

УНИВЕРЗИТЕТ У БАЊОЈ ЛУЦИ

ФАКУЛТЕТ: Рударски



ИЗВЈЕШТАЈ

о оцјени урађене докторске дисертације

І ПОДАЦИ О КОМИСИЈИ

На основу члана 61. и 141. Закона о високом образовању („Службени Гласник РС“ број: 67/20), члана 54. Статута Универзитета у Бањој Луци, те члана 21. Статута Рударског факултета Универзитета у Бањој Луци, Научно – наставно вијеће Рударског факултета је на 100. сједници одржаној дана 18.04.2022. године донијело Одлуку број: :21/1.301/22 којом је именована комисија за преглед и оцјену урађене докторске дисертације кандидата мр Љубице Фигун под називом: „Моделирање осциловања стијенске масе при мињавању у функцији заштите објеката“ у саставу:

1. др Лазар Стојановић, ванредни професор, ужа научна област Површинска експлоатација минералних сировина, Рударски факултет Приједор, Универзитет у Бањој Луци-предсједник
2. др Владимир Малбашић, редовни професор, ужа научна област Површинска експлоатација минералних сировина, Рударски факултет Приједор, Универзитет у Бањој Луци-члан
3. др Небојша Гојковић, редовни професор, ужа научна област Експлоатација чврстих минералних сировина и механика стијена, Рударско-геолошки факултет Београд, Универзитет у Београду-члан

Комисија је у предложеном року прегледала и оцијенила докторску дисертацију кандидата мр Љубице Фигун под називом: „Моделирање осциловања стијенске масе при мињавању у функцији заштите објеката“, те у складу са важећим универзитетским правилницима и прописима, Научно – наставном вијећу Рударског факултета Универзитета у Бањој Луци и Сенату Универзитета у Бањој Луци подноси извјештај.

- 1) Навести датум и орган који је именовано комисију;
- 2) Навести састав комисије са назнаком имена и презимена сваког члана, научно-наставног звања, назива уже научне области за коју је изабран у звање и назива универзитета/факултета/института на којем је члан комисије запослен.

ІІ ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ

Љубица, Васиљ, Фигун, рођена је 25.02.1979. године у Приједор, где је завршила основну и средњу хемијско-грађевинску школу и стекла звање грађевински техничар за високоградњу. Универзитетску диплому рударског инжењера стекла је 2003. године на Универзитету у Бањој Луци, Технолошки факултет Бања Лука, Рударски одсек Приједор. Дипломирала је на тему: „Анализа повреда на раду у РЈ ”Рудник” ЗДП РиТЕ ”Угљевик” са приједлогом мјера заштите“ са оцјеном 10 и стекла звање

дипломирани инжењер рударства.

Послиједипломске студије уписала је 2005. године на Рударско – геолошком факултету, Универзитет у Београду, Рударски одсек, научна област Рударство, научно подручје Заштита на раду и заштита животне средине и магистрала 2014. године, на тему: „Зонирање буке на површинском копу “Бувач“ – Приједор“ и стекла звање магистар техничких наука из области рударства.

Процедуру пријаве докторске дисертације кандидат је започео 2015. године. Одлуком Наставно-научног Вијећа Рударског факултета Универзитета у Бањој Луци број: 21/3.222/15 од дана 03.06.2015. године именована је Комисија за оцјену подобности теме „Моделирање осциловања стијенске масе при минирању у функцији заштите објеката“ и кандидата мр Љубице Фигун. На 45. редовној сједници, одржаној дана 14.09.2015. године, Наставно-научно Вијеће Рударског факултета је донијело Одлуку о усвајању Извјештаја Комисије о оцјени подобности теме и кандидата за израду докторске дисертације кандидата мр Љубице Фигун. За ментора при изради дисертације именован је др Срђан Костић, ванредни професор.

Мр Љубица Фигун је од тренутка пријаве докторске дисертације аутор и коаутор радова из области подземне и површинске експлоатације минералних сировина.

- 1) Име, име једног родитеља, презиме;
- 2) Датум рођења, општина, држава;
- 3) Назив универзитета и факултета и назив студијског програма академских студија II циклуса, односно послједипломских магистарских студија и стечено стручно/научно звање;
- 4) Факултет, назив магистарске тезе, научна област и датум одбране магистарског рада;
- 5) Научна област из које је стечено научно звање магистра наука/академско звање мастера;
- 6) Година уписа на докторске студије и назив студијског програма.

III УВОДНИ ДИО ОЦЈЕНЕ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Сенат Универзитета у Бањој Луци је дана 12.10.2015. године донио Одлуку број: 02/04-3.2973-129/15 којом се даје сагласност на Извјештај о оцјени подобности теме, кандидата и ментора за израду докторске дисертације на Рударском факултету докторанта мр Љубице Фигун под насловом „Моделирање осциловања стијенске масе при минирању у функцији заштите објеката“. Сенат Универзитета у Бањој Луци је дана 30.04.2020. године донио Одлуку број: 02/04-3.909-35/20 којом се продужује рок за израду и одбрану докторске дисертације за годину дана, а након тога је и дана 23.09.2021. године донио Одлуку број: 02/04-3.20156-76/21 којом се продужује рок за израду и одбрану докторске дисертације за још годину дана до 30.09.2022. године.

Докторска дисертација кандидата мр Љубице Фигун је написана латиничним писмом (Times New Roman, величина слова 12, проред 1,5 и формат А4). Дисертација је написана јасно и језички исправно на 200 страна писаног текста. Докторска дисертација садржи 58 слика, 39 табела и 5 прилога. У дисертацији је цитирано 153 литературна навода.

Садржај докторске дисертације представљен је сљедећим поглављима:

1 УВОД.....	1
2 ПРЕГЛЕД РЕЗУЛТАТА ПРЕТХОДНИХ ИСТРАЖИВАЊА.....	11
3 ОПШТИ ДИО.....	22
4 МЕТОДОЛОГИЈА ОЦЈЕНЕ УТИЦАЈА ПОТРЕСА ОД МИНИРАЊА НА ОБЈЕКТЕ.....	56
5 РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА.....	84

6 ДИСКУСИЈА И КОМЕНТАРИ ИСТРАЖИВАЊА	129
7 ЗАКЉУЧАК	132
8 ЛИТЕРАТУРА	136
9 ПРИЛОЗИ.....	148

На почетку дисертације налази се 18 страница које нису нумерисане, а на којима се налазе наслов, резиме на српском и енглеском језику, попис слика и табела, садржај те захвалница приликом израде докторске дисертације. На крају дисертације се налази 7 страна које нису нумерисане, а на којима се налази биографија аутора као и три изјаве према Правилнику о садржају, изгледу и дигиталном репозиторијуму докторских дисертација на Универзитету у Бањој Луци.

- 1) Наслов докторске дисертације;
- 2) Вријеме и орган који је прихватио тему докторске дисертације
- 3) Садржај докторске дисертације са страничењем;
- 4) Истаћи основне податке о докторској дисертацији: обим, број табела, слика, шема, графикана, број цитиране литературе и навести поглавља.

IV УВОД И ПРЕГЛЕД ЛИТЕРАТУРЕ

Минирање представља традиционални поступак напредовања радова у чврстим стијенским масама, са циљем експлоатације минералних сировина на површинским и у подземним коповима, или за потребе отварања нових подземних просторија. Међутим, иако је примјена минирања дала задовољавајуће резултате у инжењерској пракси, негативна страна ове технике лежи у изазивању потреса који могу да угрозе околне грађевинске објекте. Сходно томе, јасна је потреба за сталним развојем методологије процјене осциловања стијенске масе услјед минирања, укључујући формулисање нових модела и класификација, што је и био главни циљ докторске дисертације.

Опште посматрано, постоје две основне групе параметара који утичу на осциловање стијенске масе од минирања. Прву групу параметара чине бушачко-минерски фактори, укључујући укупну количину експлозива, количину експлозива по интервалу успорења, растојање између бушотина у реду, растојање између редова бушотина, дужина минских бушотина, растојање од мјеста минирања до мјеста мјерења, пречник бушотина, дубину експлозивног пуњења, дужину чепа и др. Ови параметри се задају пројектом минирања, и према томе, њихова величина, а самим тим, и јачина утицаја, могу да се контролишу. С друге стране, физичко-механичка својства стијенске масе представљају природан фактор, који не може да се контролише и чији утицај може да буде пресудан у сложеним инжењерскогеолошким условима средине у којој се минирање изводи, услјед вишеструког одбијања и преламања сеизмичких таласа. Могуће су значајне варијације у осциловању релативно хомогене стијенске масе (у погледу литолошког састава), услјед постојања расједа и других механичких дисконтинуитета у стијенској маси.

Један од циљева докторске дисертације био је и формирање посебних модела на основу регистрованих података на конкретно одабраним локацијама површинског копа „Хардовац“ Шеварлије и у градској средини градилишта Skyline Београд, који су прилагођени природним условима и карактеристикама грађевинских објеката на тим локацијама, као и разрада методологије оцјене утицаја потреса од минирања на околне грађевинске објекте.

У оквиру утицаја потреса од минирања на грађевинске објекте, на основу емпиријских формула могу се одредити тзв. зоне сигурности, у којима се могу

очекивати тачно одређене брзине осциловања стијенске масе, у зависности од предвиђених дозвољених брзина и фреквенција, користећи претходно дефинисане моделе предикције. Утврђивање ових зона практично представља формирање карата сигурног грађења одређених категорија објеката у зависности од величине потреса од минирања, и има велики значај у инжењерској пракси. Разрада методологије израде карата сигурних растојања била је и један од задатака предметне докторске дисертације.

Предмет докторске дисертације је истраживање утицаја потреса од минирања на грађевинске објекте, у функцији заштите објеката.

Циљ истраживања спроведених у оквиру дисертације био је да покажемо да се максимална брзина осциловања (PVV) и фреквенција стијенске масе може тачније процјенити моделима заснованим на вјештачким неуронским мрежама (ANN).

Полазне хипотезе истраживања спроведеног у оквиру предметне дисертације су:

- утицај потреса од минирања на грађевинске објекте може се оцјенити на основу брзине и фреквенције осциловања стијенске масе и
- примјена модерних математичких метода омогућава формирање поузданих модела предвиђања величине осциловања стијенске масе од минирања, а тиме и сигурнију процјену утицаја потреса од минирања на грађевинске објекте по одређеним зонама сигурности, узимајући у обзир класификацију објеката прилагођену структурним карактеристикама и врсти конструкција објеката на одређеној локацији.

Примјењеном методологијом су обухваћени искуствени подаци и досадашња истраживања, савремени поступци и методе истраживања у овој области, а математички модели су развијени као нелинеарне функције карактеристика осциловања стијенске масе од бушачких и минерских параметара.

Дио литературе коришћене у приказу претходних истраживања:

1. Nicholls, H.R., Johnson, C.F., Duvall, W.I. (1971) Blasting vibrations and their effects on structures, USBM RI 656: 105 p.
2. Dowding, C.H. (1971) Response of buildings to ground vibrations from construction blasting, PhD Thesis, University of Illinois, Urbana - Champaign: 219 p.
3. Dowding C.H., Corser P.G. (1981) Cracking and Construction Blasting. Importance of Frequency and Free Response. Journal of the Construction Division, ASCE.,107(1): 89-106.
4. Langefors, U., Kihlstrom, B. (1978) The modern techniques of rock blasting, New York, John Wiley, 437 pp.
5. Siskind, D.E. (2000) Vibrations from blasting, International Society of Explosives Engineers, 10: 120 p.
6. Roy, P.P. (2005) Rock blasting effects and operations. New Delhi: Oxford, IBH Publishing: 360 p.
7. Khandelwal, M., Sing, T.N. (2006) Prediction of blast induced ground vibrations and frequency in opencast mine: A neural network approach. Journal of Sound and Vibration 289: 711-725.
8. Monjezi, M., Ahmadi, M., Sheikhan, M., Bahrami, A., Salimi, A. (2010) Predicting blast-induced ground vibration using various types of neural networks. Soil Dynamics Earthquake Engineering; 30(11): 1233–1236.
9. Monjezi, M., Ghafurikalajahi, M., Bahrami, A. (2011) Prediction of blast-induced ground vibration using artificial neural networks. Tunnelling and Underground Space

- Technology 26: 45-50.
10. Kahriman, A. (2004) Analysis of parameters of ground vibration produced from bench blasting at a limestone quarry. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 24: 887–892.
 11. Singh, T.N., Singh, V. (2005) An intelligent approach to predict and control ground vibration in mines, *Geotechnical and Geological Engineering* 23(3): 249-262.
 12. Khandelwal, M., Sing, T.N. (2006) Prediction of blast induced ground vibrations and frequency in opencast mine: A neural network approach. *Journal of Sound and Vibration* 289: 711-725.
 13. Khandelwal, M., Singh, T.N. (2007) Evaluation of blast-induced ground vibration predictors, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 27(2): 116-125.
 14. Afeni B., Osasan S.K. (2009) Assessment of noise and ground vibration induced during blasting operations in an open pit mine - A case study on Ewekoro limestone quarry, Nigeria. *Mining Science and Technology (China)* 19(4): 420-424.
 15. Mohamed, M.T. (2009) Artificial neural network for prediction and control of blasting vibrations in Assiut (Egypt) limestone quarry. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 46: 426-431.
 16. Khandelwal, M., Singh, T.N. (2009) Prediction of blast-induced ground vibration using artificial neural network, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 46: 1214-1222.
 17. Monjezi, M., Ghafurikalajahi, M., Bahrami, A. (2011) Prediction of blast-induced ground vibration using artificial neural networks. *Tunnelling and Underground Space Technology* 26: 45-50.
 18. Khandelwal, M., Kumar, D.L., Yellishetty, M. (2011) Application of soft computing to predict blast-induced ground vibration. *Engineering Computations*; 27(2): 117–125.
 19. Mohamad, E.T.; Noorani, S.A.; Armaghani, D.J.; Saad, R. (2012) Simulation of blasting induced ground vibration by using artificial neural network. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 17: 2571–2584.
 20. Monjezi M., Hasanipanah M., Khandelwal, M. (2013) Evaluation and prediction of blast-induced ground vibration at Shur River Dam, Iran, by artificial neural network. *Neural Computing and Applications* 22: 1637-1643.
 21. Saadat, M., Khandelwal, M., Monjezi, M. (2014) An ANN-based approach to predict blast-induced ground vibration of Gol-E-Gohar iron ore mine, Iran. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6(1): 67–76.
 22. Hajihassani, M., Armaghani, D.J, Marto, A, Mohamad, E.T. (2015a) Ground vibration prediction in quarry blasting through an artificial neural network optimized by imperialist competitive algorithm. *Bulletin of Engineering Geology and Environment*; 74(3): 873–888.
 23. Hasanipanah, M., Naderi, R., Kashir, J., Noorani, S.A., Qaleh, A.Z.A. (2017) Prediction of blast-produced ground vibration using particle swarm optimization. *Engineering with Computers*; 33(2): 173–179.
 24. Ragam, P., Nimaje, D.S. (2018a) Monitoring of blast-induced ground vibration using WSN and prediction with an ANN approach of ACC dungri limestone mine, India. *Journal of Vibroengineering*; 20(2): 1051–1062.
 25. Ragam, P., Nimaje, D.S. (2018b) Evaluation and prediction of blast-induced peak particle velocity using artificial neural network: A case study. *Noise Vibration Worldwide*; 49(3): 111–119.
 26. Ragam, P., Nimaje, D.S. (2018c) Assessment of blast-induced ground vibration using

- different predictor approaches-A comparison. Chemical Engineering Transactions; 66: 487–492.
27. Kumar S., Choudhary B.S. (2019) Prediction of blast-induced ground vibration by ANN, USBM and CMRI formulae for safety of the structures near surface coal mines. Journal of Mines, Metals and Fuels 67(7): 351-356.
 28. Ozelik, M. (2018) Back analysis of ground vibrations which cause cracks in buildings in residential areas Karakuyu (Dinar, Afyonkarahisar, Turkey). Nat Hazards 92:497–509
 29. Noren-Cosgriff, K.M., Ramstad, N., Neby A, Madshus, C. (2020) Building damage due to vibration from rock blasting, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 138:106331: 1-13
 30. Vasović, D. (2016) Modelovanje ponašanja arhitektonskih objekata usled potesa od miniranja na površinskim kopovima, Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu: 178 str.

У Билтену 656. [Nicholls i dr. 1971], по први пут су систематизовани дотадашњи резултати истраживања о утицају ефеката минирања на околне грађевинске објекте. Уочено је да оштећења могу бити слична и да зависе и од стања објекта, слијегања, изложености атмосферским утицајима, старости, и сл.. Предложено је да се параметри количине експлозива и растојање од мјеста мјерења од мјеста минирања узму као општи. Остали минерски параметри су много варирали од копа до копа и од минера до минера, тако да су сви обједињени у параметре сваке локације појединачно.

У истраживањима о одговору конструкција и оштећењима објекта изазаваним вибрацијама приликом минирања на површинским коповима, посматране су и карактеристике конструкција и материјала угрожених зграда. Dowding [1971] је указао на битну повезаност између фреквенција осциловања тла и објекта, као и начин утицаја параметара, који описују потресе у тлу (брзина, убрзање и помјерај) на спектар одговора објекта приликом минирања. Поменути истраживањем је закључено да су доминантне фреквенције осциловања тла најчешће веће од највећих фреквенција осциловања грађевинских објекта. Закључено је да степен осјетљивости на вибрације од минирања зависи од типа, стања и врсте конструкције објекта, а предложени су прагови оштећења појединих дијелова конструкција грађевинских објекта у односу на врсту материјала [Dowding i Corser 1981] од којих су саграђени (бетон, дрво, опека, гипс-картон, ...).

Langefors i Kihlstrom су приказали своје тумачење математичке зависности [Langefors i Kihlstrom 1978] између брзине осциловања честица тла, количине експлозива и растојања од мјеста минирања до мјеста мјерења. Они су дали зависност између максималне брзине осциловања тла, количине експлозива по интервалу успорења и растојања од мјеста минирања до мјерног мјеста у функцији коефицијената који се рачунају регресионом анализом и описују карактеристику средине у којој се врши минирање.

Један од најзначајнијих аутора Siskind, [Siskind 2000], наводи више модела предикције за различите стијенске масе, гдје су теренским мјерењима одређене вриједности коефицијената, који се обично дају у општем облику, а који се најчешће користе у пракси. Предложени модели предвиђају да брзина осциловања стијенске масе зависи од два основна параметра, и то максималне количине експлозива по интервалу успорења и растојања од мјеста минирања до мјеста мјерења. Недостатак овог приступа предвиђања је тачност вриједности предиктора безбједне брзине осциловања стијенске масе, у односу на максималну безбједну количину експлозива

по успорењу за одређену локацију, као и неупотребљивост за друге локације.

На осциловање тла утиче велики број параметара, као што су физичко-механичка својства стијенске масе, карактеристике експлозива и начин минирања. Неопходно је знати утицај ових параметара на минирање због ефикасног коришћења енергије експлозива у датој стијенској маси, а уз минималне нежељене ефекте које изазива минирање. Параметри минирања као што су: количина експлозива по интервалу успорењу, број и распоред успорења, растојање између бушотина, дужина пуњења, дужина пробушења, шема минирања и начин иницирања, значајно мијењају дисперзију сеизмичке енергије [Roy 2005]. Карактеристике стијенске масе такође често варирају од мјеста до мјеста у руднику или чак од једног до другог краја истог минског поља [Khandelwal i Singh 2006].

Могућност вјештачких неуронских мрежа да кроз тренинг и процес обучавања предвиђају исходе нелинеарних проблема и машина потпорних вектора да проблем рјешавају у вишедимензионом простору у којем је могуће успоставити линеарне зависности све се више примјењује у рударству [Monjezi i dr. 2010, 2011].

Kahriman (Турска) је на основу података регистрованих потреса на једном каменолому кречњака у околини Истанбула, развио емпиријску корелацију за оцјену вриједности максималне брзине осциловања стијенске масе (PPV) засновану на редукованом растојању, са високом вриједношћу коефицијента корелације ($R=0,92$) [Kahriman 2004].

Singh је примјенио вјештачку интелигенцију [Singh i Singh 2005] за предикцију и контролу вибрација.

Другим истраживањима на површинском копу са 150 мјерења при минирању, [Khandelwal i Singh 2006] су такође проучавали вибрације и фреквенцију осциловања користећи параметре стијенске масе, карактеристике експлозива и начин минирања уз помоћ ANN и упоредили своје резултате са вишеструком регресионом анализом. Затим су 2007. године [Khandelwal i Singh 2007] вршили истраживања у руднику магнезита у Индији. Предвидјели су брзину осциловања стијенске масе уз помоћи ANN, узимајући у обзир два параметра, количину експлозива по интервалу успорења и растојање од мјеста минирања до мјеста мјерења. Они су упоредили своје резултате са уобичајено коришћеним предикторима вибрација и закључили да резултати предикције, добијени помоћу ANN, су прецизнији у поређењу са конвенционалним једначинама предикције вибрација. Поредџи добијене податке са резултатима примјене конвенционалних модела, показали су значајно поклапање излазних података неуронских мрежа са реално мјереним брзинама осциловања стијенске масе.

Afeni (Јужна Африка) и Osasan (Нигерија) изучавали су ниво буке од минирања на каменолому кречњака “Евекоро”, као и утицај произведене буке на стамбене објекте у насељима у близини површинског копа (Afeni i Osasan 2009).

Mohamed је примјенио ANN за предвиђање и контролу вибрација експлозије [Mohamed 2009] у каменолому кречњака у Асјуту (Египат) и закључио да коришћење више улазних података може побољшати способност вјештачких неуронских мрежа у предвиђању брзине осциловања стијенске масе.

Истраживања Khandelwal i Singh проведена на површинском копу у Индији приказују примјену вјештачке неуронске мреже за предвиђање вибрација и фреквенције експлозије, [Khandelwal i Singh 2009]. Модел је формиран са десет улазних параметара који имају утицај на вибрације и фреквенцију експлозије, који су представљени као излазни параметри. Развили су неуронску мрежу са простирањем

сигнала унапријед, са три слоја, и са правилом обучавања са простирањем грешке уназад, ради предвиђања вриједности максималне брзине осциловања стијенске масе. Резултати добијени предвиђањем вибрација експлозије примјеном ANN су упоређени са MVRA, као и са уобичајеним предикторима вибрација. Аутори су примјетили да резултати добијени моделом ANN имају велику сличност са PPV и фреквенцијом измјереним на терену, у односу на конвенционалне предикторе. Као резултат анализе, добили су већи коефицијент детерминације ($R^2=0,99$) у поређењу са конвенционалним моделима ($R^2=0,36-0,73$). Поменута истраживања показују да модели неуронских мрежа имају предност у рјешавању сложених проблема, у којима многи критични параметри утичу на процес и резултате, када процес и резултати нису у потпуности разумљиви и гдје су доступни искуствени или експериментални подаци.

Моњеџи и сарадници развили су ANN модел за предвиђање PPV [Моњеџи и др. 2011] на површинском копу у Ирану, користећи четири улазна параметра: количину експлозива по интервалу успорења, растојање од мјеста минирања до мјеста мјерења, дубину бушотине и зачепљење као улазне параметре и један излазни параметар PPV, упоредивши њихове резултате са емпиријским моделима и вишеструком регресионом анализом. Анализом је закључено да је растојање од мјеста минирања до мјеста мјерења најутицајнији, а зачепљење најмање утицајан параметар на PPV. Они су сачинили базу података која се састоји од 182 записа мјерења вибрација од минирања и закључили да резултати развијеног ANN модела дају боље резултате у поређењу са емпиријским предикторима и статистичким моделима за процјену брзине осциловања стијенске масе. Тачност предвиђања ANN модел ($R^2=0,95$) била је већа у поређењу са моделом заснованим на вишеструкој регресији ($R^2=0,38-0,80$).

Khandelwal и сарадници конструисали су трослојни модел ANN [Khandelwal и др. 2011] за процјену вибрација тла изазваних минирањем у руднику у Индији. Развили су повратну пропагацију уназад са 2-5-1 архитектуром, модел је обучен и тестиран на 130 извршених минирања. Њихов ANN модел даје бољи коефицијент детерминације и мању средњу апсолутну грешку у поређењу са другим моделима.

Мохамад и сарадници су предложили рјешење за предвиђање PPV користећи модел ANN. Резултати истраживања су показали да се са девет различитих улазних параметара [Мохамад и др. 2012] и са релативно малим бројем измјерених вибрација при минирању (дванаест), може тачно предвидјети PPV јер је модел показао да је коефицијент регресије 0,98.

Моњеџи је са сарадницима [Моњеџи и др. 2013], предложио рјешење засновано на ANN за предвиђање PPV при минирању на брани ријеке у Ирану. Развио је вјештачку неуронску мрежу са простирањем сигнала унапријед, са четири улазна податка, два скривена слоја и једним излазним податком, за потребе предвиђања вриједности PPV. Тачност предвиђања коришћењем неуронских мрежа била је много већа ($R=0,97$) у поређењу са конвенционалним моделима или резултатима вишеструке регресионе анализе ($R=0,62-0,89$). Резултати предложеног модела ANN указују на битно тачнија предвиђања брзине осциловања стијенске масе у поређењу са емпиријским моделима предвиђања.

У Ирану, Saadat и сарадници користили су ANN моделе за предвиђање PPV. Прикупили су 69 података из рудника гвожђа [Saadat и др. 2014]. Аутори су упоредили своје резултате са резултатима типичних експерименталних и статистичких метода анализом вишеструке линеарне регресије (MLR). Резултати су показали да је модел ANN показао већу тачност у поређењу са другим моделом.

У 2015. години, Najihassani и др. [2015a] развили су нови хибридни модел ANN унапређен доминантним конкурентним алгоритмом за предвиђање максималне брзине осциловања (PPV) која је резултат 95 минирања на локацији каменолома гранита у Малезији. Мјерени су сљедећи параметри минирања: дужина бушотине, линија најмањег отпора, количина експлозива по интервалу успорења, Јоунгов модул, брзина Р-таласа и растојање од мјеста минирања до мјеста мјерања. Добијени резултати указују да предложени модел заснован на ANN има велику тачност предвиђања у поређењу са конвенционалним предиктором.

Hasanipiranih и сарадници [2017] развили су модел вишеструке линеарне регресије (MLR) за предвиђање вибрација тла изазваних експлозијом. Њихови резултати су показали да процјена заснована на приступу MLR пружа тачност предвиђања са R^2 већим од 0,85.

Ragam i Nimaје развили су неуронску мрежу са пропагацијом уназад са шест улазних параметара и пет скривених неурона за предвиђање вибрација тла [Ragam i Nimaје 2018a] изазваних минирањем у руднику кречњака у Индији, 2018. године. Аутори су открили да резултати модела ANN могу пружити високу тачност у поређењу са другим коришћеним моделима.

У 2018. години Ragam i Nimaје су користили модел ANN за предвиђање PPV изазване вибрацијама тла при минирању. Аутори су развили модел неуронских мрежа заједно са шест емпиријских једначина конвенционалног предиктора [Ragam i Nimaје 2018b] и статистичким моделом. Њихови предложени резултати модела ANN могу прецизније предвидјети вибрације тла у поређењу с различитим конвенционалним моделима предвиђања који су доступни.

Ragam i Nimaје су 2018. године предложили модел заснован на неуронским мрежама за процјену вибрација тла изазваних минирањем [Ragam i Nimaје 2018c] за одређивање брзине осциловања стијенске масе. Аутори су закључили да модел ANN пружа висок коефицијент детерминације и малу средњу квадратну грешку.

У студији Kumar i Choudhary [2019] су закључили да се коришћењем вјештачких неуронских мрежа, са 6 улазних параметара од 34 минирања, могу предвидјети вибрације тла које су близу стварне тј. измјерене вриједности. Метода ANN је дала боље резултате предвиђања у поређењу са емпиријским односом који даје USBM или CMRI методе које су такође биле предмет наведене студије.

Ozcelik [2018] је извршио анализу вибрација тла при минирању и њихов утицај на настанак пукотина у стамбеним зградама у Турској, користећи податке из три каменолома. Аутор је утврдио, да активности минирања не изазивају никаква конструктивна оштећења, јер брзине осциловања забиљежених минирања су биле у дозвољеним границама.

Noren-Cosgriff и др. [2020] су спровели експеримент минирања на терену и закључили, да иако је ниво максималне брзине осциловања и напрезања био много изнад граничних вриједности, нису пронађена видљива оштећења ни у једној од две посматране зграде.

У истраживањима на утицај сеизмичких таласа насталих минирањем у близини рудника на околне објекте, [Vasović 2016] спроведена је динамичка анализа постојећих објеката на утицај измјерених временских записа. Резултати су показали да су, чак и у случајевима прекорачених максималних брзина осциловања тла, напрезања у приземним кућама била далеко испод дозвољених, тако да није могло доћи до појаве оштећења. Такође, примјена методе динамичке анализе може помоћи истраживачима, и показати им на којим мјестима су највећа напрезања, и гдје ће се

појавити прва оштећења. Овај поступак омогућава прецизнији преглед објеката у потрази за оштећењима од минирања, као и могућност да се означе и из разматрања елиминишу оштећења која су производ неких других дејстава.

Научни допринос резултата истраживања реализованих у оквиру предметне докторске дисертације огледа се у сљедећем:

- успостављене су статистички значајне и физички могуће корелације између параметара минирања и сигурносних растојања до објеката у одређеним геолошким условима, примјеном вишеструке линеарне регресије и вјештачких неуронских мрежа, што представља оригинални научни допринос у међународној научној јавности;
- експлицитни математички модели указали су на постојање статистички значајних и физички могућих двофакторских интеракција, што указује на међузависност више параметара, чак и на могућност постојања статистички значајне двофакторске интеракције у односу на утицаје индивидуалних контролних параметара, који не морају бити статистички значајни;
- резултати истраживања представљају значајан научни допринос рјешавању комплексног проблема пројектовања, праћења и управљања процесом минирања на површинским коповима, јер обухватају веома актуелна и значајна истраживања из области математичког моделирања у рударству.
- према сазнању докторанта, резултати изведених истраживања представљају први примјер свеобухватне анализе утицаја потреса од минирања на грађевинске објекте у домаћој научној јавности, на примјеру површинског копа на територији Републике Српске. С обзиром да не постоје домаћи стандарди за оцјену утицаја потреса од минирања, резултати изведених истраживања могу послужити као смјернице за дефинисање националних стандарда у овој области.

Осим научног доприноса дисертације у погледу формирања нових модела и разраде методологије оцјене утицаја минирања на грађевинске објекте, резултати извршених истраживања имају значаја и за инжењерску праксу, јер могу пружити један систематичан приступ и свеобухватну анализу потреса од минирања прилагођену искуству на нашим површинским коповима.

- 1) Укратко истаћи разлог због којих су истраживања предузета и представити проблем, предмет, циљеве и хипотезе;
- 2) На основу прегледа литературе сажето приказати резултате претходних истраживања у вези проблема који је истраживан (водити рачуна да обухвата најновија и најзначајнија сазнања из те области код нас и у свијету);
- 3) Навести допринос тезе у рјешавању изучаваног предмета истраживања;
- 4) Навести очекиване научне и прагматичне доприносе дисертације.

V МАТЕРИЈАЛ И МЕТОД РАДА

У оквиру методологије истраживања утицаја потреса насталих при минирању на околне грађевинске објекте, због комплексности проблематике истраживања, примјењен принцип реализације планираних активности у овој дисертацији, подразумјевао је истраживања, изучавања и испитивања у три фазе.

- Прва фаза истраживања подразумјевала је анализу постојеће и доступне литературе, испитивања и изучавања фондовске документације. Посебна пажња је била посвећена анализи резултата студија претходних истраживања везаних за изучавање брзине и фреквенције осциловања стијенске масе при минирању. Анализирани су резултати истраживања објављени у референтним домаћим и међународним часописима. Посебан акценат је био на методе које су коришћене за формирање модела, MLR и ANN приступ. Након тога, извршен је избор

погодних локација (ПК “Хардовац“ - Шеварлије и локација у градској средини Skyline - Београд) за формирање модела, у зависности од различитости у позицији мјеста минирања и специфичности бушачких и минерских параметара.

- Друга фаза истраживања представљала је теренски рад, односно прикупљање података о предметним локацијама, снимање терена, околних објеката и мјерења брзине и фреквенције осциловања стијеске масе помоћу инструмената за регистрацију сеизмичких карактеристика, сеизмографа. Такође, су прикупљени и подаци претходних мјерења и испитивања, за дужи временски период, како би се добило што више узорака за поузданију статистичку анализу.
- Трећа фаза истраживања обухватила је обраду и анализу измјерених, прикупљених и добијених теренских података, на основу чега се приступило формирању модела процјене. Обрада података представљала је статистичку анализу резултата истраживања и формирање прогнозних модела са одређивањем грешке процјене. Формирање модела процјене извршено је примјеном савремених математичких метода вишеструке линеарне регресије, регресионом анализом и вјештачких неуронских мрежа. Модели су развијени као нелинеарне функције карактеристика осциловања стијенске масе и сигурносних растојања за различите грађевинске конструкције од бушачких и минерских параметара. Оцјена успјешности формираног модела провјерена је одређивањем коефицијента корелације и средње квадратне грешке, испитивањем расподеле и аутокорелације резидуала.

Примјењене методе су адекватне, савремене и у складу са свјетским нивоима и достигнућима науке и праксе у предметној области.

Истраживања су вршена на двије различите локације: у руднику и градској средини, са битно различитим карактеристикама бушења и минирања и условима који владају у околини.

- Истраживања на првој локацији - површински коп “Хардовац“ - Шеварлије подразумевала су прикупљање бушачко-минерских података и мјерење сеизмичких ефеката, помоћу сеизмографа приликом минирања. Извршено је прикупљање и мјерење података за временски период од 2012. до 2015. године, при чему је извршено укупно комплетних 68 мјерења. Дефинисање модела процјене утицаја потреса при минирања вршило се утврђивањем односа између одговарајуће фреквенције осциловања и контролних параметара, који укључују: растојање између бушотина, растојање између редова бушотина, дубину бушотина, број бушотина, количину експлозива по интервалу успорења, укупну количину експлозива и растојање од мјеста минирања до мјеста мјерења.
- Истраживања на другој локацији - локација стамбено-пословне зграде Skyline - Београд обухватила су, такођер, прикупљање података о бушењу и минирању, као и мјерење сеизмичких ефеката, помоћу сеизмографа при сваком минирању. Извршено је прикупљање и мјерење података за временски период од 2018. до 2019. године, при чему је извршено укупно 477 мјерења брзине осциловања стијенске масе. За потребе израде поузданих модела извршена је анализа утицаја бушачко-минерских параметара за максималну брзину осциловања стијенске масе. Контролни параметри који су се разматрали су: растојање од мјеста минирања до мјеста мјерења, укупна количина експлозива и количина експлозива по интервалу успорења.

Реализованим истраживањем успостављена је физички могућа и статистички значајна корелација између карактеристика вибрација тла, бушачко-минерских параметара и сигурносних растојања од грађевинских објеката. Вибрације тла

настале минирањем, као и њихов утицаји на околне објекте, истражени су у стијенској маси коју чини кречњак, као један од најзаступљенијих типова лежишта техничко-грађевинског камена у Републици Српској и Србији а у којем се најчешће и врши минирање.

Карактеристике вибрација тла приликом минирања које смо изучавали су максимална брзина осциловања (PPV) и фреквенција осциловања (FR).

Бушачко-минерски параметри који су се изучавали су: укупна количина експлозива, количина експлозива по интервалу успорења, растојање од мјерног мјеста до мјеста минирања, дужине бушотине, броја бушотина, растојања између редова бушотина, растојања између бушотина у реду и сигурносна растојања до грађевинских објеката.

У овој дисертацији развијен је модел за процјену сигурних растојања од мјеста минирања, за различите типове конструкција према стандарду DIN-4150. Овај модел је формулисан у облику једноставног нелинеарног експлицитног математичког израза који показује зависност брзине и фреквенције осциловања при минирању од улазних контролних фактора, користећи MLR приступ и ANN методологију.

Истраживање у оквиру предметне дисертације изведено је у потпуности у складу са планом истраживања, предвиђеним у оквиру пријаве теме докторске дисертације.

- 1) Објаснити материјал који је обрађиван, критеријуме који су узети у обзир за избор материјала;
- 2) Дати кратак увид у применијењени метод истраживања при чему је важно оцијенити сљедеће:
 1. Да ли су применијењене методе истраживања адекватне, довољно тачне и савремене, имајући у виду достигнућа на том пољу у свјетским нивоима;
 2. Да ли је дошло до промјене у односу на план истраживања који је дат приликом пријаве докторске тезе, ако јесте зашто;
 3. Да ли испитивани параметри дају довољно елемената или је требало испитивати још неке, за поуздано истраживање;
 4. Да ли је статистичка обрада података адекватна.

VI РЕЗУЛТАТИ И НАУЧНИ ДОПРИНОС ИСТРАЖИВАЊА

У циљу повећања поузданости модела предвиђања, прво су систематизовани и анализирани подаци добијени теренским мјерењима за четворогодишњи период на површинском копу "Хардовац", а затим је извршена анализа измјерених карактеристика потреса промоћу постојећих стандарда. Извршена анализа регистрованих вриједности потреса свих минирања према стандарду DIN 4150-3. за стамбене и индустријске објекте, показала је да су вриједности брзина осциловања тла, у односу на прописане стандарде фреквенција, испод граничних вриједности. Такођер су прорачунате вриједности дозвољене количине експлозива и сигурносна растојања на основу више стандарда: руски критеријум према GOST-6249-52, њемачки критеријум према DIN 4150 III, амерички стандард према USBM-RI-8507 и швајцарски стандард према SN 640312. Коришћењем конвенционалних модела закључено је да се за ниже фреквенције осциловања треба користити мања количина експлозива како би вриједности PVV биле у дозвољеним границама за исте вриједности сигурносних растојања.

Анализа је извршена помоћу вишеструке линеарне регресије (MLR) и вјештачких неуронских мрежа (ANN) за утврђивање корелације између максималне брзине осциловања, одговарајуће фреквенције и контролних фактора. Модел процјене утицаја потреса од минирања формиран је на основу дефинисања математичке зависности фреквенције осциловања као излазног параметра у функцији улазних параметара. За формирање модела кориштено је седам улазних параметара: укупна количина експлозива, количина експлозива по интервалу успорења, растојање од мјерног мјеста до мјеста минирања, дужине минских бушотина, броја бушотина,

растојања између редова бушотина и растојања између бушотина у реду. Излазне промјенљиве модела ANN су: максимална брзина осциловања и фреквенција.

Даље су постојећи DIN 4150 и амерички стандарди изражени у облику нелинеарне везе између граничних вриједности PVV и фреквенција осцилација коришћењем једноставне методе нелинеарне регресије, за различите типове објеката. Добијени резултати су показали да је коефицијент детерминације R^2 у распону 0,99-1,0 зависно од врсте објеката, док је средња квадратна грешка MSE у распону 0,057 - 0,0282. Затим су утврђене статистички значајне корелације ($R=0,91$) између регистрованих вриједности PVV, максималне количине експлозива и растојање од мјеста минирања до мјеста мјерења, које су се даље користиле за одређивање изолинија сигурних растојања за различите количине експлозива помоћу Лангефорс-Килхстромовог модела.

Добијени резултати истраживања у докторској дисертацији указују да и MLR и ANN приступ пружају статистички значајне моделе процјене, који омогућавају израчунавање сигурносних растојања за различиту количину експлозива. Осим тога, MLR приступ омогућава даљу детаљнију анализу природе утицаја контролних фактора на фреквенцију вибрација при минирању. Конкретно, извршена анализа указује на постојање статистички значајних двофакторских интеракција, између свих анализираних улазних фактора. Растојање између бушотина, дубина бушотина и број бушотина имају јак негативан нелинеарни ефекат на фреквенцију осциловања, док растојање између редова бушотина и растојање од мјеста минирања до мјеста мјерења имају слаб нелинеарни негативни утицај на фреквенцију осциловања. С друге стране, укупна количина експлозива и количина експлозива по интервалу успорења имају јак позитиван утицај на фреквенцију осциловања.

Као резултат изведених истраживања и примјењујући развијени модел за анализирану студију случаја, конструисане су изолиније сигурносног растојања за различиту укупну количину експлозива који се користи и различите врсте грађевинских конструкција.

За предвиђање потреса од минирања на локацији пословно-стамбеног објекта Skyline - Београд, користили смо, најчешће коришћен конвенционални модел за процјену вриједности максималне брзине осциловања у инжењерској пракси Лангефорс и Килхстром. Анализа је показала да примјењени конвенционални модел, не дају задовољавајуће резултате у погледу процјењених вриједности максималне брзине осциловања, јер је коефицијент детерминације ($R=0,20$) испод вриједности 0,8, док је коријен средње квадратне грешке $RMSE=2,2$.

Поређењем процијењених и измјерених вриједности PVV за податке обучавања, валидација и тестирања за вјештачке неуронске мреже, показали су да формиран модел даје прихватљиву процјену вриједности брзине осциловања стијенске масе јер је коефицијент детерминације $R>0,7$, а коријен средње квадратне грешке је $RMSE=1,6$

Утицајност појединих контролних параметара, који су коришћени у анализи укупна количина експлозива, количина експлозива по интервалу успорења и растојање од мјеста минирања до мјеста мјерења, показују да са повећањем растојања од мјеста мјерења до мјеста минирања опада брзина осциловања стијенске масе, док иста расте са повећањем количине експлозива по интервалу успорења. Укупна количина експлозива нема статистички значајан утицај, у разматраном распону, на јачину потреса од минирања.

У процесу истраживања извршено је моделирање предвиђања потреса при минирању на површинским коповима примјеном MLR и ANN, засновано на подацима регистрованим теренским истраживањима. Параметри модела дефинисани су

анализом бушачко-минерских параметара при минирању, као и истраживањем велосиграма добијених мјерењем потреса при минирању.

Из свега напријед наведеног недвосмислено се може закључити да је дисертација оригинални примјер успостављања корелације између PVV, фреквенције и бушачко-минерских параметара у односу на сигурносно растојање. Добијени резултати су јасно приказани, правилно, логично и јасно тумачени. Резултати истраживања спроведених у предметној дисертацији презентовани су у референтним часописима и на научно-стручним скуповима. Оригиналноост резултата који су проистекли из активности реализованих у оквиру израде докторске дисертације верификован је њиховим објављивањем у истакнутом међународном часопису Environmental Earth Sciences (IF=2.784). Тиме је потврђен и научни допринос дисертације на међународном нивоу.

На основу резултата у дисертацији може се констатовати да се развијени модели могу директно примијенити на ПК "Хардовац" - Шеварлије и у градској средини на локацији објекта Skyline – Београд. Добијени резултат имају инжењерски допринос, јер се приказана методологија моделирања, може примијенити и на другим површинским коповима и приликом минирању у градским срединама, при предвиђању потреса насталих од минирања у истим или сличним геолошким условима, и стању испуцалости и физичко-механичке оштећености радне средине.

Циљ развоја модела је смањење односно ублажавање негативних утицаја вибрација приликом минирања на околне грађевинске објекте чиме би могућа оштећења објеката била потпуно избјегнута.

Садашња истраживања могу се даље проширити у два правца. Прво, могу се модели проширити и анализом утицаја геотехничке средине, што би подразумјевало извођење статистички значајног броја лабораторијских испитивања и теренских истраживања, која ће омогућити добијање довољног броја података за анализу и евалуацију утицаја параметара геотехничке средине на величину осциловања стијенске масе при минирању. Параметри који би могли да се анализирају су: динамички модул еластичности и деформабилности стијенске масе, испуцалост стијенске масе, геометријске карактеристике испуцалости (оријентација пукотина у простору у односу на правац ударног таласа, и позиције објеката у односу на мјесто минирања), и сл. Друго, даља истраживања могла би се усмјерити и на детаљније разматрање карактеристика грађевинских објеката, када су у питању конструктивне карактеристике, квалитет и старост градње, врста коришћених материјала, врста конструкције, квалитет одржавања, спратност, итд.

- 1) Укратко навести резултате до којих је кандидат дошао;
- 2) Оцијенити да ли су добијени резултати јасно приказани, правилно, логично и јасно тумачени, упоређујући са резултатима других аутора и да ли је кандидат при томе испољавао довољно критичности;
- 3) Посебно је важно истаћи до којих нових сазнања се дошло у истраживању, који је њихов теоријски и практични допринос, као и који нови истраживачки задаци се на основу њих могу утврдити или назирати.

VII ЗАКЉУЧАК И ПРИЈЕДЛОГ

Докторска дисертација кандидата мр Љубице Фигун по називом „Моделирање осциловања стијенске масе при минирању у функцији заштите објеката“ садржи све неопходне елементе које захтјева један научно-истраживачки рад. Дисертација је урађена у складу са савременим принципима и методологијом научно-истраживачког рада, те у складу са постављеном хипотезом коју је кандидат дао приликом пријаве дисертације. Сви елементи у дисертацији су

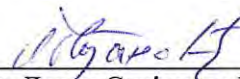

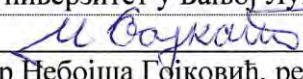
изложени на јасан и коректан начин, са научним утемељењем. На основу прегледа и анализе докторске дисертације, Комисија сматра да дисертација мр Љубице Фигун представља самосталан и оригиналан научни рад. Комисија констатује да је кандидат овладао методама научног рада, а проведена истраживања у дисертацији дају допринос науци и примјенљива су у пракси. Оригиналноста резултата кандидаткиња је потврдила презентовањем радова из области дисертације на реномираним међународним научно-стручним скуповима, као и публиковањем рада у референтном међународном часопису. Кандидаткиња је показала самосталност у научном раду кроз објављивање више научних радова у домаћим и иностраним часописима, и презентовањем саопштења из уже научне области на релевантним домаћим и међународним научно-стручним скуповима.

На основу укупне оцјене докторске дисертације и свега изложеног у овом Извјештају, Комисија једногласно даје позитивну оцјену урађеној докторској дисертацији кандидата мр Љубице Фигун под називом „Моделирање осциловањем стијенске масе при минирању у функцији заштите објеката“ и предлаже Научно-наставном вијећу Рударског факултета и Сенату Универзитета у Бањој Луци да се докторска дисертација прихвати и кандидату одобри одбрана.

- 1) Навести најзначајније чињенице што тези даје научну вриједност, ако исте постоје дати позитивну вриједност самој тези;
- 2) На основу укупне оцјене дисертације комисија предлаже:
 - да се докторска дисертација прихвати, а кандидату одобри одбрана,
 - да се докторска дисертација враћа кандидату на дораду (да се допуни или измијени) или
 - да се докторска дисертација одбија.

ПОТПИС ЧЛАНОВА КОМИСИЈЕ

Датум: 26.04.2022. године

1. 
др Лазар Стојановић, ванредни професор,
Рударски факултет, Универзитет у Бањој
Луци - председ
2. 
др Владимир Малчбашић, редовни
професор, Рударски факултет,
Универзитет у Бањој Луци - члан
3. 
др Небојша Грјковић, редовни
професор, Рударско – геолошки факултет,
Универзитет у Београду - члан

ИЗДВОЈЕНО МИШЉЕЊЕ: Члан комисије који не жели да потпише извјештај јер се не слаже са мишљењем већине чланова комисије, дужан је да унесе у извјештај образложење, односно разлог због којих не жели да потпише извјештај.