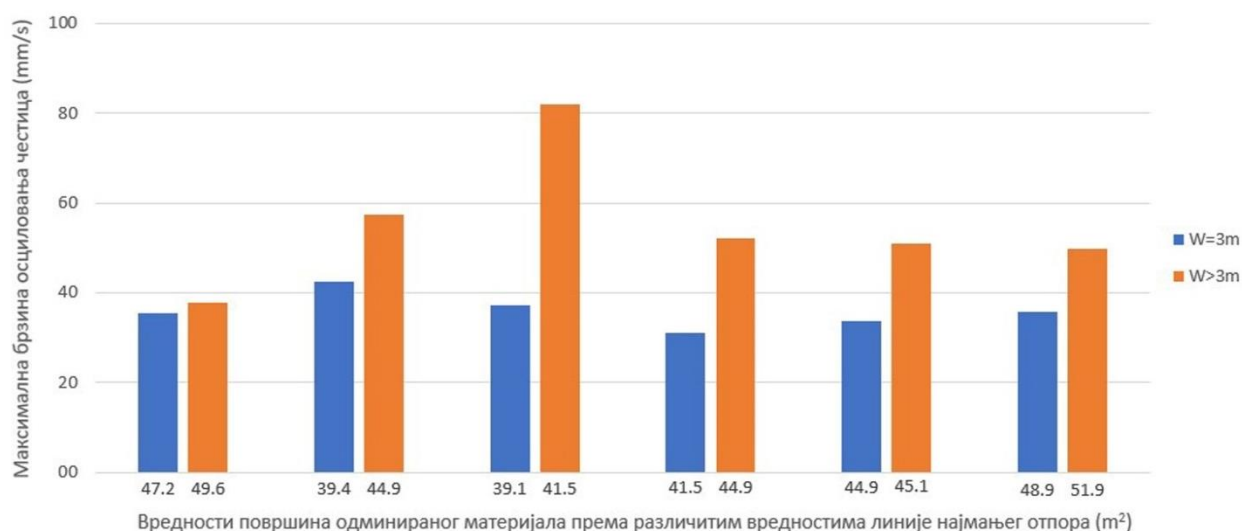
На основу испитивања на лабораторијском моделу и добијених резултата, као и анализе резултата, извршена је верификација модела у погледу утицаја линије најмањег отпора на интензитет потреса услед минирања на минском пољу. За овај случај испитивања на терену рађено је 12 минских бушотина, са истом методологијом за мерење потреса услед минирања. Инструмент је постављен на удаљености од 60 m од центра минске бушотине. Пречник минске бушотине износио је 89 mm, а дужина бушотине 10 m, са количином од 50 kg по интервалу иницирања. У овом случају дат је пример профила минске бушотине са различитим вредностима линије најмањег отпора по њеној дужини. Ове вредности су коришћене при прорачуну површине минираниог материјала, као и у случају лабораторијског модела [1].

Слика 5.13 представља 3D модел минске бушотине са различитим вредностима оптерећења где је величина линије најмањег отпора мања од пројектоване (црвена линија), једнака пројектованој (зелена линија) и већа од пројектоване (плава линија). У овом случају, упоредном анализом резултата мерења на лабораторијском моделу и теренским мерењима, на местима где постоји веће одступање линије најмањег отпора од пројектоване (плава линија), вредност максималне брзине честица треба да буде такође већа. Различите вредности оптерећења дуж минске бушотине су такође представљене бројем сваке вредности за одступање оптерећења од пројектованог [1].



Слика 5.13 Профил 3D модела минске бушотине представљен кроз O-Pitblast софтвер са различитим вредностима линије најмањег отпора [1]

Анализа података и резултати са инструмената обрађени су статистички и потврђују повећање интензитета потреса услед минирања са повећањем вредности линије најмањег отпора дуж бушотине (слика 5.13). Измерени подаци при теренским испитивања приказани су статистички кроз дијаграм на слици 5.14, а резултати су представљени у табели 5.4 [1].



Слика 5.14 Зависност максималне брзине осциловања честица (PPV) према вредности одступања линије најмањег отпора од пројектоване при теренским испитивањима [1]

Табела 5.4 Резултати мерења утицаја линије најмањег отпора за вредности $W = 3 \text{ m}$ и $W > 3 \text{ m}$ [1]

Линија најмањег отпора (m)	Површина одминираниог материјала (m^2)	PPV (mm/s)
W=3	47.2	35,3
W>3	49.6	37,8
W=3	39.4	42,4
W>3	44.9	57,3
W=3	39.1	37,1
W>3	41.5	82,0
W=3	41.5	31,2
W>3	44.9	52,2
W=3	44.9	33,8
W>3	45.1	51,0
W=3	48.9	35,7
W>3	51.9	49,8

Верификација лабораторијског модела извршена је применом истих образаца за резултате измерене на терену. Површина одминираниог материјала када је линија најмањег отпора једнака пројектованој, може се израчунати помоћу обрасца 5.3 [1]:

$$\Delta P_{des} = \Delta P_{des_1} + \Delta P_{des_2} + \dots + \Delta P_{des_6} = 261 \text{ m}^2$$

Површина одминираниог материјала за случај када имамо одступање линије најмањег отпора и када је вредност већа од пројектоване може се израчунати из обрасца 5.4 [1]:

$$\Delta P_{dev} = \Delta P_{dev_1} + \Delta P_{dev_2} + \dots + \Delta P_{dev_6} = 277,9 \text{ m}^2$$

Однос између ових површина ΔP може се израчунати из обрасца 5.2 [1]:

$$\Delta P = \frac{\Delta P_{des}}{\Delta P_{dev}} = 0,94$$

Рачунање максималне брзине осциловања честица (PPV) када је вредност линије најмањег отпора једнака пројектованој, може се израчунати помоћу обрасца 5.6 [1]:

$$\Delta v_{des_{max}} = \Delta v_{des_{max1}} + \Delta v_{des_{max2}} + \dots + \Delta v_{des_{max6}} = 215,5 \text{ mm/s}$$

Прорачун максималне брзине честица (PPV) када линија најмањег отпора није једнака пројектованој по једначини 5.7 [1]:

$$\Delta v_{dev_{max}} = \Delta v_{dev_{max1}} + \Delta v_{dev_{max2}} + \dots + \Delta v_{dev_{max6}} = 330,1 \text{ mm/s}$$

Однос између максималне брзине осциловања честица (PPV) при одступању линије најмањег отпора израчунава се помоћу обрасца 5.5 [1]:

$$\Delta v_{max} = \frac{\Delta v_{des_{max}}}{\Delta v_{dev_{max}}} = 0,65$$

Додатно се може израчунати коефицијент из обрасца 5.1 за сваку од измерених вредности, што је приказано на дијаграму слика 5.14, како би се приказала зависност максималне брзине осциловања честица од вредности одступања линије најмањег отпора [1].

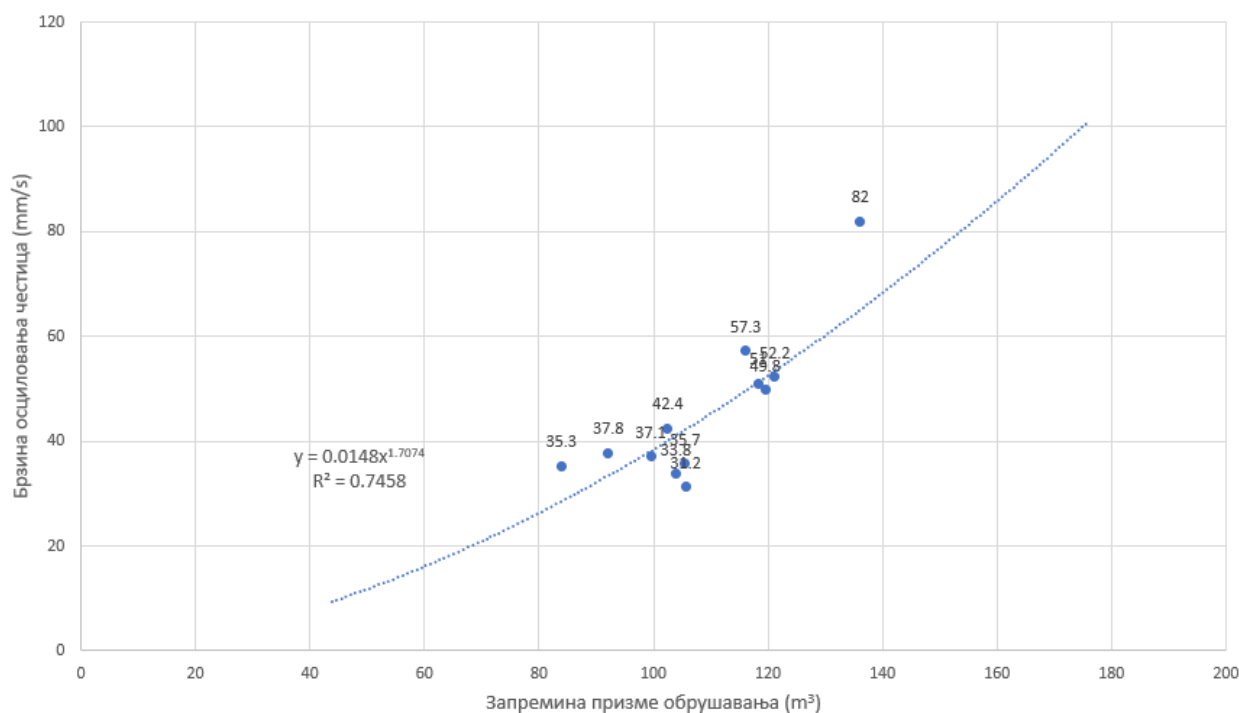
$$K = \frac{\Delta v_{max}}{\Delta P} = 0,69$$

Како се на моделу са терена може уочити да се повећање потреса услед минирања дешава при одступању линије најмањег отпора које је изражено преко површине одминираниог материјала, за исти пример урађен је прорачун преко запремине одминираниог материјала од једне бушотине. Површина одминираниог материјала би повећањем требало да утиче и на повећање запремине одминираниог материјала, где као и у претходном случају узрокује повећан ниво потреса при минирању. Прорачун количине односно запремине одминираниог материјала појединачно за сваку од бушотина, вршен је у софтверском пакету O-Pitblast. Приказ измерених вредности запремине одминираниог материјала и постојећих резултата мерења брзине осциловања честица тла приказан је у наредној табели 5.5.

Табела 5.5 Резултати мерења брзине осциловања честица тла према запремини одминираниог материјала за вредности $W = 3 \text{ m}$ и $W > 3 \text{ m}$

Линија најмањег отпора (m)	Запремина одминираниог материјала (m ³)	PPV (mm/s)
W=3	83,9	35,3
W>3	92,1	37,8
W=3	102,5	42,4
W>3	116,1	57,3
W=3	99,5	37,1
W>3	136,1	82,0
W=3	105,6	31,2
W>3	121,2	52,2
W=3	103,9	33,8
W>3	118,3	51,0
W=3	105,5	35,7
W>3	119,5	49,8

Увећање максималне брзине осциловања честица за вредност одступања линије најмањег отпора преко запремине одминираниог материјала за представљен случај теренског испитивања, може се рачунати преко обрасца 5.8. На основу резултата из табеле 5.5 урађен је дијаграм према коме је одређена зависност и установљен образац за прорачун увећања брзине осциловања честица приликом одступања линије најмањег отпора од пројектоване, а која је изражена запремином.



Слика 5.15 Дијаграм зависности увећања брзине осциловања честица у односу на запремину призме обрушавања

Уносом ΔV који се може рачунати као однос збира запремина одминираниог материјала код линије најмањег отпора које имају одступање од пројектоване и једнаких пројектованој, можемо израчунати вредност увећања Δv_{max} максималне брзине осциловања честица приликом одступања линије најмањег отпора.

$$\Delta v_{max} = 0,0148 \cdot \Delta V^{1,7074} \quad (5.8)$$

Образац 5.8, може послужити као модел за предвиђање потреса, којим се може израчунати могући степен увећања потреса услед повећања запремине одминираниог материјала при одступању линије најмањег отпора.

На основу вредности са дијаграма 5.15, може се доћи до закључка, да повећање запремине одминираниог материјала ствара већи утицај на интензитет потреса услед минирања. Из претходног обрасца 5.8, може се вршити прорачун за различите вредности одступања линије најмањег отпора од пројектоване, преко запремине призме обрушавања у односу на повећање брзине осциловања честица код услова када је линија најмањег отпора једнака пројектованој и када има одступања.

Утицај различитих фактора и мали број података приликом извођења опита на терену, отвара могућност за даља истраживања на ову тему, како би се модел допунио и унапредио. Овим узорком са терена извршен је прорачун за различите вредности одступања запремине као што је приказано у табели. Према обрасцу 5.8, израчунате су вредности увећања брзине осциловања честица на основу одступања линије најмањег отпора од пројектоване, што је представљено у следећој табели 5.5.

Табела 5.6 Резултати прорачуна за различите вредности одступања запремине и увећања брзине осциловања честица

Запремина одминираниог материјала (m ³)	PPV (mm/s)
5	0,2
10	0,8
15	1,5
20	2,5
25	3,6
30	4,9
35	6,4
40	8,0
45	9,8
50	11,8
55	13,9
60	16,1
65	18,4
70	20,9
75	23,5
80	26,3
85	29,1
90	32,1
95	35,2
100	38,5

6. АНАЛИЗА УТИЦАЈА ОДСТУПАЊА ЛИНИЈЕ НАЈМАЊЕГ ОТПОРА МЕТОДОМ РАЗДВОЈЕНИХ ЕЛЕМЕНАТА (DEM)

Метода раздвојених елемената углавном има примену код моделирања дискретних система као што су чврсте фазе, тло, стенски масив итд. [82]. Метода раздвојених елемената (DEM) припада нумеричким методама за прорачун механичког понашања материјала, али такође и структура састављених од великог броја партикула [83]. Карактеристика ове методе представљају елементи независних целина који при утицају спољашњих сила улазе у међусобну интеракцију и крећу дуж контактних површи и са осталим елементима стварају нове интеракције [82].

При нумеричком моделирању, за неки модел се може рећи да представља модел раздвојених елемента ако:

- се састоји од одвојених тела коначних димензија (раздвојени елементи) и сваки од њих се може померати независно један од другог,
- су померања елемената велика,
- елементи аутоматски долазе у контакт [84].

Већина нумеричких метода се користе при симулацији физичког проблема или интеракцији код више физичких процеса са применом најмодернијег мултифизичког приступа, док (DEM) метода односно метода раздвојених елемената је искључиво развијена у сврху моделирања понашања код гранулисаних партикула [85].

6.1. Развој и област примене методе раздвојених елемената

Метода раздвојених елемената (DEM) користила се првобитно искључиво у 2D простору, међутим развој рачунара је омогућио моделирање проблема у 3D окружењу, тако да је DEM методу могуће користити у 3D простору при моделирању гранулисаног материјала, који се налази у посудама (флуидизованим) и није сув. Флуидизоване посуде служе за индуковање, сушење или мешање хемијских реакција [86].

Како би се што боље могла представити интеракција између гранулисаних зрна поред утицаја течности у порам, DEM метода је модификована, где уместо идеализованог контакта у некој тачки, код примене DEM методе, контакт између две партикуле може се моделирати уз помоћ контактне површине са храпавом текстуром [87]. Храпавост веома утиче код отпора котрљања између партикула и тако добијена модификована DEM метода се користила за проучавање настанка трака смицања при троосном тесту. Поред тога рађена су и истраживања где је задавање притиска директно на гранулисане партикуле омогућило реалније деформисање границе модела [88], а касније су могућности DEM методе проширене на 3D моделирање код троосног теста [89].

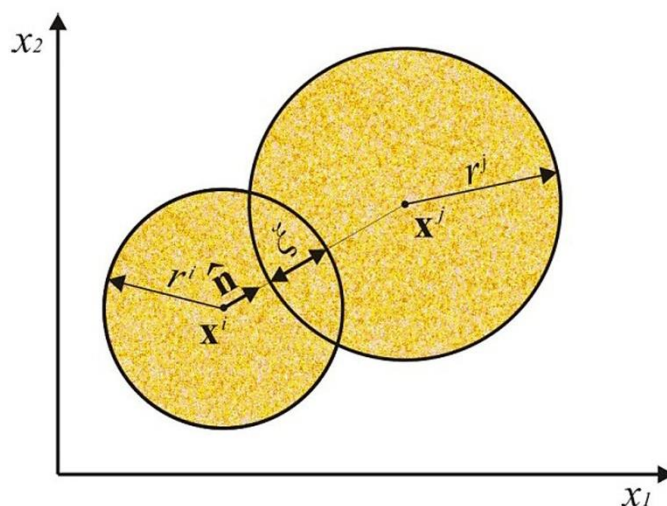
Наредни корак у развоју методе (DEM) представља увођење полигона који су произвољни, а служе као замена за коришћење сфера прво у 2D, али и у 3D окружењу [90]. Коришћење полигона код представљања гранулисаних партикула омогућава DEM моделирање при лому стенске масе при изградњи тунела, код одрона и могућност симулације кретања, али и понашање између добијених партикула. Код моделирања могућа је и комбинација DEM методе са применом метода које су базиране на механици континуума, и то су: FEM (метода коначних елемената) и SPH метода (хидродинамика глатких партикула) [91].

Поред постојећих комбинација, постоји и хибридна метода која је уствари комбинација метода дискретних и коначних елемената (Finite-Discrete Element Method FDEM), а представља методу која је одлична за коришћење при механици лома [91].

Метода раздвојених елемената (DEM) углавном се користи за моделирање зрнастог материјала, земљишта, зиданих конструкција и испуцалих стена. Ова метода има широку примену у проучавању гранулисаних средина без кохезије [85], земљишта са кохезијом, стена, асфалта, геотехничких и геолошких студија за интеракцију две грануларне средине (земљиште и стена) [92]. У току последње две деценије метода дискретних елемената (DEM) успешно се примењује у различитим областима рударства, грађевинарства, металургије и нафтне индустрије.

6.2. Основне поставке методе раздвојених елемената

Метода раздвојених елемената, представља методу засновану на моделирању контакта између партикула коришћењем еластичног нелинеарног Херцовог закона [85], где се дефинишу силе при контакту партикула. Када је растојање између центра код две партикуле i и j и вектором положаја x^i и x^j мање од збира полупречника, појављује се улегнуће ξ при чему настају Херцове силе, слика 6.1.



Слика 6.1 Улегнуће које се јавља при контакту између партикула [85]

Херцове силе које настају између партикула i и j [93] су дефинисане помоћу обрасца:

$$F_H^{ij} = K^{ij} \xi^3 \hat{n} \quad (6.1)$$

где је вектор једначине нормале:

$$\hat{n} = \frac{x^j - x^i}{|x^j - x^i|} \quad (6.2)$$

Дубина улегнућа је дата изразом:

$$\xi = \begin{cases} r^j + r^i - |x^j - x^i| & \text{if } \xi > 0 \\ 0 & \text{if } \xi < 0 \end{cases} \quad (6.3)$$

а коефицијент крутости K^{ij} дефинисан је помоћу обрасца:

$$K^{ij} = \frac{2}{3} \frac{E}{(1-\nu^2)} \sqrt{\frac{r^i r^j}{r^i + r^j}} \quad (6.4)$$

при чему $\sqrt{\frac{r^i r^j}{r^i + r^j}}$ представља ефективни радијус контакта.

Најважнија карактеристика гранулисаних материјала је губитак енергије који настаје услед трења, сила трења која настаје мора се узети у обзир при моделирању интеракција између партикула [94]. Сила трења моделира се применом методе вискозне регуларизације уз коришћење Кулоновог закона [95], представљене уз помоћ наредног обрасца:

$$F_F^{ij} = -\mu |F_H^{ij}| \left(\frac{|V_s^{ij}|}{\eta_0} \right)^{1/m} \hat{V}_s^{ij} \quad (6.5)$$

где је:

μ - коефицијент трења,

m - произвољни број,

η_0 - номинална брзина, (m/s)

V_s^{ij} - брзина клизања између партикула i и j , (m/s)

\hat{V}_s^{ij} - јединични вектор дуж правца клизања.

Брзина клизања представља збир брзина translације и ротације:

$$V_s^{ij} = V_t^{ij} + V_r^{ij} \quad (6.6)$$

Брзина translације [95] је дата са:

$$V_t^{ij} = ((V^j - V^i) \cdot \hat{t}) \hat{t} \quad (6.7)$$

где је:

\hat{t} - тангентни јединични вектор, тако да важи $\hat{n} \cdot \hat{t} = 0$.

Брзина ротације [94] представљена је следећим изразом:

$$V_r^{ij} = \omega^j \times (x^{ij} - x^j) - \omega^i \times (x^{ij} - x^i) \quad (6.8)$$

где су :

ω^i и ω^j угаоне брзине партикула,

x^{ij} је вектор положаја контакта.

Осим трења међу партикулама i и j где се тај контакт између њих посматра, пожељно је узети у разматрање и интеракцију тих партикула са околином. Друге партикуле и простор између њих чине околину, а простор међу њима је испуњен са ваздухом или може бити испуњен течностју. Описаном интеракцијом ствара се вискозна пригушна сила услед трења и она се супротставља кретању партикула.

Партикуле које су окружене другим партикулама, приликом самог трења, њихова кинетичка енергија, односно највећи део те енергије се расипа, док приликом судара партикула брзина тог судара је истог реда вредности као и пре њиховог судара.

Однос брзина судара партикула које слободно лете, пре и после судара представља коефицијент реституције k , док код гранулисаног материјала он може бити у широком спектру вредности [94], а то најпре зависи од околине партикуле која се посматра. Код суседних партикула, коефицијент реституције у већини примера може бити веома мали, али у случају одвајања партикуле од остатка материјала, при судару исте са зидом или другом партикулом, повећава се знатно коефицијент реституције. Понашање које је описано најбоље представља нелинеарни високоеластични закон удара [96], где се коефицијент контактеног пригушења T фигурише и зависи од коефицијента реституције k . Веза између T и k се решава уз помоћ диференцијалне једначине преко другог Њутновог закона. Вискозна пригушна сила поред коефицијента контактеног пригушења зависи од брзине судара ξ и од коефицијента крутости K , код великих брзина судара између партикула већи део кинетичке енергије се расипа, а при малим брзинама судара, код густо збијених партикула, већи део кинетичке енергије се претвара у потенцијалну енергију еластичности. Дефинисана сила пригушења [94] може се представити следећим изразом:

$$F_D^{ij} = TK^{ij}\xi^{\frac{3}{2}}\xi\hat{n} \quad (6.9)$$

где је брзина судара (брзина промене улегнућа) представљена изразом [94]:

$$\xi = \begin{cases} (v^j + v^i) \cdot \hat{n} & \text{if } \xi > 0 \\ 0 & \text{if } \xi < 0 \end{cases} \quad (6.10)$$

где су:

v^i и v^j вектори брзина зрна i и j .

Одређивање коефицијента контактеног пригушења T на основу коефицијента реституције k је значајно за одређивање адекватног временског корака [94].

Укупна сила код контакта између партикула i и j , према израчунатим компонентама [95] се може се рачунати као збир тих сила [94]:

$$F^{ij} = F_H^{ij} + F_D^{ij} + F_F^{ij} \quad (6.11)$$

Моменте око центра партикула изазива трење, где се момент у честици i од честице j представља изразом:

$$M^{ij} = (x^{ij} + x^i) \times F_F^{ij} \quad (6.12)$$

Збирни моменти и силе у партикулама описују збир свих појединачних момената и сила које се могу јавити у току контакта међу партикулама. Када је број контакта означен са n , моменти и силе за партикулу i су представљени следећим изразима [94]:

$$F^i = \sum_{j=1}^n F^{ij} \quad (6.13)$$

$$M^i = \sum_{j=1}^n M^{ij}$$

6.3. Софтверски пакет YADE за нумеричку анализу

YADE OPEN DEM је софтверска платформа отвореног кода (open source) намењена за дискретне нумеричке моделе, превасходно фокусирана на методу дискретних елемената (DEM). Софтвер користи технике објектно оријентисаног програмирања [97].

YADE (eng. Yet Another Dynamic Engine) је високо проширљив оквир отвореног кода за нумеричке моделе који користе методу дискретних елемената. Софтвер је написан у C++ програмском језику и садржи Python интерфејс за велику флексибилност и перформансе. То омогућава симулацију милиона партикула које су у интеракцији једне са другима. YADE се користи на оперативним системима заснованим на Linux оперативном систему и доступан је из званичних репозиторија заједничких дистрибуција попут Ubuntu и Debian. Прва верзија програма YADE покренута је 2004. године. Од 2007. до 2010. године кодекс је био рефактиран и постао конзистентнији [98]. Python се користи за подешавање симулације, контролу и пост-процесирање. Овај интерпретирани програмски језик скрива релативно сложену C++ имплементацију. То чини YADE одговарајућим софтвером за наставне сврхе и успешно га користе многи универзитети како би студентима представили основе методе дискретних елемената [99].

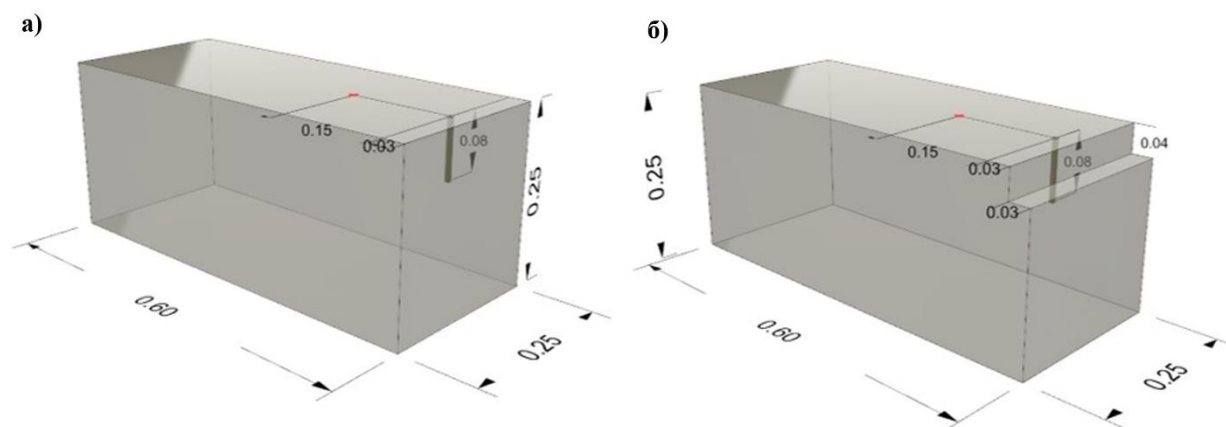
Паралелизација је веома важан део било ког софтвера за симулацију заснованом на честици. YADE користи већи део важних петљи OpenMP (open multiprocessing) технике како би повећао брзину израчунавања на процесорским системима [99]. Симулације се могу покренути као самостална апликација, али и у batch моду, што чини овај софтвер погодним за параметарска анализирања у области науке и инжењерства [99].

YADE има бројне спољне, обавезне и опционе зависности. Ове зависности компликују процес компајлирања на неким специфичним платформама, али смањују кодну базу софтвера, повећавајући читљивост и смањујући дуплирање кодова. Најважније библиотеке потребне за процес компајлирања у YADE су Eigen (библиотека само за заглавље шаблона за линеарну алгебру), QGLviewer (графички интерфејс), VTK (алат за постпроцесирање), неколико Python библиотека, CGAL (пакет геометрије, опционо) итд.

YADE има активну заједницу која развија код и помаже корисницима да пронађу одговоре на своја питања. Launchpad инфраструктура се користи као комуникациона платформа и као трагач за грешке [100].

6.4. Процена интензитета потреса услед минирања на основу одступања линије најмањег отпора применом (DEM) методе

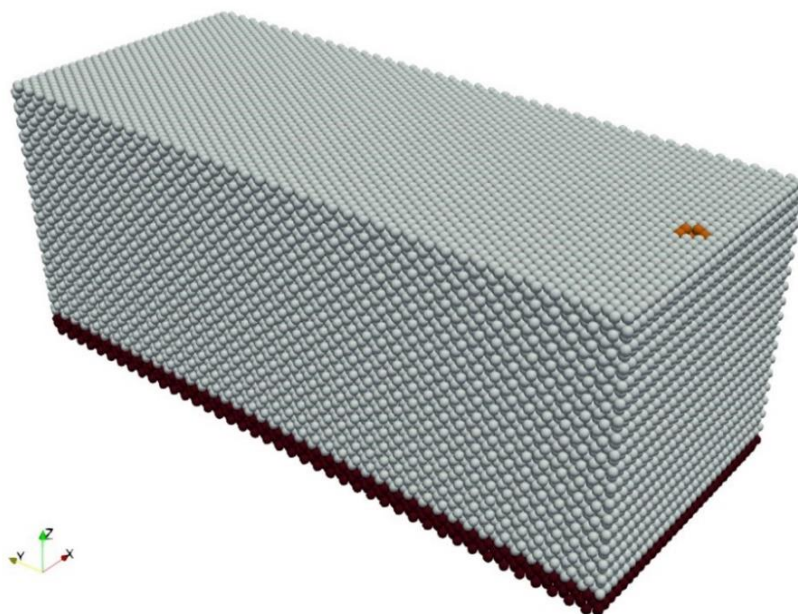
За анализу потреса изазваних минирањем примениће се метода раздвојених елемената обзиром на њене могућности за моделирање динамичких и дискретних система. Геометрија модела одговара сипорекс блоку илустрованом на слици 6.2. Приказана геометрија има улогу предиката у оквиру кога се генерише скуп партикула (сферичних елемената) повезаних у јединствену целину.



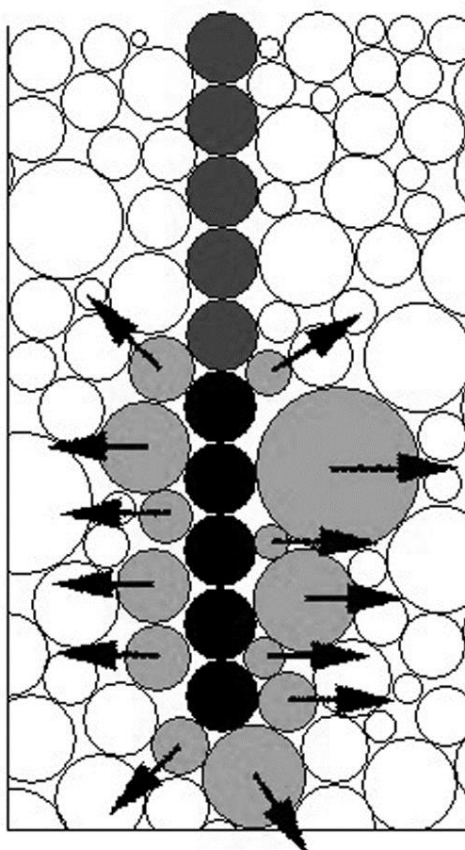
Слика 6.2 Геометрија модела раздвојених елемената изражена у метрима, са позицијом минске бушотине и тачке опажања; а) модел 1, б) модел 2

Модел раздвојених елемената слика 6.3, креира се попуњавањем предиката сферичним елементима који су међусобно повезани механичком везом. Доњи део модела је фиксиран, те партикуле које се налазе на самом дну блока имају ограничено кретање у свим правцима. На позицији минске бушотине се иницијално врши идентификација партикула које би одговарале експлозивном пуњењу. У следећем кораку се врши идентификација свих партикула које се граниче са експлозивним пуњењем и утврђује се вектор нормале њиховог контакта, и на самом крају врши се уклањање партикула минског пуњења из симулације, слика 6.4. Овај вид моделирања процеса минирања је успешно примењиван за анализу ефеката минирања код израде подземних просторија [101].

На основу укупне површине контакта између партикула експлозивног пуњења и партикула које сачињавају сипорекс блок врши се прерасподела целокупног оптерећења насталог експлозијом које износи према спецификацији произвођача око 1 МПа.



Слика 6.3 Модел раздвојених елемената са позицијом минске бушотине и фиксним контурним условима



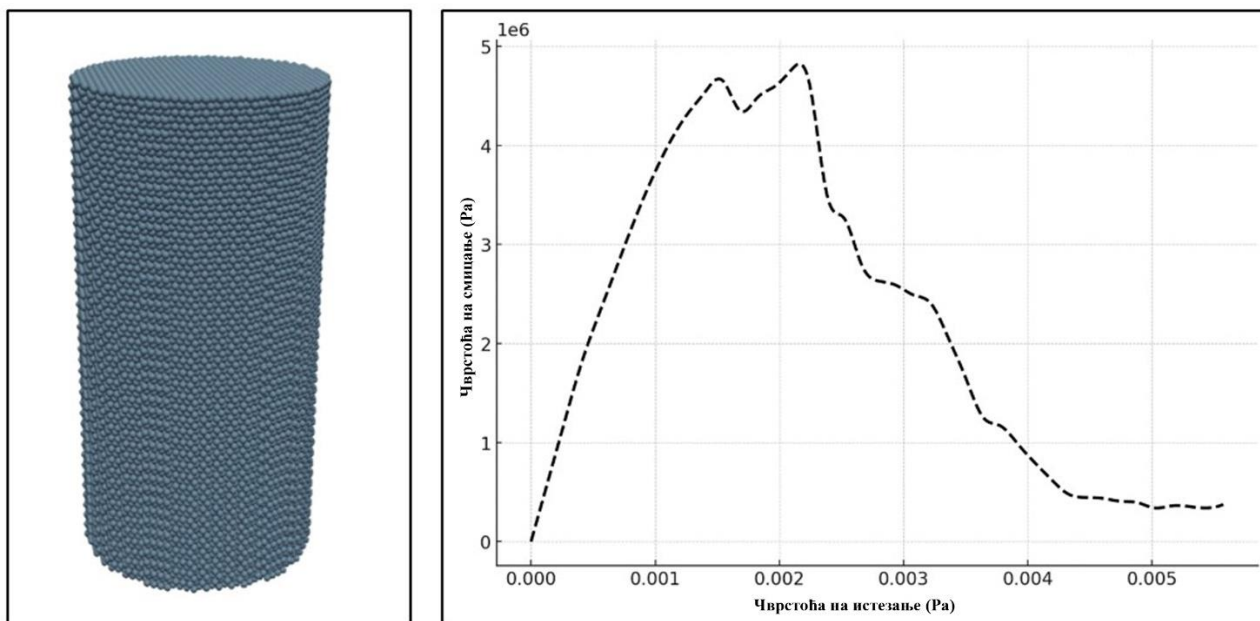
Слика 6.4 Шематски приказ наношења оптерећења у оквиру модела [101]

Како би се извршила симулација процеса минирања за потребе опажања индукованих потреса неопходно је одредити материјалне особине модела тако да кореспондирају са стварним особинама сипорекс блока. Код методе раздвојених елемената неопходно је дефинисати микро и макро особине материјала, а за те потребе се симулира опит једноосијалне чврстоће. Микро особине се односе на везе између појединачних партикула, док се макро особине односе на особине целокупног блока.

Из наведених разлога, у првом кораку се креира модел којим се симулира опит једноосијалне чврстоће. Цилиндрични узорак, стандардних димензија, се оптерећује док у истом не дође до лома и том приликом се врши опажање дилатација. Процес се понавља за различите вредности микро параметара све до момента када се не постигну жељени макро параметри.

Циљ моделирања је постићи следеће материјалне макро особине:

- Чврстоћа на притисак: 5 MPa ,
- Брзина простирања лонгитудиналних таласа: $1900 \frac{\text{m}}{\text{s}}$,
- Густина блока: $700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$.



Слика 6.5 Модел и деформација крива симулираног опита једноаксијалне чврстоће

За моделирање се примењује СртМат (представља својства партикуле) [98] са следећим вредностима микро параметара:

- Густина: $960 \frac{kg}{m^3}$,
- Јунгов модул еластичности: 3.5 GPa,
- Чврстоћа на истегање: 0.3 МПа,
- Угао унутрашњег трења: 32,
- Поасонов коефицијент: 0.2,
- Релативна дуктилност: 30.

Сходно резултатима приказаним на слици 6.5 и наведених микро параметара модела, макро особине модела се одређују према следећим обрасцима:

Брзина простирања таласа:

$$V_p = \sqrt{\frac{K}{\rho}}, \left(\frac{m}{s}\right) \quad (6.14)$$

где је:

V_p – брзина простирања лонгитудиналних таласа, $\left(\frac{m}{s}\right)$

K – запремински модул еластичности, (Pa)

ρ – густина сипорекс блока, $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$.

Порозност пакета партикула коришћеног за моделирање је израчуната и износи 27%. Сходно томе густина сипорекс блока у моделу износи:

$$\rho = \rho_b \cdot (1 - p) \quad (6.15)$$

$$\rho = 700,8 \frac{kg}{m^3}$$

где је:

ρ_b - густина партикула у моделу (960 kg/m^3)

ρ - порозност пакета партикула у моделу (27%)

Запремински модул еластичности:

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)}, (MPa) \quad (6.16)$$

где је:

E - модул еластичности одређен опитом једнооксијалне чврстоће, (Pa)

ν - Поасонов коефицијент (0.2).

Са дијаграма на слици 6.5 добијамо вредност:

$$E = \frac{\sigma_{50}}{\varepsilon}, (MPa) \quad (6.17)$$

$$E = \frac{2,46}{0,000556} = 4428 \text{ MPa}$$

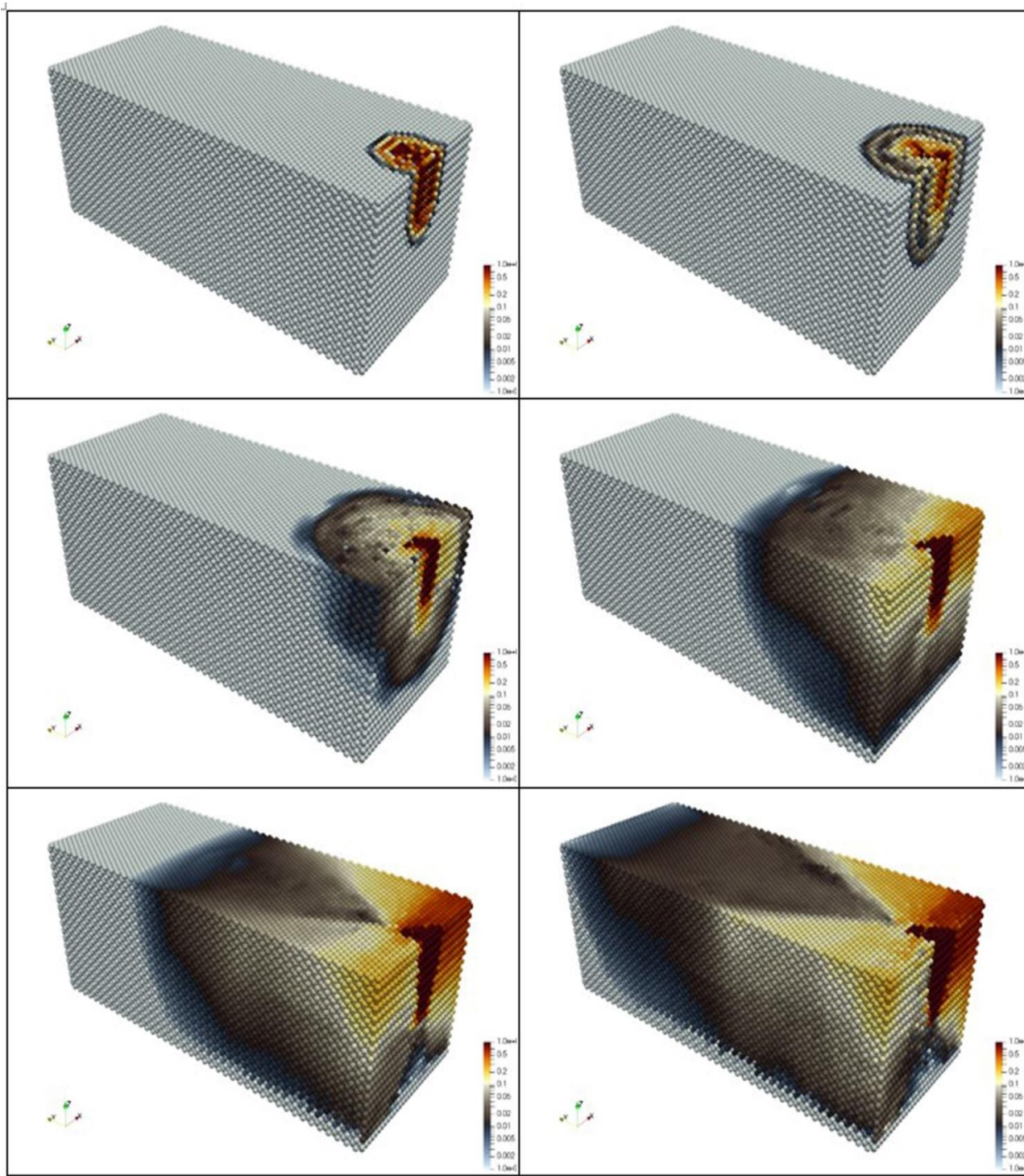
Сходно томе запремински модул еластичности износи према обрасцу 6.16:

$$K = \frac{4428}{3(1-2 \cdot 0,2)} = 2460 \text{ MPa}$$

На крају, брзина простирања лонгитудиналних таласа износи по обрасцу 6.14:

$$V_p = \sqrt{\frac{K}{\rho}} = \sqrt{\frac{2460}{700,8}} = 1874 \left(\frac{m}{s}\right)$$

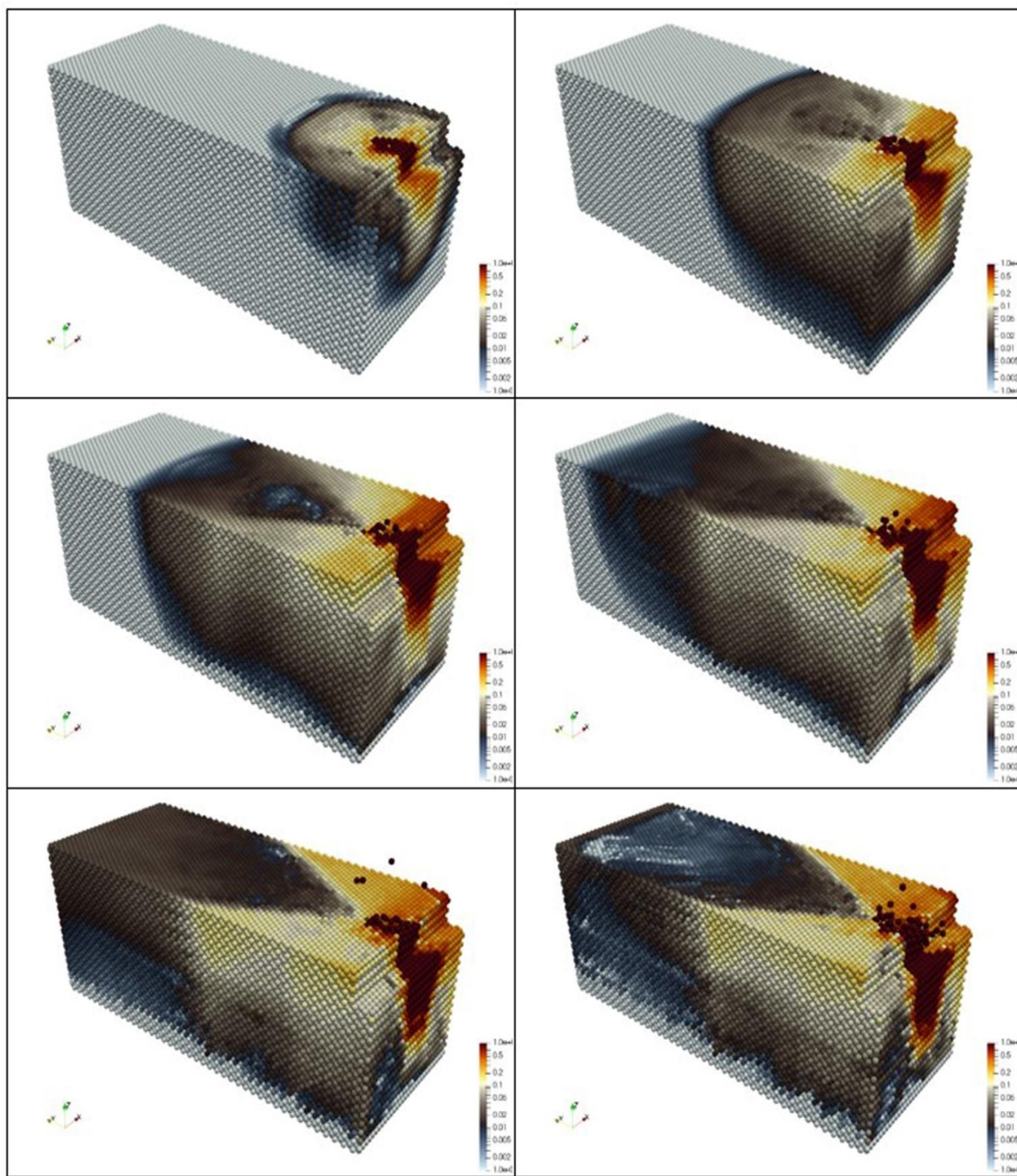
Слика 6.6 и слика 6.7 дају приказ простирања притисног таласа током симулације и као што се може видети долази до јасног издвајања зоне лома или призме обрушавања која ће бити одминирана. На већ дефинисаним локацијама, 150 mm удаљено од минске бушотине, врши се опажање брзине лонгитудиналних таласа.



Слика 6.6 Простирање притисног таласа услед иницирања минске бушотине, модел 1

Модел 1 се односи на иницијално минирање сипорекс блока са бушотином лоцираном 3 mm од његове ивице. Ово представља основни модел и забележена брзина таласа на месту опажања износи 34 mm/s што кореспондира са извршеним мерењима.

Модел 2 симулира ситуацију када постоји варијација линије најмањег отпора насталом приликом претходног минирања. У циљу доказивања наведене тезе извршена је модификација иницијалне геометрије модела 1 са кога је уклоњен појас партикула као што је то приказано на слици 6.2 под б).

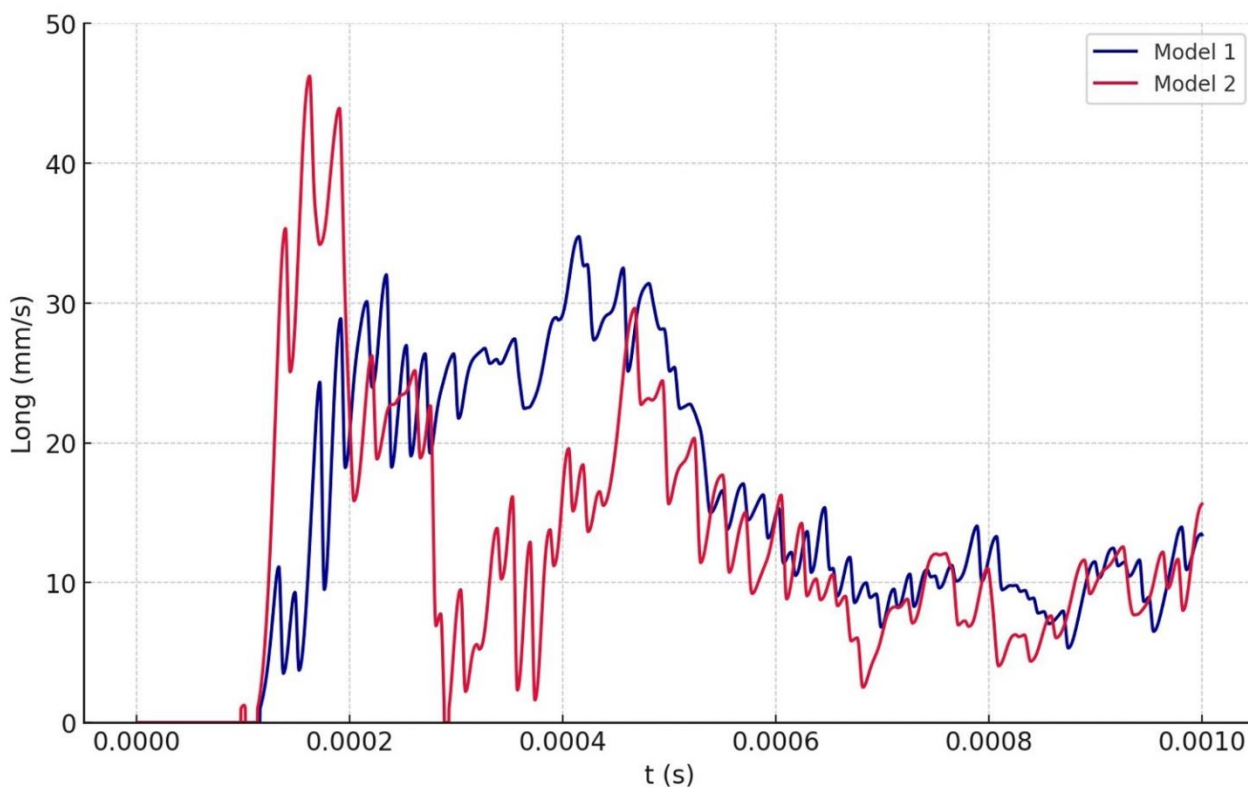


Слика 6.7 Простирање притисног таласа услед иницирања минске бушотине, модел 2

На овај начин се добијају виртуелни услови за тестирање утицаја услова минирања на брзину таласа у тачки осматрања. Код модела 2, извршено је померање локације минске бушотине и тачке опажања сходно наведеним условима.

Резултати јасно показују да се код модела 2 брзина лонгитудиналних таласа повећава на 46mm/s што недвосмислено указује на то да увећање линије најмањег отпора у једном делу модела утиче на повећање брзине лонгитудиналних таласа. Слика 6.8 илуструје временску зависност брзине таласа за оба модела и може се видети да код модела 2 знатно брже долази до постизања максималне вредности брзине у односу на модел 1. након постизања максималних вредности на оба модела је изван тренд пригушења, односно успостављања

претходног равнотежног стања. Овај процес је врло сличан код оба модела без значајнијих одступања.



Слика 6.8 Брзина простирања лонгитудиналних таласа за моделе 1 и 2

Са графичких прилога се може видети да у случају модела 1 фронт притисног таласа има равномернију контуру у односу на модел 2 што даље утиче на оптерећење у делу модела иза минске бушотине.

7. ДИСКУСИЈА

Дијаграм приказан на слици 5.11 и резултати у табели 5.2 показују да се вредности потреса услед иницирања минских бушотина повећавају са повећањем површине одминираниог материјала. На основу испитивања добијени су прецизнији резултати у погледу зависности величине линије најмањег отпора анализирание кроз површину одминираниог материјала за три случаја, али је прво рађено за вредност линије најмањег отпора $W = 20$ mm. Због неправилности на слободној површини након сваког следећег иницирања, зависност је изражена преко површине одминираниог материјала, при чему се она разликује код сваке наредне минске бушотине. Остали подаци су добијени за остала два случаја, где су вредности линије најмањег отпора износиле $W = 30$ mm и $W = 40$ mm. Дакле, анализом података можемо закључити како је највећи интензитет потреса услед иницирања минске бушотине за пројектовану линију најмањег отпора од 40 mm.

Вредност линије најмањег отпора у већини случајева варира и није једнака пројектованој дуж минске бушотине на самом терену. Одступање линије најмањег отпора се одређује помоћу софтвера O-Pitblast, који може да тачно прорачуна све удаљености од осе минског пуњења до слободне површине дуж целе бушотине, а затим се може израчунати површина одминираниог материјала. Због тога кроз испитивања зависност величине линије најмањег отпора од интензитета потреса анализираниа је преко површине одминираниог материјала, јер њена вредност директно утиче на величину површине и запремине одминираниог материјала.

Да би се израчунала зависност максималне брзине осциловања честица (PPV) у односу на одступање линије најмањег отпора од пројектоване за други тест где је $W = 30$ mm, обављено је више мерења на лабораторијском моделу. Мерења су прво извршена када је вредност линије најмањег отпора била једнака пројектованој по целој дужини минске бушотине, а затим и за случај када су одступања била већа од пројектованих. Кроз овај модел, све вредности веће од пројектованих биле су од значаја за анализу, јер према досадашњим истраживањима баш оне утичу на повећање потреса.

На основу испитивања на лабораторијском моделу и добијених резултата, као и анализе истих, извршена је верификација модела утицаја одступања оптерећења на интензитет потреса при минирању на терену. За овај случај испитивања на терену вршено је минирање са неколико минских бушотина при условима сличним као и у лабораторији. На крају испитивања извршена је упоредна анализа резултата који су добијени лабораторијским и теренским испитивањем.

Лабораторијска мерења и подаци послужили су и при моделирању линије најмањег отпора односно њеном одступању од пројектоване и утицају на интензитет потреса услед иницирања минске бушотине применом методе раздвојених елемената. Моделирање и нумеричка анализа су извршени у софтверском пакету YADE, где се са слика 6.6 и 6.7 јасно виде разлике у простирању таласа приликом опита вршених на моделу 1 када је линија најмањег отпора једнака пројектованој и када има одступања, модел 2. Интензитет потреса приказан је на дијаграму слика 6.8, где се виде разлике у максималној брзини осциловања честица тла приликом иницирања минске бушотине, за оба модела.

8. ЗАКЉУЧАК

Модел приказан у докторској дисертацији представља резултате истраживања, где се кроз лабораторијска и теренска мерења, као и израду модела преко методе раздвојених елемената, испитао утицај одступања линије најмањег отпора од пројектоване на интензитет потреса приликом минирања. Током лабораторијских испитивања извршен је већи број мерења за услове када је величина отпора једнака пројектованој и када постоји одступање од пројектованог стања. Потреси изазвани иницирањем минске бушотине праћени су сеизмографима који су постављани на одређеном растојању од минске бушотине. Резултати лабораторијских мерења омогућили су поређење вредности линије најмањег отпора и максималне брзине осциловања честица, за случајеве са и без одступања линије најмањег отпора.

Статистичка анализа резултата мерења и приказ дијаграма јасно указују на разлику у вредностима максималне брзине осциловања честица када постоје веће вредности одступања отпора и за случај када је вредност одступања линије најмањег отпора мања, тј. оптерећење је приближно једнако пројектованој вредности. Вредност величине отпора је променљива дуж минске бушотине, па су резултати математички анализирани испитивањем односа максималне брзине осциловања честица и површине одминираниог материјала који је узет у разматрање.

Модел добијен лабораторијским испитивањем верификован је у теренским условима, на минском пољу где су минске бушотине инициране са различитим вредностима линије најмањег отпора и праћењем брзине осциловања честица. Основни параметар модела, коефицијент K , представља однос максималне брзине осциловања честица и површине одминираниог материјала из лабораторијских и теренских испитивања, што указује да постоји веза између ових вредности, а може се видети кроз резултате прорачуна. Одступање при лабораторијским и теренским условима је изражено преко коефицијента K , који износи 5,5%. Резултати мерења у лабораторијским условима, а посебно на терену, у великој мери зависе од карактеристика материјала и средине у којој се врше испитивања.

Приликом теренских испитивања, присуство међуслојева, раседа и пукотина у материјалу може имати значајан утицај на ефекат минирања, а самим тим на резултате и на интензитет потреса услед минирања. За ову врсту испитивања коришћен је мањи број теренских испитивања и на основу њих урађен модел предвиђања потреса услед одступања линије најмањег отпора. Ова зависност је изражена функцијом, која представља основу за нека будућа истраживања у сврху израде модела предвиђања потреса у зависности од утицаја линије најмањег отпора. Врло је тешко теренским испитивањима обезбедити довољан број мерења, јер често утицај разних фактора смањује могућност коришћења података, али овакав модел би уз неку допуну података могао послужити за даља истраживања.

На основу лабораторијских мерења и модела на коме су истраживања вршена, рађено је и моделирање утицаја кроз нумерички модел преко методе раздвојених елемената. Калибрација модела за ову анализу вршена је према лабораторијском моделу, где су урађени тестови на блоку кроз софтверску анализу, а затим урађена је симулација кроз моделе у условима када је линија најмањег отпора једнака пројектованој и када има већа одступања. Приликом симулације на моделу, вршено је праћење утицаја потреса, где су резултати приказани преко дијаграма, који дају прегледну анализу утицаја потреса и шематски приказ тог утицаја кроз сам модел.

Истраживање приказано кроз ову дисертацију је покушај да се пронађе директна зависност између одступања линије најмањег отпора и потреса при минирању, као и утицаја повећаног одступања линије најмањег отпора на интензитет потреса који настају услед минирања на површинским коповима. Потреси услед минирања не зависе само од једног параметра минирања, као што је линија најмањег отпора, због тога неопходно је спровести даља истраживања како би се модел побољшао у односу на друге услове минирања. Ово истраживање се такође може користити за смањење фактора као што су потреси услед минирања, разлетања стенског материјала, појаве негабарита итд., као и за побољшање безбедности током минирања и заштите животне средине.

9. ЛИТЕРАТУРА

1. S. Milanović, L. Kričak, M. Negovanović, N. Simić, J. Marković and N. Đokić, „Analysis of the Influence of Burden Deviation from the Designed One on the Intensity of the Blast Vibration“, *Applied science*, 2023, 13(23).
2. G. M. Simangunsong, S. Maehara, H. Shimada, S. Kubota, Y. Wada and Y. Ogata, „Vibration and fragmentation by changing the blast burden at Funeo limestone quarry“. *Science and Technology of Energetic Materials*, 2006, Vol. 67, No. 3, 102-110.
3. D. P. Sighn and V. R. Sastry, „An investigation into the effect of blast geometry on rock fragmentation“, *6th ISRM congress*, 1987, Montreal, Canada, 721-725.
4. D. P. Singh, V. R. Sastry and C. V. Suresh, „Fragmentation in jointed rock material-A model scale investigation“, *National Seminar, Indigenous Development of Mining Explosives and Accessories*, 1985, Policies and Programme, New Delhi, India.
5. O. Uysal, E. Arpaz and M. Berber, „Studies on the effect of burden width on blast-induced vibration in open-pit mines“, *Environmental Geology*, 2007, 53, 643-650.
6. B. S. Choudhary and R. Arora, „Influence of front row burden on fragmentation, muckpile shape, excavator cycle time, and back break in surface limestone mines“, *Iranian Journal of Earth Sciences 10*, 2018, 1-10.
7. T. N. Hagan, „Good delay timing -prerequisite of efficient bench blasts“, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics*, 1977, 15(3):47-54.
8. P. A. Rustan, V. S. Vutukuri and T. Naartijvari, „The influence from specific charge, geometric scale and physical properties of homogeneous rocks on fragmentation“, *Procs. Proceedings of the 1st international symposium on rock fragmentation by blasting*, 1983, 1:115-142.
9. T. N. Hagan, „Controlling blast-induced cracking around large caverns“, *International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering, ISRM International Symposium*, Aachen, West Germany, 1982.
10. C. J. Konya and E. J. Walter „Rock Blast“, *Precision Blasting Service*, 1985, Montville, Ohio, USA.
11. S. S. Jenkins, „Adjusting blast design for best results“, *Pit and Quarry*, 1987, Rotterdam, Balkema.
12. C. J. Konya, „Rock blasting and over break control (2nd ed)“, *National Highway Institute*, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 2003.
13. M. Ghiasi, N. Askarnejad, S. R. Dindarloo and H. Shamsoddini, „Prediction of blast boulders in open pit mines via multiple regression and artificial neural networks“. *International Journal Mining Sciences and Technology*, 2016.
14. M. Khandelwal and T. N. Singh, „Prediction of blast induced ground vibration and frequency in opencast mine: a neural network approach“, *Journal of Sound and Vibration*, 2005, 289:711–725.

15. M. Monjezi, K. H. Amini and V. A. Yazdian, „Prediction of flyrock and backbreak in open pit blasting operation: a neuro-genetic approach“, *Arabian Journal of Geosciences*, 2012, 5:441–448.
16. M. Sharma, H. Agrawal and B. S. Choudhary, „Multivariate regression and genetic programming for prediction of backbreak in open-pit blasting“, *Neural Computing and Applications*, 2022, 34:2103–2114.
17. U. Langefors and B. Kihlstrom, „The modern technique of rock blasting“, Wiley, New York, 1963.
18. R. Rai, B. K. Shrivastva and T. N. Singh, „Prediction of maximum safe charge per delay in surface mining“, *Mining Technology (Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy Section A)*, 2005, 114(4):A227–A231.
19. S. Prasad, B. S. Choudhary and A. K. Mishra, „Effect of stemming to burden ratio and powder factor on blast-induced rock fragmentation-a case study“, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, 225.
20. N. K. Dumakor-Dupey, S. Arya and A. Jha, „Advances in Blast-Induced Impact Prediction-A Review of Machine Learning“, *Minerals*, 2021, 11, 601.
21. D. J. Armaghadi, M. Hajihassani, E. T. Mohamad, A. Marto and S. A. Noorani, „Blasting-induced flyrock and ground vibration prediction through an expert artificial neural network based on particle swarm optimization“, *Saudi society for geoscience*, 2013.
22. O. Erten, G. Konak, M. S. Kizil, A. H. Onur and D. Karakus, „Analysis of quarry-blast-induced ground vibrations to mitigate their adverse effects on nearby structures“. *International Journal of Mining and Mineral Engineering*, 2009, Vol. 1, No. 4.
23. „O-Pitblast-Rethinking the Drill & Blast Industry“, доступно на мрежи: <https://www.o-pitblast.com/> (приступљено 04.10.2023.).
24. „Strayos-AI Powered Insights for Drilling, Blasting and Mining“, доступно на мрежи: <https://www.strayos.com/> (приступљено 14.12.2023.).
25. „GSM-BlastMetriX“, доступно на мрежи: <https://3gsm.at/produkte/blastmetrix-uav/> (приступљено 14.12.2023.).
26. W. Lu, Z. Leng, H. Hu, Chen M. and G. Wang, „Experimental and numerical investigation of the effect blast-generated free surfaces on blasting vibration“, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2018, vol.22, no.11, 1374-1398.
27. A. Mortazavi and P. D. Katsabanis, „Modeling burden size and strata dip effects on the surface blasting process“, *International journal of rock mechanics and mining sciences* 38, 2001, 481-498.
28. Sazid M.; Singh T. N. Numerical assessment of spacing–burden ratio to effective utilization of explosive energy. *International Journal of Mining Science and Technology* 25, 2015, 291-297.
29. W. Gao, Z. Zhang Z, B. Li and K. Li, „Study on Numerical Simulation of Geometric Elements of Blasting Funnel Based on PFC5.0“, *Hindawi: Shock and Vibration*, 2021.

30. X. Huo, X. Shi, X. Qiu, H. Chen, J. Zhou, S. Zhang and D. Rao, „Study on Rock Damage Mechanism for Lateral Blasting under High In Situ Stresses“, *Applied science*, 2021, vol. 11.
31. M. Haustein, A. Gladkyy and R. Schwarze, „Discrete element modeling of deformable particles in YADE“, *SoftwareX, TU Bergakademie Freiberg*, Germany, 2017.
32. M. Hosseini, M. Khandelwal, R. Lotfi and M. Eslahi, „Sensitivity analysis on blast design parameters to improve bench blasting outcomes using the Taguchi method“, *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 9:9, 2023.
33. „ERG Industrial: Home“, доступно на мрежи: <https://ergindustrial.com/high-level-blast-design-basics/> (приступљено 11.12.2023.).
34. М. Неговановић, „Модел предвиђања потреса од минирања на површинским коповима применом симулационе методе Монте Карло и фази логике“, докторска дисертација, Рударско-геолошки факултет, Београд, 2015.
35. Н. Пуртић, „Бушење и минирање“, Рударско-геолошки факултет, Београд, 1991.
36. М. Савић, „Минирање на површинским коповима“, Институт за бакар, Бор, 2000.
37. C. L. Jimeno, E. L. Jimeno and F. J. A. Carcedo, „Drilling and blasting of rocks“, *A. A. Balkema*, Rotterdam, Brookfield, 1995.
38. C. J. Konya, „Blast design“, *Intercontinental development*, Montville, Ohio, USA, 1995.
39. O. Akyildiz and T. Hudaverdi, „ANFIS modelling for blast fragmentation and blast-induced vibrations considering stiffness ratio“, *Arabian Journal of Geoscience*, 13, 2020.
40. J. C. Konya and E. J. Walter, „Surface blast design“, *Prentice Hall*, Englewood Cliffs, New Jersey, USA, 1990.
41. Л. Кричак, „Сеизмика минирања“, Центар за минирање, Рударско-геолошки факултет, Београд, 2006.
42. P. Persson, R. Holmerg, J. Lee, „Rock blasting and explosive engineering“, CRC Press, Inc, *Distributed by International Society of Explosives Engineering*, USA, 1994.
43. D. R. Cox, A. N. W. Newton, „Huuse M. An introduction to seismic reflection data: acquisition, processing and interpretation“, *Regional Geology and Tectonics*, Volume 1: Principles of Geological Analysis, 2020, pp. 571-603.
44. „Graphical representation of S. H. M.“, доступно на мрежи: <https://www.askiitians.com/iit-study-material/iit-jee-physics/oscillation/graphical-representation-of-shm/> (приступљено 26.12.2023.).
45. S. Bhandari, „Engineering Rock Blasting Operations“, *Department of Mining Engineering*, J. N.V. University, Jodhpur, India, 1997.
46. G. A. Bollinger, „Blast Vibration Analysis“, Southern Illinois University Press, Carbondale, 1971.

47. D. E. Siskind, M. S. Stagg, J. W. Kopp and C. H. Dowding, „Structure Response and Damage Produced by Ground Vibration from Surface Mine Blasting“. US Bureau of Mines, 1980, R.I. 8507, 74.
48. H. R. Nicholls, C. F. Johnson and W. I. Duvall, „Blasting Vibrations and Their Effects on Structures“, USBM. Bull. 656, 1971.
49. „How the Drilling Tools Selection Impacts Borehole Quality“, доступно на мрежи: <https://www.hardrockdrills.com/drilling-tools-impacts-borehole-quality/> (приступљено 27.12.2023.).
50. D. Zou, „Bench Blasting“, *Theory and Technology of Rock Excavation for Civil Engineering*, 2017, Springer, Singapore.
51. M. S. Hons, „Seismic sensing: Comparison of geophones and accelerometers using laboratory and field data“, University of Calgary, Alberta, 2008.
52. „Micromate, Vibration and Air Overpressure Monitor“, доступно на мрежи: <https://www.geokon.com/Micromate> (приступљено 31.12.2023.).
53. „Blastmate III Operator Manual“, доступно на мрежи: <https://www.instantel.com/resource/blastmate-iii> (приступљено 31.12.2023.).
54. „Home / Instantel Vibration Monitors / Instantel Micromate®“, доступно на мрежи: <https://www.spectotechnology.com/product/instantel-micromate/> (приступљено 31.12.2023.).
55. „Micromate|Instantel“, доступно на мрежи: <https://www.instantel.com/products/micromate> (приступљено 04.10.2023.)
56. S. Milanović, L. Kričak, M. Negovanović, N. Simić, J. Marković and N. Đokić, „Rock Excavation Methods In Urban Areas“, *Underground Mining Engineering*, Faculty of Mining and Geology, 2023, No. 42, pp. 47-64.
57. „CivilMac. Vibrations, controlled detonation effects in underground work“, доступно на мрежи: <https://www.civilmac.com/eadic/vibraciones-efectos-de-detonacion-controlada-en-trabajos-subteraneos/> (приступљено 02.01.2024.).
58. L. Nguyen and N. B. Chan, „Designing an Arduino-microprocessor-and-Labview-based system for monitoring wave spread in the ground caused by constructing activities“, *MATEC Web Conference*, 2017.
59. A. A. M. Niza, T. N. T Chik, A. N. Yusoff, K. M. Shamsudin and A. N. Rahman, „Structural Vibration Assessment of an Old Building Using Experimental Vibration Data“, *Recent Trends in Civil Engineering and Built Environment*, Vol. 2, No. 1, 2021, pp. 418-428.
60. S. Milanović, L. Kričak, M. Negovanović, N. Simić and J. Marković, „Application of Softwares for Drilling and Blasting“, *Underground Mining Engineering*, Faculty of Mining and Geology, 2019, No. 34, pp. 77-89.
61. T. Schenk, „Introduction to Photogrammetry“, *Department of Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science*, The Ohio State University; 2005.

62. M. Borisov, R. Simić, V. M. Petrović and M. Milinčić, „Analiza kvaliteta 3D modela zasnovanih na digitalnoj fotogrametriji“, *Geodetski glasnik*, 2021, 52, 5-26.
63. Д. Васић, „Модел геодетског премера савременим аквизиционим технологијама“, докторска дисертација, факултет техничких наука Нови Сад, 2017.
64. A. A. Taha, „Aerial triangulation using small format digital images“, *Institute of Engineering Surveying and Space Geodesy*, The University of Nottingham, 2005.
65. F. Moffitt and E. Mikhail, „Photogrammetry Third Edition“, 1980, New York: Harper & Row, Inc.
66. „Agisoft Metashape“, доступно на мрежи: <https://www.agisoft.com/> (приступљено 04.01.2024.).
67. „Pix 4D“, доступно на мрежи: <https://www.pix4d.com/> (приступљено 04.01.2024.).
68. Д. Јовановић, „Модел објектно оријентисане класификације у идентификацији геопросторних објеката“, докторска дисертација, факултет техничких наука Нови Сад, 2015.
69. T. Bamford, K. Esmaili and A. P. Schoellig, „A real-time analysis of rock fragmentation using UAV technology“, *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2017, 31, 439–456.
70. Z. X. Zang, L. Y. Chi and C. Yi, „An empirical approach for predicting burden velocities in rock blasting“, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2021, 13, 767–773.
71. „O-Pitblast, Distribution Tool“, доступно на мрежи: downloads.o-pitblast.com/files/manual/O-Pitblast Manual 2021.pdf (приступљено 09.11.2023), 151.
72. M. Wimmer, A. Nordqvist, F. Ouchterlony, U. Nyberg and J. K. Furtney, „Burden movement in confined drift wall blasting tests studied at the LKAB Kiruna SLC mine“, *In Rock Fragmentation by Blasting*, London, UK, 2013; pp. 373–383.
73. D. Bogunovic and V. Kecojevic, „Artificial screen for reducing seismic vibration generated by blasting“, *Environmental Earth Science*, 2007, 53, 517–525.
74. „Pundit 200|Ultrasonic Pulse Velocity Test of Concrete“, доступно на мрежи: <https://www.screeningeagle.com/en/products/pundit-200> (приступљено 04.10.2023).
75. „Pundit 200|Ultrasonic Pulse Velocity Test of Concrete“, доступно на мрежи: <https://www.screeningeagle.com/en/sales-flyers/SFPundit-200> (приступљено 04.10.2023).
76. „Pundit 200|Ultrasonic Pulse Velocity Test of Concrete“, доступно на мрежи: https://media.screeningeagle.com/asset/Downloads/Pundit%20202_Operating%20Instructions_English.pdf (приступљено 4.10.2023).
77. „Instantel|Instantel Products“, доступно на мрежи: <https://www.instantel.com/products> (приступљено 4.10.2023).

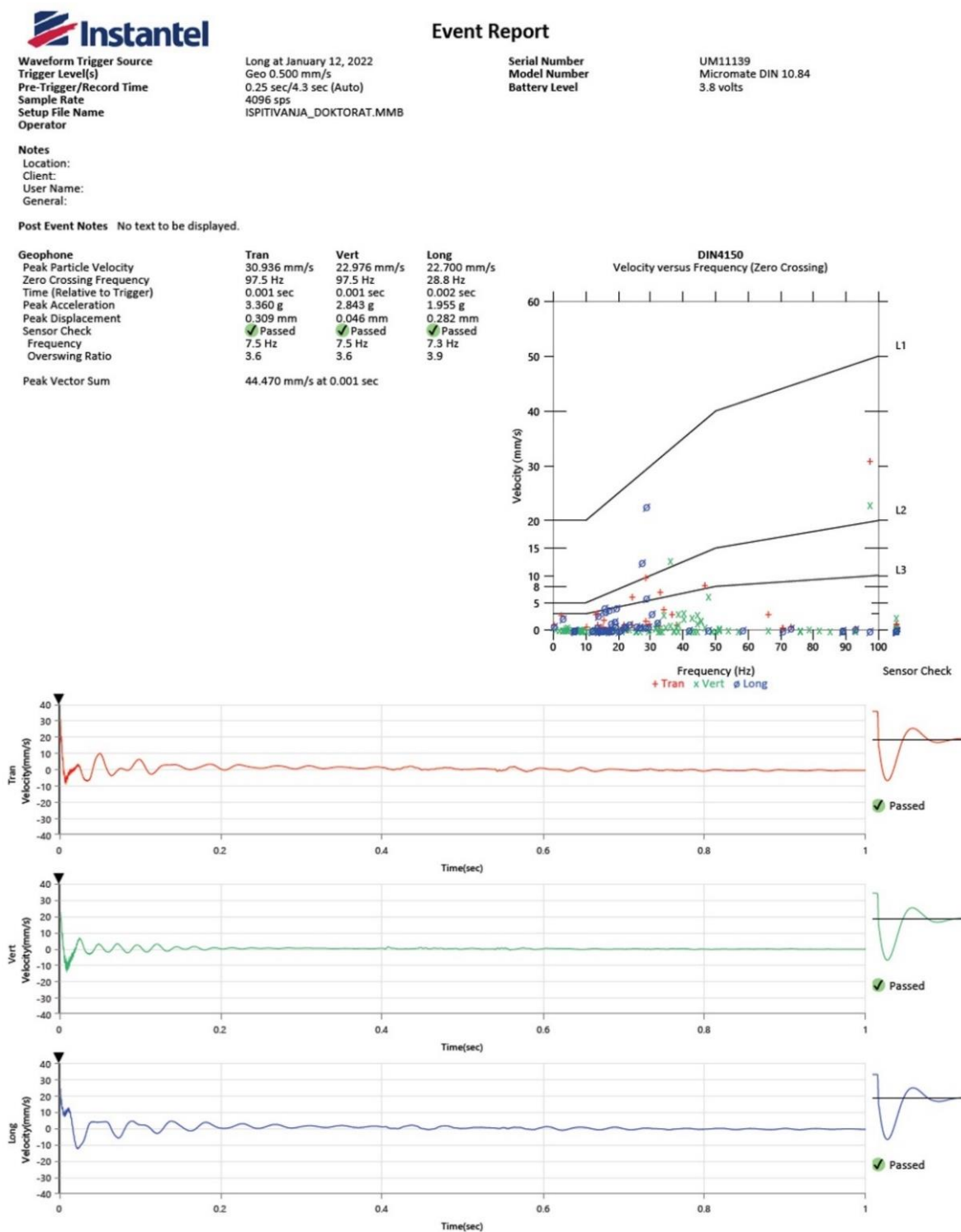
78. „Thor|Instantel“, доступно на мрежи: <https://www.instantel.com/products/thor> (приступљено 12.11.2023).
79. „Sensors & Accessories|Instantel“, доступно на мрежи: <https://www.instantel.com/sites/instantel.com/files/media/202211/M7063%20Micromate%20and%20Minimate%20Pro%20Microphones-Rev%2003.pdf> (приступљено 04.10.2023).
80. R. S. Faradonbeh, D. J. Armaghani, M. Z. Abd Majid, M. M. Tahir, B. R. Murlidhar, M. Monjezi, and H. M. Wong, „Prediction of ground vibration due to quarry blasting based on gene expression programming: A new model for peak particle velocity prediction“, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2016, 13, 1453–1464.
81. „DIN 4150-3; Structural Vibration Part 3: Effects of Vibration on Structures“, German Institute for Standardisation: Berlin, Germany, 1999.
82. В. Лапчевић, „Утицај променљивости особина зарушеног стенског материјала на гравитациони ток код метода подетажног зарушавања“, докторска дисертација, Рударско-геолошки факултет, Београд, 2020.
83. Z. Gyurkó, K. Bagi and A. Borosnyoi, „Discrete Element Modelling of uniaxial compression test of hardened concrete“, *Journal of Silicate Based and Composite Materials*, 2014, 66: 113-119
84. P. A. Cundall and D. H. Hart, „Numerical modeling of discontinua, Engineering Computations“, 1992, Vol. 9, No. 2, pp. 101-113.
85. Cundall P. A. and Strack O. D., „A discrete numerical model for granular assemblies“, *Geotechnique*, vol. 29, no. 1, pp. 47-65, 1979.
86. T. Kawaguchi, T. Tanaka and Y. Tsuji, „Numerical simulation of two-dimensional fluidized beds using the discrete element method (comparison between the two- and three-dimensional models)“, *Powder Technology*, pp. 129-138, 1998.
87. K. Iwashita and M. Oda, „Micro-deformation mechanism of shear banding process based on modified distinct element method“, *Powder Technology*, vol. 109, p. 192–205, 2000.
88. J. P. Bardet and J. Proubet, „A numerical investigation of the structure of persistent shear bands in granular media“, *Geotechnique*, vol. 41, no. 4, pp. 599-613, 1991.
89. S. Fazekas, J. Török, J. Kertész and D. E. Wolf, „Morphologies of three-dimensional shear bands in granular media“, *Physical Review E*, 2006, vol. 74, no. 3, p. 031303.
90. A. Bobet, A. Fakhimi, S. Johnson, J. Morris, F. Tonon and M. Yeung, „Numerical Models in Discontinuous Media: Review of Advances for Rock Mechanics Applications“, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 135, no. 11, p. 1547–1561, 2009.
91. A. Munjiza, „The Combined Finite-Discrete Element Method“, London: John Wiley & Sons Ltd, 2004.
92. S. Kanou, M. Amano, Y. Terasaka, N. Matsumoto and T. Wada, „Terra-mechanical simulation using distinct element method“, *Komatsu Technical Report*, 2003, Vol. 49, No. 151, pp. 13–19.

93. J. D. Riera, L. F. F. Miguel and I. Iturrioz, „Assessment of Brazilian tensile test by means of the truss-like Discrete Element Method (DEM) with imperfect mesh“, *Engineering Structures*, 2014, Vol. 81, pp. 10-21.
94. J. M. Padbidri and S. D. Mesarović, „Acceleration of DEM algorithm for quasistatic processes“, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2011, vol. 86, p. 816–828.
95. J. M. Padbidri, C. M. Hansen, S. D. Mesarović and B. Muhunthan, „Length Scale for Transmission of Rotations in Dense Granular Materials“, *Journal of Applied Mechanics*, 2012, vol. 79, pp. 031011-1.
96. N. V. Brilliantov, F. Spahn, J. M. Hertzsch and T. Pöschel, „Model for collisions in granular gases“, *Physical Review E*, 1996, vol. 53, p. 5382.
97. J. Kozicki and F. V. Donzé, „YADE-OPEN DEM: an open-source software using a discrete element method to simulate granular material“, *Engineering Computations*, Vol. 26 Issue: 7, pp.786-805, 2009
98. V. Šmilauer, „Cohesive particle model using the discrete element method on the yade platform“ [Ph.D. thesis] Czech Technical University, Université Grenoble I, Prague, Grenoble, 2010.
99. M. Hausteijn, A. Gladkyy and R. Schwarze, „Discrete element modeling of deformable particles in {yade}“, *SoftwareX* (6), pages 118 – 123, 2017.
100. „Yade“, доступно на мрежи: <https://launchpad.net/yade> (приступљено 27.01.2024).
101. F. V. Donzé and P. Bernasconi, „Simulation of the blasting patterns in shaft sinking using a discrete element method“, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, 9, 1-44.

10. ПРИЛОЗИ

Прилог 1. Записи измерених потреса са инструмената

Приказ неколико измерених података и записа са сеизмографа услед иницирања минске бушотине на моделима, при условима када је линија најмањег отпора једнака пројектованој и када има одступања од пројектованог стања.



Слика 10.1 Запис инструмента када је линија најмањег отпора била једнака пројектованој линији најмањег отпора од 30 mm, модел бр.1



Waveform Trigger Source
 Trigger Level(s)
 Pre-Trigger/Record Time
 Sample Rate
 Setup File Name
 Operator

Tran at January 13, 2022
 Geo 0.500 mm/s
 0.25 sec/4.4 sec (Auto)
 4096 sps
 ISPITIVANJA_DOKTORAT.MMB

Event Report

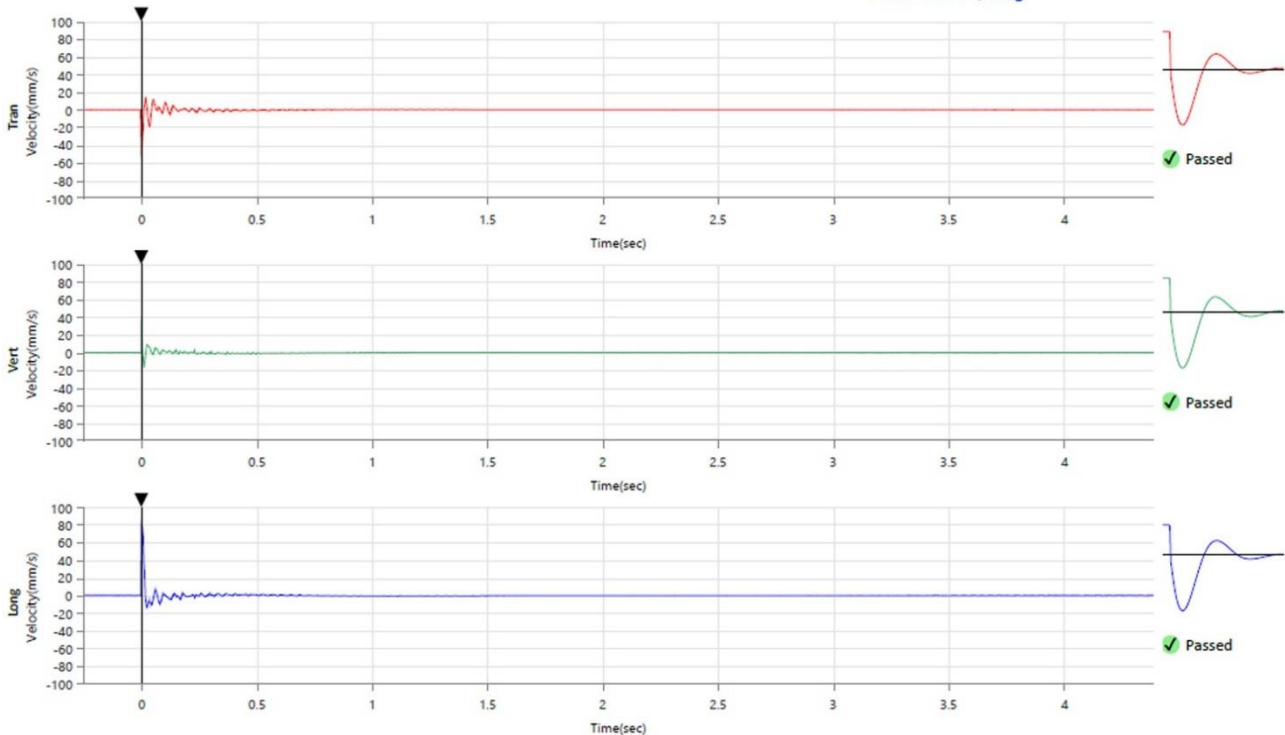
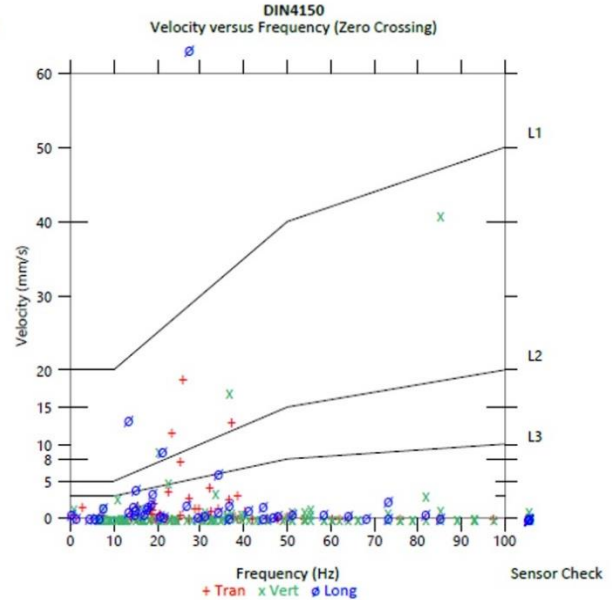
Serial Number
 Model Number
 Battery Level

UM11139
 Micromate DIN 10.84
 3.8 volts

Notes
 Location:
 Client:
 User Name:
 General:

Post Event Notes No text to be displayed.

Geophone	Tran	Vert	Long
Peak Particle Velocity	53.715 mm/s	40.922 mm/s	86.085 mm/s
Zero Crossing Frequency	7.4 Hz	85.3 Hz	27.3 Hz
Time (Relative to Trigger)	0.002 sec	0.002 sec	0.002 sec
Peak Acceleration	4.446 g	5.002 g	8.257 g
Peak Displacement	0.168 mm	0.136 mm	0.440 mm
Sensor Check	✓ Passed	✓ Passed	✓ Passed
Frequency	7.5 Hz	7.5 Hz	7.3 Hz
Overswing Ratio	3.6	3.6	3.8
Peak Vector Sum	109.410 mm/s at 0.002 sec		



Слика 10.2 Запис инструмента када је линија најмањег отпора имала одступања од пројектоване, модел бр.1



Event Report

Waveform Trigger Source
Trigger Level(s)
Pre-Trigger/Record Time
Sample Rate
Setup File Name
Operator

Long at February 21, 2022
Geo 0.500 mm/s
0.25 sec/4.5 sec (Auto)
4096 sps
ISPITIVANJA DOKTORAT.MMB

Serial Number
Model Number
Battery Level

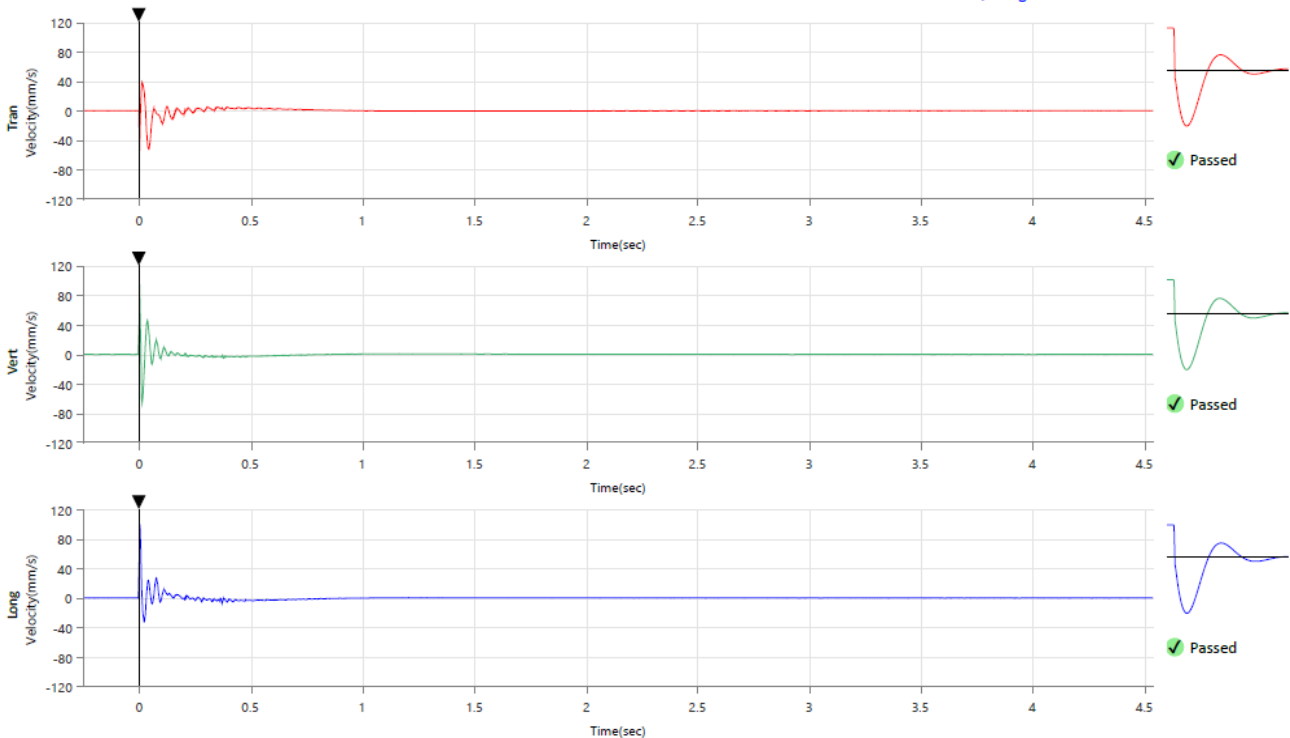
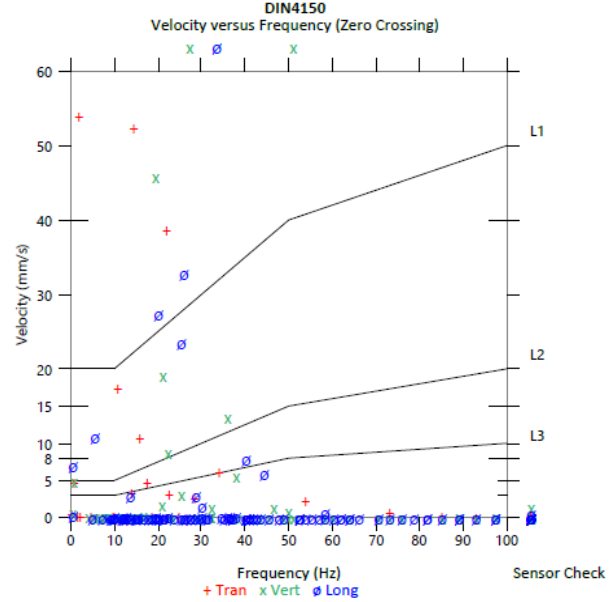
UM11139
Micromate DIN 10.84
3.8 volts

Notes

Location:
Client:
User Name:
General:

Post Event Notes No text to be displayed.

Geophone	Tran	Vert	Long
Peak Particle Velocity	53.990 mm/s	94.732 mm/s	99.398 mm/s
Zero Crossing Frequency	64.0 Hz	53.9 Hz	33.0 Hz
Time (Relative to Trigger)	0.002 sec	0.002 sec	0.004 sec
Peak Acceleration	6.055 g	8.862 g	8.639 g
Peak Displacement	0.708 mm	0.639 mm	0.776 mm
Sensor Check	✓ Passed	✓ Passed	✓ Passed
Frequency	7.5 Hz	7.5 Hz	7.3 Hz
Overswing Ratio	3.6	3.6	3.9
Peak Vector Sum	136.346 mm/s at 0.002 sec		



Слика 10.3 Запис инструмента када је линија најмањег отпора била једнака пројектованој линији најмањег отпора од 30 mm, модел бр. 5



Event Report

Waveform Trigger Source
Trigger Level(s)
Pre-Trigger/Record Time
Sample Rate
Setup File Name
Operator

Long at February 21, 2022
Geo 0.500 mm/s
0.25 sec/4.5 sec (Auto)
4096 sps
ISPITIVANJA_DOKTORAT.MMB

Serial Number
Model Number
Battery Level

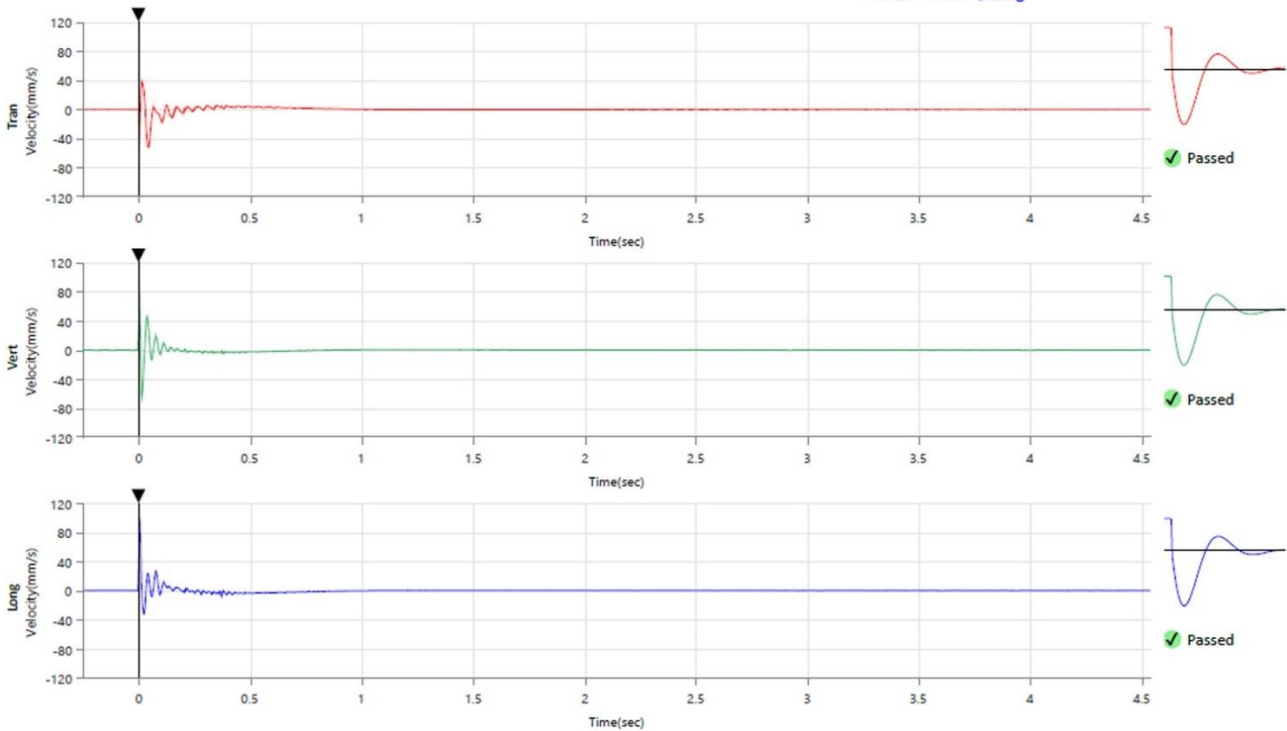
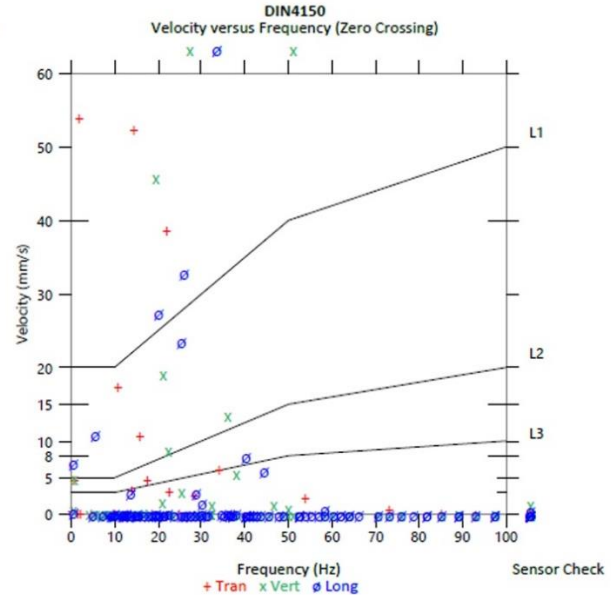
UM11139
Micromate DIN 10.84
3.8 volts

Notes

Location:
Client:
User Name:
General:

Post Event Notes No text to be displayed.

Geophone	Tran	Vert	Long
Peak Particle Velocity	53.990 mm/s	94.732 mm/s	99.398 mm/s
Zero Crossing Frequency	64.0 Hz	53.9 Hz	33.0 Hz
Time (Relative to Trigger)	0.002 sec	0.002 sec	0.004 sec
Peak Acceleration	6.055 g	8.862 g	8.639 g
Peak Displacement	0.708 mm	0.639 mm	0.776 mm
Sensor Check	✓ Passed	✓ Passed	✓ Passed
Frequency	7.5 Hz	7.5 Hz	7.3 Hz
Overswing Ratio	3.6	3.6	3.9
Peak Vector Sum	136.346 mm/s at 0.002 sec		



Слика 10.4 Запис инструмента када је линија најмањег отпора имала одступања од пројектоване, модел бр.5



Event Report

Waveform Trigger Source
 Trigger Level(s)
 Pre-Trigger/Record Time
 Sample Rate
 Setup File Name
 Operator

Tran at February 22, 2022
 Geo 0.500 mm/s
 0.25 sec/4.0 sec (Auto)
 4096 sps
 ISPITIVANJA_DOKTORAT.MMB

Serial Number
 Model Number
 Battery Level

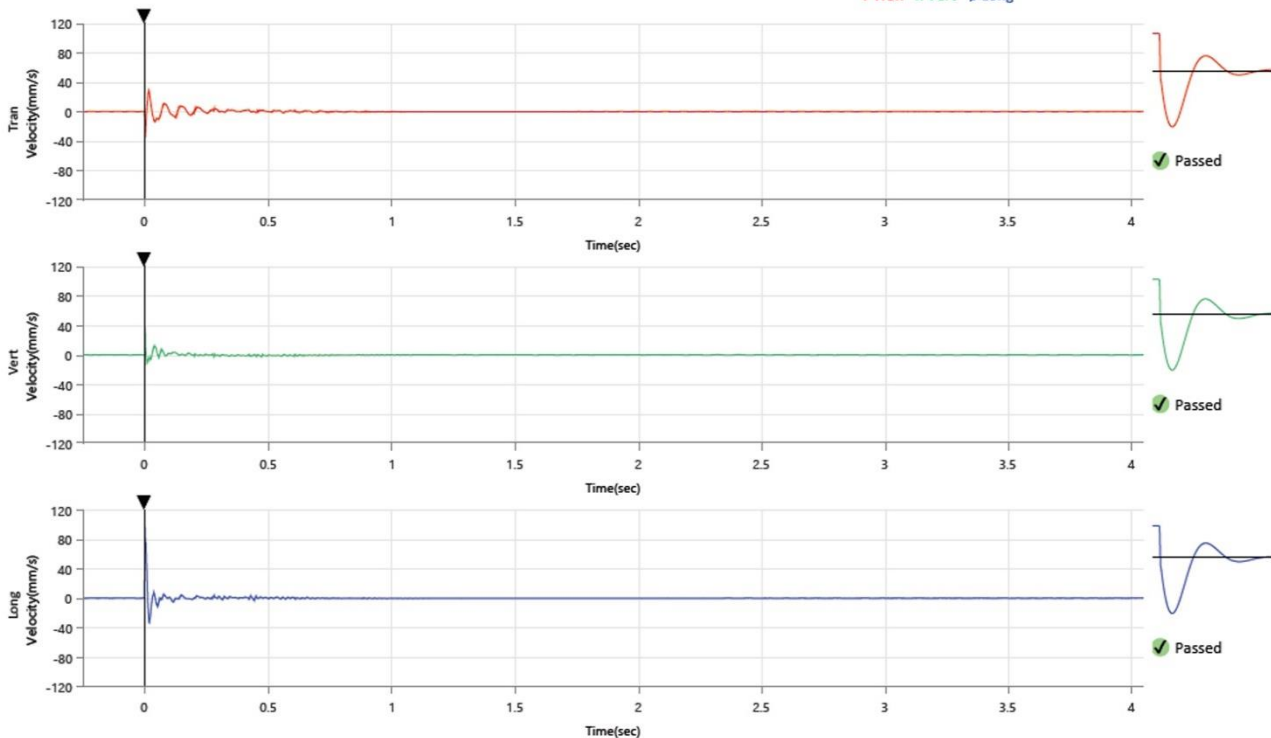
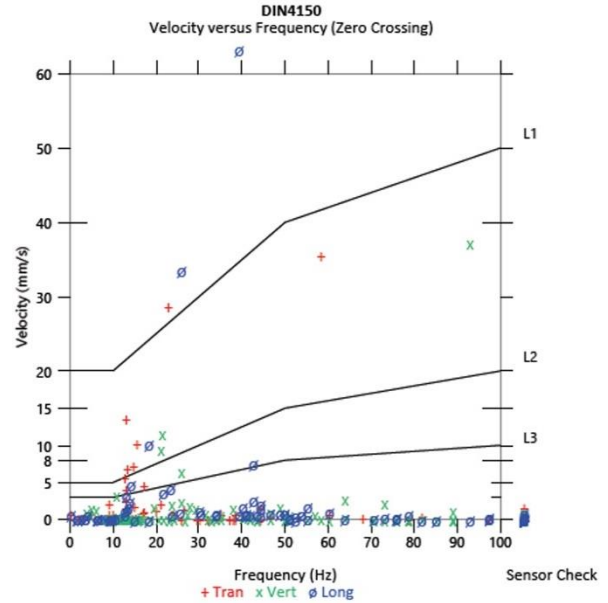
UM11139
 Micromate DIN 10.84
 3.7 volts

Notes

Location:
 Client:
 User Name:
 General:

Post Event Notes No text to be displayed.

Geophone	Tran	Vert	Long
Peak Particle Velocity	35.547 mm/s	37.368 mm/s	96.064 mm/s
Zero Crossing Frequency	58.5 Hz	93.1 Hz	39.4 Hz
Time (Relative to Trigger)	0.002 sec	0.002 sec	0.002 sec
Peak Acceleration	2.554 g	3.495 g	8.727 g
Peak Displacement	0.174 mm	0.084 mm	0.311 mm
Sensor Check	✓ Passed	✓ Passed	✓ Passed
Frequency	7.5 Hz	7.5 Hz	7.3 Hz
Overswing Ratio	3.6	3.6	3.8
Peak Vector Sum	108.672 mm/s at 0.002 sec		



Слика 10.5 Запис инструмента када је линија најмањег отпора била једнака пројектованој линији најмањег отпора од 30 mm, модел бр. 8



Event Report

Waveform Trigger Source
Trigger Level(s)
Pre-Trigger/Record Time
Sample Rate
Setup File Name
Operator

Long at February 22, 2022
Geo 0.500 mm/s
0.25 sec/3.8 sec (Auto)
4096 sps
ISPITIVANJA_DOKTORAT.MMB

Serial Number
Model Number
Battery Level

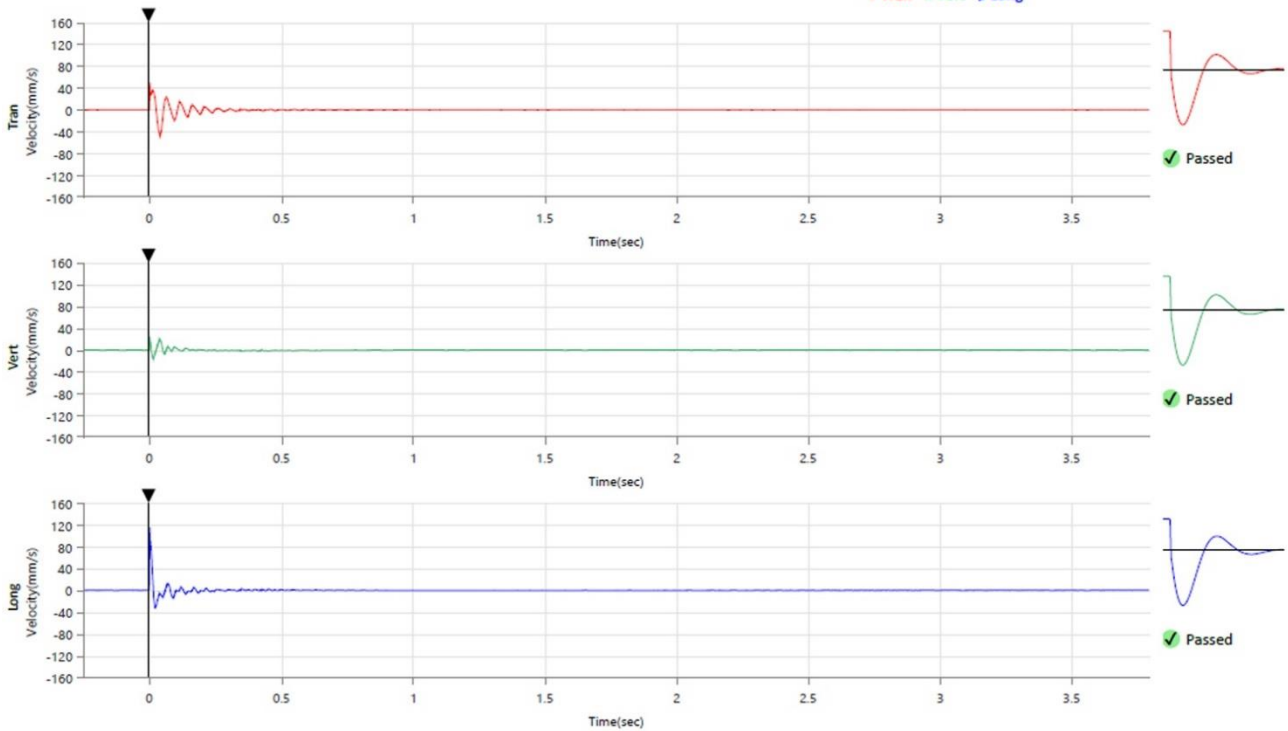
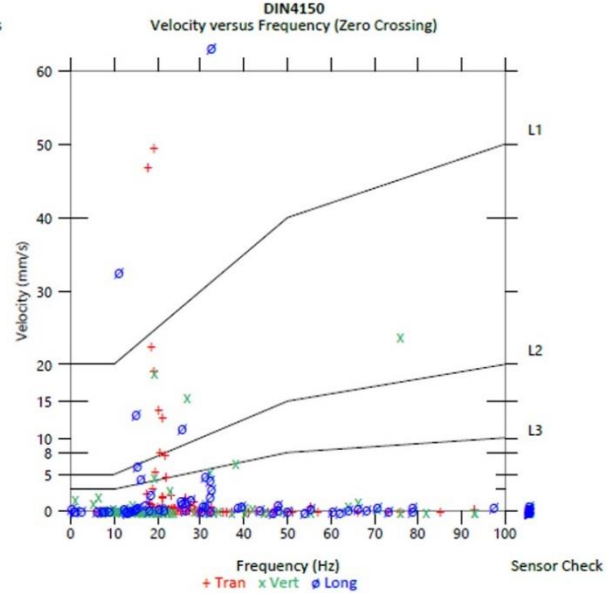
UM11139
Micromate DIN 10.84
3.7 volts

Notes

Location:
Client:
User Name:
General:

Post Event Notes No text to be displayed.

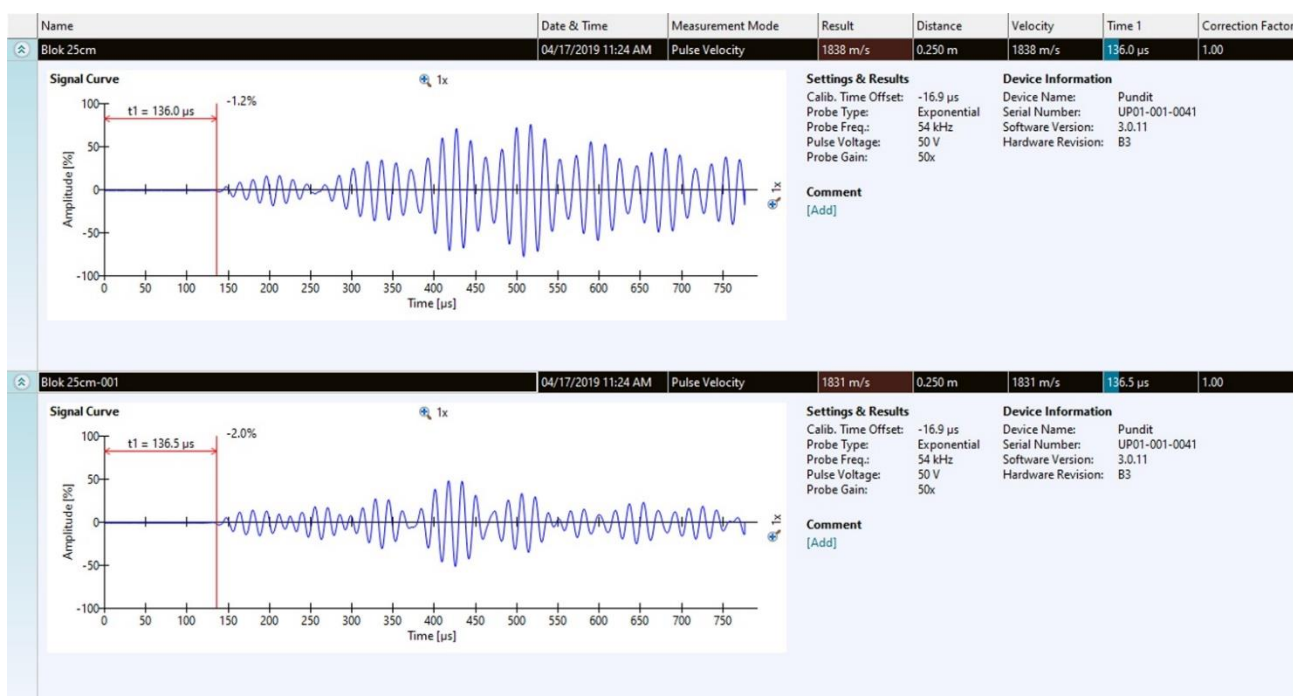
Geophone	Tran	Vert	Long
Peak Particle Velocity	49.514 mm/s	24.008 mm/s	115.067 mm/s
Zero Crossing Frequency	19.1 Hz	75.9 Hz	32.5 Hz
Time (Relative to Trigger)	0.002 sec	0.002 sec	0.002 sec
Peak Acceleration	4.505 g	2.508 g	10.432 g
Peak Displacement	0.407 mm	0.144 mm	0.432 mm
Sensor Check	✓ Passed	✓ Passed	✓ Passed
Frequency	7.5 Hz	7.5 Hz	7.3 Hz
Overswing Ratio	3.6	3.6	3.9
Peak Vector Sum	127.118 mm/s at 0.002 sec		



Слика 10.6 Запис инструмента када је линија најмањег отпора имала одступања од пројектоване, модел бр.8

Прилог 2. Запис и измерни подаци брзине простирања таласа кроз материјал

Измерени подаци брзине простирања таласа кроз блокове, који су коришћени при испитивању у лабораторијским условима.



Слика 10.7 Запис инструмента приликом мерења брзине простирања лонгитудиналних таласа

Прилог 3. Приказ кода при моделирању утицаја линије најмањег отпора

Приказ кода нумеричком анализом и применом методе раздвојених елемената код моделирања утицаја линије најмањег отпора на интензитет потреса услед минирања када је једнака пројектованој и када има одступања.

```
1. import math
2. import os
3. import sys
4. import random
5. import time
6. from yade import pack, qt, plot, timing, utils
7. from yade.params.table import *
8. from math import radians, sqrt
9.
10. # Define material parameters
11. readParamsFromTable(
12.     noTableOk=True,
13.     testType='cyl', # Type of test ['cyl','cube']
14.     density=960,
15.     young=3.5e9,
16.     poisson=.2,
17.     frictionAngle=radians(32),
18.     sigmaT=3e5,
19.     epsCrackOnset=1e-4,
20.     relDuctility=30,
21. )
22.
23. # Append materials
24. concMat = O.materials.append(
25.     CpmMat(density=density, young=young, frictionAngle=frictionAngle,
26.           poisson=poisson, sigmaT=sigmaT, epsCrackOnset=epsCrackOnset,
27.           relDuctility=relDuctility)
28. )
29.
30. concMat0 = O.materials.append(
31.     CpmMat(density=density, young=young, frictionAngle=0,
32.           poisson=poisson, sigmaT=sigmaT, epsCrackOnset=epsCrackOnset,
33.           relDuctility=relDuctility)
34. )
35.
36. # Define geometric parameters
37. chargeRadius = 0.004
38. particleRad = chargeRadius
39.
40. # Create geometric objects
41. charge = pack.inCylinder((0.125, 0.03, .17), (0.125, 0.03, 0.25), chargeRadius)
42. block = pack.inAlignedBox((0, 0, 0), (0.25, 0.6, 0.25))
43. boxOut = pack.inAlignedBox((-0.05, -0.05, -0.05), (0.30, 0.63, 0.30))
44.
45. O.bodies.append(pack.regularHexa(block, radius=particleRad, gap=0, material=concMat,
46. color=(0.6, 0.6, 0.6)))
47.
48. print("Packing finished")
49.
50. # Function to fix certain bodies based on position
51. def fix():
52.     for o in O.bodies:
53.         if isinstance(o.shape, Sphere) and o.state.pos[2] < 0.025:
54.             o.state.blockedDOFs += 'xyz'
55.             o.shape.color = (1, 0, 0)
56.
57. fix()
58. print("Fix finished")
59.
60. # Color and adjust charge particles
```

```

60. for o in O.bodies:
61.     if isinstance(o.shape, Sphere) and charge(o.state.pos, 0.25 * o.shape.radius):
62.         o.shape.color = (0, 0, 1)
63.         o.shape.radius = 2 * chargeRadius
64.
65. O.step()
66. utils.calm()
67.
68. # Monitor location function
69. def monitorLocation():
70.     target = (0.125, 0.18, 0.25)
71.     min_distance = float('inf')
72.     closest_body = None
73.
74.     for b in O.bodies:
75.         if isinstance(b.shape, Sphere):
76.             distance = sqrt(sum((b.state.pos[i] - target[i]) ** 2 for i in range(3)))
77.             if distance < min_distance:
78.                 min_distance = distance
79.                 closest_body = b
80.
81.     closest_body.shape.highlight = True
82.     return closest_body
83.
84. monitorID = monitorLocation()
85. print(monitorID.state.pos[0], monitorID.state.pos[1], monitorID.state.pos[2])
86.
87. # Add plot data function
88. def addPlotData(body):
89.     vel = body.state.vel
90.     Vx, Vy, Vz = (v if abs(v) > 1e-3 else 0 for v in vel)
91.     V = math.sqrt(Vx**2 + Vy**2 + Vz**2)
92.     plot.addData(t=O.time, V=V, Vx=Vx, Vy=Vy, Vz=Vz)
93.     plot.saveGnuplot('data_base_model')
94.
95. plot.plots = {'t': ('Vy', 'Vz', 'Vx')}
96. plot.liveInterval = 1
97. plot.plot(subPlots=False)
98.
99. # Pressure and force calculation
100. P = 1e6 # 1MPa
101. A = 2 * math.pi * chargeRadius * 0.05
102. F_tot = P * A
103. nIter = 1
104. F_i = F_tot / nIter
105.
106. # Function to apply force
107. def forceApply(initiationData, F_i):
108.     for id2, norm in initiationData:
109.         fx, fy, fz = (0.33 * norm[i] * F_i for i in range(3))
110.         O.forces.setPermF(id2, (fx, fy, fz))
111.
112. # Collect charge IDs and calculate total volume
113. chargeIDs = [b.id for b in O.bodies if isinstance(b.shape, Sphere) and b.shape.color == (0,
0, 1)]
114. chargeParticlesTotalVolume = sum(O.bodies[id].state.mass for id in chargeIDs)
115.
116. # Initiate and apply forces
117. initiationData = []
118. for id1 in chargeIDs:
119.     for i in O.interactions:
120.         if i.id1 == id1 and i.id2 not in chargeIDs:
121.             norm = i.geom.normal
122.             O.bodies[i.id2].shape.color = (0, 1, 0.1)
123.             initiationData.append((i.id2, norm))
124.
125. forceApply(initiationData, F_i)
126.

```



```
127. # Erase charge bodies
128. for id in chargeIDs:
129.     O.bodies.erase(id)
130.
131. print("Prep finished")
132.
133. # Simulation setup
134. O.dt = 2e-7
135. enlargeFactor = 1
136. O.engines = [
137.     ForceResetter(),
138.     InsertionSortCollider([Bo1_Sphere_Aabb(aabbEnlargeFactor=enlargeFactor),
Bo1_Wall_Aabb(), Bo1_Facet_Aabb()], label='collider'),
139.     InteractionLoop([Ig2_Sphere_Sphere_ScGeom(interactionDetectionFactor=enlargeFactor),
Ig2_Wall_Sphere_ScGeom()], [Ip2_CpmMat_CpmMat_CpmPhys()], [Law2_ScGeom_CpmPhys_Cpm()] ),
140.     NewtonIntegrator(damping=.8, gravity=[0, 0, -9.81]),
141.     PyRunner(initRun=True, iterPeriod=1, command='addPlotData(monitorID)'),
142.     VTKRecorder(fileName=os.path.join(os.getcwd(), 'output', 'blast_base_model'),
recorders=['all'], iterPeriod=100, initRun=True),
143. ]
144.
145. O.run(5000)
146.
```

БИОГРАФИЈА

Стефан Милановић рођен је 23.08.1991. године у Београду. Основну и средњу школу завршио је у Лајковцу са одличним успехом. Основне студије студијски програм - рударско инжењерство, модул - површинска експлоатација лежишта минералних сировина, уписао 2010. године. Основне студије завршио је 2014. године и одбранио завршни рад са оценом 10 и просечном оценом свих положених испита 8,61. Мастер студије на Рударско – геолошком факултету у Београду, модул – површинска експлоатација лежишта минералних сировина, уписао је 2014. године. Године 2015. завршио је мастер студије и одбранио мастер рад са оценом 10 и просечном оценом свих положених испита 9,20.

Током основних и мастер студија одрадио је две стручне праксе (РБ „Колубара“, Експлозивни РУДЕКС). У току мастер студија запослио се на Рударско-геолошком факултету у Београду (Катедри за површинску експлоатацију лежишта минералних сировина), као истраживач на пројекту технолошког развоја, министарстава просвете, науке и технолошког развоја „Вишенаменски аутономни систем за даљинско праћење параметара стања у рудницима и окружењу, ТР33003“. Као сарадник проф. др Лазара Кричка учествовао на већем броју мерења сеизмичких потреса услед минирања, као и изради елабората, пројеката и техничких решења. Аутор или коаутор више научних радова са међународних или домаћих часописа и радова са међународних конференција.

Докторске студије на Рударско-геолошком факултету у Београду, студијски програм - рударско инжењерство, уписао је 2016. године. Обучен за рад на софтверима, управљање беспилотним летелицама, као и познавање енглеског језика. Користи AutoCAD, O-Pitblast, као и неколицину специјализованих софтвера из области рударства и софтвера за израду 3D модела терена. У новембру 2017. године, положио је стручни испит из области рударства.

ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Име и презиме аутора: Стефан В. Милановић

Број индекса: P709/16

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Моделирање утицаја одступања линије најмањег отпора од пројектоване на интензитет
потреса од минирања

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

Потпис аутора

У Београду, 07.02.2024.године

ИЗЈАВА О ИСТОВЕТНОСТИ ШТАМПАНЕ И ЕЛЕКТРОНСКЕ ВЕРЗИЈЕ ДОКТОРСКОГ РАДА

Име и презиме аутора Стефан В. Милановић

Број индекса Р709/16

Студијски програм Рударско инжењерство

Наслов рада Моделирање утицаја одступања линије најмањег отпора од пројектоване на интензитет потреса од минирања

Ментор проф. др Лазар Кричак

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

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

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

Потпис аутора

У Београду, 07.02.2024.године

ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ

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

Моделирање утицаја одступања линије најмањег отпора од пројектоване на интензитет потреса од минирања

која је моје ауторско дело.

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

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

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

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

Потпис аутора

У Београду, 07.02.2024.године

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