



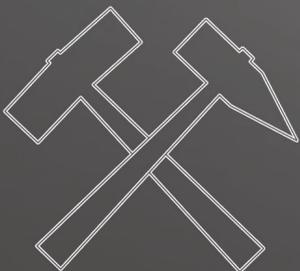
# РУДАРСКИ ГЛАСНИК

BULLETIN OF MINES

ISSN 2956-2457

Къига СХХІ, Бр. 1-2, 2024.

Volume СХХІ, No 1-2, 2024



**РУДАРСКИ ГЛАСНИК**

**BULLETIN OF MINES**

**Главни и одговорни уредник**

Др Јасмина Нешковић

**Editor in Chief:**

Dr Jasmina Nešković

**Издавач:**

Рударски институт д.о.о. Београд  
Београд, Батајнички пут 2,  
тел: 011 21 95 112; факс: 011 26 14 632;  
www.ribeograd.ac.rs

**Publishers:**

Mining Institute Ltd Belgrade  
Belgrade, Batajnički put 2,  
Phone. (381 11) 21 95 112; Fax. (381 11) 26 14 632  
www.ribeograd.ac.rs

**За издавача:**

Др Милинко Радосављевић, директор РИ

**For publishers:**

Dr Milinko Radosavljević, director of the MI

**Припрема за штампу:**

Лепосава Кнежевић  
Раде Шарац

**Prepress:**

Leposava Knežević  
Rade Šarac

**Штампа:**

Klik commerce d.o.o. Београд

**Press:**

Klik commerce d.o.o. Belgrade

**Тираж:**

300 примерака

**Circulation:**

300 copies

**Место и година издавања:**

Београд, 2024.

**Place and year of the issue:**

Belgrade, 2024.

**ISSN**

ISSN 0035-9637 (штампано)  
e-ISSN 2956-2457 (online)

**ISSN**

ISSN 0035-9637 (print)  
e-ISSN 2956-2457 (online)

**Адреса:**

Редакција Рударског гласника  
11080 Београд, Батајнички пут 2  
Е-пошта: jasmina.neskovic@ribeograd.ac.rs

**Address:**

Editorial Board of the Bulletin of Mines  
11080 Belgrade, Batajnički put 2  
e-mail: jasmina.neskovic@ribeograd.ac.rs

**Copyright © 2024**

Сва права задржава  
Рударски институт д.о.о. Београд

**Copyright © 2024**

All rights reserved  
Mining Institute Ltd. Belgrade

**РЕДАКЦИЈА**

Др Јасмина Нешковић, *гл. и одг. уредник*  
*e-маил: jasmina.neskovic@ribeograd.ac.rs*

Проф. др Милош Танасијевић  
*Рударско геолошки факултет, Београд*

Проф. др Предраг Лазич  
*Рударско геолошки факултет, Београд*

Проф. др Милена Костовић  
*Рударско геолошки факултет, Београд*

Проф. др Лазар Кричак  
*Рударско геолошки факултет, Београд*

Проф. др Владислав Чебашек  
*Рударско геолошки факултет, Београд*

Проф. др Томислав Шубарановић  
*Рударско геолошки факултет, Београд*

Проф. др Раде Јеленковић  
*Рударско геолошки факултет, Београд*

Др Милинко Радосављевић  
*Рударски институт д.о.о. Београд*

Др Светлана Полавдер  
*Рударски институт д.о.о. Београд*

Др Жељко Праштало  
*Рударски институт д.о.о. Београд*

Др Сандра Петковић Папалазароу  
*Рударски институт д.о.о. Београд*

Др Драгана Савић  
*Рударски институт д.о.о. Београд*

Др Ивана Јовановић  
*Институт за рударство и металургију Бор*

Др Владимир Јовановић  
*ИТНМС, Београд*

Павле Стјепановић  
*Рударски институт д.о.о. Београд*

Виолета Чолаковић  
*Рударски институт д.о.о. Београд*

Раде Шарац  
*Рударски институт д.о.о. Београд*

Тома Јовичић  
*Рударски институт д.о.о. Београд*

Огњен Поповић  
*Рударски институт д.о.о. Београд*

Веселин Анђелковић  
*Рударски институт д.о.о. Београд*

Јелена Исаиловић  
*Рударски институт д.о.о. Београд*

Тања Миладиновић  
*Рударски институт д.о.о. Београд*

**EDITORIAL BOARD**

Dr Jasmina Nešković, editor in chief  
*e-mail: jasmina.neskovic@ribeograd.ac.rs*

Prof. dr Miloš Tanasijević  
*Faculty of Mining and Geology, Belgrade*

Prof. dr Predrag Lazić  
*Faculty of Mining and Geology, Belgrade*

Prof. dr Milena Kostović  
*Faculty of Mining and Geology, Belgrade*

Prof. dr Lazar Kričak  
*Faculty of Mining and Geology, Belgrade*

Prof. dr Vladislav Čebašek  
*Faculty of Mining and Geology, Belgrade*

Prof. dr Tomislav Šubaranović  
*Faculty of Mining and Geology, Belgrade*

Prof. dr Rade Jelenković  
*Faculty of Mining and Geology, Belgrade*

Dr Milinko Radosavljević  
*Mining institute Ltd. Belgrade*

Dr Svetlana Polavder  
*Mining institute Ltd. Belgrade*

Dr Željko Praštalo  
*Mining institute Ltd. Belgrade*

Dr Sandra Petković Papalazarou  
*Mining institute Ltd. Belgrade*

Dr Dragana Savić  
*Mining institute Ltd. Belgrade*

Dr Ivana Jovanović  
*Mining and Metallurgy Institute Bor*

Dr Vladimir Jovanović  
*ITNMS, Belgrade*

Pavle Stjepanović  
*Mining institute Ltd. Belgrade*

Violeta Čolaković  
*Mining institute Ltd. Belgrade*

Rade Šarac  
*Mining institute Ltd. Belgrade*

Toma Jovičić  
*Mining institute Ltd. Belgrade*

Ognjen Popović  
*Mining institute Ltd. Belgrade*

Veselin Anđelković  
*Mining institute Ltd. Belgrade*

Jelena Isailović  
*Mining institute Ltd. Belgrade*

Tanja Miladinović  
*Mining institute Ltd. Belgrade*

**МЕЂУНАРОДНИ ИЗДАВАЧКИ САВЕТ**

Академик проф. др Слободан Вујић  
*Академија инжењерских наука Србије, Србија*

Академик проф. др Валентин Чантурија  
*Руска академија наука, Русија*

Академик проф. др Александар Грубић  
*Академија наука и умјетности Републике Српске, Босна и Херцеговина*

Академик проф. др Неђо Ђурић  
*Академија наука и умјетности Републике Српске, Босна и Херцеговина*

Проф. др Виктор Н. Опарин  
*Дописни члан Руске академије наука, Рударски институт, Новосибирск, Русија*

Проф. др Венцислав Иванов  
*Рударски факултет, Буџарска*

Проф. др Зоран Пантов  
*Универзитет Гоце Делчев, Факултет природних и техничких наука, Штип, Северна Македонија*

Проф. др Марек Цала  
*АГХ универзитет за науку и технологију, Краков, Пољска*

Проф др Аруна Мангалпади  
*Национални институт за технологију, Рударски одсек, Карнаџака, Индија*

Проф. др Тунцел М. Јегулали  
*Колумбија универзитет, Рударска школа Хенри Крумб, Њујорк, САД*

Проф. др Вереш Јоел  
*Универзитет у Петрошани, Рударски факултет, Румунија*

Проф. др Карстен Дребенштет  
*ТУ Рударска академија Фрајберг, Инс. за руд, Немачка*

Проф. др Милован Урошевић  
*Куртин Универзитет, Перт, Аустралија*

Проф. др Абдулах Фишне  
*Технички универзитет Истанбул, Одсек рударског инжењерства, Турска*

Др Марјан Худеј  
*РГП Велење, Словенија*

**INTERNATIONAL PUBLISHING COUNCIL**

Academician prof. dr Slobodan Vujic  
*Academy of Engineering Sciences of Serbia, Serbia*

Academician prof. dr Valentin Čanturija  
*Russian Academy of Sciences, Russia*

Academician prof. dr Aleksandar Grubić  
*Academy of Sciences and Arts of the Republic of Srpska, Bosnia and Herzegovina*

Academician prof. dr Neđo Đurić  
*Academy of Sciences and Arts Republic of Srpska, Bosnia and Herzegovina*

Prof. dr Viktor N. Oparin  
*Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Institute of Mining, Novosibirsk, Russia*

Prof. dr Vencislav Ivanov  
*Mining Faculty, Bulgaria*

Prof. dr Zoran Pantov  
*University Goce Delchev, Faculty of Natural and Technical Sciences, Štip, North Macedonia*

Prof. dr Marek Cala  
*AGH University of Science and Technology, Krakow, Poland*

Prof dr Aruna Mangalpadi  
*National Institute of Technology, Department of Mining, Karnataka, India*

Prof. dr Tuncel M. Jegulali  
*Columbia University, Henry Crumb School of Mines, New York, USA*

Prof. dr Vereš Joel  
*University of Petroșani, Faculty of Mining, Romania*

Prof. dr Carsten Drebenštet  
*TU Bergakademie Freiberg, Institute of Mining, Germany*

Prof. dr Milovan Urošević  
*Curtin University, Perth, Australia*

Prof. dr Abdulah Fišne  
*Istanbul Technical University, Department of Mining Engineering, Turkey*

Dr Marjan Hudej  
*RGP Velenje, Slovenia*

**РЕЦЕНЗЕНТИ**

Академик проф. др Слободан Вујић  
*Академија инжењерских наука Србије, Србија*

Проф. др Милан Трумић  
*Технички факултет у Бору, Србија*

Проф. др Новак Блечић  
*Рударско геолошки факултет, Београд*

Проф. др Владимир Милисављевић  
*Рударско геолошки факултет, Београд*

Проф. др Душан Берисављевић  
*Рударско геолошки факултет, Београд*

Др Милинко Радосављевић  
*Рударски институт д.о.о. Београд, Србија*

Др Светомир Максимовић  
*Академија инжењерских наука Србије*

Др Александар Митрашиновић,  
*Институт техничких наука САНУ, Београд, Србија*

Др Жељко Праштало  
*Рударски институт д.о.о. Београд, Србија*

**REVIEWERS**

Academician prof. dr Slobodan Vujić  
*Academy of Engineering Sciences of Serbia*

Prof. dr Milan Trumić  
*Technical Faculty in Bor, Serbia*

Prof. dr Novak Blečić  
*Faculty of Mining and Geology, Serbia*

Prof. dr Vladimir Milisavljević  
*Faculty of Mining and Geology, Serbia*

Prof. dr Dušan Berisavljević  
*Faculty of Mining and Geology, Serbia*

Dr Milinko Radosavljević  
*Mining Institute Ltd. Belgrade, Serbia*

Dr Svetomir Maksimović  
*Academy of Engineering Sciences of Serbia*

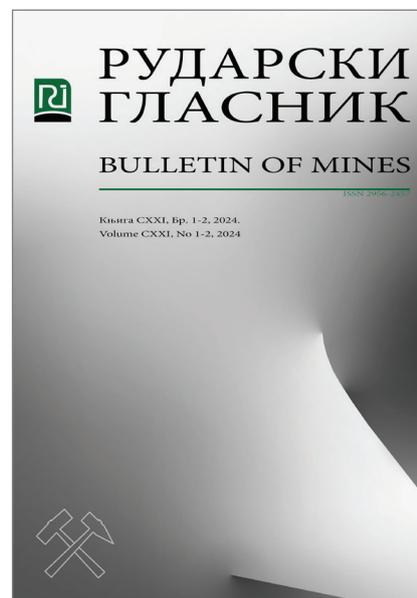
Dr Aleksandar Mitrašinović,  
*Institute of Technical Sciences of SASA, Belgrade, Serbia*

Dr Željko Praštalo  
*Mining Institute Ltd. Belgrade, Serbia*



## САДРЖАЈ / TABLE OF CONTENTS

*Часопис Рударски гласник излази од 1903. и намењен је свим истраживачима и стручњацима у домену техничко-технолошких наука. Часопис је бесплатан, отвореног приступа, објављује рецензиране научне и стручне чланке који садрже значајне новине, експерименталне и теоријске, научне и инжењерске резултате у рударству, геологији и блиским областима. Осим чланака објављују се и прилози ненауног карактера као што су прегледи нових публикација, прикази научних и стручних скупова у земљи и иностранству, информације о најновијим техничким достигнућима и сл.*



*The journal Bulletin of Mines has been published since 1903 and is intended for all researchers and experts in the area of technical and technological sciences. The journal is free of charge, open access, and publishes peer-reviewed scientific and professional articles containing significant novelties, experimental and theoretical, scientific and engineering results in mining, geology, and related areas. In addition to articles, non-scientific contributions are also published, such as reviews of new publications, reports of scientific and professional conferences in the country and abroad, information on the latest technical achievements, etc.*

## РАДОВИ / ARTICLES

ПРОИЗВОДЊА НАНОПРАХОВА ТИТАНИЈУМ ДИОКСИДА ИЗ ЦРВЕНОГ МУЉА PRODUCTION OF TITANIUM DIOXIDE NANOPOWDERS FROM RED MUD Срећко Стопић, Душко Костић, Ненад Николић, Драгана Животић, Милена Росић, Митар Перушић, Bernd Friedrich / Srećko Stopić, Duško Kostić, Nenad Nikolić, Dragana Životić, Milena Rosić, Mitar Perušić, Bernd Friedrich.....	7-28
О ПРОЦЕСУ РЕЗАЊА КАМЕНА ВОДОМ ABOUT THE HARD STONES WATER JET CUTTING PROCESS Сорин Михаи Раду / Sorin Mihai Radu.....	29-40
ИДЕЈНО РЕШЕЊЕ СТАБИЛИЗАЦИЈЕ УНУТРАШЊЕГ ОДЛАГАЛИШТА ПОВРШИНСКОГ КОПА ПОЉЕ Б И ПОЉЕ Ц CONCEPTUAL SOLUTION OF STABILIZATION OF INTERNAL LANDFILL OF SURFACE MINE FIELD B AND FIELD C Драган Милошевић, Тања Миладиновић, Жељко Праштало, Снежана Јаковљевић / Dragan Milošević, Tanja Miladinović, Željko Praštalo, Snežana Jakovljević .....	41-51

УТИЦАЈ УНУТРАШЊЕГ ОДЛАГАЛИШТА ПК ПОЉЕ Д НА СТАБИЛНОСТ СЕВЕРНЕ КОСИНЕ ПК ПОЉЕ Е У РБ КОЛУБАРА IMPACT OF THE INTERNAL LANDFILL O.P. FIELD D ON THE STABILITY OF THE NORTHERN SLOPE OF O.P. FIELD E IN RB KOLUBARA Бранко Петровић, Никола Анђелковић / Branko Petrović, Nikola Anđelković.....	53-62
САГЛЕДАВАЊЕ ПРОЦЕСА ЗГУШЊАВАЊА КОНЦЕНТРАТА БАКРА РУДНОГ ЛЕЖИШТА БОРСКА РЕКА КРОЗ РЕЛЕВАНТНЕ ИНДИКАТОРЕ OBSERVATION OF THE PROCESS OF CONCENTRATE CONCENTRATE OF THE BORSKA REKA ORE DEPOSIT THROUGH RELEVANT INDICATORS Ивана Јовановић, Сања Петровић, Јасмина Нешковић, Павле Стјепановић / Ivana Jovanović, Sanja Petrović, Jasmina Nešković, Pavle Stjepanović.....	63-71
ПРЕГЛЕД ТЕХНИЧКИХ РЕШЕЊА ЗА ПОДЗЕМНИ РУДНИК У ПРОЈЕКТУ „ЈАДАР“ REVIEW OF TECHNICAL SOLUTIONS FOR UNDERGROUND MINE IN PROJECT „JADAR“ Огњен Поповић, Саша Јовановић / Ognjen Popović, Saša Jovanović .....	73-83
ИЗ ИСТОРИЈЕ РУДАРСТВА СРБИЈЕ РУДНИК КАМЕНОГ УГЉА ДОБРА СРЕЋА 1884 – 1970. FROM THE HISTORY OF SERBIAN MINING HARD COAL MINE DOBRA SREĆA 1884 – 1970. Светомир Максимовић, Марко Бабовић / Svetomir Maksimović, Marko Babović.....	85-95
МОДЕЛ ОПТИМИЗАЦИЈЕ ИЗБОРА МЕХАНИЗАЦИЈЕ И ТРАНСПОРТНИХ СРЕДСТАВА НА ПРИМЕРУ ДИСКОНТИНУАЛНОГ ОТКОПАВАЊА И ТРАНСПОРТА УГЉА НА ЛОКАЛИТЕТУ СКОБАЉ („ТАМНАВА ЗАПАДНО ПОЉЕ“) ПРИМЕНОМ ЛИНЕАРНОГ ПРОГРАМИРАЊА И ПОУЗДАНОСТИ СИСТЕМА MODEL OF OPTIMIZATION OF THE CHOICE OF MACHINERY AND MEANS OF TRANSPORT ON THE EXAMPLE OF DISCONTINUOUS COAL MINING AND TRANSPORT AT THE SKOBALJ SITE ("TAMNAVA WEST FIELD") BY APPLYING LINEAR PROGRAMMING AND SYSTEM RELIABILITY Саша Цвијић / Saša Cvijić. ....	97-109
88 ГОДИНА ГЕОЛОШКИХ ИСТРАЖИВАЊА ЛИГНИТА У КОЛУБАРСКОМ УГЉОНОСНОМ БАСЕНУ, СРБИЈА – ГОДИНЕ ИСТРАЖНОГ БУШЕЊА (ОД 1936. ДО 2024. ГОДИНЕ) 88 YEARS OF GEOLOGICAL EXPLORATION OF LIGNITE IN THE KOLUBARA COAL BASIN, SERBIA – YEARS OF EXPLORATION DRILLING (SINCE 1936. UP TO 2024. YEAR) Богољуб Вучковић / Bogoljub Vučković.....	111-127
ОСТАЛО / OTHER	
ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ / PhD THESIS.....	129-131
ЗНАЧАЈНИ ДОГАЂАЈИ / SIGNIFICANT EVENTS.....	133
КЊИГЕ / BOOKS.....	135-136
ЈЕДИНСТВЕНА ИДЕНТИФИКАЦИЈА АУТОРА / OPEN RESEARCH AND CONTRIBUTOR ID (ORCID).....	137
УПУТСТВО АУТОРИМА / INSTRUCTION FOR AUTHORS.....	139-141

ПРОИЗВОДЊА НАНОПРАХОВА ТИТАНИЈУМ  
ДИОКСИДА ИЗ ЦРВЕНОГ МУЉА

PRODUCTION OF TITANIUM DIOXIDE  
NANOPOWDERS FROM RED MUD

DOI: 10.5937/RG2402007S

Оригинални научни рад  
Original Scientific Paper

Срећко Стопић<sup>1</sup>  
Душко Костић<sup>1,5</sup>  
Ненад Николић<sup>2</sup>  
Драгана Животић<sup>3</sup>  
Милена Росић<sup>4</sup>  
Митар Перушић<sup>5</sup>  
Bernd Friedrich<sup>1</sup>

Srećko Stopic<sup>1</sup>  
Duško Kostić<sup>1,5</sup>  
Nenad Nikolić<sup>2</sup>  
Dragana Životić<sup>3</sup>  
Milena Rosić<sup>4</sup>  
Mitar Perušić<sup>5</sup>  
Bernd Friedrich<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IME Институт за процесну металургију и рециклирање метала, RWTH Ахен Универзитет, Технички Универзитет Рајне Вестфалије, Ахен, Немачка;

<sup>1</sup>IME Institute for Process Metallurgy and Recycling, RWTH Aachen University, Aachen, Germany

<sup>2</sup>Институт за мултидисциплинарна истраживања, Универзитет у Београду, Београд, Србија

<sup>2</sup>Institute for Mutlidisciplinary Research, University of Belgrade, Belgrade, Serbia

<sup>3</sup>Рударско-геолошки факултет, Универзитет у Београду, Београд, Србија

<sup>3</sup>Faculty of Mining and Geology, University of Belgrade, Belgrade, Serbia

<sup>4</sup>Институт за нуклеарне науке „Винча“, Београд, Србија

<sup>4</sup>“Vinča” Institute of Nuclear Sciences, Belgrade, Serbia

<sup>5</sup>Технолошки факултет Зворник, Универзитет у Источном Сарајеву, Зворник, Република Српска, Босна и Херцеговина

<sup>5</sup>Faculty of Technology Zvornik, University of East Sarajevo, Zvornik, Republic of Srpska, Bosnia and Herzegovina

SStopic@metallurgie.rwth-aachen.de

SStopic@metallurgie.rwth-aachen.de

Примљен 27 септембра 2024; Рецензиран 9 децембра 2024; Прихваћен 9 децембра 2024.  
Received 27 Septembre, 2024; Received in revised 9 Decembre 2024; Accepted 9 Decembre 2024

**Сажетак:** Црвени муљ, као нуспроизвод алуминијумске индустрије, представља значајан еколошки проблем збој свој хемијској састава и количина које се генеришу. Ова студија испитује могућности његове валоризације кроз вишестепени процес који укључује редукцију, лужење са пречишћавањем раствора и ултрасоничну спреј пиролизу (USP). У првом кораку, црвени муљ пролази кроз карбојтермалну редукцију, током које се оксиди метала трансформишу у металну фазу и шљаку. У другом кораку, шљака се одвргава лужењу при различитим условима односно температуре пречишћавања, концентрације киселине, што омогућава издвајање титанијума у облику титанијум окси-сулфата и других метала. На крају, након пречишћавања раствора коришћењем пречишћавања или солвент екстракције ултрасонична спреј пиролиза користи титанијум окси-сулфат ( $TiOSO_4$ ) за синтезу нанопрахова титанијум диоксида ( $TiO_2$ ). Овај материјал не само да доприноси смањењу отпада, већ и производи материјале високе вредности који имају широку примену у индустрији.

**Кључне ријечи:** ЦРВЕНИ МУЉ, РЕДУКЦИЈА, ЛУЖЕЊЕ, УЛТРАСОНИЧНА СПРЕЈ ПИРОЛИЗА

**Abstract:** Red mud, byproduct of the aluminum industry, poses a significant environmental problem due to its chemical composition and the large quantities generated. This study explores the potential for its valorization through a multi-step process that includes reduction, leaching with acid solution, purification, and ultrasonic spray pyrolysis (USP). In the first step, red mud undergoes carbothermal reduction, during which metal oxides are transformed into metal phase and slag. In the second step, the slag is subjected to leaching under various conditions, including changes in pressure, temperature, and acid concentration, which allows the recovery of titanium in the form of titanium oxysulfate and other metals. Finally, after purifying the solution using precipitation or solvent extraction, ultrasonic spray pyrolysis is used to synthesize titanium dioxide ( $\text{TiO}_2$ ) nanopowders from titanium oxysulfate ( $\text{TiOSO}_4$ ). This integrated approach not only reduces waste but also produces high-value materials with broad industrial applications.

**Keywords:** RED MUD, REDUCTION, LEACHING, ULTRASONIC SPRAY PYROLYSIS

## УВОД

Црвени муљ, индустријски отпад који настаје као нуспроизвод у производњи алуминијума, представља велики еколошки изазов због свог високог алкалног садржаја и присуства токсичних метала. Традиционалне методе управљања овим отпадом, као што су одлагање у депонијама или коришћење у грађевинским материјалима, показале су се као недовољно ефикасне и неприкладне за широку примјену, посебно када се разматра обим његове производње и дугорочне еколошке последице. Потребна су иновативна рјешења која би омогућила ефикасно искориштавање црвеног муља, уз минималан негативан утицај на животну средину [1].

Разматране су различите методе за обраду црвеног муља, али су многе технички комплексне, скупе или не пружају задовољавајуће резултате у смислу издвајања корисних материјала. У том контексту, истраживање усмјерено на његову редукуцију, лужење и примјену напредних техника попут ултрасоничне спреј пироллизе (USP) нуди нове могућности. Управо оваква комбинација процеса пружа не само издвајање кључних елемената попут титанијума, жељеза и алуминијума, већ и смањење негативног утицаја на околину [2], [3], [4].

Карботермичка редукација је истакнут процес у металургији за издвајање метала из њихових оксида користећи угљеник као редукационо средство. Ова метода је посебно значајна у редукацији жељезних оксида, што је кључни корак у производњи жељеза и челика. Основни принцип карботермичке редукације подразумијева интеракцију између угљеника, обично у обли-

## INTRODUCTION

Red mud, an industrial waste generated as a byproduct in aluminum production, poses a significant environmental challenge due to its high alkaline content and the presence of toxic metals. Traditional methods for managing this waste, such as landfill disposal or use in construction materials, have proven inadequate and unsuitable for widespread application, especially given the scale of its production and the long-term ecological consequences. Innovative solutions are needed to enable the efficient utilization of red mud with minimal negative environmental impact [1].

Various methods for red mud processing have been considered, but many are technically complex, costly, or fail to deliver satisfactory results in terms of recovering useful materials. In this context, research focused on its reduction, leaching, and the application of advanced techniques like ultrasonic spray pyrolysis (USP) offers new possibilities. Such a combination of processes enables not only the recovery of key elements like titanium, iron, and aluminum but also a reduction in the environmental footprint [2], [3], [4].

Carbothermal reduction is a well-established process in metallurgy for extracting metals from their oxides using carbon as a reducing agent. This method is particularly important for the reduction of iron oxides, which is a crucial step in the production of iron and steel. The basic principle of carbothermal reduction involves the interaction between carbon, usually in the form of coke or charcoal, and metal oxides at elevated temperatures, leading to the

ку коксног угља или дрвеног угља, и металног оксида на повишеним температурама, што доводи до формирања угљен-моноксида (CO) или угљен-диоксида (CO<sub>2</sub>) и метала [5], [6].

У контексту железних оксида, карботермичка редукција првенствено циља хематит (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) и магнетит (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), који су најзаступљеније железне руде. Процес се изводи у високој пећи, гдје се смјеса жељезне руде, кокса и кречњака загријава на температуре око 1500°C. Реакције се одвијају у неколико фаза. У почетку се хематит редукује у магнетит [7], [8]:



Затим магнетит се редукује до вустита (FeO) [7]:



Коначно вустит се редукује до металног жељеза (гвожђа) [7]:



Ове реакције су ендотермне и захтијевају значајан унос топлоте, која се обезбеђује сагоријевањем кокса у присуству топлог ваздуха. Угљен-моноксид који настаје у овим реакцијама дјелује као редукцијско средство, додатно побољшавајући ефикасност редукције. Овај низ реакција је кључан за производњу сировог жељеза, које садржи угљеник и друге нечистоће и који се накнадно рафинише да би се добио челик. Сличан механизам је присутан и код редукције црвеног муља, јер је црвени муљ углавном састављен од железно(III) оксида, слично као железна руда [9].

Ефикасност карботермичке редукције црвеног муља зависи од неколико фактора, укључујући реактивност извора угљеника, температуру и притисак унутар пећи, те физичке карактеристике црвеног муља. Оптимални услови морају бити одржавани како би се осигурала потпуна редукција и смањило формирање непожељних нуспроизвода, попут троска, која се састоји од нечистоћа и топитеља [10].

formation of carbon monoxide (CO) or carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and the production of the metal [5], [6].

In the context of iron oxides, carbothermal reduction primarily targets hematite (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) and magnetite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), which are the most abundant iron ores. The process is carried out in a blast furnace, where a mixture of iron ore, coke, and limestone is heated to temperatures around 1500°C. The reactions occur in several stages. Initially, hematite is reduced to magnetite [7], [8]:

Then, magnetite is reduced to wustite (FeO) [7]:

Finally, wustite is reduced to metallic iron [7]:

These reactions are endothermic and require a significant heat input, which is supplied by burning coke in the presence of hot air. The carbon monoxide produced in these reactions acts as a reducing agent, further enhancing the reduction efficiency. This series of reactions is crucial for the production of pig iron, which contains carbon and other impurities, and is subsequently refined to produce steel. A similar mechanism is present in the reduction of red mud, as red mud is mainly composed of iron (III) oxide, similar to iron ore [9].

The efficiency of carbothermal reduction of red mud depends on several factors, including the reactivity of the carbon source, the temperature and pressure within the furnace, and the physical characteristics of the red mud. Optimal conditions must be maintained to ensure complete reduction and minimize the formation of undesirable byproducts, such as slag, which consists of impurities and fluxes [10].

Са термодинамичке тачке гледишта, изводљивост ових реакција одређује промена Гибсове слободне енергије, која постаје повољнија на вишим температурама. Кинетика такође игра кључну улогу, јер дифузија реактаната и продуката кроз чврсте и растопљене фазе може утицати на укупну брзину реакције. Стога су дизајн и рад електролучне пећи кључни за максимизацију ефикасности карботермичког редукционог процеса [9], [11].

Међутим, изазови остају у оптимизацији карботермичке редукције црвеног муља. То укључује управљање високом потрошњом енергије због повишених температура које су потребне, осигуравање ефикасног издвајању свих драгоцјених метала и суочавање са потенцијалним емисијама CO и CO<sub>2</sub>. [10], [12].

## ЛУЖЕЊЕ

Лужење је процес који се користи у различитим индустријама за издвајање корисних компоненти из чврстих материјала растварањем у течном растварачу. Ова метода је посебно заступљена у рударству, гдје се користи за издвајање метала из руда. Основни принцип укључује контакт чврстог материјала с растварачем који селективно раствара жељене састојке, остављајући иза себе нежељене остатке.

Процес лужења може се изводити у различитим конфигурацијама, као што су лужење на гомили, лужење у аутоклаву и ин-ситу лужење. У лужењу на гомили, уситњена руда се слаже на велике гомиле и натапа раствором за лужење, који продирући кроз гомилу раствара циљане метале. Лужење под високим притиском подразумева стављање руде у аутоклаве или резервоаре и урањање у раствор за лужење, омогућајући процес растварања у контролисанијем окружењу. Ин-ситу лужење, укључује убризгавање раствора директно у рудник под земљом, где раствара метале на лицу мјеста, који се потом пумпају на површину ради обраде [13], [14].

Неколико фактора утиче на ефикасност процеса лужења, укључујући природу чврстог

From a thermodynamic perspective, the feasibility of these reactions is determined by the change in Gibbs free energy, which becomes more favorable at higher temperatures. Kinetics also plays a key role, as the diffusion of reactants and products through solid and molten phases can influence the overall reaction rate. Therefore, the design and operation of the electric arc furnace are critical to maximizing the efficiency of the carbothermal reduction process [9], [11].

However, challenges remain in optimizing the carbothermal reduction of red mud. These include managing the high energy consumption due to the elevated temperatures required, ensuring the efficient recovery of all valuable metals, and addressing potential emissions of CO and CO<sub>2</sub> [10], [12].

## LEACHING

Leaching is a process used in various industries to extract valuable components from solid materials by dissolving them in a liquid solvent. This method is especially used in mining, where it is used to recover metals from ores. The basic principle involves the contact of solid material with a solvent that selectively dissolves the desired components, leaving behind unwanted residues.

Leaching can be performed in different configurations, such as heap leaching, autoclave leaching, and in-situ leaching. In heap leaching, crushed ore is piled into large heaps and soaked with a leaching solution, which percolates through the heap, dissolving the targeted metals. High pressure leaching involves placing the ore in autoclave or tanks and immersing it in the leaching solution, allowing the dissolution process to occur in a more controlled environment. In-situ leaching involves injecting the solution directly into an underground mine, where it dissolves the metals in situ, which are then pumped to the surface for processing [13], [14].

Several factors affect the efficiency of the leaching process, including the nature of the solid material, the type of solvent used, temperature,

материјала, врсту кориштеног растварача, температуру, рН вриједност и мијешање. На примјер, температура може значајно утицати на брзину растварања; више температуре обично повећавају растворљивост циљаних компоненти и брзину реакције [15], [16].

Континуално лужење под високим притиском, познато и као каскадно аутоклавно лужење, представља напредну хидрометалуршку технику која се користи за издвајање метала из руда и концентрата под повишеним притисцима и температурама у индустрији алуминијума. Ова метода је нарочито ефикасна код третирања руда, које је тешко прерадити коришћењем конвенционалних техника лужења због присуства сложених минералних структура или нечистоћа које ометају издвајање метала [17], [18].

#### УЛТРАСОНИЧНА СПРЕЈ ПИРОЛИЗА

Техника ултразвучног спреј пироллизе (USP) укључује генерисање капљица помоћу ултразвучних таласа, нудећи једноставност, исплативост, континуирану операцију, високе брзине наношења и могућност покривања великих површина. Произведене капљице су обично мање од 20  $\mu\text{m}$  у величини при ниским брзинама током кретања, што може изазвати потешкоће у њиховом уклањању из гасне фазе због судара са зидовима реактора и међусобних судара, што доводи до спајања. Једна од значајних предности технике спреј пироллизе је већа стабилност премаза које производи у поређењу са онима који се наносе у вакууму, као и њена свестраност. [19], [20].

Спреј пироллиза је прилагодљива метода за припрему једнослојних и вишеслојних филмова, било да су густе или порозни, керамичких премаза и разних прахова материјала. Постојеће технике спреј обраде могу се класификовати на основу врсте извора енергије који се користи за реакцију почетног раствора. То укључује цевне реакторе (SP), методу сагоревања, реакторе са пламеном паре и распршивање у пламену. Такође се могу класификовати према методи атомизације прекурсора, као што су електростатичке, ваздушним притиском и ултразвучне

pH value, and agitation. For example, temperature can significantly influence the dissolution rate; higher temperatures generally increase the solubility of the target components and the reaction rate [15], [16].

Continuous high-pressure leaching, also known as cascade autoclave leaching, is an advanced hydrometallurgical technique used to extract metals from ores and concentrates under elevated pressures and temperatures in aluminum industry. This method is particularly effective in treating ores that are difficult to process using conventional leaching techniques due to the presence of complex mineral structures or impurities that hinder metal extraction [17], [18].

#### ULTRASONIC SPRAY PYROLYSIS

The ultrasonic spray pyrolysis (USP) technique involves the generation of droplets using ultrasonic waves, offering simplicity, cost-effectiveness, continuous operation, high deposition rates, and the ability to cover large surface areas. The droplets produced are typically smaller than 20  $\mu\text{m}$  in size at low velocities during movement, which may cause difficulties in their removal from the gas phase due to collisions with reactor walls and mutual collisions, leading to coalescence. One significant advantage of the spray pyrolysis technique is the greater stability of the coatings it produces compared to those deposited in a vacuum, as well as its versatility [19], [20].

Spray pyrolysis is an adaptable method for preparing single-layer and multilayer films, whether dense or porous, ceramic coatings, and various material powders. Existing spray processing techniques can be classified based on the type of energy source used for the reaction of the initial solution. These include tubular reactors (SP), combustion methods, steam flame reactors, and flame spray pyrolysis. They can also be classified according to the precursor atomization method, such as electrostatic, air pressure, and ultrasonic spray pyrolysis techniques. If the energy source for the precursor solution reaction comes from external sources rather than from the spray

технике спреј пиролизе. Ако извор енергије за реакцију раствора прекурсора долази из спољашњих извора уместо из самог спреја, метода је мање осетљива на одабране прекурсоре и раствараче. У зависности од растворљивости, врсте и исплативости раствора прекурсора, користе се различити растварачи у спреј пиролизи, обично нитрати, хлориди и ацетати растворени у воденим и алкохолним растварачима [21].

Технике спреј пиролизе се такође могу класификовати на основу типа атомизера који се користе. Величина аеросола, која утиче на квалитет филма, обично се одређује методом атомизације. Постоје три главне методе атомизације: електростатичка, ваздушна и ултразвучна. Технике које користе ове атомизере називају се електростатичком спреј депозицијом, спреј пиролизе у којима се раствор распршује помоћу притиска и ултразвучном или нормалном спреј пиролизом (USP). Ултразвучна атомизација се ослања на електро механички уређај који вибрира на високим фреквенцијама и може атомизовати само Њутнове течности са ниском вискозношћу које пролазе преко вибрирајуће површине, узрокујући да се раствор разбије у капљице [22].

У поређењу са другим техникама депозиције танких филмова, спреј пиролиза има неколико предности, укључујући процес у отвореној атмосфери, отворену реакцијску комору, прилагодљивост током депозиције и лакоћу посматрања процеса депозиције. Састав филма може се прилагодити варирањем почетних раствора, што чини спреј пиролизу погодном за производњу густих и порозних филмова кроз оптимизацију различитих варијабли депозиције. Ове променљиве укључују температуру депозиције, састав и концентрацију прекурсора, температуру подлоге, тип растварача, однос носивог гаса, брзину протока раствора, удаљеност између млазнице и подлоге, као и брзину протока. Главна предност спреј пиролизе у односу на друге методе у гасној фази је њена способност да синтетише вишекомпонентне честице са прецизно жељеном стехиометријом. У зависности од типа

itself, the method is less sensitive to the selected precursors and solvents. Depending on the solubility, type, and cost-effectiveness of the precursor solution, various solvents are used in spray pyrolysis, typically nitrates, chlorides, and acetates dissolved in water and alcohol solvents [21].

Spray pyrolysis techniques can also be classified based on the type of atomizer used. The size of the aerosol, which affects the film quality, is typically determined by the atomization method. There are three main atomization methods: electrostatic, air, and ultrasonic. Techniques using these atomizers are known as electrostatic spray deposition, spray pyrolysis where the solution is sprayed using pressure, and ultrasonic or regular spray pyrolysis (USP). Ultrasonic atomization relies on an electromechanical device that vibrates at high frequencies and can only atomize Newtonian fluids with low viscosity that pass over the vibrating surface, causing the solution to break into droplets [22].

Compared to other thin-film deposition techniques, spray pyrolysis has several advantages, including processing in an open atmosphere, an open reaction chamber, adaptability during deposition, and the ease of observing the deposition process. The film composition can be adjusted by varying the initial solutions, making spray pyrolysis suitable for producing dense and porous films through the optimization of various deposition variables. These variables include deposition temperature, precursor composition and concentration, substrate temperature, solvent type, carrier gas ratio, solution flow rate, the distance between the nozzle and the substrate, and the gas flow rate. The main advantage of spray pyrolysis over other gas-phase methods is its ability to synthesize multicomponent particles with precisely desired stoichiometry. Depending on the type of precursor, substrate temperature, and the distance between the nozzle and the substrate, the droplets can either deposit without evaporation or completely decompose before reaching the substrate, resulting in a process similar to chemical vapor deposition [23].

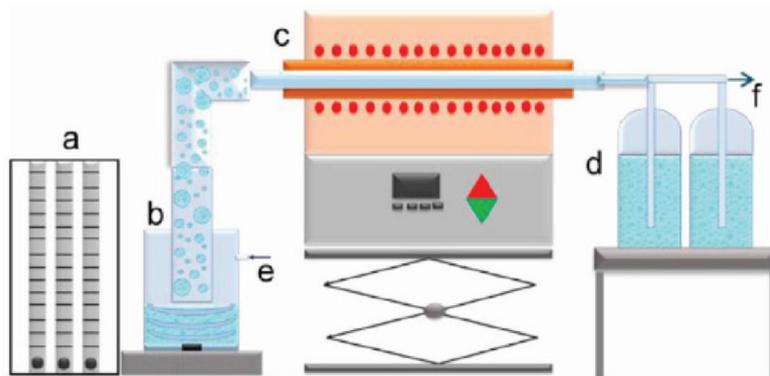
прекурсора, температуре подлоге и удаљености између млазнице и подлоге, капљице се могу или таложити без испаравања или се потпуно разложити прије него што дођу до подлоге, што резултира процесом сличним хемијској гасној депозицији. [23].

Због лаког контролисања морфологије прахова добијених коришћењем USP методе и доступности јефтених прекурсора, ова техника представља свестран и моћан алат за синтезу честица са контролисаним и униформним величинама. Има значајан потенцијал за производњу нанопрахова.

У USP методи, почетни раствор се атомизује како би се формирао аеросол. Ове аеросолне капљице се преносе помоћу носивог гаса, који може бити редукујући гас, у врућу комору где пролазе кроз сушење, контракцију, преципитацију и синтеровање како би се формирале сферне честице. Веома кратко време задржавања, обично неколико секунди, је обично довољно да се осигура формирање сферних наночестица [24].

Due to the ease of controlling the morphology of powders obtained using the USP method and the availability of inexpensive precursors, this technique represents a versatile and powerful tool for synthesizing particles with controlled and uniform sizes. It has significant potential for producing nanopowders.

In the USP method, the initial solution is atomized to form an aerosol. These aerosol droplets are transported by a carrier gas, which can be a reducing gas, into a hot chamber where they undergo drying, contraction, precipitation, and sintering to form spherical particles. A very short residence time, usually a few seconds, is typically sufficient to ensure the formation of spherical nanoparticles [24].



Слика 1, Шема USP опреме: а) Регулација протока гаса; б) ултразвучни генератор; ц) цевна пећ; д) боце за сакупљање; е) улаз гаса; ф) излаз гаса [24]

Figure 1, Schematic of USP Equipment: a) Gas flow control; b) Ultrasonic generator; c) Tubular furnace; d) Collection bottles; e) Gas inlet; f) Gas outlet [24]

Неколико студија се фокусирао на обраду финих прахова користећи технику спреј пироллизе, јер она може произвести високо чисте и неагломерисане наночестице са хомогеним хемијским саставом. Током поступка, почетни прекурсор се атомизује у капљице, које се затим преносе гасом кроз пећ за калцинацију. Са ових капљица растарач испарава, долази до преципитације и

Several studies have focused on processing fine powders using the spray pyrolysis technique, as it can produce highly pure and non-agglomerated nanoparticles with homogeneous chemical composition. During the process, the initial precursor is atomized into droplets, which are then transported by gas through a calcination furnace. The solvent from these droplets evaporates, leading to precipitation and drying. The

сушења. Осушене честице реагују са водоником и долази до настанка финих честица титанијум диоксида. [25].

Истраживачи су показали да је критични параметар у припреми финих, сферних честица да се преципитирана со не деформише или топи током грејања, јер то може довести до формирања нископропусних омотача. Овај проблем узрокује заробљавање растварача унутар језгра капљица, што ствара већи притисак јер се растварач не може лако испарити из омотача. Као резултат тога, на омотачима се формирају пукотине, што доводи до стварања секундарних капљица и сломљених омотача, што резултира честицама неправилног облика. Доказано је да висока растворљивост соли није неопходна за формирање униформних и чврстих честица [26].

У овом раду биће приказати добијање нанопрахова титан-оксида након редукције осушеног црвеног муља са угљеником, лужења шљаке са сумпорном киселином, и ултразвучног распршивања титанокисулфата у атмосфери водоника, при чему пречишћавање раствора након лужења шљаке неће бити описано.

## МАТЕРИЈАЛИ И МЕТОДЕ

### КАРБОТЕРМИЧКА РЕДУКЦИЈА

Процес редукције с угљеником је изведен у електролучној пећи. Три килограма црвеног муља састава (табела 1.) и 10 g графита на 100 g црвеног муља као редукционог агенса мешани су и додавани у пећ. Због високе вискозности шљаке након редукције железних оксида, шљака је стварала пену. Како би се смањила вискозност, додат је СаО као средство за снижавање тачке топљења. Након пуњења, започета је реакција која је трајала од 60 минута, како би се омогућило да С реагује са шљаком. На крају реакције, пећ је отворена да би се метална фаза жељеза одвојила, док је шљака остала у посуди.

dried particles react with hydrogen, resulting in the formation of fine titanium dioxide particles [25].

Researchers have demonstrated that a critical parameter in the preparation of fine, spherical particles is to prevent the precipitated salt from deforming or melting during heating, as this can lead to the formation of low-permeability shells. This issue causes solvent entrapment within the droplet cores, which creates higher pressure since the solvent cannot easily evaporate from the shell. As a result, cracks form on the shells, leading to the creation of secondary droplets and broken shells, which result in irregularly shaped particles. It has been shown that high salt solubility is not necessary for the formation of uniform and solid particles [26].

In this work, the production of titanium oxide nanopowders will be demonstrated after the reduction of dried red mud with carbon, the leaching of slag with sulfuric acid, and the ultrasonic spraying of titanium oxy-sulfate in a hydrogen atmosphere. The purification of the solution after the slag leaching process will not be described.

## MATERIALS AND METHODS

### CARBOTHERMAL REDUCTION

The reduction process with carbon was carried out in an electric arc furnace. Three kilograms of red mud (composition shown in Table 1) and 10 g of graphite per 100 g of red mud as a reducing agent were mixed and added to the furnace. Due to the high viscosity of the slag after the reduction of iron oxides, the slag formed foam. To reduce the viscosity, CaO was added as a flux to lower the melting point. After loading, the reaction began, lasting 60 minutes, allowing the carbon to react with the slag. At the end of the reaction, the furnace was opened to separate the metallic iron phase, while the slag remained in the container.

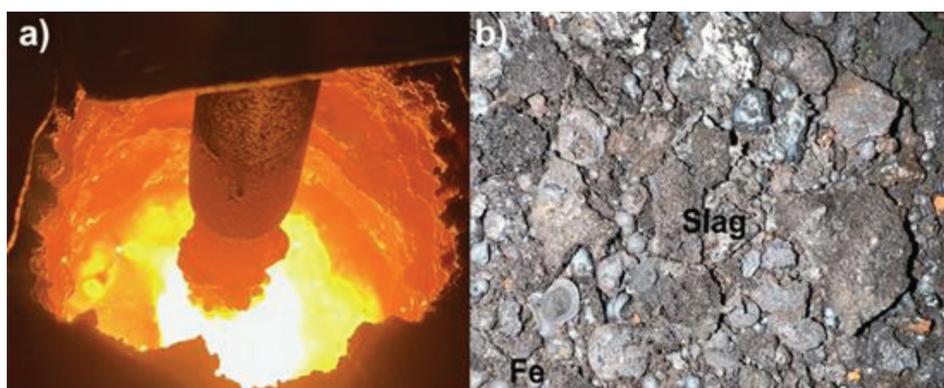
Табела 1, Састав црвеног муља

Table 1, Composition of Red Mud

Једињења Compounds	%	Једињења Compounds	%
Губитак паљењем на 1000°C Ignition loss at 1000°C	8.1	Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.235
SiO <sub>2</sub>	10.38	CuO	0.008
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	48.29	K <sub>2</sub> O	0.149
Na <sub>2</sub> O	2.55	Tl <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.080
TiO <sub>2</sub>	4.59	MnO	0.155
CaO	8.23	MgO	0.677
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.04	NiO	0.044
Ag <sub>2</sub> O	0.001	PbO	0.018
BaO	0.015	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.940
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.134	ZnO	0.017
Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.012	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.125
Co <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.011	SrO	0.073

Узорци су раздвојени механички коришћењем магнетне сепарације. Добијени производи су анализирани XRD и EDS анализом, као и SEM анализом. На слици 2. је приказана електролучна пећ за редукцију црвеног муља а) и производи редукције б).

Samples were separated mechanically using magnetic separation. The obtained products were analyzed through XRD and EDS analysis, as well as SEM analysis. Figure 2 shows the electric arc furnace used for the reduction of red mud (a) and the reduction products (b).



Слика 2, Електролучна пећ а) и карбоџермално редуковани црвени муљ б)  
 Figure 2, Electric arc furnace a) and carbothermally reduced red mud b)

## ЛУЖЕЊЕ

Процес лужења одвијао се у аутоклаву под повишеним притиском и температуром. За лужење је коришћена сумпорна киселина. Материјал за процес лужења је шљака (ре-

## LEACHING

The leaching process took place in an autoclave under elevated pressure and temperature. Sulfuric acid was used for leaching. The material for the leaching process was slag (reduced red

дуковани црвени муљ) Дизајн процеса лужења приказан је у табели 2.

Сви експерименти су изведени у лабораторијама ИМЕ RWTH. Лужење шљаке обављено је у аутоклаву Бучи, Швајцарска, који је дизајниран за кисело лужење (1.53 L, мах притисак 200 bar, макс. температура 270°C), као што је приказано на Слици 3. Овај експериментални сет укључује топлотни измјењивач са термостатом, миксер, сонде за повећање и смањење притиска, као и могућност узимања узорака током рада. Аутоклав је повезан са рачунаром и може се потпуно контролисати путем софтвера који бележи све податке током рада, а који се касније могу користити за обраду резултата. Притисак у овом аутоклаву је праћен помоћу манометра и дигиталних сензора. Притисак у систему је формиран помоћу компримованог кисеоника (6, 9 bar-а) и притиска водене паре (укупно 12-15 bar-а). Хлађење аутоклава обављено је посебним системом за хлађење направљеним у Ахену. Брзина загревања била је 10°C/min. Аутоклав се мора ручно заптивати вијцима и пре сваке операције мора се извршити тест притиска.

mud). The design of the leaching process is presented in Table 2.

All experiments were conducted in the laboratories of IME RWTH. Leaching of the slag was performed in a Buchi autoclave, Switzerland, designed for acid leaching (1.53 L, max pressure 200 bar, max temperature 270°C), as shown in Figure 3. This experimental setup includes a heat exchanger with a thermostat, a mixer, pressure increase and decrease probes, and the ability to take samples during operation. The autoclave is connected to a computer and can be fully controlled via software that records all data during operation, which can later be used for result processing. The pressure in this autoclave is monitored by a manometer and digital sensors. The pressure in the system was generated by compressed oxygen (6, 9 bars) and water vapor pressure (a total of 12-15 bars). The cooling of the autoclave was performed by a special cooling system made in Aachen. The heating rate was 10°C/min. The autoclave must be manually sealed with bolts, and a pressure test must be performed before each operation.



Слика 3, Аутоклав за процес лужења

Figure 3, Autoclave for the leaching process

Процес лужења прати филтрација, тј. раздвајање остатака од раствора. Раствор је анализиран помоћу ICP-OES, док је чврсти остатак анализиран помоћу EDS и XRD.

The leaching process is followed by filtration, i.e., the separation of the residue from the solution. The solution was analyzed using ICP-OES, while the solid residue was analyzed using EDS and XRD.

100 грама шљаке је лужено под различитим условима приказаним у табели 2. Шљака је претходно мљевена и просијана прије лужења. Као што је приказано у табели 2, различити параметри су праћени и оптимизовани како би се постигли што бољи резултати за лужење титанијума. Експеримент је започет под атмосферским притиском са ниском концентрацијом киселине и кратким временом реакције. У наредним експериментима, услови су прилагођавани повећањем концентрације киселине, продужењем времена реакције и повећањем притиска кисеоника како би се побољшала ефикасност лужења.

100 grams of slag were leached under various conditions shown in the Table 2. The slag was ground and sieved prior to leaching. As shown in Table 2, different parameters were monitored and optimized to achieve the best possible results for titanium leaching. The experiment began under atmospheric pressure with a low acid concentration and a short reaction time. In subsequent experiments, conditions were adjusted by increasing the acid concentration, extending the reaction time, and increasing the oxygen pressure to improve leaching efficiency.

Табела 2, Дизајн експерименталног за лужење шљаке

Table 2, Experimental design for slag leaching

Екс. Вр. Exp No.	Температура Temperature (°C)	Притисак кисеоника Pressure of oxygen	Концентрација киселине Acid concentration (mol/dm <sup>3</sup> )	Однос течност:чврсто Liquid:solid ratio	Време Time (min)
1	150	0 bar	0,5	10:1	30
2	150	6 bar	0,5	10:1	30
3	150	6 bar	2,5	10:1	60
4	150	6 bar	5	10:1	120
5	180	6 bar	5	10:1	120
6	150	9 bar	5	10:1	120

Након процеса лужења раствор је пречишћен коришћењем солвентне екстракције које је обавила фирма MEAB CHEMIE Technik GmbH.

After the leaching process, the solution was purified using solvent extraction performed by MEAB CHEMIE Technik GmbH.

#### УЛТРАЗВУЧНА СПРЕЈ ПИРОЛИЗА

Ултразвучна спреј пиролиза са редукцијом водоником у овом случају се користи за синтезу прахова на бази титана из титан-оксисулфата (TiOSO<sub>4</sub>). Сви експерименти су извођени у лабораторијама Института за металургију у Ахену. Методе коришћене у овим експериментима за карактеризацију узорака су: XRD анализа добијених узорака, EDS анализа и SEM анализа. На слици 4. је приказана опрема за USP са редукцијом водоником.

#### ULTRASONIC SPRAY PYROLYSIS (USP)

Ultrasonic spray pyrolysis with hydrogen reduction is used in this case for the synthesis of titanium-based powders from titanium oxysulfate (TiOSO<sub>4</sub>). All experiments were conducted in the laboratories of IME-Institute in Aachen. The methods used in these experiments for sample characterization include XRD analysis of the obtained samples, EDS analysis, and SEM analysis. Figure 4 shows the equipment for USP with hydrogen reduction.



Слика 4, Ојрема за USP са редукцијом водоником  
 Figure 4, USP Equipment with Hydrogen Reduction

За експерименте коришћен је синтетички титанијум оксисулфат са моларном концентрацијом од 1.5 mol/L. Праћен је утицај температуре при константној фреквенцији од 1,7 MHz, што се може видјети у табели 3.

A synthetic titanium oxysulfate solution with a molar concentration of 1.5 mol/L was used for the experiments. The effect of temperature was monitored at a constant frequency of 1.7 MHz, as shown in Table 3.

Табела 3, Дизајн експеримента

Table 3. Experimental Design

Екс. Бр. Exp No.	Температура Temperature (°C)	Вријеме Time (min)	Концентрација Concentration (g/l)	Густина раствора Density of solution (g/l)	Однос гасова Gas ratio H <sub>2</sub> / Ar (L/min)
1	700	180	80	1,15	1:1
2	800	180	80	1,15	1:1
3	900	180	80	1,15	1:1
4	1000	180	240	1,39	1:1

Црвени муљ, шљака, чврсти остатак и добијени узорци нанопорова титанијум диоксида анализирани су на собној температури техником рендгенске дифракције x зрака користећи Ultima IV Rigaku дифрактометар, опремљен са CuKα<sub>1,2</sub> зрачењем, уз напон генератора од 40 kV и струју генератора од 40 mA. Распон од 10–100° 2θ је кориштен за све узорке праха у режиму континуираног скенирања, са величином корака скенирања од 0,02° и брзином скенирања од 1°/min, користећи D/TeX Ultra детектор. Стаклени носач је кориштен за припрему узорка. Софтвер PDXL2 (Вер. 2.8.4.0) је кориштен за евалуацију фазног састава и идентификацију. Сви добијени прахови су идентификовани користећи ICDD базу података.

Red mud, slag, solid residue, and obtained titanium dioxide nanopowders were analyzed at room temperature using X-ray diffraction (XRD) techniques. The samples were analyzed with a Rigaku Ultima IV diffractometer equipped with CuKα<sub>1,2</sub> radiation, with a generator voltage of 40 kV and a generator current of 40 mA. A range of 10–100° 2θ was used for all powder samples in continuous scanning mode, with a step size of 0.02° and a scanning speed of 1°/min, utilizing a D/TeX Ultra detector. A glass holder was used for sample preparation. The PDXL2 software (Ver. 2.8.4.0) was used to evaluate phase composition and identification, with all obtained powders identified using the ICDD database.

Скенирајућа електронска микроскопија (SEM): SEM анализа је изведена помоћу JSM 7000F уређаја компаније JEOL (модел из 2006. године, JEOL Ltd., Токио, Јапан).

Енергетски дисперзивна рендгенска спектроскопија (EDS): EDX анализа је изведена помоћу Octane Plus-A система компаније Ametek-EDAX (модел из 2015. године, AMETEK Inc., Берwyn, PA, USA) и анализирана коришћењем софтвера Genesis V 6.53 од Ametek-EDAX-а.

## РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

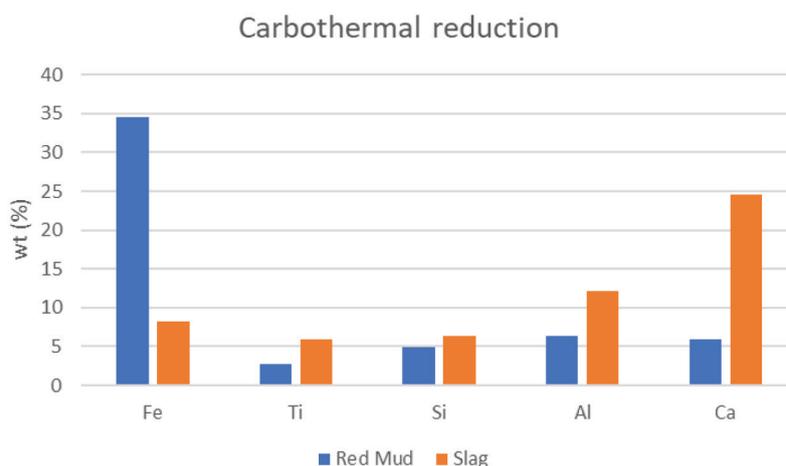
Редуковани узорци су механички раздвојени коришћењем магнетне сепарације. ICP-OES је коришћен за елементарну анализу шљаке, што је приказано у слици 5.

Scanning Electron Microscopy (SEM): SEM analysis was performed using a JSM 7000F device from JEOL (model 2006, JEOL Ltd., Tokyo, Japan).

Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS): EDX analysis was conducted using the Octane Plus-A system by Ametek-EDAX (model 2015, AMETEK Inc., Berwyn, PA, USA) and analyzed using Genesis V 6.53 software from Ametek-EDAX.

## RESULTS AND DISCUSSION

The reduced samples were mechanically separated using magnetic separation. ICP-OES was used for the elemental analysis of the slag, as shown in Figure 5.



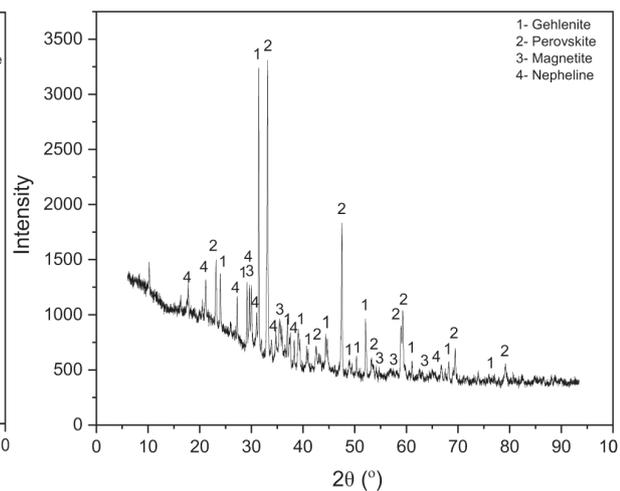
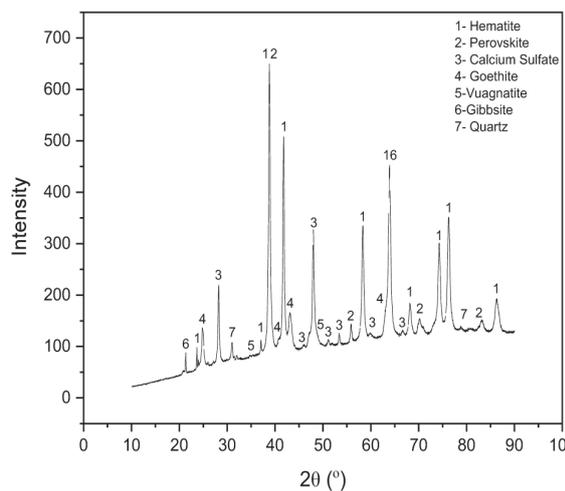
Слика 5, Елементарна анализа карботермално редуковане шљаке у поређењу са црвеним муљем

Figure 5, Elemental Analysis of Carbothermally Reduced Slag Compared to the Red Mud

Ова слика приказује концентрацију (у масеним процентима wt%) различитих елемената—жељеза (Fe), титанијума (Ti), силицијума (Si), алуминијума (Al) и калцијума (Ca) у шљаци након карботермалне редукације у поређењу са почетним количинама у црвеном муљу. Висока концентрација калцијума, која достиже готово 30%, одражава додавање калцијум оксида као средства за топљење током процеса. У поређењу с оригиналним црвеним муљем, који је садржао занемарљиве количине калцијума, увођење калцијум оксида значајно повећава његову концентрацију у

This figure shows the concentration (in weight percent wt%) of various elements—iron (Fe), titanium (Ti), silicon (Si), aluminum (Al), and calcium (Ca) in the slag after carbothermal reduction compared to the initial content in red mud. The high concentration of calcium, reaching nearly 30%, reflects the addition of CaO as a fluxing agent during the process. In comparison to the original red mud, which contained negligible amounts of calcium, the introduction of CaO significantly increases its concentration in the reduced slag. Aluminum also shows a higher concentration, slightly

редукованој шљаци. Алуминијум такође показује већу концентрацију, нешто изнад 20%. Концентрација жељеза смањује се на између 10% и 15%, што указује на редукцију жељезних оксида. Силицијум и титанијум, оба присутна у нижим концентрацијама (испод 10%), показују како су ови елементи обогаћени у односу на почетни црвени муљ.



Слика 6, Дифрактограми црвеног муља и шљакe редуковане на 1600 °C

Figure 6, Diffractograms of Red Mud and Slag Reduced at 1600 °C

Резултати рендгенске дифракције (XRD) карботермално редукованог црвеног муља (слика 6.), који је оригинално садржавао хематит, бемит, диаспор, илменит, перовскит, кварц и друге минерале, откривају значајне трансформације. У почетку, XRD пикови црвеног муља показују јасне врхове који одговарају овим фазама, при чему је хематит главна компонента због високог садржаја жељеза. Фазе које садрже алуминијум, попут бемита и диаспора, као и минерали који садрже титанијум, попут илменита и перовскита, доприносе обрасцу, заједно с кварцом, који је уобичајена силикатна фаза.

Након карботермалног процеса редукције, XRD резултати приказују потпуно другачији састав фаза. Хематит, доминантни оксид жељеза, више није присутан, што указује на његову потпуну редукцију. Уместо тога, редукциони процес је довео до формирања две различите фазе: металне фазе састављене углавном од жељеза (Fe) и шљакe. XRD пикови шљакe откривају присуство перовскита, који је остао готово непромењен, заједно са

above 20%. The concentration of iron decreases to between 10% and 15%, indicating the reduction of iron oxides. Silicon and titanium, both present in lower concentrations (below 10%), demonstrate how these elements are enriched compared to the initial red mud.

The X-ray diffraction (XRD) results of carbothermally reduced red mud (Figure 6), which originally contained hematite, boehmite, diaspore, ilmenite, perovskite, quartz, and other minerals, reveal significant transformations. Initially, the XRD peaks of the red mud show clear peaks corresponding to these phases, with hematite being the main component due to its high iron content. Phases containing aluminum, such as boehmite and diaspore, as well as titanium-containing minerals, such as ilmenite and perovskite, contribute to the pattern, along with quartz, which is a common silicate phase.

After the carbothermal reduction process, the XRD results display a completely different phase composition. Hematite, the dominant iron oxide, is no longer present, indicating its complete reduction. Instead, the reduction process has led to the formation of two different phases: a metallic phase mainly composed of iron (Fe) and slag. The XRD peaks of the slag reveal the presence of perovskite, which remains almost unchanged, alongside the forma-

формирањем геленита, калцијум-алуминијум силиката који вјероватно настаје из интеракције глинице са силицијумом током редукције. Додатно, присутан је мали удео магнетита, што указује на то да није сво железно редуковано до металне фазе.

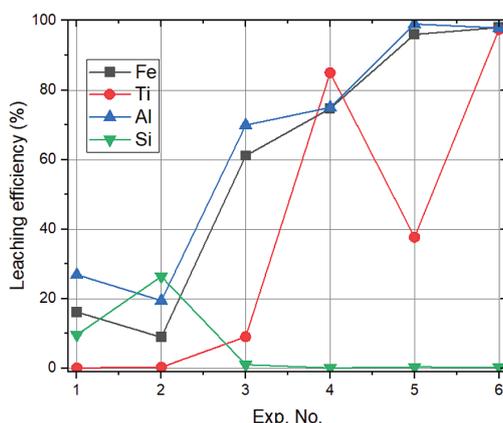
Перовскит остаје присутан, што указује на то да титанијумова једињења не подлијежу процесу редукције, док појава геленита одражава сложене реакције између различитих оксида у црвеном муљу током процеса редукције на високим температурама.

Све у свему, XRD резултати приказују трансформацију црвеног муља из сложене мјешавине оксида и силиката у систем у којем доминира метално железно и шљака, при чему су перовскит и геленит главне фазе, уз мањи удио магнетита.

У другом делу, шљака из овог дела се подвргава се процесу лужења.

## ЛУЖЕЊЕ ШЉАКЕ

На слици 7. приказане су различите ефикасности лужења у зависности од различитих услова експеримената дефинисаних у табели 2.



Слика 7, Ефикасности лужења за различите параметре (150°C, 6-9bar O<sub>2</sub>, 0.5-5 mol/l H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)

Figure 7, Leaching Efficiency for different parameters (150°C, 6-9 bar O<sub>2</sub>, 0.5-5 mol/l H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)

Што се тиче прва три експеримента јасно је да ови параметри нису довољни за адекватно лужење титанијумових једињења. Са повећањем температуре, концентрација Al и Fe расте, али концентрација Ti значајно

tion of gehlenite, a calcium-aluminum silicate likely formed from the interaction of alumina with silicon during reduction. Additionally, a small amount of magnetite is present, indicating that not all iron has been reduced to the metallic phase.

Perovskite remains present, suggesting that titanium compounds do not undergo the reduction process, while the appearance of gehlenite reflects complex reactions between various oxides in the red mud during the high-temperature reduction process.

Overall, the XRD results shows the transformation of red mud from a complex mixture of oxides and silicates to a system dominated by metallic iron and slag, with perovskite and gehlenite being the main phases, along with a smaller fraction of magnetite.

In the second part, the slag from this section undergoes the leaching process.

## LEACHING OF SLAG

Figure 7 shows different leaching efficiencies depending on the various experimental conditions defined in Table 2.

Regarding the first three experiments, it is clear that these parameters are insufficient for adequate leaching of titanium compounds. As the temperature increases, the concentrations of Al and Fe rise, but the concentration of Ti signifi-

опада. Међутим, са повећањем притиска кисеоника са 6 на 9 bar-а, долази до значајног повећања ефикасности лужења Ti. Веома добри резултати добијени су при притиску кисеоника од 9 bar-а, гдје је ефикасност лужења титанијума 97,5%. То значи да је притисак кисеоника кључни параметар ефикасности лужења титанијума. Поред титанијума, ефикасност лужења гвожђа и алуминијума је такође веома висока. Што се тиче силицијума, у случају високе температуре, концентрације киселине и високог притиска, количина излуженог силицијума је врло мала, тако да нема проблема са образовањем гела.

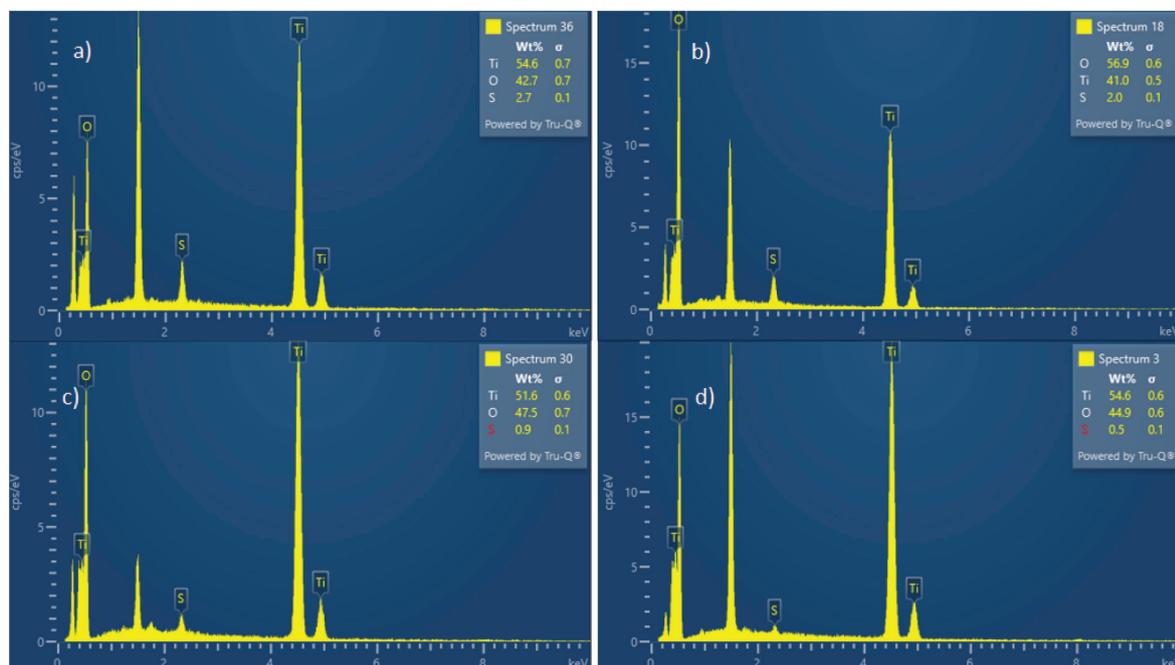
#### УЛТРАСОНИЧНА СПРЕЈ ПИРОЛИЗА

Истраживани су ефекти температуре на различите параметре, као што су величина честица, морфологија и састав добијених прахова на бази титана, док су други параметри одржавани константним, што је приказано у табели 2.

cantly decreases. However, with the increase in oxygen pressure from 6 to 9 bars, there is a significant increase in the leaching efficiency of Ti. Very good results were obtained at an oxygen pressure of 9 bars, where the leaching efficiency of titanium is 97,5%. This indicates that oxygen pressure is a key parameter for the leaching efficiency of titanium. In addition to titanium, the leaching efficiencies of iron and aluminum are also very high. As for silicon, under conditions of high temperature, acid concentration, and high pressure, the amount of leached silicon is very small, so there are no issues with gelation.

#### ULTRASONIC SPRAY PYROLYSIS

The effects of temperature on various parameters, such as particle size, morphology, and composition of the produced titanium-based powders, were investigated while other parameters remained constant, as shown in Table 2.



Слика 8, EDS дијаграм за честице добијене при а) 700 °C, б) 800 °C, в) 900 °C и д) 1000 °C  
Figure 8, EDS Diagram for Particles Obtained at a) 700 °C, b) 800 °C, c) 900 °C, and d) 1000 °C

На основу EDS анализа, евидентно је да производи добијени под овим условима претежно садрже стехијометријски  $\text{TiO}_2$ . Утицај температуре на процес синтезе је

Based on EDS analyses, it is evident that the products obtained under these conditions predominantly contain stoichiometric  $\text{TiO}_2$ . The impact of temperature on the synthesis pro-

посебно значајан; како температура расте, долази до значајног смањења садржаја сумпора унутар узорака. Ово смањење сумпора може се приписати потпунијем разлагању и редукцији прекурсора титанијум оксисулфата ( $\text{TiOSO}_4$ ) при вишим температурама, што указује на побољшану ефикасност реакције и чистоћу произведеног  $\text{TiO}_2$ .

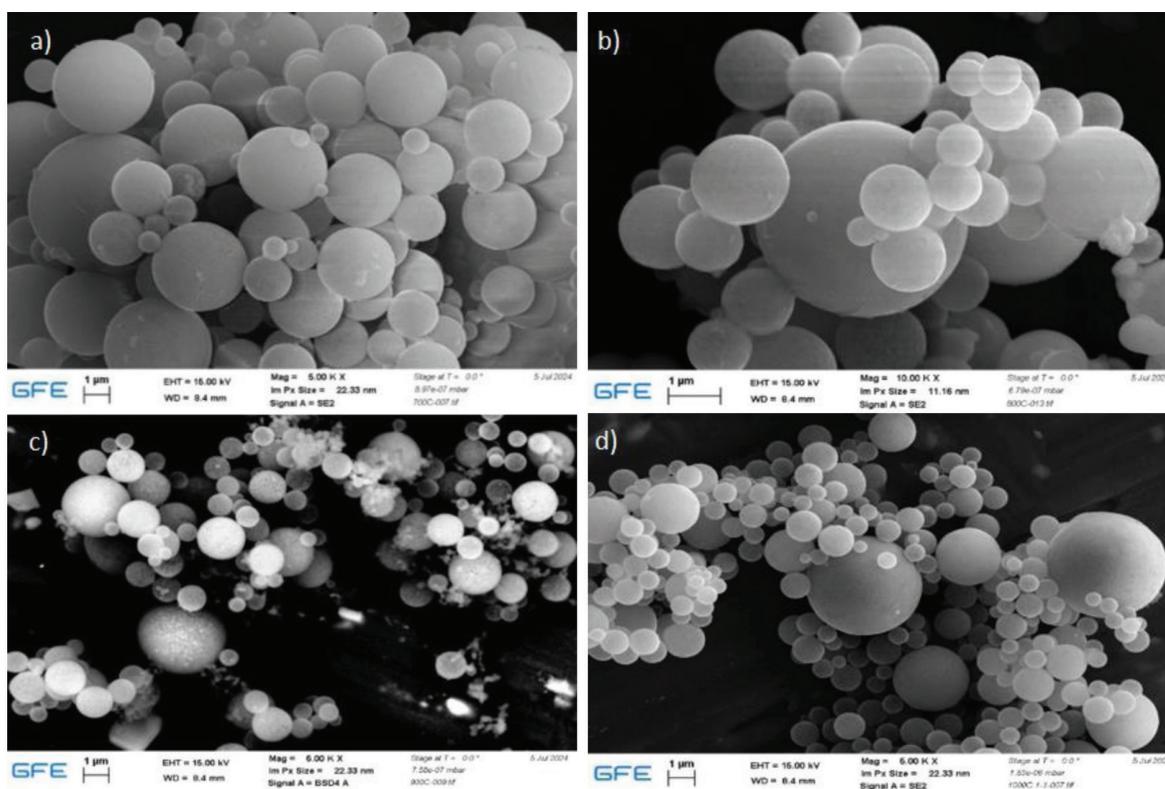
Приказани врх на приближно 1.5 keV у EDS спектру идентификован је као носач коришћен током припреме узорка. То потврђује да врх није повезан са нечистоћама унутар синтетизованог производа, већ је продукт аналитичког процеса.

Поред EDS анализе, извршене су анализе скенирајуће електронске микроскопије (SEM), а резултати су приказани на слици 9. за различите температуре. SEM анализе пружају детаљан увид у морфолошке карактеристике синтетизованих  $\text{TiO}_2$  честица.

cess is particularly significant; as the temperature increases, there is a substantial reduction in the sulfur content within the samples. This reduction in sulfur can be attributed to the more complete decomposition and reduction of the titanium oxysulfate ( $\text{TiOSO}_4$ ) precursor at higher temperatures, indicating improved reaction efficiency and purity of the produced  $\text{TiO}_2$ .

The peak observed at approximately 1.5 keV in the EDS spectrum was identified as a carrier used during the sample preparation. This confirms that the peak is not related to impurities within the synthesized product but is a product of the analytical process.

In addition to the EDS findings, scanning electron microscopy (SEM) analyses were performed, with the results shown in Figure 9 for different temperatures. SEM analyses provide detailed insight into the morphological characteristics of the synthesized  $\text{TiO}_2$  particles.



Слика 9, SEM анализа узорака за различитим температурама  
а) 700 °C, б) 800 °C, в) 900 °C и г) 1000 °C

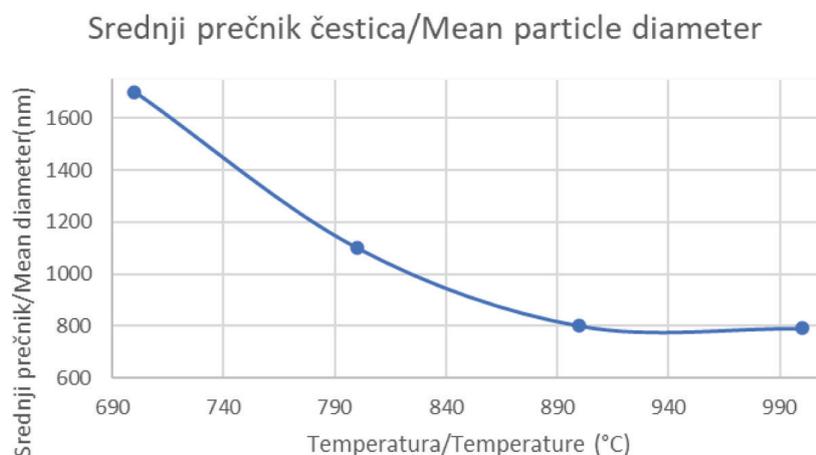
Figure 9, SEM Analysis of Samples at Different Temperatures  
a) 700 °C, b) 800 °C, c) 900 °C, and d) 1000 °C

Као што је поменуто у уводу, техника ултразвучног распршивања (USP) је посебно ефикасна у производњи сферичних честица. У овој студији, коришћен је прекурсор  $TiOSO_4$ , који пролази кроз термичку декомпозицију на повишеним температурама у атмосфери водоника, што доводи до формирања нанопорова титанијум диоксида. Анализа расподеле величине честица открива јасан тренд: како се температура повећава, величина честица доследно опада. Ова посматрања потврђује анализа скенирајуће електронске микроскопије (SEM), приказана на слици 9, гдје се потврђује да су честице потпуно сферичне. Поред тога дата слика пружа детаљан преглед пречника честица, приказујући ефикасност USP процеса у генерисању финих, сферичних нанопорова. Корелација између температуре и величине честица наглашава способност ове методе да производи висококвалитетне нанопорова.

Збирно, комбиноване анализе EDS и SEM наглашавају кључну улогу температуре у одређивању како композиционих, тако и морфолошких својстава нанопорова титанијум диоксида синтетизованог овом методом. Ова сазнања ће послужити као основа за даљу оптимизацију параметара синтезе како би се постигли висококвалитетни  $TiO_2$  наноматеријали прилагођени специфичним индустријским и технолошким применама.

As mentioned in the introduction, the ultrasonic spray pyrolysis (USP) technique is particularly effective in producing spherical particles. In this study, the  $TiOSO_4$  precursor was used, which undergoes thermal decomposition at elevated temperatures in a hydrogen atmosphere, resulting in the formation of titanium dioxide nanopowders. Particle size distribution analysis reveals a clear trend: as the temperature increases, the particle size consistently decreases. This observation is confirmed by the scanning electron microscopy (SEM) analysis shown in Figure 9, which verifies that the particles are completely spherical. Furthermore, the provided image offers a detailed overview of the particle diameters, demonstrating the effectiveness of the USP process in generating fine, spherical nanopowders. The correlation between temperature and particle size emphasizes the capability of this method to produce high-quality nanopowders.

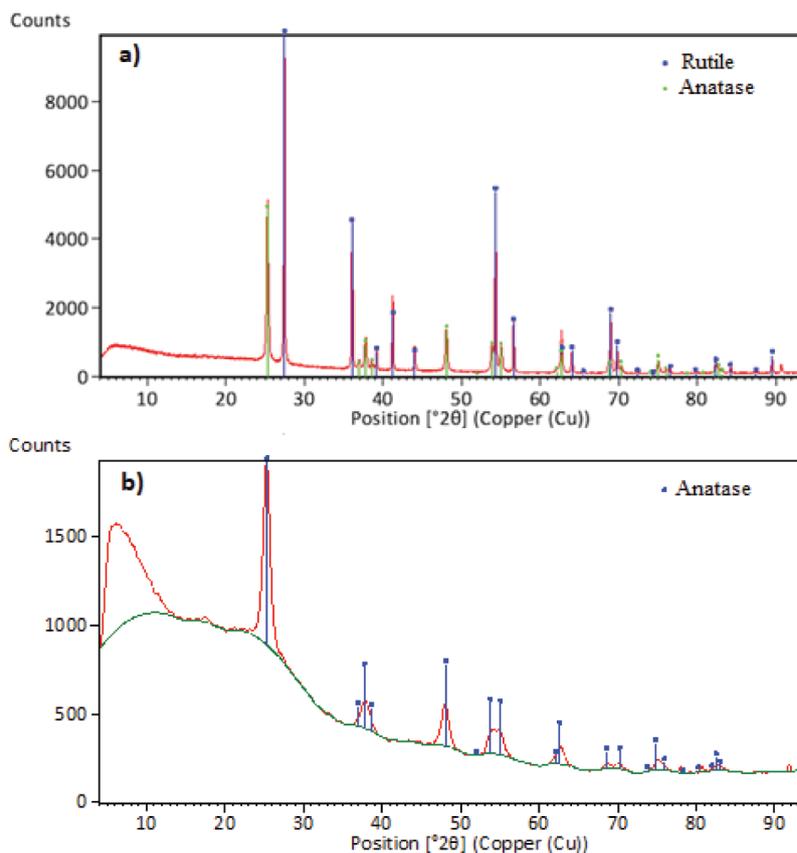
Overall, the combined EDS and SEM analyses highlight the crucial role of temperature in determining both the compositional and morphological properties of the titanium dioxide nanopowders synthesized by this method. These insights will serve as a foundation for further optimization of synthesis parameters to achieve high-quality  $TiO_2$  nanomaterials tailored for specific industrial and technological applications.



Слика 10, Средњи пречник честица у зависности од температуре  
Figure 10, Average Particle Diameter as a function of temperature

Након детаљне анализе резултата приказаних на слици, очигледно је да средњи пречник честица доследно опада са повећањем температуре. Запажено је да на повишеним температурама од 900°C и 1000°C процес ефикасно производи fine, униформно сферне наночестице титанијум диоксида. Овај тренд сугерише да више повишена температура подстиче формирање мањих честица, што доводи до формирања нанопраха са побољшаним својствима.

After a detailed analysis of the results presented in the figure, it is clear that the average particle diameter consistently decreases with increasing temperature. It was observed that at elevated temperatures of 900°C and 1000°C, the process effectively produces fine, uniformly spherical titanium dioxide nanoparticles. This trend suggests that higher temperatures promote the formation of smaller particles, leading to the generation of nanopowders with enhanced properties.



Слика 11, XRD резултати честица а) 1000 °C, б) 700 °C  
Figure 11, XRD Results of Particles a) 1000 °C, b) 700 °C

У узорку на температури 1000 °C (Слика 11а), присутне су обе фазе и рутил и анатас. Присутност рутила указује на то да виша температура подстиче формирање ове термодинамички стабилне фазе. Анатас, метастабилна фаза титанијум диоксида, такође остаје присутан, што сугерише да услови фаворизују дјелимичну трансформацију у рутил без потпуне конверзије.

In the sample at a temperature of 1000°C (Figure 11a), both phases, rutile and anatase, are present. The presence of rutile indicates that higher temperatures encourage the formation of this thermodynamically stable phase. Anatase, a metastable phase of titanium dioxide, also remains present, suggesting that the conditions favor partial transformation to rutile without complete conversion.

Насупрот томе, XRD образац за узорак са температуром од 700°C (Слика 11б), показује присуство само анатас фазе и извесног аморфног материјала. Одсуство рутила и присуство аморфног садржаја указују на то да нижа температура није довољна да подстакне потпуну кристализацију и фазну трансформацију која се обично јавља на вишим температурама. Аморфна интерференција на XRD слици сугерише да сав материјал није кристализован, што може бити последица ниже енергије доступне на 700°C, што доводи до непотпуног структурног развоја.

## ЗАКЉУЧАК

Процес карботермалне редукције црвеног муља довео је до значајних промјена у минералном саставу, при чему је доминантни оксид жељеза, хематит, био у потпуности редукован, што је резултирало формирањем металне фазе и шљаке. XRD анализа показала је да су главне фазе у шљаци постале перовскит и геленит, док су жељезни оксиди у великој мери трансформисани у метално жељезо. Овај корак је био кључан за даљи процес прераде.

У процесу лужења, највиша ефикасност постигнута је при високом притиску кисеоника, при чему је ефикасност лужења титанијума достигла 97.5%. Ови резултати указују да су притисак и температура кључни параметри за оптимизацију лужења, док су ниске концентрације излуженог силицијума спречиле појаву гелације, што олакшава даљу обраду.

Ултразвучна спреј пиролиза је показала велику ефикасност у производњи сферичних нанопорова титанијум диоксида, са јасном корелацијом између температуре и величине честица. При вишим температурама (900°C и 1000°C) добијени су прахови са доминантном рутилном фазом, док су ниже температуре резултирале присуством анатас фазе и одређеном количином аморфног материјала. SEM анализа потврдила је да су нанопрахови хомогени и сферични, што указује на успешност методе у синтези висококвалитетних наноматеријала.

In contrast, the XRD pattern for the sample at 700°C (Figure 11b) shows the presence of only the anatase phase and some amorphous material. The absence of rutile and the presence of amorphous content indicate that the lower temperature is insufficient to promote complete crystallization and the phase transformation typically occurring at higher temperatures. The amorphous interference in the XRD image suggests that not all material is crystallized, which may be due to the lower energy available at 700°C, leading to incomplete structural development.

## CONCLUSION

The carbothermal reduction process of red mud led to significant changes in the mineral composition, with the dominant iron oxide, hematite, being completely reduced, resulting in the formation of a metallic phase and slag. XRD analysis showed that the main phases in the slag became perovskite and gehlenite, while iron oxides were largely transformed into metallic iron. This step was crucial for further processing.

In the leaching process, the highest efficiency was achieved at high oxygen pressure, with titanium leaching efficiency reaching 97.5%. These results indicate that pressure and temperature are key parameters for optimizing leaching, while low concentrations of leached silicon prevented the occurrence of gelation, facilitating further processing.

Ultrasonic spray pyrolysis demonstrated high efficiency in producing spherical titanium dioxide nanopowders, with a clear correlation between temperature and particle size. At higher temperatures (900°C and 1000°C), powders with a dominant rutile phase were obtained, while lower temperatures resulted in the presence of the anatase phase and a certain amount of amorphous material. SEM analysis confirmed that the nanopowders were homogeneous and spherical, indicating the success of the method in synthesizing high-quality nanomaterials.

Оптимизација параметара сваког процеса, од редукције и лужења до пиролизе, игра кључну улогу у постизању високе ефикасности и квалитета крајњег производа. Ова метода не само да омогућава потпуну валоризацију црвеног муља, већ има и значајан потенцијал за скалирање и индустријску примјену, доприносећи тако смањењу еколошког оптерећења које црвени муљ представља.

Optimization of the parameters for each process, from reduction and leaching to pyrolysis, plays a crucial role in achieving high efficiency and quality of the final product. This method not only enables the complete valorization of red mud but also has significant potential for scaling and industrial application, thereby contributing to the reduction of the environmental burden posed by red mud.

## ЛИТЕРАТУРА / LITERATURE

- [1] H. Sutar, "Progress of Red Mud Utilization: An Overview," *American Chemical Science Journal*, vol. 4, no. 3, pp. 255–279, Jan. 2014, doi: 10.9734/ACSJ/2014/7258.
- [2] X. Pan, H. Wu, Z. Lv, H. Yu, and G. Tu, "Recovery of valuable metals from red mud: A comprehensive review," *Science of The Total Environment*, vol. 904, p. 166686, Dec. 2023, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2023.166686.
- [3] A. S. Verma, N. M. Suri, and S. Kant, "Applications of bauxite residue: A mini-review," *Waste Manag Res*, vol. 35, no. 10, pp. 999–1012, Oct. 2017, doi: 10.1177/0734242X17720290.
- [4] X. Shengguo, L. Yubing, and G. Ying, "Environmental impact of bauxite residue : a comprehensive review," *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, vol. 34, no. 4, p. 401, Jul. 2017, doi: 10.7523/J.ISSN.2095-6134.2017.04.001.
- [5] H. A. Cheema, S. Ilyas, M. Farhan, J. hye Yang, and H. Kim, "Extraction of Fe and Al from red mud using carbothermic reduction followed by water leaching," *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 136, pp. 201–210, Aug. 2024, doi: 10.1016/J.JIEC.2024.02.007.
- [6] M. Rao, J. Zhuang, G. Li, J. Zeng, and T. Jiang, "Iron recovery from red mud by reduction roasting-magnetic separation," *Minerals, Metals and Materials Series*, vol. 0, pp. 125–130, 2016, doi: 10.1007/978-3-319-65136-1\_22/COVER.
- [7] "Blast furnace process - tec-science." Accessed: Jul. 23, 2024. [Online]. Available: <https://www.tec-science.com/material-science/steel-making/blast-furnace-process/>
- [8] H. Feng, X. F. She, X. M. You, G. Q. Zhang, J. S. Wang, and Q. G. Xue, "Carbothermic reduction of red mud for iron extraction and sodium removal," *High Temperature Materials and Processes*, vol. 41, no. 1, pp. 161–171, Jan. 2022, doi: 10.1515/HTMP-2022-0005/MACHINEREA-DABLECITATION/RIS.
- [9] H. Habibi, D. Piruzian, S. Shakibania, Z. Pourkarimi, and M. Mokmeli, "The effect of carbothermic reduction on the physical and chemical separation of the red mud components," *Miner Eng*, vol. 173, p. 107216, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.MINENG.2021.107216.
- [10] D. Zinoveev, L. Pasechnik, P. Grudinsky, A. Yurtaeva, and V. Dyubanov, "Kinetics and Mechanism of Red Mud Carbothermic Reduction and Reduced Iron Grain Growth: An Influence of Sodium Sulfate," *Crystals 2023, Vol. 13, Page 1*, vol. 13, no. 1, p. 1, Dec. 2022, doi: 10.3390/CRYST13010001.
- [11] S. Stopic, D.Kostic, R.Schneider, M. Sievers, F. Wegmann, F. E. Emil Kaya, E., M.Perušić, and B. Friedrich, "Recovery of Titanium from Red Mud Using Carbothermic Reduction and High Pressure Leaching of the Slag in an Autoclave." *Minerals* 2024, 14, 1151. <https://doi.org/10.3390/min14111151>.
- [12] D. Zhu, T.Chun, J. Pan, and Z.He, "Recovery of Iron From High-Iron Red Mud by Reduction Roasting With Adding Sodium Salt," *Journal of Iron and Steel Research, International*, vol. 19, no. 8, pp. 1–5, Aug. 2012, doi: 10.1016/S1006-706X(12)60131-9.
- [13] S. Agatzini-Leonardou, P. Oustadakis, P. E. Tsakiridis, and C. Markopoulos, "Titanium leaching from red mud by diluted sulfuric acid at atmospheric pressure," *J Hazard Mater*, vol. 157, no. 2–3, pp. 579–586, Sep. 2008, doi: 10.1016/J.JHAZMAT.2008.01.054.
- [14] F. Faraji, A. Alizadeh, F. Rashchi, and N. Mostoufi, "Kinetics of leaching: A review," *Reviews in Chemical Engineering*, vol. 38, no. 2, pp. 113–148, Feb. 2022, doi: 10.1515/REVCE-2019-0073/XML.

- [15] K. Zhou, C. Teng, X. Zhang, C. Peng, and W. Chen, "Enhanced selective leaching of scandium from red mud," *Hydrometallurgy*, vol. 182, pp. 57–63, Dec. 2018, doi: 10.1016/J.HYDROMET.2018.10.011.
- [16] N. Othuisitse, and E. Muzenda "Predictive Models of Leaching Processes: A Critical Review," Nov. 2015, doi: 10.15242/IIIE.E1115039.
- [17] C. R. Borra, J. Mermans, B. Blanpain, Y. Pontikes, K. Binnemans, and T. van Gerven, "Selective recovery of rare earths from bauxite residue by combination of sulfation, roasting and leaching," *Miner Eng*, vol. 92, pp. 151–159, Jun. 2016, doi: 10.1016/J.MINENG.2016.03.002.
- [18] Milivojevic, M., Stopic, S. Friedrich, B. Stojanovic B., Drndarevic, D. (2012): Computer Modeling of High Pressure Leaching Process of Nickel Laterite by Design of Experiments and Neural Networks, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 19, 7, 584-595.
- [19] B. W. Mwakikunga, "Progress in Ultrasonic Spray Pyrolysis for Condensed Matter Sciences Developed from Ultrasonic Nebulization Theories Since Michael Faraday," *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, vol. 39, no. 1, pp. 46–80, Jan. 2014, doi: 10.1080/10408436.2012.687359.
- [20] S. Stojić, *Synthesis of metallic nanosized particles by ultrasonic spray pyrolysis*. Shaker, Kohlscheid, 2015.
- [21] D. Perednis, "Thin film deposition by spray pyrolysis and the application in solid oxide fuel cells," 2003, doi: 10.3929/ETHZ-A-004637544.
- [22] D. Beckel, A. Dubach, A. R. Studart, and L. J. Gauckler, "Spray pyrolysis of La<sub>0.6</sub>Sr<sub>0.4</sub>Co<sub>0.2</sub>Fe<sub>0.8</sub>O<sub>3-δ</sub> thin film cathodes," *J Electroceram*, vol. 16, no. 3, pp. 221–228, May 2006, doi: 10.1007/S10832-006-6971-3/METRICS.
- [23] S. Rahemi Ardekani, A. Sabour Rouh Aghdam, M. Nazari, A. Bayat, E. Yazdani, and E. Saievar-Iranizad, "A comprehensive review on ultrasonic spray pyrolysis technique: Mechanism, main parameters and applications in condensed matter," *J Anal Appl Pyrolysis*, vol. 141, p. 104631, Aug. 2019, doi: 10.1016/J.JAAP.2019.104631.
- [24] S. Stopic, F. Wenz, T. V. Husovic, and B. Friedrich, "Synthesis of Silica Particles Using Ultrasonic Spray Pyrolysis Method," *Metals*, Vol. 11, Page 463, Mar. 2021, doi: 10.3390/MET11030463.
- [25] S. Gürmen, S. Stojić, and B. Friedrich, "Synthesis of nanosized spherical cobalt powder by ultrasonic spray pyrolysis," *Mater Res Bull*, vol. 41, no. 10, pp. 1882–1890, Oct. 2006, doi: 10.1016/J.MATERRESBULL.2006.03.006.
- [26] I. S. Altman, P. V. Pikhitsa, and M. Choi, "Key Effects in Nanoparticle Formation by Combustion Techniques," *Gas Phase Nanoparticle Synthesis*, pp. 43–67, 2004, doi: 10.1007/978-1-4020-2444-3\_3.

О ПРОЦЕСУ РЕЗАЊА КАМЕНА ВОДОМ  
ABOUT THE HARD STONES WATER JET CUTTING PROCESS

DOI: 10.5937/RG2402029R

Оригинални научни рад

Original Scientific Paper

Сорин Михаи Раду  
Универзитет Петросани, Румунија  
sorin\_mihai\_radu@yahoo.com

Sorin Mihai Radu  
Petrosani University, Romania  
sorin\_mihai\_radu@yahoo.com

Примљен 4 јуна 2024; Рецензиран 6 децембра 2024; Прихваћен 8 децембра 2024.  
Received 4 June 2024; Received in revised 6 Decembre 2024; Accepted 8 Decembre 2024

**Сажетак:** Проучавање димензионалног сечења камена воденим млазом једно је од главних области рада тима за хидромеханизацију Каптедре за рударску опрему Пејрошани Универзитета. У раду су приказана истраживања сprovedена у лабораторијском сечењу мермера и других стена на основу закона који регулишу овај процес.

**Кључне речи:** ХИДРОМЕХАНИЗАЦИЈА, СЕЧЕЊЕ, СТЕНЕ, „WATER JET“ ТЕХНОЛОГИЈА

**Abstract:** The study of dimensional stone cutting using water jets is one of the major fields of activity of the Hydromechanization team of the Department of Mining Equipment of the University of Petrosani. The paper presents the researches carried out in laboratory cutting of marble and other rocks in order to derive the laws, which are governing this process.

**Key words:** HYDROMECHANIZATION, CUTTING, ROCKS, WATER JETS

## УВОД

За добијање бољих површина за сечење, за елиминисање линија сечења насталих класичним измештањем, сада се све више развија неконвенционална технологија сечења воденим млазом под високим притиском. У поређењу са класичним методама путем перфорације – пуцања или дијамантских каблова, декоративне стене пресечене методом водених млазница имају проценат поврата од 70%.

## ТЕОРИЈСКА АНАЛИЗА ПОЈАВА ХИДРАУЛИЧНОГ СЕЧЕЊА СТЕНА

У циљу утврђивања утицаја сваког воденог млаза и параметра стене на процес сечења,

## INTRODUCTION

For obtaining some better cutting surfaces, for elimination the cutting lines created through classical dislocation, in present it has developed more and more a unconventional technology, the cutting with high pressure water jets. In comparison with the classical methods through perforation – shooting or with diamond cables, the decorative rocks cut through water jets method have a recoverable percent of 70%.

## THE THEORETICAL ANALYZE OF THE ROCKS HYDRAULIC CUTTING PHENOMENA

In order to establish the influence of each water jet and rock parameter on the cutting process

развијен је нови модел [3] који покушава да објасни интеракцију између млаза и стене која се сече.

Овај модел предлаже средство за анализу ефикасности воденог млаза у процесу сечења стена. Полази се од претпоставке да се снага млаза користи за сечење  $\Delta v$  запремине стене. Стену карактерише јединствени параметар  $A$ , односно отпор стене према дејству млаза [3].

Према овом моделу, коначна поједностављена релација за одређивање дубине прореза  $h$  је:

$$h = k_1 \frac{\left[ d_1 (\rho_p + \rho_0) p_0^{\frac{3}{2}} \right]}{Au^{0,33}} - \frac{\pi}{2} d_1 \quad (1)$$

где је:

$d_1$  – пречник млазнице воденог или абразивног млаза;

$p_0$  – почетни притисак млаза;

$u$  – брзина померања млаза у односу на стену;

$\rho_p$  – густина абразива;

$\rho_0$  – густина воде.

У релацији (1) може се приметити да процес сечења почиње од притиска  $p_s$  [3] који се назива праг притиска, што је полазна тачка у процесу сечења, као и формирања прореза. Отпор стене против дејства млаза  $A$  може се утврдити на основу једначине (2):

$$A = \frac{k_1 d_1 (\rho_p + \rho_0) p_0^{\frac{3}{2}}}{\left( h - \frac{\pi}{2} d_1 \right) u^{0,33}} \quad (2)$$

Ова карактеристика стене узима у обзир природу стене и њену порозност, величину узорка, њене пукотине и пропустљивост итд.

## ЕКСПЕРИМЕНТИ СА МЛАЗОВИМА ЧИСТЕ ВОДЕ

Обим истраживања је био да се с једне стране докажу најефикаснији облици млазница и резних глава, и са друге стране да се утврди правилно сечење воденим млазом према параметрима млаза и стене.

wad developed a new model [3] which tries to explain the interaction between the jet and the rock be cut.

This model proposes a means of analyzing the efficiency of the water jet in the process of rock cutting. It starts from the premise that the jet power is used to cut a  $\Delta v$  volume of rock. The rock is characterized by unique parameter  $A$ , that is the resistance of the rock against the jet attach [3].

According to this model, the final simplified relation for the depth of the slit  $h$  determination is:

where:

$d_1$  – the nozzle diameter of the water jet or of the abrasive one;

$p_0$  – the initial pressure of the jet;

$u$  – the speed of the jet displacement against the rock;

$\rho_p$  – the density of the abrasive;

$\rho_0$  – water density.

In relation (1) it can be noticed that the cutting process starts from a pressure  $p_s$  [3] called threshold pressure, this being the starting point in cutting process, also the slit formation. The resistance of the rock against the jet action  $A$  can be identified from the equation (2):

This characteristic of the rock takes into account the nature of the rock and its porosity, the size of the sample, its fissures and permeability, etc.

## EXPERIMENTS WITH PURE WATER JETS

The research scope was, on one hand to evidence the most efficiency nozzle forms and cutting heads, and the other hand to determine the legal cutting with water jets according to jet and rock parameters.

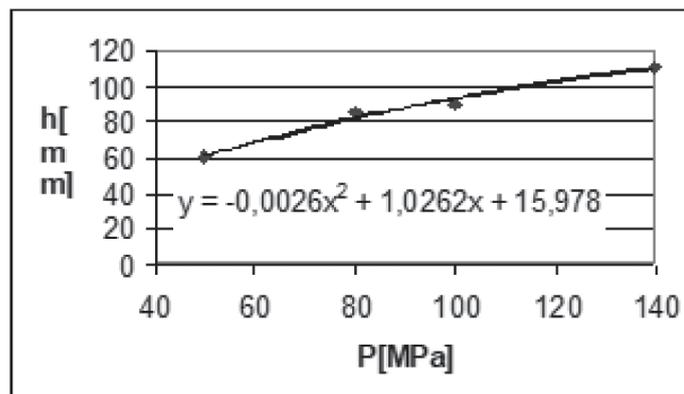
**а. Утицај угла млазног напада.**

Први сет тестова има за циљ да проучава ударни угао утицаја воденог млаза на узорак. Усмерили смо млаз на узорке, како вертикалне ( $\Phi = 0$ ), тако и на  $+45^\circ$  и  $-45^\circ$  супротно од вертикалног смера.

Приметно је да деловање вертикалног млаза на површину стене нуди најбоље резултате. Изузетак су чиниле стене које већ имају пукотине или расцеп усмерен под одређеним углом. Путем проксимације ова зависност је дефинисана једначином  $h=h_0\cos\Phi$ , где је  $h_0$  дубина прореза за ( $\Phi = 0$ ).

**б. Утицај притиска млаза.**

За проучавање утицаја притиска у процесу сечења урадили смо доста експеримената на узорцима лапора, шљунка, мермера, гранита итд. Прорези који су направљени млазом воде под високим притиском на угљу, мермеру, шљунку и граниту приказани су на слици бр. 1. Број експеримената био је довољно велики да се примети да се, без обзира на природу стене која се сече, дубина прореза повећава истовремено са повећањем притиска млаза. Ово повећање није линеарно већ параболично, добијени су дубљи прорези у абразивним и хомогеним стенама (камена ситнеж).



Слика 1, Зависност дубине резања у односу на притисак

Figure 1, Cut depth ratio by pressure

**ц. Утицај пречника млазнице.**

Направљене величине прореза (дубина и ширина) су пропорционалне пречнику млаза. Иако се може веровати да ће се дубина прореза повећати као и пречник млазнице, експерименти показују да за различите притиске

**а. The angle of the jet attack influence.**

The first set of tests intend to study the attack angle of water jet effect on the sample. We directed the jet on samples, both perpendicular ( $\Phi = 0$ ) and at  $+45^\circ$  and  $-45^\circ$  against the perpendicular direction.

It observed that the perpendicular jet action on the rock surface offers the best results. Exception made the rocks which have already fissures or a cleavage directed after an certain angle. With approximation this dependence is defined by the equation  $h=h_0\cos\Phi$ , where  $h_0$  is the depth of the slit for  $\Phi=0$ .

**б. The jet pressure influence.**

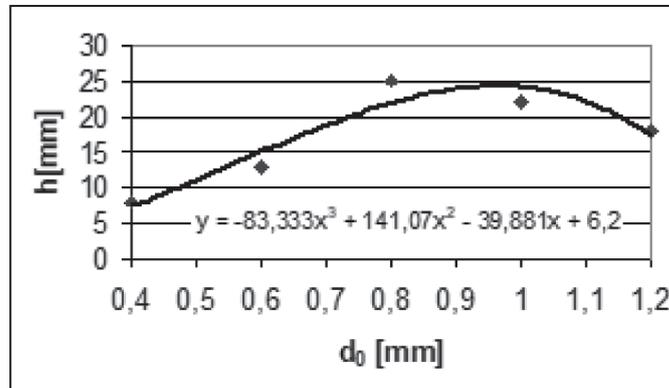
For study the pressure influence in the cutting process we made a lot of experiments on marl, grit stone, marble, granite samples, etc. The slits created with high pressure water jets on coal, marble, grit stone and granite are presented in figure no. 1. The experiments numbers were enough big for observe that, indifferent of the cutting rock nature, the slit depth increase at the same time with jet pressure increase. This increase is not linear but parabolic, deeper slits had obtained in abrasive and homogene rocks (grit stone).

**с. The nozzle diameter influence.**

The created slit sizes (depth and width) are proportional with the jet diameter. Although it can believe that the slit depth will increase as well as the nozzle diameter increase, the experiments show that for different jet pressure

млаза постоји оптималан пречник млазнице. На слици 2 приказана је зависност добијена за узорак мермера који је тестиран при високом притиску, за који цилиндрична млазница од сафира има оптимум од 0,8 или 1,0 mm.

there is an optimum nozzle diameter. In figure no. 2 we presented the dependence resulted for a marble sample tested at high pressure, for which the cylindrical nozzle from sapphire have an optimum at 0,8 or 1,0 mm.



Слика 2, Зависнось пречника млазнице и притиска

Figure 2, Nozzle diameter ratio by pressure

#### д. Утицај брзине померања млаза.

За све врсте стена које су испитиване, а посебно за хомогене стене, закон зависности је  $u^{-\alpha}$ . Коэффициент  $\alpha$  је скоро константан за различите врсте стена.

Константна појава на свим врстама стена је да се са повећањем брзине померања млаза смањује и дубина прореза. Мада, у случају у коме се изводе дубоки прорези, предлажемо већу брзину уместо низа мањих брзина померања.

#### е. Утицај удаљености између млазница и стена.

Поред повећања растојање између млазница и стена, смањење се и дубина прореза. Објашњена је константна појава да се такође и млаз на повећаној удаљености распршује услед трења са ваздухом. Дубина сечења се прво одједном смањује, а затим се растојање повећава.

### ЕКСПЕРИМЕНТИ СА АБРАЗИВНИМ МЛАЗЕВИМА ВОДЕ

Експерименти рађени на светском нивоу у специјализованој лабораторији су без сумње показали да се перфорација и сечење стена и тврдох материјала воденим млазом

#### д. The jet displacement speed influence.

For all kind of rocks which were tested and especially for homogeneous rocks the dependence law is  $u^{-\alpha}$ . The  $\alpha$  coefficient is almost constant for different types of rocks.

The constant phenomena at all kind of rocks is that as well as the jet displacement speed increase, the slit depth decrease. Although, in the case in which is executed deep slits, we suggest more high speed instead of a number of lower displacement speed.

#### е. The nozzle – rock distance influence.

As well as the nozzle – rock distance increase the slit depth decrease. The constant phenomena is explained that as well as the jet distance increase is dispersed due to the friction with air. The cutting depth decrease at first at once, and then as well as the distance increase lower.

### EXPERIMENTS WITH ABRASIVE WATER JETS

The experiments made on world plan in specialized laboratory were demonstrated without doubts that the perforation and cutting the rocks and hard materials with

може побољшати коришћењем абразивних водених млазница.

У овим експериментима као абразивне честице користимо кварцни песак, електрокориндон, силицијум карбид и гранат произведен у Румунији, углавном у CARBOCHIM S.A. Cluj-Napoca.

Креирали смо и реализовали фидер са абразивним честицама за проучавање резања абразивном водом, који се прилагођава постојећем лабораторијском постољу.

У суштини, сечење абразивним млазом воде је слично као и сечење млазом чисте воде. Мада, постоје неке разлике за које смо сматрали да је прикладно њихово представљање.

**а. Утицај пречника млазнице при коришћењу чистог и абразивног воденог млаза.**

Из извршених експеримената се показало да се оптимални пречник млазнице  $d_0$  креће између 0,8 и 1 mm, при чему је изузетак је чинила суспензија кристала гранат за који је оптимални пречник 1,2 mm. Уместо за све врсте испитиваних стена, оптимални пречник излазног абразивног млаза је  $d_1 = 4$  mm.

**б. Утицај концентрације абразивних честица у процесу сечења.**

За све врсте абразивних честица тестирали смо константу да постоје неке оптималне концентрације за које је дубина прореза максимална. На пример, у кућишту за сечење гранита са воденим млазом у коме је абразив силицијум карбид, најбоље резултате (слика бр. 3) добили смо за концентрације од 0,2 и 1,2 kg/min.

Ако се мешавина воде и абразивних честица реализује само у просторији за мешање хидромонитора, а не у доводној кади, препоручена концентрација је мања (0,8 kg/min). У овом последњем случају абразивна честица не сме бити хигроскопна, иначе се зачепљују путеви кретања абразивних честица у простору за мешање хидромонитора.

water jets can be improved through using the abrasive water jets.

In these experiments we use as abrasive particles the quartz sand, electrocorindon, silicon carbide and garnet produced in Romania, mostly at CARBOCHIM S.A. Cluj-Napoca.

We created and realized a feeder with abrasive particles for study the abrasive water cutting, adaptable to the existing laboratory stand.

In essence, the cutting with abrasive water jets is similar with the cutting with pure water jets. Although, there is some differences for which we considered opportune their presentation.

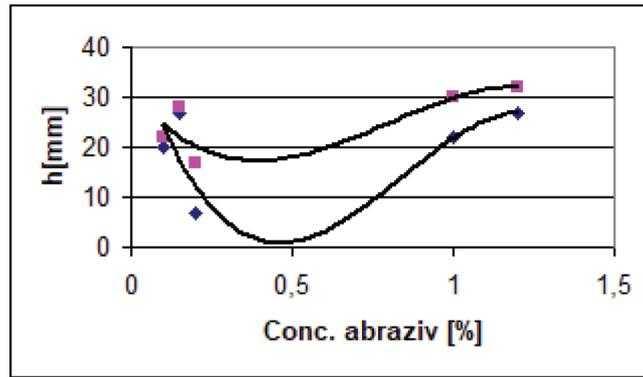
**a. The water jet and abrasive water jet nozzle diameter influence.**

From the made experiments it has resulted that the optimum diameter of nozzle  $d_0$  is contained between 0,8 and 1 mm, exception made the garnet for which the optimum diameter is 1,2 mm. In stead for all kind of tested rocks, the optimum diameter of abrasive jet exit is  $d_1 = 4$  mm.

**b. The abrasive particles concentration influence in cutting process.**

For all kind of abrasive particles we tested constant that there is some optimum concentrations for which the slit depth is maximum. For example, in granet cutting case with water jet in which the abrasive is the silicon carbide, the best results (figure no. 3) we obtained for concentrations of 0,2 and 1,2 kg/min.

If the water and abrasive particles mixture is realized only in the mixture room of the hydromonitor and not in the feeder tub, the recomanded concentration is smaller (0,8 kg/min). In this final case the abrasive particle mustn't be hygroscopic, otherwise is obturated the direction ways of the abrasive particles at the mixture room of the hydromonitor.



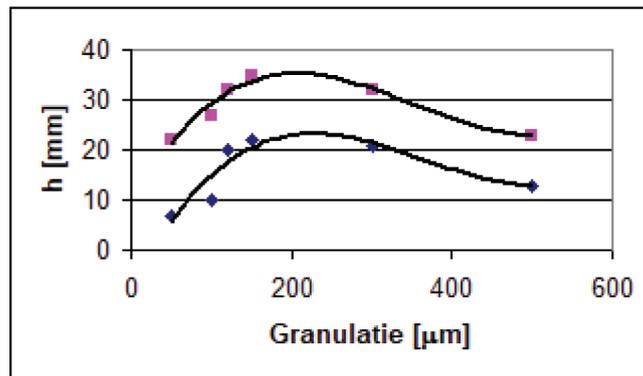
Слика 3, Утицај концентрације абразива на дубину резања  
Figure 3, Abrasive concentration influence against cut depth

**ц. Утицај гранулације абразивних честица.**

Током експеримената користили смо абразивне честице са гранулацијом од 10 до 600  $\mu\text{m}$  (слика бр. 4). Абразивна гранулација утиче и на дубину прореза и квалитет површине сечења. Код већих гранулација абразивних честица, створени прорези су шири.

**c. The abrasive particle granulation influence.**

During the experiments we used abrasive particles with granulation contain between 10 and 600  $\mu\text{m}$  (figure no. 4). The abrasive granulation influence also the slit depth and the cutting surfaces quality. At bigger granulations of abrasive particle, the created slits are wider.



Слика 4, Утицај гранулације абразивних честица на дубину прореза  
Figure 4, The influence of abrasive particle granulation on the slit depth

Да бисмо студију реализовали, што је могуће реалније, извршили смо две анализе:

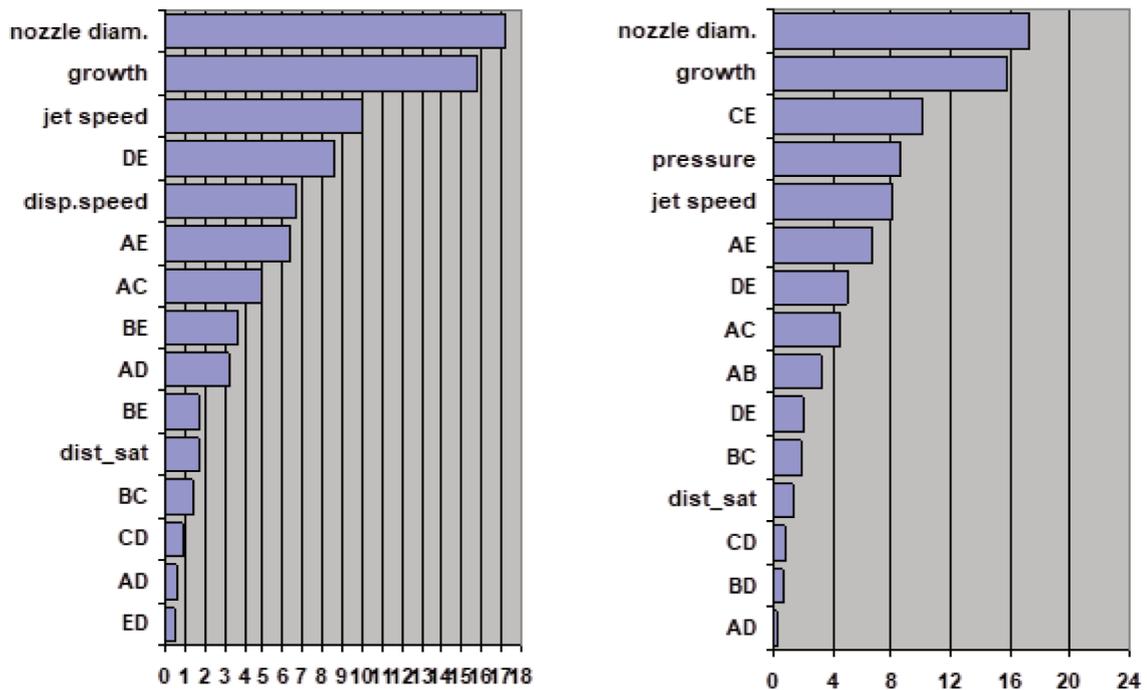
- а. Прву при притиску од – 100.....200 МПа
- б. Другу при притиску од – 200 .....400 МПа

са пречником млазнице од 0,12 mm, односно 0,25 mm. Растојање између млазнице и материјала је било 13, 18 и 23 mm, брзина померања млаза је била од 0 до 66 mm/min. Реализовани су хистограми са слике 5, уз запажање да сила резања зависи од пречника млазнице, раста материјала, притиска, односно брзине померања млаза.

In order to realise a study, as real as possible, we made two analises:

- a. First at a pressure of – 100.....200 MPa
- b. The second at a pressure of – 200 .....400 MPa

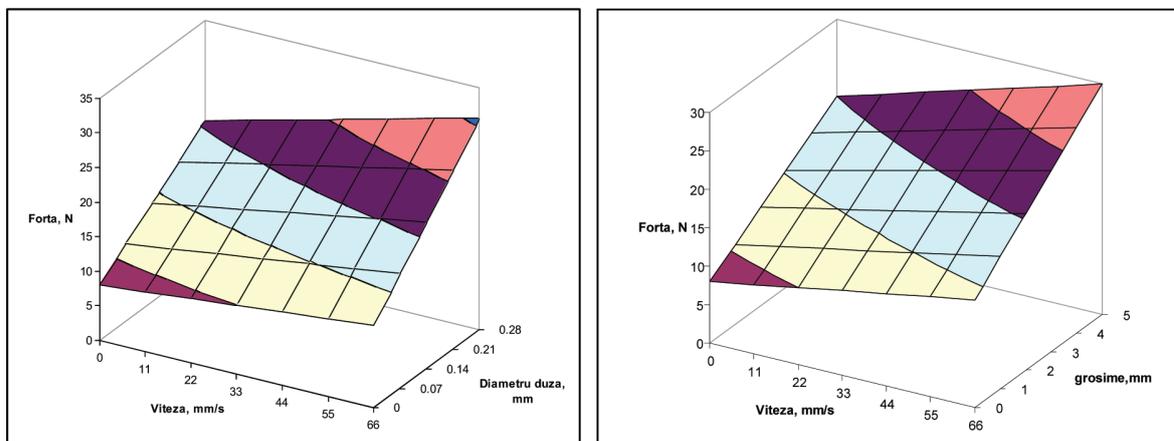
with the nozzle diameter of 0,12 mm and respectively 0,25 mm. The nozzle-material distance was 13, 18 și 23 mm, the jet displacement speed beeing from 0 to 66 mm/min. Were realised the histogrames from Figure 5, observing that the cutting force depends of nozzle diameter, material growth, pressure and respectively the jet displacement speed.



Слика 5, Утицај параметара водених млазева у процеси резања  
 Figure 5, The influence of the water jets parameters in the cutting process

На слици 6 су приказани значајни фактори који утичу на процес резања и наравно на силу деловања на површину материјала.

In Figure 6. are presented the significant factors which influence the cutting process and of course the acting force on the material surface.



Слика 6, Значајни фактори који утичу на процес резања  
 Figure 6, The significant factors which influence the cutting process

СТАТИЧКО МОДЕЛОВАЊЕ ОБРАДЕ МАТЕРИЈАЛА ВОДЕНОГ МЛАЗА ПУТЕМ DELPHI МЕТОДА

STATIC MODELING OF THE WATER JET MATERIAL PROCESSING THROUGH THE METHOD OF DELPHI

Постоји велики проблем који се јавља при резању и обради хидрауличним млазом, који суштински утиче на показатеље перформанси процеса. Постоји велики број

There is a major problem that arises at cutting and processing with hydraulic jet, with a fundamental influence on the performance indicators of the process. There is a large

метода које се могу користити, али оне захтевају велики обим тестова – експеримента, примњивих за ову врсту експеримента. Да би се имао минимум тестова са максимумом релевантних информација, може се користити „Delphi“ метод. У том погледу потребни су следећи кораци:

- Утврђивање параметара обраде и индикатора учинка;
- Израда упитника;
- Синтеза информација и корелација примарних вредности;
- Усклађивање мишљења специјалиста и потврђивање њихове сагласности;
- Графички приказ;
- Распоређивање фактора у групе утицаја;
- Објашњење резултата.

За синтезу информација коришћен је посебан програм који су аутори направили у једној врсти погодних табела у форми – word sheet Quattro, Excel или Lotus. Овај програм се заснива на централизовању информација у јасним формама на три нивоа. Први ниво има централизоване синове податке где је испитано 17 података, од којих је 7 елиминисано, за други ниво је остало само 10 података који су обрађени, а у случају да је специјалиста за два параметра дао исти коефицијент они се поништавају.

За трећи ниво извршиће се потребне корекције и потребна оптимизација, уз оптималну расподелу потребних коефицијената на оних 10 података који су остали у бази података. На тај начин ће се испунити услов верификације текста FISCHER и квадрата  $H_i$ , истовремено за све факторе.

На основу ове технологије, на крају су узете у обзир само тачке које је дало тих 10 података од 17. На тај начин су направљене прве табеле, да би се на крају добили подаци из табела. Методом Делпи експеримента, утврђен је утицај подесивих параметара на неке показатеље пер-

number of methods that can be used but they require a big volume of test – experiments, appealing to this kind of experiment. In order to have a minimum of tests with a maximum of relevant information, the Delphi method can be used. In these respect the following steps are required:

- Establishing the processing parameters and performance indicators;
- Elaborating the questionnaire;
- Synthesis of information and correlation of primary values;
- Balancing the specialists' opinions and verifying their concord;
- Graphical representation;
- Arranging the factors in groups of influence;
- Explaining the results.

In order to synthesize the information it was used a special program made by the authors in one of the utilitarian table type – word sheet Quattro, Excel or Lotus types. This program is based on centralizing the information in distinct sheets on three levels. First level has centralized raw data where 17 data were questioned, 7 of them were eliminated, for the second level remained only 10 data, which were processed and in case that the specialist gave for two parameters for the same coefficient these were annulled.

For the third level the necessary corrections will be made and the optimization required will be done, optimizing the distribution of the required coefficients to those 10 data remained in the database, in this way the verifying condition of FISCHER text and  $H_i$  square will be fulfilled, simultaneously for all the factors.

Based on this technology, in the end were taken in consideration only the points given by those 10 data from 17. In this way the first tables were remade, obtaining the data from the tables in the end. The influence, through the method of Delphi experiment, of the adjustable parameters over some performance

форманси у процесу резања абразивним воденим млазом.

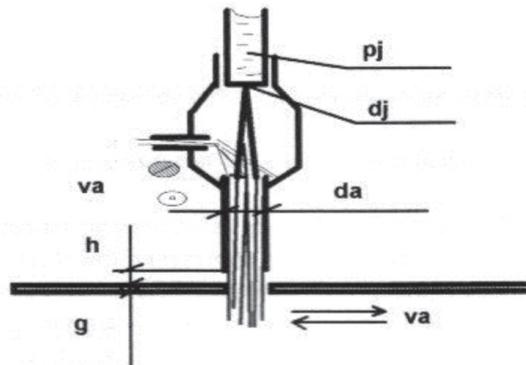
Параметри са слике 7 су:

- Називни притисак воденог млаза,  $p_j$ , ( $x_1$ );
- Брзина напредовања воденог млаза  $v_a$ , ( $x_2$ );
- Пречник млазнице,  $d_j$ , ( $x_3$ );
- Стопа абразивног протока, ( $x_4$ );
- Однос пречника млазнице и абразива,  $d_a/d_j$ , ( $x_5$ );
- Растојање између млазнице и материјала,  $h$ , ( $x_6$ );
- Дебљина материјала,  $g$ , ( $x_7$ );
- Врста абразива, ( $x_8$ );
- Абразивна ситнеж средњег пречника, ( $x_9$ );
- Однос тврдоће између абразивне средине и окружења обраде, ( $x_{10}$ ).

indicators, in abrasive water jet cutting process, were established.

Parameters from figure 7. are:

- Water jet nominal pressure,  $p_j$ , ( $x_1$ );
- Water jet advance speed  $v_a$ , ( $x_2$ );
- Nozzle diameter,  $d_j$ , ( $x_3$ );
- Abrasive flow rate, ( $x_4$ );
- Ratio between the diameters of nozzle and abrasive,  $d_a/d_j$ , ( $x_5$ );
- Nozzle-material distance,  $h$ , ( $x_6$ );
- Material thickness,  $g$ , ( $x_7$ );
- Type of abrasive, ( $x_8$ );
- Abrasive grains medium diameter, ( $x_9$ );
- Hardness ratio between the abrasive environment and the processing environment, ( $x_{10}$ ).



Слика 7, Дефинисање параметара обраде абразивној воденој млаза  
Figure 7, Defining the parameters of abrasive water jet processing

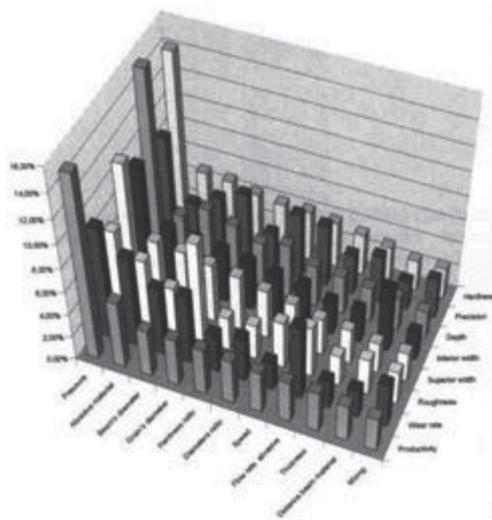
Резултати су разврстани у табеле и израчунати су просечни резултати коришћењем EXCEL табеле. У облику матрице утицаја, у табели 1, приказани су резултати обраде података.

The results were synthesized in tables and the average scores using an EXCELL spreadsheet was calculated. In the form of influence matrix, in the table 1, the results of data processing is presented.

Табела 1, Процентуална вредности фактора у обради абразивној воденој млази  
Table 1, Percentage value of factors in abrasive water jet processing

Бр. No.	Фактор утицаја Factor of influence	Продуктивност Productivity	Стопа хабања Wear rate	Храпавост Roughness
1	Притисак Pressure, $p_p$ , ( $x_1$ )	15,4%	9,5%	7,5%
2	Врста абразива Type of abrasive, ( $x_8$ )	5,7%	7,7%	5,7%
3	Пречник млазнице Nozzle diameter, $d_n$ , ( $x_3$ )	4%	5,8%	4%
4	Абразивна зрна средњег притиска Abrasive grains medium diameter, ( $x_9$ )	4%	5,9%	8,6%
5	Однос тврдоће Hardness ratio ( $x_{10}$ )	3,9%	3,3%	2,9%
6	Однос између пречника млазнице и пречника абразива Ratio between the nozzle diameter and abrasive diameter, $d_a/d_j$ , ( $x_5$ )	3,7%	3,7%	3%
7	Брзина напредовања воденог млаза Water jet advance speed $v_a$ , ( $x_2$ )	3,5%	2,4%	4%
8	Стопа протока абразива Abrasive flow rate, ( $x_4$ )	3,5%	6,3%	4,3%
9	Дубина продирања материјала Material penetration depth, $g$ , ( $x_7$ )	3,4%	2,4%	2,6%
10	Удаљеност између млазнице и материјала Nozzle-material distance, $h$ , ( $x_6$ )	3,1%	2,4%	3,1%
11	Мешање Mixing	2,8%	3,7%	2,8%
12	Притисак Pressure, $p_p$ , ( $x_1$ )	8,8%	14,3%	15,7%
13	Врста абразива Type of abrasive, ( $x_8$ )	3,9%	5%	4,5%
14	Пречник млазнице Nozzle diameter, $d_n$ , ( $x_3$ )	5%	4,9%	5,7%
15	Абразивна зрна средњег пречника Abrasive grains medium diameter, ( $x_9$ )	6%	4,4%	5%
16	Однос тврдоће Hardness ratio ( $x_{10}$ )	3,3%	4,2%	4,1%
17	Однос између пречника млазнице и пречника абразива Ratio between the nozzle diameter and abrasive diameter, $d_a/d_j$ , ( $x_5$ )	5,6%	4,2%	4,6%
18	Брзина напредовања воденог млаза Water jet advance speed $v_a$ , ( $x_2$ )	5,3%	3,9%	3,5%
19	Стопа протока абразива Abrasive flow rate, ( $x_4$ )	3,4%	3,5%	3,3%
20	Дубина продирања материјала Material penetration depth, $g$ , ( $x_7$ )	4%	3,1%	3%
21	Удаљеност између млазнице и материјала Nozzle-material distance, $h$ , ( $x_6$ )	2,5%	2,6%	2,9%
22	Мешање Mixing	3,4%	2,6%	2,4%

Графички, утицај фактора је приказан на слици 8 и на слици 9. Парето дијаграми су представљени за сваки индикатор учинка.



Слика 8, Дијаграми дисјерибуције значаја фактора утицаја  
Figure 8, The distribution of the importance of influence factors

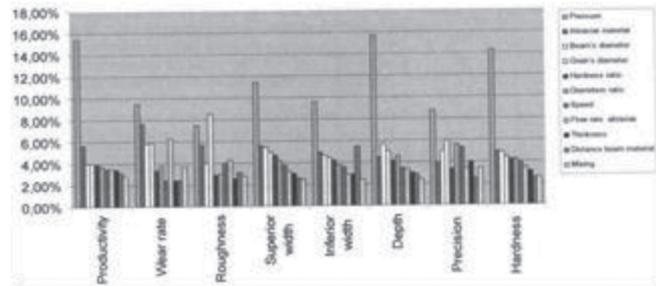
Као резултат ове анализе, прва четири фактора задржана су као битна, за спроведени планирани експеримент у циљу успостављања модела регресије.

## ЗАКЉУЧАК

У закључку, иако су перформансе абразивних млазева супериорније од чистих, за економичну ефикасност коришћења абразивних честица морамо анализирати скалу радног притиска, коришћене пречнике млазница, растојање између млазница и стена и искоришћену концентрацију абразива.

Млазнице високог притиска, генерално, и абразивни посебно, због преношења неких великих снага представљају револуционарни инструмент за експлоатацију и обраду декоративних стена и грађевинских материјала, а многе предности ове нове технологије показују позитивна очекивања и примењивост за будућност.

Graphically, the factors influence is presented in figure 8 and in figure 9. The Pareto diagrams are presented for each performance indicator.



Слика 9, Парето дијаграми фактора утицаја  
Figure 9. The Pareto diagrams of the factor's importance

As a result of this analysis, the first four factor were retained as important ones, for a conducted planned experiment in order to establish a regression model.

## CONCLUSION

In conclusion, although the abrasive jets performances are superior than the pure ones, for the economical efficiency of using abrasive particle we must analyze the work pressure scale, the utilized nozzle diameters, the nozzle – rock distance and the utilized abrasive concentration.

The high pressure jets, in general, and the abrasive one especially, due to transmit some high powers are a revolutionary instrument for the extraction and processing of the decorative rocks and building materials, and a lot of advantages of this new technology let to expect a certain future.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ilias N., Magyari A., Radu S.M., Achim M., Magyari A.A.: Water Jet and Abrasive Water Jet Performances in Materials Cutting, Proceedings of 5th Pacific Rim International Conference on Water Jet Technology, New Delhi, India, 3-5 february 1998.
- [2] Radu S.M., Ilias N., Magyari A.: The Prediction of an Abrasive Water Jet Rock Cutting Equation, Proceedings of 5th Pacific Rim International Conference on Water Jet Technology, New Delhi, India, 3-5 february 1998.
- [3] Radu S. M., Matei A., Prip I., Costa C.A.: Researches in the nonconventional and clean technology for rock and material cutting, 19th Conference on Environment and Mineral

## LITERATURE

- Processing, Technical University of Ostrava, Czech Republic, 04-06. 06. 2015, Part II, pp. 165-169, ISBN 978-80-248-3753-6,  
[http://homen.vsb.cz/hgf/546/18th\\_EaMP2015\\_programme.pdf](http://homen.vsb.cz/hgf/546/18th_EaMP2015_programme.pdf)
- [4] Radu S.M., Chmielarz W., Andras A.: Mining Technological System's Performance Analysis, Annals of the University of Craiova for Journalism, Communication and Management, nr. 2/2016, pp. 56-64, ISSN 2501-3513.
- [5] Radu S.M.: Abrasive waterjet-a clean technology, Director from Romania of international Grant, INCO-COPERNICUS ERB IC 15 CT98 0821, financed by European Community, Bruxelles, 1999-2001.

ИДЕЈНО РЕШЕЊЕ СТАБИЛИЗАЦИЈЕ УНУТРАШЊЕГ  
ОДЛАГАЛИШТА ПОВРШИНСКОГ КОПА ПОЉЕ Б И ПОЉЕ Ц  
CONCEPTUAL SOLUTION OF STABILIZATION OF INTERNAL  
LANDFILL OF SURFACE MINE FIELD B AND FIELD C

DOI: 10.5937/RG2402041M

Прегледни рад  
Review

Драган Милошевић  
Тања Миладиновић  
Жељко Праштало  
Снежана Јаковљевић  
Рударски институт д.о.о. Београд  
[dragan.milosevic@ribeograd.ac.rs](mailto:dragan.milosevic@ribeograd.ac.rs)

Dragan Milošević  
Tanja Miladinović  
Željko Praštalo  
Snežana Jakovljević  
Mining institute Ltd. Belgrade  
[dragan.milosevic@ribeograd.ac.rs](mailto:dragan.milosevic@ribeograd.ac.rs)

Примљен 7 марта 2024; Рецензиран 8 децембра 2024; Прихваћен 9 децембра 2024.  
Received 7 March 2024; Received in revised 8 Decembre 2024; Accepted 9 Decembre 2024

**Сажетак:** Већина површинских копова угља је вишедеценијском производњом изексплоатисала најповољније резерве угља. Садашња производња угља одвија се у веома сложеним рударско – геолошким условима. Копови су све дубљи, присутна је велика оводњеност као и раслојавање угља. Како је евидентна близина великих и мноббројних мањих али и већих речних токова, велика густина насељености и развијена инфраструктура, онда се може схватити са каквим се проблемима срећу пројектанти и рударска оператива. Посебна пажња је оклоњена решавању нестабилности унутрашњих одлагалишта која су често главни узрок у неосстваривању планиране динамике производње угља. Рад се ујравно односи на препознавање једног од могућих решења који могу дати поуздан допринос у решавању ових проблема.

**Кључне речи:** ПОВРШИНСКИ КОП, ОДЛАГАЛИШТЕ, ЈАЛОВИНА, ИНИЦИЈАЛНИ НАСИП, СТАБИЛНОСТ

**Abstract:** Most surface coal mines have excavated the most favorable coal reserves through decades of production. Current coal production is taking place in very complex mining-geological conditions. The mines are getting deeper, there is a lot of dewatering and spalling of the coal. As the proximity of large and numerous smaller and larger river flows, high population density and developed infrastructure is evident, then it can be understood what kind of problems planners and mining operatives are facing. Special attention was given to solving the instability of internal landfills, which are often the main cause of failure to realize the planned dynamics of coal production. The paper is precisely related to the recognition of one of the possible solutions that can make a reliable contribution to solving these problems.

**Key words:** SURFACE MINE, LANDFILL, TAILINGS, INITIAL EMBANKMENT, STABILITY

## УВОД

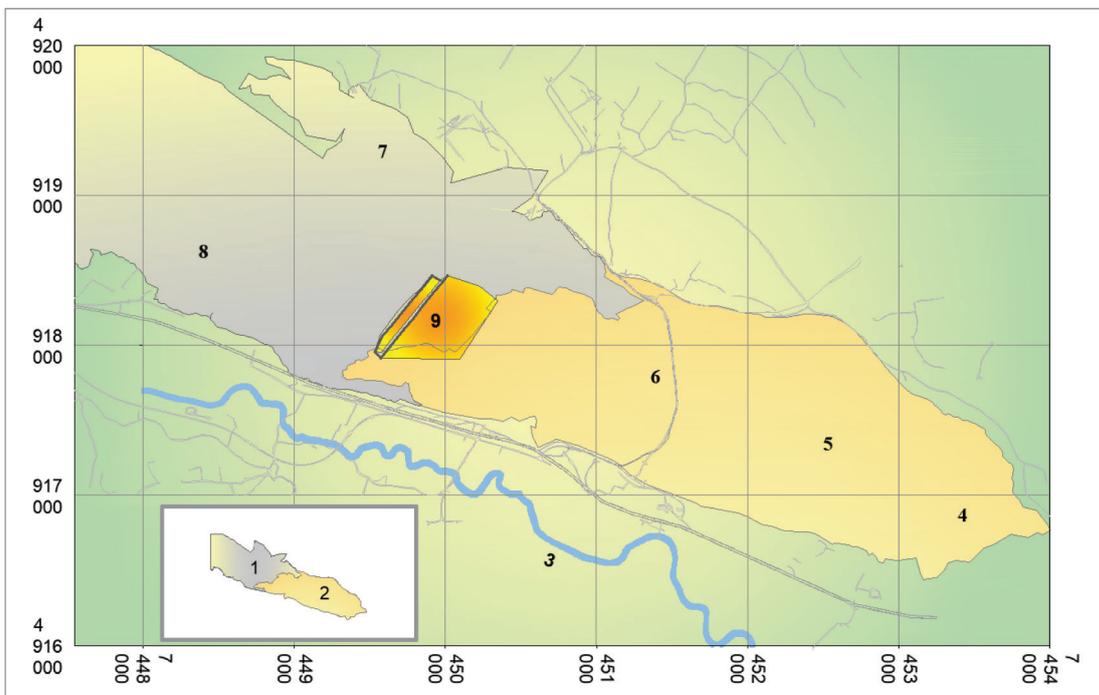
Рударски басен Колубара је највећи произвођач угља у „Електропривреди Србије“ и

## INTRODUCTION

The Kolubara mining basin is the largest producer of coal in the “Electric Power Company

Републици Србији са производњом од око 30 милиона тона угља на годишњем нивоу. Недавни престанак рада површинског копа Поље Д убрзао је отварање површинских копова Поље Е и Радјева и условио повећање производње угља на ПК Поље Ц и Поље Г. ПК Поље Ц се налази у крајњем источном делу колубарског басена и представља наставак најстаријег површинског копа Поља Б. Унутрашње одлагалиште ПК Поље Ц истиче се као посебан проблем. Ради се о ширем простору који се налази највећим делом на некадашњем ПК Поље Б и делимично на ПК Поље Ц. Напредовање откопавања и одлагања одвија се према западу, према ПК Поље Е [2].

of Serbia” and the Republic of Serbia with an annual production of about 30 million tons of coal. The recent cessation of open pit mining Field D hastened the opening of open pit mines Field E and Radjev and led to an increase in coal production at Surface mine Field C and Field G. Surface mine Field C is located in the extreme eastern part of the Kolubara basin and is a continuation of the oldest surface mine Field B. The internal landfill Surface mine Field C stands out as a special problem. It is a wider area that is mostly located on the former Surface mine Field B and partially on Surface mine Field C. The progress of excavation and disposal is taking place towards the west, towards Surface mine Field E [2].



Слика 1, Прегледна карта источне дела колубарског угљеносног басена [2]

Figure 1, Overview map of the eastern part of the Kolubara coal bearing basin [2]

**Тумач:** 1 – Откопни фронт (откривка и угљ); 2 – Одлагалиште (јаловина); 3 – Река Пештан; 4 – ПК Поље А; 5 – ПК Поље Б; 6 – ПК Поље Ц; 7 – ПК Поље Д; 8 – ПК Поље Е; 9 – Иницијални насип.

**Legend:** 1 – Mining front (overburden and coal); 2 – Landfill (tailings); 3 – Pestan River; 4 – Surface mine Field A; 5 – Surface mine Field B; 6 – Surface mine Field C; 7 – Surface mine Field D; 8 – Surface mine Field E; 9 – Initial embankment.

Унутрашње одлагалиште ПК Поље Б и Поље Ц, ограничено је фронтом рударских радова на угљеној етажи на западу, северном завршном косином, источно до краја пројектованог одлагалишта и јужном границом површинског копа. Приближне димензије

The internal landfill of Surface mine Field B and Field C is limited by the front of the mining operations on the coal floor to the west, the northern final slope, to the east to the end of the designed landfill and the southern border of the surface mine. The approximate

одлагалишта су 4.500 m дуж северозапад – југоисток и 1.200 m североисток – југозапад. Просечна висина одложене јаловине је око 35 m у централном делу одлагалишта и 10 m по ободу [2]. Проблем унутрашњег одлагалишта је вишеструк [2]:

- Неприпремљена подина одлагалишта за дренарање одложених маса;
- Неселективно одлагање јаловине;
- Недовољно одводњена јаловина у фронту напредовања рударских радова;
- Неефикасна заштита одлагалишта од утицаја површинских вода ван и унутар копа.

Описани проблеми узроковали су високу заводњеност одлагалишта. Ниво подземне воде на већем делу је близу површине. Одлагалишта јаловине у источном делу колубарског басена не располажу довољним простором за додатно инвестиционо одлагање јаловине из новог ПК Поље Е. Приступило се анализи могућности надвишења постојећег унутрашњег одлагалишта на ПК Поље Б и Поље Ц. Требало је решити три проблема:

- Стабилизovati постојеће одлагалиште (иницијални насип);
- Стабилизovati надвишење постојећег одлагалишта (надвишење иницијалног насипа);
- Повећати носивост постојеће површине одлагалишта за додатно одлагање (надвишење постојећег одлагалишта).

Пре спровођења свих технолошких захвата потребно је у потпуности решити све проблеме који су везани за заштиту копа од површинских и подземних вода.

#### ОПШТИ УСЛОВИ НА ПОВРШИНСКОМ КОПУ

Напредовање рударских радова на откопавању угља има смер север – југ. На северној страни копа, угаљ исклињава вертикално. Најнижи је у средишњем делу копа и

dimensions of the landfill are 4,500 m along the northwest – southeast and 1,200 m northeast – southwest. The average height of the deposited tailings is about 35 m in the central part of the landfill and 10 m along the skirt board [2]. The problem of the internal landfill is multiple [2]:

- Unprepared floor of the landfill for draining the disposed masses;
- Non-discriminatory waste disposal;
- Insufficiently drained tailings in front of mining progress;
- Inefficient protection of the landfill from the influence of surface water outside and inside the mine.

The described problems caused a high level of flooding in the landfill. The groundwater level is mostly close to the surface. Tailings disposal sites in the eastern part of the Kolubara basin do not have sufficient space for additional investment disposal of tailings from the new Surface mine Field E. An analysis of the possibility of overhanging the existing internal landfill at Surface mine Field B and Field C was undertaken. Three problems had to be solved:

- Stabilize the existing landfill (initial embankment);
- Stabilize the raise of the existing landfill (the raise of the initial embankment);
- Increase the load-bearing capacity of the existing landfill area for additional disposal (elevation of the existing landfill).

Before the implementation of all technological interventions, it is necessary to completely solve all problems related to the protection of the mine from surface and underground water.

#### GENERAL CONDITIONS AT THE SURFACE MINING

The progress of mining works on the excavation of coal has a north-south direction. On the north side of the pit, the coal pinches out vertically. It is the lowest in the central part

потом стрмо исклињава у северном делу. Приметна су локална клизишта на етажама. На дну копа констатовано је да се вода углавном акумулира гравитацијом са откопног фронта и подручја изван копа, док мањи део долази из унутрашњег одлагалишта [2]. Како је одлагалиште површинског копа окарактерисано као заводњена средина, очигледна опасност је у могућности појаве клизишта и тецишта већих размера, што би се неповољно одразило на одлагалишну и откопну механизацију на угљу. Према тренутној ситуацији на терену, радови на експлоатацији угља су у директном контакту са унутрашњим одлагалиштем. Такво стање узроковало је размештање БТО система на унутрашње одлагалиште ПК Поље Д. Наставак одлагања на унутрашњем одлагалишту ПК Поље Б и Поље Ц оправдан је тек након спроведеног предодовођивања и израде стабилизационих објеката.

of the mine and then it pinches out steeply in the northern part. Local landslides on the floors are noticeable. At the bottom of the mine, it was established that water is mainly accumulated by gravity from the excavation front and the area outside the mine, while a smaller part comes from the internal landfill [2]. As the surface mine landfill is characterized as a waterlogged environment, the obvious danger is the possibility of large-scale landslides and liquefaction, which would have an adverse effect on the disposal and coal mining machinery. According to the current situation on the ground, the coal mining works are in direct contact with the internal landfill. Such a situation caused the relocation of the BTO system to the internal parking lot of Surface mine Field D. Continuation of disposal at the internal landfill of Surface mine Field B and Field C is justified only after pre-watering and construction of stabilization facilities.



Слика 2, ПК Поље Ц – акумулисана вода у ножици одлагалишта [2] (снимљено 01.09.2020.)

Figure 2, Surface mine Field C – accumulated water in the foot of the landfill [2] (recorded on September 1, 2020)



Слика 3, Ручеви северне границе ПК Поље Б [2] (снимљено 01.09.2020.)

Figure 3, Ručevi northern border Surface mine Field B [2] (recorded on September 1, 2020)

## ИДЕНТИФИКАЦИЈА НАСТАНКА КЛИЗИШТА

Појаве нестабилности вештачки насталих косина представљају резултат поремећаја равнотеже у природи. Решавање ових проблема у рударству захтева анализу, истраживачки рад, избор, примену и праћење методологије стабилизације.

## IDENTIFICATION OF ORIGIN OF LANDSLIDE

The phenomena of instability of artificially created slopes are the result of imbalance in nature. Solving these problems in mining requires analysis, research work, selection, application and monitoring of stabilization methodology.

Процес рада на површинском копу условљава да се радне косине етажа и завршне косине површинског копа константно изводе у променљивим условима [2]. Косине одложене јаловине налазе се у стабилном стању (не клизају се и не обрушавају) све дотле, док у њима постоји за то довољна унутрашња веза [4].

Познавање својстава и састава терена на коме је дошло до појаве клизишта су веома битан услов за препознавање разлога настанка. На бази тих података утврђују се ефикасне санационе мере. Захтев је да се одлагалиште санира најјефтинијим и технолошки најједноставнијим санационим поступцима. Различити су узроци нестабилности одлагалишта: косине су стрме и високе, подина одлагалишта има недовољну носивост, високи порни притисци, недовољна одводњеност откопане јаловине. Наведени узроци могу да делују појединачно, а могу и међусобно повезани. Од начина њиховог деловања зависи и избор санационих мера.

Санационе мере се могу поделити на: дренажне, потпорне промене геометрије косина, примена конструкција и армирање тла. Када су у питању површински копови често се постављају три кључна питања: колика се стабилност захтева, за који временски период и колико је при стабилизацији косине прихватљива цена? Ова три питања представљају основни проблем на површинским коповима, а њихово решавање је компромис између сигурности, цене и времена.

Најчешћи поступци за санацију или побољшање слабоносивог тла, а који укључују различите технолошке мере којима се повећава пропустљивост и/или побољшавају чврстоћа и деформациона својства тла су [2]:

- Уграђивање вертикалних дренажа, шљунчани шипови и вертикалне дренажне траке (wick – drains) за убрзање консолидације у радијалном и вертикалном смеру. Поступак је одговарајући када је утицајна дубина слабо носећег тла велика (5 m до 30 m);

The process of working on an open pit requires that the working slopes of the floors and the final slopes of the surface mine are constantly performed in changing conditions [2]. Slopes of deposited tailings are in a stable state (do not slide or collapse) as long as there is sufficient internal connection in them [4].

Knowing the properties and composition of the terrain on which the landslide occurred is a very important condition for recognizing the reason for its occurrence. Effective remedial measures are determined on the basis of this data. The request is to rehabilitate the landfill using the cheapest and technologically simplest remedial procedures. There are various causes of landfill instability: slopes are steep and high, the floor of the landfill has insufficient bearing capacity, high pore pressures, insufficient drainage of excavated tailings. The mentioned causes can act individually, or they can be interconnected. The choice of remedial measures also depends on their mode of action.

Remedial measures can be divided into: drainage, supporting changes in slope geometry, application of structures and soil reinforcement. When it comes to surface mines, three key questions are often asked: how much stability is required, for what period of time, and what is the acceptable price for slope stabilization? These three issues represent the basic problem in surface mines, and solving them is a compromise between safety, cost and time.

The most common procedures for rehabilitating or improving weak-bearing soil, which include various technological measures that increase the permeability and/or improve the strength and deformation properties of the soil, are [2]:

- Installation of vertical drains, gravel piles and vertical drainage strips (wick – drains) to accelerate consolidation in the radial and vertical direction. The procedure is appropriate when the effective depth of weakly bearing soil is large (5 m to 30 m);

- Уграђивање хоризонталних дренажних ребара за убрзање вертикалне и хоризонталне консолидације и за побољшање отпорности слабоносивог слоја на смицање. Поступак је одговарајући када је утицајна дубина слабоносивог тла сразмерно мала;
  - Замена слабоносивог тла бољим материјалом. Поступак је одговарајући када је утицајна дубина слабоносивог тла сразмерно мала;
  - Побољшање чврстоће слабоносивог тла при смицању поступцима дубинског ињектирања (jet – grouting шипови) или дубинске хемијске стабилизације (кречни шипови). Поступци су одговарајући када је утицајна дубина слабоносивог тла велика (5 м до 30 м);
  - Побољшање чврстоће слабоносивог тла поступцима додатног збијања (динамичко компримирање, тешко набијање, дубинско вибрирање). Поступци су одговарајући у пропуснијим, нехомогеним земљаним материјалима, као што су ситни песак и неконтролисана вештачка насипања;
  - Побољшање чврстоће површине темељног тла армирањем помоћу геосинтетика;
  - У посебним случајевима када описаним поступцима није могуће осигурати хомогено побољшање својства темељног тла у планираним роковима, насипи могу да се граде и на сабијеним или бушеним шиповима;
  - Применом комбинованих и посебних поступака.
- Installation of horizontal drainage ribs to accelerate vertical and horizontal consolidation and to improve the shear resistance of the weak-bearing layer. The procedure is suitable when the effective depth of weakly bearing soil is relatively small;
  - Replacement of weak-bearing soil with better material. The procedure is suitable when the effective depth of weakly bearing soil is relatively small;
  - Improvement of the shear strength of weak-bearing soil by means of deep injection (jet grouting piles) or deep chemical stabilization (lime piles). The procedures are suitable when the effective depth of weakly bearing soil is large (5 m to 30 m);
  - Improving the strength of weak-bearing soil by means of additional compaction (dynamic compaction, heavy compaction, deep vibration). The procedures are appropriate in more permeable, inhomogeneous soil materials, such as fine sand and uncontrolled man-made embankments;
  - Improving the strength of the foundation soil surface by reinforcement with geosynthetics;
  - In special cases when it is not possible to ensure a homogenous improvement of the properties of the foundation soil within the planned deadlines, embankments can also be built on compacted or drilled piles;
  - By applying combined and special procedures.

Стабилност одлагалишта за одређену технологију рада на одлагању зависи првенствено од физичко – механичких особина јаловине (замреминска маса, садржај влаге, гранулометријски састав, кохезија, унутрашње трење, конзистенција, еластичност и чврстоћа на смицање) у поремећеном стању и подине (темељног тла) у непо ремећеном стању. Када подина одлагалишта прима оптерећење одложених маса не сме бити склона клизању, нарочито ако је нагнута у правцу напредовања одлага-

The stability of the landfill for a certain disposal technology depends primarily on the physical and mechanical properties of the tailings (bulk mass, moisture content, granulometric composition, cohesion, internal friction, consistency, elasticity and shear strength) in a disturbed state and the floor (foundation soil) in undisturbed state. When the floor of the landfill receives the load of the deposited masses, it must not be prone to sliding, especially if it is inclined in the direction of the advance of the landfill. The bearing capacity of the base must be such that it can receive, apart

лишта. Носивост подлоге мора бити таква да прими, осим оптерећења одложених маса и силе које стварају динамички притисак при напредовању радова на одлагању и формирању косина [1]. На теренима где је изражена сеизмика потребно је укључити и овај параметар. У пракси су присутна честа потискивања и други облици деформације подине (унутрашње одлагалиште ПК Дрмно, Огранак ТЕ – КО Костолац).

Општа карактеристика спољашњих одлагалишта наших површинских копова угља, јесте да су им подлоге претежно глиновите или алувијалне, при чему се деформисање косина и истискивање тла из подлоге врши у облику више таласних узвишења [3]. Оптерећењу маса јаловине треба додати и масу одлагача као и транспортних средстава која изазивају константне вибрације током рада.

Повећање носивости може се извести дренирањем као и променом висине појединих етажа. Свака етажа одлагалишта треба да буде у стању да прими и носи оптерећење виших етажа. У том контексту потребно је истаћи да је прва етажа до подине, темељног тла, највише оптерећена. То захтева преваходно дисциплиновано вођење технолошког процеса одлагања јаловине које омогућава брзо збијање и планирање површине одлагалишта ради бржег отицања атмосферских вода [1].

Најповољнија висина етажа омогућује максимално коришћење производних могућности одлагача (висину и нагиб косине), која произилази из прорачуна стабилности. Код истог нагиба косине дубинске етаже одлагалишта, повећањем садржаја глиновитих компоненти висина одлагалишта ће се у мањој мери смањити, али само до одређене критичне висине, када се угао нагиба нагло смањује [1].

#### АНАЛИЗА УСЛОВА СТАБИЛИЗАЦИЈЕ УНУТРАШЊЕГ ОДЛАГАЛИШТА

Анализом унутрашњег одлагалишта утврђено је да су у неправилној синклинали

from the load of the deposited masses and the forces that create dynamic pressure during the progress of the works on the disposal and the formation of the slope [1]. In terrains where seismicity is pronounced, it is necessary to include this parameter. In practice, there are frequent push-overs and other forms of deformation of the floor (internal landfill Surface mine Drmno, Branch of TPP – Surface mine Kostolac).

The general characteristic of the external landfills of our surface coal mines is that their substrates are predominantly clayey or alluvial, whereby the deformation of the slope and the displacement of the soil from the substrate is done in the form of several wave elevations [3]. To the load of tailings mass, the mass of dumpers and transport vehicles that cause constant vibrations during operation should be added.

The load capacity can be increased by draining as well as by changing the height of individual floors. Each floor of the landfill should be able to receive and bear the load of the higher floors. In this context, it should be pointed out that the first floor next to the basement, the solid foundation, is the most heavily loaded one. This requires above all disciplined management of the technological process of tailings disposal, which enables rapid compaction and planning of the landfill surface for faster stormwater runoff [1].

The most favourable floor height enables maximum use of the production possibilities of the stacker (height and slope inclination), which results from stability calculations. At the same slope inclination of the deep floor of the landfill, by increasing the content of clay components, the height of the landfill will decrease to a lesser extent, but only up to a certain critical height, when the angle of inclination decreases sharply [1].

#### ANALYSIS OF INTERNAL LANDFILL STABILIZATION CONDITIONS

The analysis of the internal landfill found that the largest loads of dumped tailings are in the

највећа оптерећења одложене јаловине. Констатација се базира на литологији терена, залегању угља, као и дебљини одложене јаловине. Имајући у виду значај могућег коришћења високопродуктивне механизације којом располаже површински коп, нека скромна светска искуства која се односе на стабилизацију унутрашњег одлагалишта, убрзану динамику извођења радова, процену трошкова изградње објекта предводњавања и заштитног иницијалног насипа, пројектанти су се определили за кориснику препознатљив објекат, иницијални насип [2].

Основни модел пројектног решења базиран је на примени мера и поступака санације како би се достигли законски захтеви фактора сигурности и обезбедио наставак коришћења унутрашњег одлагалишта за додатни смештај јаловине са ПК Поље Е. Једна од првих идеја која је овде разматрана је обезбедити стабилност постојећег одлагалишта и тренутни положај радова у односу на ПК Поље Е како би се на време осигурао наставак одлагања и надвишење унутрашњег одлагалишта. Пројектном документацијом за ПК Поље Ц дефинисано је растојање фронта радова на угљу у односу на ножицу одложеног материјала од 250 m. Како би се у зони пројектованог иницијалног насипа створили услови за дренажање одложених маса на подини и постављање геомреже за повећање носивости подине, потребно је у функцији геомеханичке стабилности оставити појас главног угљеног слоја на контакту са подином и растеретити северну косину која је једним делом већ формирано клизиште. Након израде дренажног система у подини и постављања геомреже, стварају се услови за изградњу иницијалног насипа.

## ТЕХНОЛОШКИ ПОСТУПАК САНАЦИЈЕ

Технолошки поступак одлагања у функцији формирања иницијалног насипа и надвишења унутрашњег одлагалишта, подразумева примену већ описаних активности и разматран је са више аспеката. Анализира-

irregular syncline. The finding is based on the lithology of the terrain, coal deposits, as well as the thickness of the deposited tailings. Bearing in mind the importance of the possible use of highly productive mechanization at the disposal of an open-pit mine, some modest world experiences related to the stabilization of an internal landfill, the accelerated dynamics of the execution of works, the estimation of the costs of the construction of pre-drainage facilities and the protective initial embankment, the designers opted for a user-recognizable facility, namely the initial embankment [2].

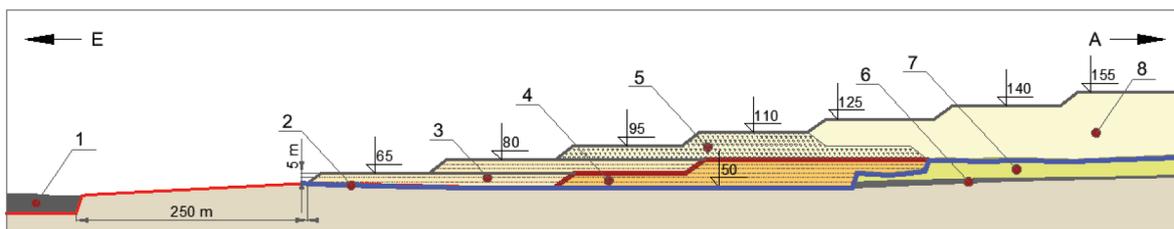
The basic model of the project solution is based on the application of remediation measures and procedures in order to reach the legal requirements of the safety factor and ensure the continuation of the use of the internal disposal site for additional storage of tailings from Surface mine Field E. One of the first ideas that was considered here is to ensure the stability of the existing landfill and the current position of the works in relation to Surface mine Field E in order to ensure the continuation of disposal and the elevation of the internal landfill in time. The project documentation for Surface mine Field C defines the distance of the front of the coal works in relation to the foot of deposited material of 250 m. In order to create the conditions in the area of the projected initial embankment for draining the deposited masses on the floor and installing a geogrid to increase the bearing capacity of the floor, it is necessary to leave a belt of the main coal seam in contact with the floor and relieve the northern slope, which has already formed a landslide. After construction of the drainage system in the floor and installation of the geogrid, conditions are created for the construction of the initial embankment.

## TECHNOLOGICAL PROCEDURE OF REMEDIATION

The technological procedure of disposal in the function of forming the initial embankment and the internal landfill banking, implies the application of the already described activities and it has been considered from several aspects.

на је актуелна ситуација на површинском копу, динамика експлоатације, расположивост опреме и њени конструктивни параметри, распоред БТО система, подлога са које би се вршило одлагање, врста материјала од кога би се изградио стабилизациони објекат, дебљина слојева. Узевши у обзир да ће иницијални насип претрпети највеће оптерећење, предвиђена је његова изградња одлагањем песка у више слојева од 6 m (након сабијања етажне су 5 m). Одлагач напредује одлажући масе испред себе [2].

An analysis was done concerning the current situation at the surface mine, the dynamics of mining, the availability of equipment and its structural parameters, the layout of the BTO system, the substrate from which the disposal would be carried out, the type of material from which the stabilization facility would be built, the thickness of the layers. Taking into account that the initial embankment will bear the greatest load, its construction is planned by placing sand in multiple layers of 6 m (after compaction, the levels are 5 m). The delayer advances by delaying the masses in front of him [2].



Слика 4, Принципијелна шема стабилизације унутрашње одлагалишта [2]

Figure 4, Principle scheme of internal landfill stabilization [2]

**Тумач:** А – ПК Поље А; Е – ПК Поље Е; 1 – Неоткопани угаљ; 2 – Дренажни систем;

- 3 – Надоградња иницијалног насипа; 4 – Иницијални насип; 5 – Надвишење иницијалног насипа;  
6 – Неоткопан угаљ; 7 – Претходно одложена јаловина-постојеће одлагалиште;  
8 – Надвишење постојећег одлагалишта.

**Legend:** A – Surface mine Field A; E – Surface mine Field E; 1 – Unmined coal; 2 – Drainage system;  
3 – Upgrade of the initial embankment; 4 – Initial embankment; 5 – Elevation of the initial embankment;  
6 – Unmined coal; 7 – Previously disposed tailings – existing landfill;  
8 – Exceeding the existing landfill.

На основу ситуације на терену, усвојених конструктивних параметара и резултата геомеханичких прорачуна, одлагање на унутрашњем одлагалишту је предвиђено да се врши у продужетку иницијалног насипа са напредовањем према ПК Поље Е, продужавањем етажних равни на k+65 m и k+80 m [2].

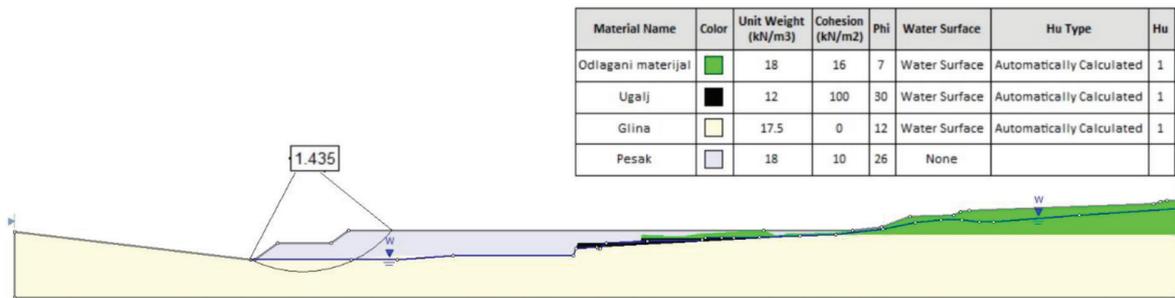
Based on the situation on the ground, the adopted structural parameters and the results of geomechanical calculations, the disposal at the internal landfill is planned to be carried out in the extension of the initial embankment with the advancement towards Surface mine Field E, by extending the floor levels to k+65 m and k+80 m [2].

Наставак одлагања јаловине на унутрашњем одлагалишту предвиђен је формирањем виших етажних равни са kotaма: k+65 m, k+80 m, k+95 m, k+110 m, k+125 m, k+140 m, k+155 m, k+170 m и k+185 m.

The continuation of tailings disposal at the internal landfill is foreseen by the formation of higher storey planes with elevations: k+65 m, k+80 m, k+95 m, k+110 m, k+125 m, k+140 m, k+155 m, k+170 m and k+185 m.

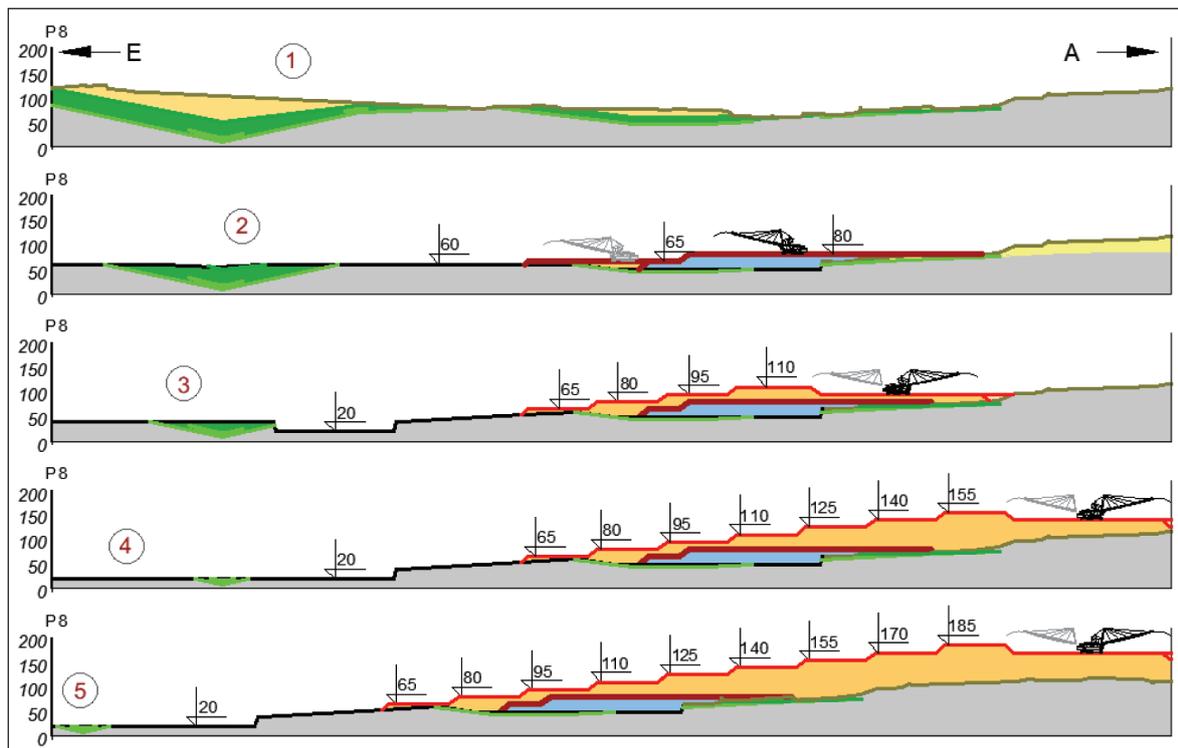
Анализа геомеханичких резултата показује да се надвишењем иницијалног насипа и формирањем етажа унутрашњег одлагалишта према ПК Поље А постиже већа стабилност [2].

The analysis of the geomechanical results shows that by raising the initial embankment and forming the floors of the internal landfill according to Surface mine Field A, greater stability is achieved [2].



Слика 5, Фактор сигурности након изградње иницијалног насипа [2]

Figure 5, Safety factor after the construction of the initial embankment [2]



Слика 6, Технологија одлагања на унутрашњем одлагалишту [2]

Figure 6, Disposal technology at an internal landfill [2]

**Тумач:** А – ПК Поље А; Е – ПК Поље Е; 1 – Тренутна ситуација; 2 – Формирање иницијалног насипа;  
3 – Надвишење иницијалног насипа; 4 – Надвишење одлагалишта до k+155 m;  
5 – Надвишење одлагалишта до k+185 m

**Legend:** A – Surface mine Field A; E – Surface mine Field E; 1 – Current situation; 2 – Formation of the initial embankment; 3 – Elevation of the initial embankment; 4 – Elevation of the landfill up to k+155 m; 5 – Elevation of the landfill up to k+185 m

## ЗАКЉУЧАК

Након анализе услова на терену, усвојених конструктивних параметара коришћених у документацији, дефинисани су дренажни систем, поступци изградње иницијалног насипа, његово надвишење и надвишење претходно формираног одлагалишта. Ре-

## CONCLUSION

After the analysis of the conditions on the ground, the adopted constructive parameters used in the documentation, the drainage system, the construction procedures of the initial embankment, its elevation and the elevation of the previously formed landfill were defined.

шења су у континуитету проверавана геомеханичким прорачунима како би се утврдили граничне висине одлагања и прорачунао смештајни простор. Геомеханичке анализе су утицале на смер напредовања и начин одлагања јаловинских маса.

Све наведено, обезбеђење слободног простора између неоткопаног угља и ножице одложених маса, предодводњавање, ојачавање подине геомрежом, израда иницијалног насипа, надвишење иницијалног насипа и надвишење претходно формираног унутрашњег одлагалишта, представљају редослед операција које треба реализовати како би се остварила његова стабилизација и испунио захтев за одлагање додатне јаловине. Даљим напредовањем фронта радова на ископавању јаловине и угља, према ПК Поље Е, стварају се услови за дисциплиновано процедурално одлагање јаловинских маса формирањем ниже одлагалишне нивеле  $k+65$  m, што би се позитивно одразило на наставак надвишења одложене јаловине.

Узевши у обзир, величину и облик може се констатовати да предложена стабилизација предметног одлагалишта, наведених димензија и карактеристика, није била присутна у светској пракси.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Јанош К.: Површинска експлоатација лигнита, Књига 2, 1982, 373 стр.
- [2] Милошевић Д.: Студија стабилизације унутрашњих одлагалишта простора Поља Б/Ц за потребе одлагања откривке са ПК Поље Е, Рударски институт Београд, 2020, 249 стр.
- [3] Обрадовић Р.: Формирање предодлагалишта као фактор стабилности одлагалишта на површинским коповима лигнита, Рударски гласник, Бр. 3, 1989, стр. 5-13.
- [4] Обрадовић Р.: Анализа услова стабилности одлагалишта на брдским падинама, Рударски гласник, Бр. 4, 1987, стр. 5-13.

The solutions were continuously checked with geomechanical calculations in order to determine the limit heights of disposal and calculate the accommodation space. Geomechanical analyses influenced the direction of progress and the method of disposal of tailings masses.

All of the above, the provision of free space between the unmined coal and the base of the deposited masses, pre-drainage, strengthening of the floor with a geogrid, creation of the initial embankment, elevation of the initial embankment and elevation of the previously formed internal landfill, represent the sequence of operations that should be implemented in order to achieve its stabilization and fulfill the requirement for disposal of additional tailings. With the further progress of the tailings and coal excavation front, according to Surface mine Field E, the conditions have been created for the disciplined procedural disposal of tailings masses by forming a lower disposal level of  $k+65$  m, which would have a positive effect on the extended banking of the deposited tailings.

Taking into account the size and shape, it can be concluded that the proposed stabilization of the landfill in question, with the stated dimensions and characteristics, was not present in world practice.

## LITERATURE

- [1] Janoš K.: Površinska eksploatacija lignita, Knjiga 2, 1982, 373 str.
- [2] Milošević D.: Studija stabilizacije unutrašnjih odlagališta prostora Polja B/C za potrebe odlaganja otkrivke sa PK Polje E, Rudarski institut Beograd, 2020, 249 str.
- [3] Obradović R.: Formiranje predodlagališta kao faktor stabilnosti odlagališta na površinskim kopovima lignita, Rudarski glasnik, Br. 3, 1989, str. 5-13.
- [4] Obradović R.: Analiza uslova stabilnosti odlagališta na brdskim padinama, Rudarski glasnik, Br. 4, 1987, str. 5-13.



УТИЦАЈ УНУТРАШЊЕГ ОДЛАГАЛИШТА ПК ПОЉЕ Д  
НА СТАБИЛНОСТ СЕВЕРНЕ КОСИНЕ ПК ПОЉЕ Е  
У РБ КОЛУБАРА

IMPACT OF THE INTERNAL LANDFILL O.P. FIELD D  
ON THE STABILITY OF THE NORTHERN SLOPE OF O.P. FIELD E  
IN RB KOLUBARA

DOI: 10.5937/RG2402053P

Научна критика  
Critical Review

Бранко Петровић  
Никола Анђелковић  
АД „Електропривреда Србије”,  
Београд,  
РБ КОЛУБАРА, СРБИЈА  
branko.petrovic@eps.rs

Branko Petrović  
Nikola Anđelković  
Joint stock company „Elektroprivreda Srbije”,  
Belgrade,  
RB KOLUBARA, SERBIA  
branko.petrovic@eps.rs

Примљен 15 јуна 2024; Рецензиран 8 децембра 2024; Прихваћен 10 децембра 2024.  
Received 15 June 2024; Received in revised 8 Decembre 2024; Accepted 10 Decembre 2024

**Сажетак:** Површински коп Поље Е се налази у источном делу РБ Колубара у продужетку Поља Ц. У перспективи тај коп би требало да буде носилац производње угља у РБ Колубара (12 милиона t/god.). Да би се започело са експлоатацијом угља на овом откопном пољу претходно је неопходно откопати велике количине откритке које се налазе изнад њега. Простор предвиђен за депоновање те откритке је унутрашње одлагалиште Поља Б/Ц. На том одлагалишту, 2006. године дошло је до покретања велике количине одложене масе и зарушавања етажа на њему. Из тог разлога наставак одлагања откритке на то одлагалиште био је онемогућен, тако да су се сви системи који су одлагали откритку преbacили на унутрашње одлагалиште Поља Д, које се пружа дуж северне косине Поља Е. Самим тим, одлагалиште Поља Д временом је добило нову контуру чиме је претходно планирана геометрија одлагалишта измењена. Услед непланског одлагања откопаног материјала на одлагалиште Поља Д, дошло се у позицију да било какви радови у зони северне косине Поља Е могу да се изведу једино уз веома велики степен ризика што би угрозило безбедност и људства и опреме. У овом раду приказана је анализа стабилности северне косине Поља Е, узимајући при томе у обзир утицај унутрашњег одлагалишта Поља Д на њу.

**Кључне речи:** ЕТАЖА, УНУТРАШЊЕ ОДЛАГАЛИШТЕ, ФАКТОР СИГУРНОСТИ, САНАЦИЈА

**Abstract:** The surface mine Field E is located in the eastern part of RB Kolubara in the extension of Field C. In perspective, that mine should be the carrier of coal production in RB Kolubara (12 million t/year). In order to begin the exploitation of coal in this mining field, it is first necessary to dig out large amounts of overburden that are located above it. The space provided for depositing that overburden is the internal disposal site Polja B/C. At that landfill, in 2006, a large amount of deposited mass was moved and the floors on it were destroyed. For this reason, the continuation of overburden disposal at that landfill was impossible, so all the systems that disposed of overburden were transferred to the internal landfill of Field D, which extends along the northern slope of Field E. As a result, the landfill of Field D acquired a new contour over time, which changed the previously planned geometry of

the landfill. Due to the unplanned dumping of excavated material at the Field D landfill, it has come to a position that any works in the northern slope of Field E can only be carried out with a very high degree of risk, which would endanger the safety of both people and equipment. This paper presents an analysis of the stability of the northern slope of Field E, taking into account the influence of the internal landfill of Field D on it.

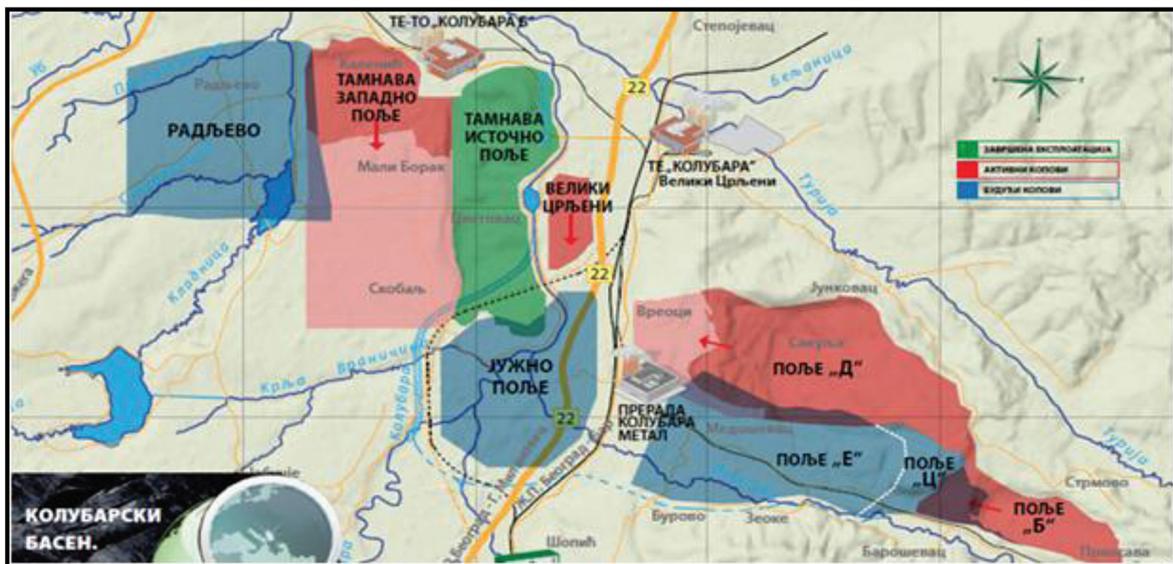
**Key words:** SLOPES, INTERNAL LANDFILL, THE SAFETY FACTOR, REMEDIATION

## УВОД

Површински коп Поље Е представља заменски капацитет за Поље Д, са планираном производњом угља од 12 милиона t/god. Находи се у југоисточном делу РБ Колубара, у продужетку Поља Ц (Слика 1).

## INTRODUCTION

The open-pit mine Field E represents a replacement capacity for Field D, with a planned coal production of 12 million t/year. It is located in the southeastern part of MB Kolubara, in the extension of Field C (Figure 1).



Слика 1, Колубарски угљоносни басен са експлоатационим пољима

Figure 1, Kolubara Coal Basin with Mine Fields

Да би се створили услови за експлоатацију угља са Поља Е неопходно је откопати значајне количине откривке која се налази изнад угљеног слоја и депоновати је на простор предвиђен за то, тачније на простор унутрашњег одлагалишта Поља Б/Ц.

На том одлагалишту је почетком 2006. године дошло до покретања велике количине одложеног материјала (око 80 милиона  $m^3$ ) услед чега су затрпане етаже на угљу, тако да се на том простору прекинуло са откопавањем угља и одлагањем материјала а сви јаловински системи су измештени на унутрашње одлагалиште Поља Д. Услед непланског одлагања материјала на том одлагалишту, тачније на јужној косини

In order to create conditions for the coal mining from Field E, it is necessary to excavate a significant amount of the overburden located above the coal seam and deposit it in the area provided for it, more precisely in the area of the internal landfill of Field B/C.

At the beginning of 2006, motion of a large amount of deposited material (about 80 million  $m^3$ ) occurred at that landfill, as a result of which the coal floors were buried, so that the excavation of coal and the disposal of material in that area was interrupted, and all tailings systems were moved to the internal landfill of Field D. Due to the unplanned disposal of material at that landfill, more precisely on the

Поља Д, створене су велике гомиле које су заузеле простор будуће северне косине Поља Е. Било какви радови да се изводе у тој зони представљали би велики ризик како за људство тако и за механизацију. Из тог разлога је неопходно те гомиле једном одложеног материјала поново откопати и пребацити на простор чија локација не угрожава производни процес.

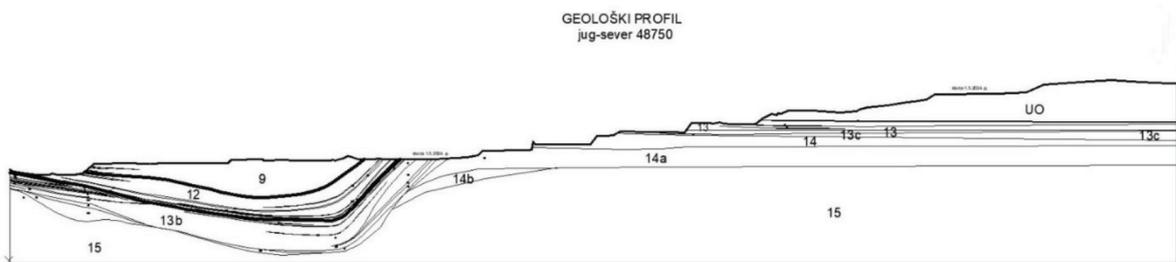
У овом раду приказана је анализа стабилности северне косине Поља Е:

- a) За тренутно стање северне косине са постојећим одложеним материјалом на њој (Слика 2);
- б) За изглед северне косине по Главном рударском пројекту – ОЦ Пројект, 2021. године. (Слика 3).

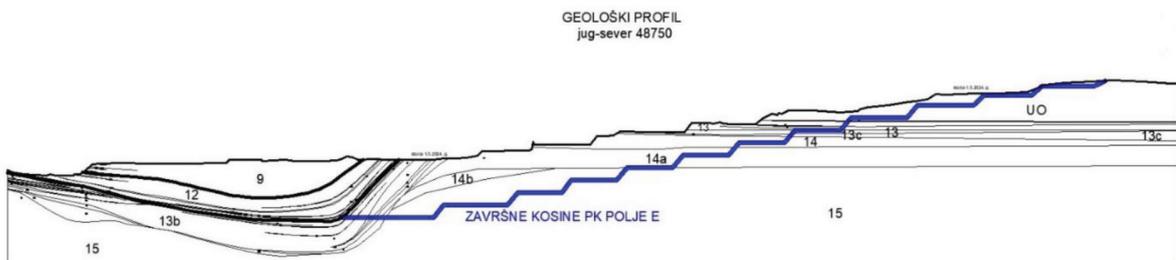
southern slope of Field D, large piles were created occupying the area of the future northern slope of Field E. Any work carried out in that zone would pose a great risk to both personnel and machinery. For that reason, it is necessary to dig up again these piles of once deposited material and transfer them to an area whose location does not endanger the production process.

This paper presents an analysis of the stability of the northern slope of Field E:

- a) For the current state of the northern slope with the existing deposited material on it (Figure 2);
- b) For the appearance of the northern slope according to the Main Mining Project – OC Project, 2021. (Figure 3);



Слика 2, Тренутно стање северне косине (Профил 48750)  
Figure 2, Current state of the northern slope (Profile 48750)



Слика 3, Планирано стање северне косине по Главном рударском пројекту (Профил 48750)  
Figure 3, Planned condition of the northern slope according to the Main Mining Project (Profile 48750)

## АНАЛИЗА СТАБИЛНОСТИ СЕВЕРНЕ КОСИНЕ

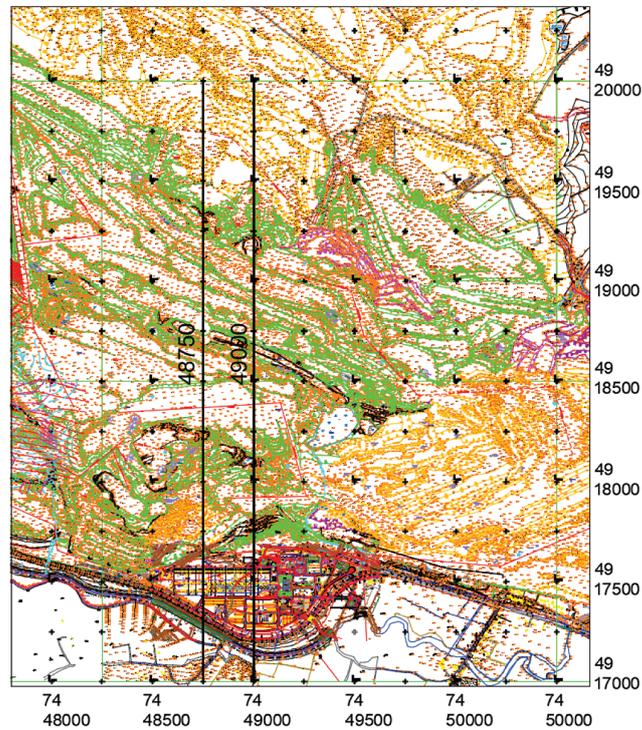
Анализа стабилности северне косине и изучавање фактора сигурности ( $F_s$ ) рађена је применом софтверског програма SLIDE 6.0, Rocscience Inc, uz Mohr-Coulombов критеријум лома. Резултати прорачуна за оба анализирана

## NORTH SLOPE STABILITY ANALYSIS

An analysis of the stability of the northern slope and evaluation of the safety factor ( $F_s$ ) was performed using the software programme on SLIDE 6.0, Rocscience Inc., together with the Mohr-Coulomb criterion of fracture. The results of the calculation for both analyzed profiles are

профила приказани су табеларно и графички. Положаји профила (48750 и 49000), за које су рађене анализе, приказани су на Слици 4.

presented in tabular and graphical terms. The profile positions (48750 and 49000), for which the analyses were performed, are shown in Figure 4.



Слика 4, Ситуациона карта Поља Е (стање 1.5.2024. године) са положајем профила 48750 и 49000

Figure 4, Situation map of Field E (as of May 1, 2024) with profile position 48750 and 49000

а) Анализа стабилности северне косине (тренућно стање)

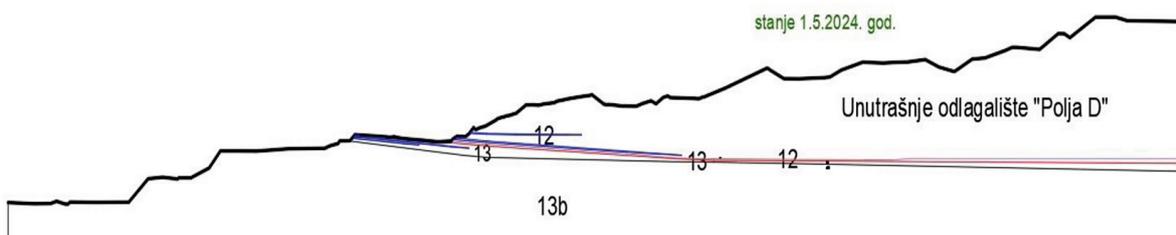
a) Analysis of the stability of the northern slope (current state)

Анализа је рађена за Профил 48750 (Слика 2) и Профил 49000 (Слика 5), када је коефицијент порног притиска  $r_u = 0.0$  и  $r_u = 0.2$ .

An analysis was performed for Profile 48750 (Figure 2) and Profile 49000 (Figure 5), when the pore pressure coefficient  $r_u = 0.0$  and  $r_u = 0.2$ .

Вредности фактора сигурности (Fs) за парцијалне косине, системе косина и генералне косине приказане су у Табели 1 (за Профил 48750) и Табели 2 (за Профил 49000).

Safety factor (Fs) values for partial slopes, slope systems and general slopes are shown in Table 1 (for Profile 48750) and Table 2 (for Profile 49000).



Слика 5, Тренућно стање северне косине (Профил 49000)

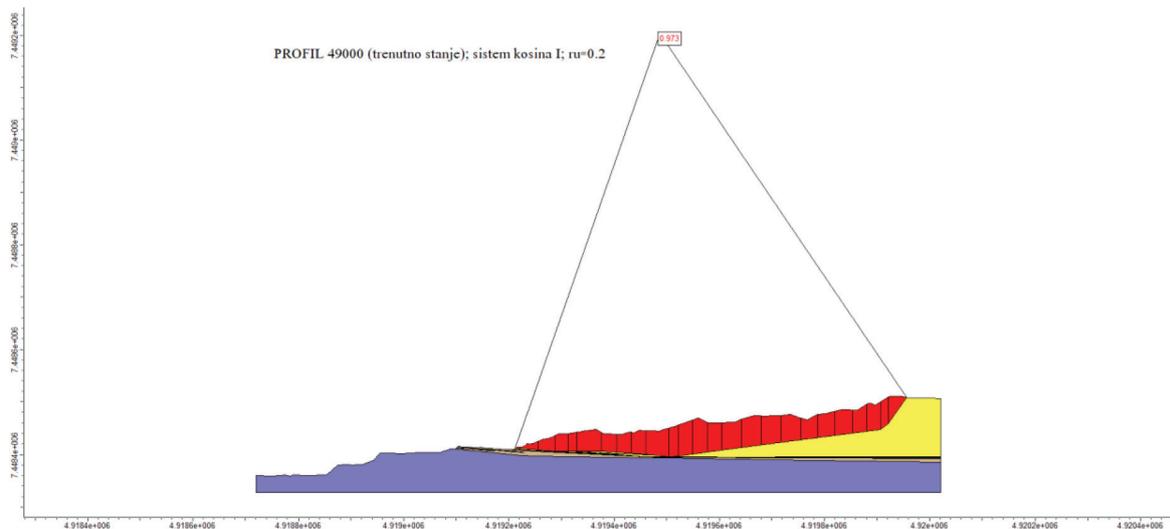
Figure 5, Current state of the northern slope (Profile 49000)

Табела 1, Вредности фактора сигурности за Профил 48750 (тренутно стање)  
 Table 1, Safety factor values for Profile 48750 (current state)

Етажа Floor	Порни притисак Pore pressure ( $r_u$ )	Fs
I	0.0	0.79
	0.2	/
II	0.0	0.89
	0.2	/
III	0.0	0.64
	0.2	/
IV	0.0	1.11
	0.2	0.93
V	0.0	1.07
	0.2	0.92
VI	0.0	1.27
	0.2	0.95
VII	0.0	1.94
	0.2	1.74
Систем косина I Slope system I	0.0	1.29
	0.2	1.06
Систем косина II Slope system II	0.0	2.94
	0.2	2.42
Генерална косина General slope	0.0	2.68
	0.2	2.17

Табела 2, Вредности фактора сигурности за Профил 49000 (тренутно стање)  
 Table 2, Safety factor values for Profile 49000 (current state)

Етажа Floor	Порни притисак Pore pressure ( $r_u$ )	Fs
I	0.0	0.59
	0.2	/
II	0.0	0.92
	0.2	/
III	0.0	0.68
	0.2	/
IV	0.0	0.68
	0.2	/
V	0.0	1.22
	0.2	1.02
VI	0.0	1.18
	0.2	0.98
Систем косина I Slope sistem I	0.0	1.18
	0.2	0.97
Систем косина II Slope sistem II	0.0	1.71
	0.2	1.40
Генерална косина General slope	0.0	2.30
	0.2	1.69



Слика 6, Вредности фактора сигурности  $F_s = 0.97$  за систем косина (Профил 49000)

Figure 6, Safety factor value  $F_s = 0.97$  for the slope system (Profile 49000)

б) Анализа стабилности северне косине (стање по Главном рударском пројекту)

Такође, анализа је рађена за два профила, Профил 48750 (Слика 3) и Профил 49000 (Слика 7).

При томе, коефицијент порног притиска има исте вредности као при анализи стабилности косина код тренутног стања северне косине;  $r_u = 0.0$  и  $r_u = 0.2$ .

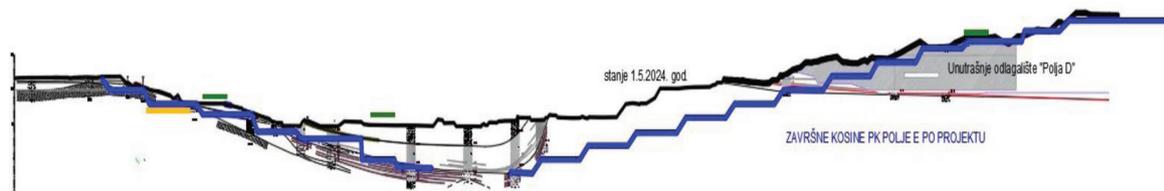
Вредности фактора сигурности ( $F_s$ ) за парцијалне косине, системе косина и генералне косине приказане су у Табели 3 (за Профил 48750) и Табели 4 (за Профил 49000).

b) Analysis of the stability of the northern slope (condition according to the Main Mining Project)

Also, an analysis was done for two profiles, Profile 48750 (Figure 3) and Profile 49000 (Figure 7).

Here, the pore pressure coefficient has the same values as in the analysis of slope stability in the current state of the northern slope;  $r_u = 0.0$  and  $r_u = 0.2$ .

Safety factor ( $F_s$ ) values for partial slopes, slope systems and general slopes are shown in Table 3 (for Profile 48750) and Table 4 (for Profile 49000).



Слика 7, Стање северне косине по Главном рударском пројекту (Профил 49000)

Figure 7, Current state of the the northern slope according to the Main Mining Project (Profile 49000)

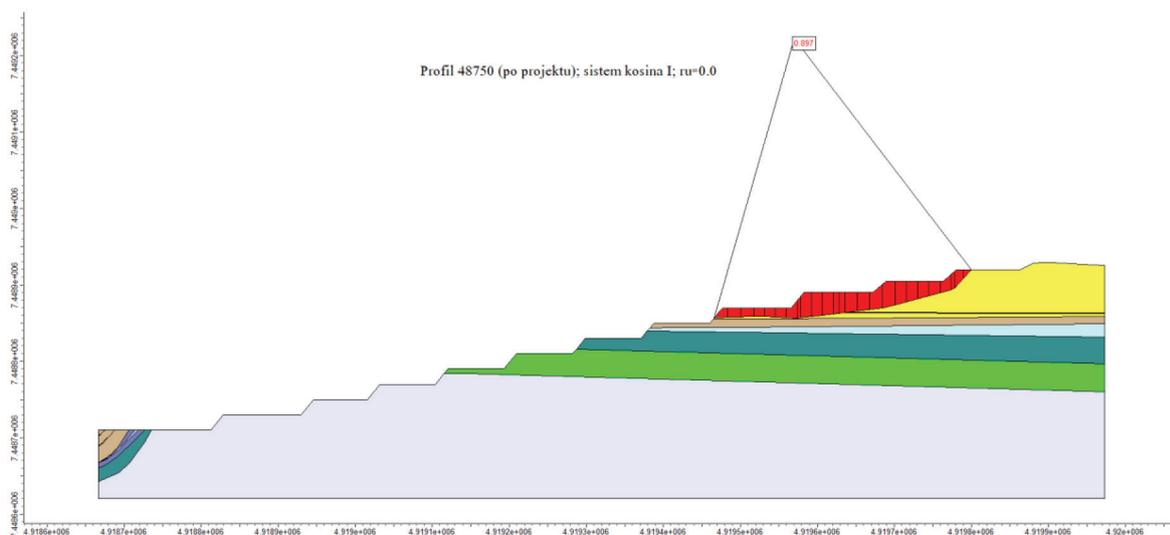
Табела 3, Вредности фактора сигурности за Профил 48750 (стање по Главном рударском пројекту)  
 Table 3, Safety factor values for Profile 48750 (state according to the Main Mining Project)

Етажа Floor	Порни притисак Pore pressure ( $r_u$ )	Fs
I	0.0	0.90
	0.2	/
II	0.0	0.51
	0.2	/
III	0.0	0.51
	0.2	/
IV	0.0	0.51
	0.2	/
V	0.0	0.49
	0.2	/
VI	0.0	0.92
	0.2	/
VII	0.0	0.91
	0.2	/
VIII	0.0	0.93
	0.2	/
IX	0.0	0.87
	0.2	/
X-XII	0.0	0.76
	0.2	/
XIII	0.0	0.78
	0.2	/
Систем косина I Slope sistem I	0.0	0.90
	0.2	/
Систем косина II Slope sistem II	0.0	2.24
	0.2	1.85
Генерална косина General slope	0.0	1.91
	0.2	1.53

Табела 4, Вредности фактора сигурности за Профил 49000 (стање по Главном рударском пројекту)  
 Table 4, Safety factor values for Profile 49000 (state according to the Main Mining Project)

Етажа Floor	Порни притисак Pore pressure ( $r_u$ )	Fs
I	0.0	0.59
	0.2	/
II	0.0	0.40
	0.2	/
III	0.0	0.71
	0.2	/
IV	0.0	0.38
	0.2	/

Етажа Floor	Порни притисак Pore pressure ( $r_u$ )	Fs
V	0.0	0.38
	0.2	/
VI	0.0	0.45
	0.2	/
VII	0.0	1.12
	0.2	0.92
VIII-XIII	0.0	1.13
	0.2	0.93
Систем косина I Slope sistem I	0.0	0.98
	0.2	/
Систем косина II Slope sistem II	0.0	2.70
	0.2	2.19
Генерална косина General slope	0.0	2.04
	0.2	1.76



Слика 8, Вредности фактора сигурности  $F_s = 0.90$  за систем косина (Профил 48750)

Figure 8, Safety factor value  $F_s = 0.90$  for the slope system (Profile 48750)

#### ДОБИЈЕНИ РЕЗУЛТАТИ – КОМЕНТАР

Евидентно је да добијени резултати анализа стабилности северне косине Поља Е (Табела 1, Табела 2, Табела 3 и Табела 4) указују на то да нити тренутно стање косине, нити пројектом предвиђена геометрија те косине не гарантују сигуран рад у тој зони копа, тачније косина мора да се препројектује у

#### RESULTS OBTAINED – COMMENT

It is evident that the obtained results of the analysis of stability of the northern slope of Field E (Table 1, Table 2, Table 3 and Table 4) indicate that neither the current state of the slope nor the geometry of the slope provided by the project guarantee safe work in that mine area, which means that the slope

складу са законски захтеваним вредности-ма фактора сигурности (Fs). Посебно треба обратити пажњу на парцијалне косине које у Главном рударском пројекту Поља Е (ОЦ Пројект, 2021.године) нису разматране, што је недопустиво. Као што се на профилима може видети, део одложеног материјала (јужна косина Поља Д) одлаган је на простор који захвата и северну косину Поља Е чиме је додатно оптерећује и итекако утиче на њену стабилност.

## ЗАКЉУЧАК

Површински коп Поље Е предвиђен је да буде носилац производње угља у РБ Колубара (12 милиона t/god.). Да би се покренула производња угља са овог копа неопходно је створити услове за то, тј. санирати унутрашње одлагалиште Поља Б/Ц које је предвиђено за депоновање откривке која се налази изнад угљеног слоја и истовремено урадити систем одводњавања који ће цео тај простор ослободити од издани које егзистирају на том простору. Због рушења унутрашњег одлагалишта Поља Б/Ц 2006. године, јаловински системи који су одлагали откривку на том одлагалишту измештени су на простор унутрашњег одлагалишта Поља Д. Услед нерационалног и непланског рада тих система на новом одлагалишту, тј. у зони јужне косине Поља Д, створене су велике гомиле одложеног материјала које су прекриле и зону северне косине Поља Е, чиме су угрозиле њену стабилност.

У овом раду приказани су резултати анализе стабилности северне косине Поља Е за два случаја: за тренутно стање косине и за стање косине по Главном рударском пројекту. Добијени резултати (Табела 1, Табела 2, Табела 3 и Табела 4) јасно указују да за оба случаја северна косина нема задовољавајућу стабилност и да је неопходна њена корекција. При томе, посебну пажњу треба обратити на поузданост физичко-механичких параметара како материјала који се одлаже тако и тла које чини косину у природном стању. Доистраживање целог тог простора копа представља основ за било какву активност на том терену. Након тога је неопходно

must be redesigned in accordance with the legally required values of the safety factor (Fs). Particular attention should be paid to the partial slopes that were not considered in the Main Mining Project Field E (OC Project, 2021), which is unacceptable. As can be seen on the profiles, part of the deposited material (the southern slope of Field D) was deposited in the area that also covers the northern slope of Field E, which further burdens it and greatly affects its stability.

## CONCLUSION

The open pit mine Field E is planned to be the holder of coal production in MB Kolubara (12 million t/year). In order to start the production of coal from this mine, it is necessary to create conditions for it, i.e. rehabilitate the internal landfill of Field B/C, which is intended for depositing the overburden located above the coal seam, and at the same time create a drainage system that will free the entire area from the ground water that exists in that area. Due to the demolition of the internal landfill of Field B/C in 2006, the tailings systems that disposed of overburden at that landfill were relocated to the area of the internal landfill of Field D. Due to irrational and unplanned operation of those systems at the new landfill, i.e. in the southern slope zone of Field D, large piles of deposited material were created, which also covered the northern slope zone of Field E, thus endangering its stability.

This paper presents the results of stability analysis of the northern slope of Field E for two cases: for the current state of the slope and for the state of the slope according to the Main Mining Project. The obtained results (Table 1, Table 2, Table 3 and Table 4) clearly indicate that in both cases the northern slope does not have satisfactory stability and that its correction is necessary. At the same time, special attention should be paid to the reliability of the physical and mechanical parameters of both the material to be deposited and the soil that makes up the slope in its natural state. Additional exploration of the entire area of the mine is the basis for any activity in that area. After that, it is necessary

израдити квалитетну пројектну документацију по којој ће се сви планирани радови на Пољу Е изводити. Евидентно је да постоји Главни рударски пројекат Поља Е, али његове мањкавости (пројектом није решено одводњавање копа, није дата јасна технологија откопавања, веома лоше геомеханичке анализе) упућују на претходно изречено.

Фактор време је веома битан параметар који утиче на успешност отварања Поља Е, јер свако пролонгирање корекционих мера у овом случају може довести до трајне обуставе свих радова на Пољу Е.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Технички рударски пројекат експлоатације откривке и угља на ПК Поље Е, ОЦ Пројект, фебруар, 2023.
- [2] Упрошћени рударски пројекат откопавања у јужној косини површинског копа Поље Е, ОЦ Пројект, мај, 2023.
- [3] Главни рударски пројекат површинског копа Поље Е, ОЦ Пројект, септембар, 2021.
- [4] Годишњи оперативни план површинског копа Поље Е за 2023. годину, ОЦ Површински копови Барошевац, март 2023.
- [5] Остала стручна и фондовска документација РБ Колубара

to prepare high-quality project documentation according to which all planned works on Field E will be carried out. It is evident that the Main Mining Project Field E, but its shortcomings (the project did not solve the drainage of the mine, no clear excavation technology was given, very bad geomechanical analyses) point to what has been the previously stated.

The time factor is a very important parameter that affects the success of the opening of Field E, because any prolongation of corrective measures in this case may lead to permanent suspension of all works on Field E.

#### LITERATURE

- [1] Tehnički rudarski projekat eksploatacije otkrivke i uglja na PK Polje E, OC Projekt, februar, 2023.
- [2] Uprošćeni rudarski projekat otkopavanja u južnoj kosini površinskog kopa Polje E, OC Projekt, maj, 2023.
- [3] Glavni rudarski projekat površinskog kopa Polje E, OC Projekt, septembar, 2021.
- [4] Godišnji operativni plan površinskog kopa Polje E za 2023. godinu, OC Površinski kopovi Baroševac, mart 2023.
- [5] Ostala stručna i fondovska dokumentacija RB Kolubara

САГЛЕДАВАЊЕ ПРОЦЕСА ЗГУШЊАВАЊА  
КОНЦЕНТРАТА БАКРА РУДНОГ ЛЕЖИШТА  
БОРСКА РЕКА КРОЗ РЕЛЕВАНТНЕ ИНДИКАТОРЕ

OBSERVATION OF THE PROCESS OF CONCENTRATE  
CONCENTRATE OF THE BORSKA REKA ORE  
DEPOSIT THROUGH RELEVANT INDICATORS

DOI: 10.5937/RG2402063J

Стручни рад  
Expert Paper

Ивана Јовановић<sup>1</sup>

Сања Петровић<sup>1</sup>

Јасмина Нешковић<sup>2</sup>

Павле Стјепановић<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт за рударство и металургију Бор,  
Србија

<sup>2</sup> Рударски институт д.о.о, Београд, Србија

*ivana.jovanovic@irmbor.co.rs*

Ivana Jovanović<sup>1</sup>

Sanja Petrović<sup>1</sup>

Jasmina Nešković<sup>2</sup>

Pavle Stjepanović<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Mining and Metallurgy Institute Bor,  
Serbia

<sup>2</sup> Рударски институт д.о.о, Београд, Србија

*ivana.jovanovic@irmbor.co.rs*

Примљен 2 децембра 2024; Рецензиран 6 децембра 2024; Прихваћен 10 децембра 2024.

Received 2 Decembre 2024; Received in revised 6 Decembre 2024; Accepted 10 Decembre 2024

**Сажетак:** У циљу одређивања параметара згушњавања дефинитивног концентрата бакра из лежишта Борска река који је добијен процесом флоатације урађен је експериментни таложења. Садржај чврсте фазе на почетку испитивања је износио 30%. Резултати који су добијени показали су да се дефинитивни концентрат бакра таложи до садржаја чврстој од 55% адекватном брзином. При овако повољној брзини таложења неопходна је мала специфична површина згушњивача.

**Кључне речи:** КОНЦЕНТРАТ БАКРА, САДРЖАЈ ЧВРСТЕ ФАЗЕ, ТАЛОЖЕЊЕ, ЗГУШЊАВАЊЕ

**Abstract:** In order to determine the thickening parameters of the definitive copper concentrate from the Borska Reka deposit, which was obtained by the flotation process, a sedimentation experiment was conducted. The solids content at the beginning of the test was 30%. The results obtained showed that the definitive copper concentrate precipitated to a solids content of 55% at an adequate rate. At such a favorable deposition rate, a small specific surface area of the thickener is necessary.

**Key words:** COPPER CONCENTRATE, SOLID PHASE CONTENT, DEPOSITION, THICKENING

## УВОД

Лежиште «Борска Река» је саставни део Тимочког магматског комплекса и налази се у северо-западном ободном делу града Бора,

## INTRODUCTION

The “Borska Reka” deposit is an integral part of the Timok Magmatic Complex and is located in the north-western peripheral part

испод долине Борске реке, у саставу активног рудника Јаме. Лежиште је дужине око 1000 m и ширине око 500 m, залеже према западу под углом од 45° до 55°, сагласно залегању Борских конгломерата и пешчара, а од Борске хидротермалне зоне одваја га Борски расед [1]. Досадашњим истраживањем је константовано да рудно тело «Борска река» припада групи врло великих лежишта чија просечна моћност прелази 300 m [2]. Досадашњим испитивањима утврђено је да у лежишту «Борска Река» средњи садржај бакра износи 0,50% Cu, злата 0,204 g/t Au, сребра 1,62 g/t Ag, молибдена 35,89 g/t Mo и сумпора 7,8% S [3]. Лежиште «Борска Река» се још увек не експлоатише, али се сматра да има значајан потенцијал за будућу производњу бакра [4].

За профитабилну експлоатацију одређеног лежишта неопходно је најпре спровести обимна истраживања уз одговарајућу економску процену [5]. Сходно томе, обављена су технолошка испитивања на језгрима бушотина из лежишта «Борска река» у оквиру којих је, између осталог, предвиђено да се одреде параметри који карактеришу дефинитивне производе флотацијске концентрације у поступцима њиховог одводњавања. У складу са тим, извршена су лабораторијска испитивања са сврхом утврђивања показатеља процеса згушњавања дефинитивног концентрата бакра.

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ПОСТУПАК

### КАРАКТЕРИЗАЦИЈА ПОЛАЗНОГ УЗОРКА

Узорак концентрата бакра који је коришћен у овом испитивању добијен је према утврђеној технолошкој шеми приказаној на слици 1. Применом дате технолошке шеме, кроз претходна испитивања, постигнути су оптимални резултати у погледу садржаја и искоришћења бакра у концентрату.

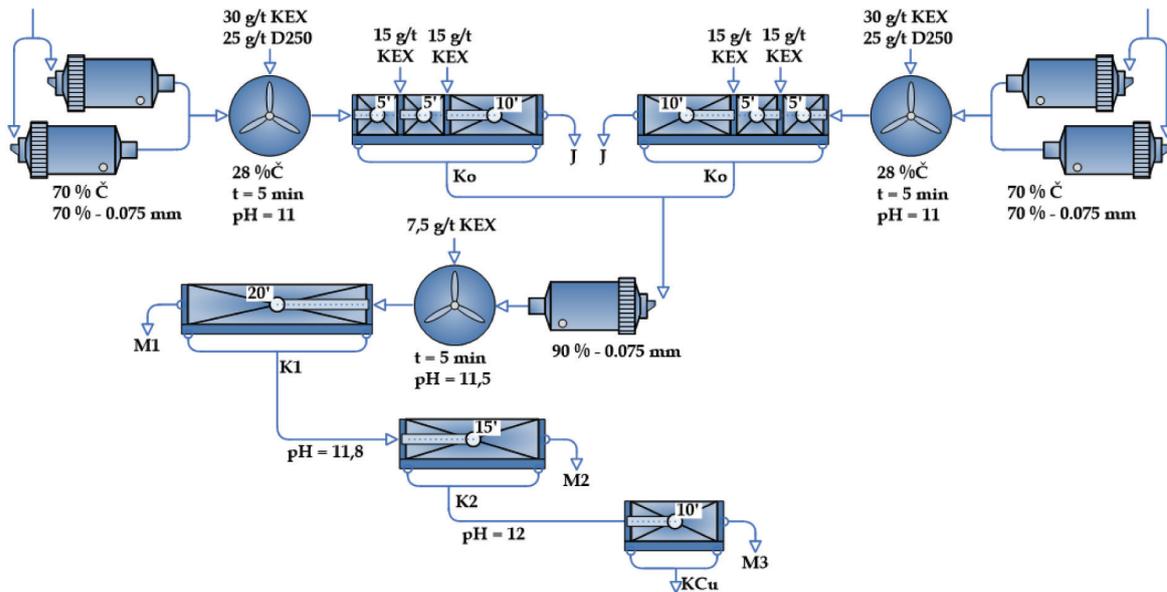
of the town Bor, beneath the Borska Reka valley, as a constituent of the active mine Jama. The deposit is about 1000 m long, about 500 m wide, and inclined towards west at angle of 45° to 55°, in accordance with the inclination of Bor's conglomerates and sandstones. It is separated from the Bor hydrothermal zone by the Bor fault [1]. The researches so far have proved that the ore body "Borska Reka" belongs to a group of very large deposits whose average thickness exceeds 300 m [2]. Previous studies have shown that "Borska Reka" deposit contains (on average): 0.50% Cu, 0.204 g/t Au, 1.62 g/t Ag, 35.89 g/t Mo and 7.8% S [3]. The "Borska Reka" deposit has not yet been exploited, but is considered to have significant potential for future copper production [4].

Profitable exploitation of a certain mineral deposit requires extensive previous researches with appropriate economic assessment [5]. Accordingly, technological tests were carried out on exploration drill cores from the deposit "Borska Reka", where, among other things, it was predicted to determine the parameters that characterize dewatering properties of final flotation products. Therefore, laboratory tests were performed with the purpose of determining the indicators of the final copper concentrate thickening.

## EXPERIMENTAL

### CHARACTERIZATION OF THE INITIAL SAMPLE

The copper concentrate sample used in this study was obtained according to the technological scheme shown in Figure 1. According to presented technological scheme obtained by the previous studies, optimal results were achieved regarding the content and recovery of copper in the concentrate.



Слика 1, Технолошка шема добијања концентрата бакра

Figure 1, Technological scheme of the flotation concentration of copper minerals

Биланс концентрације који одговара датом експерименту приказан је у табели 1.

The obtained results of flotation are shown in Table 1.

Табела 1, Остварени биланс флојацијске концентрације

Table 1, Technological results of the examination

	m, %	Cu, %	R Cu, %	S, %	R S, %	Au, g/t	R Au, %	Ag, g/t	R Ag, %
U	100,00	0,485	100,00	6,37	100,00	0,16	100,00	1,63	100,00
J	89,29	0,056	10,31	3,98	55,75	0,05	28,11	0,80	43,95
K <sub>0</sub>	10,71	4,06	89,69	26,35	44,25	1,07	71,89	8,51	56,05
K <sub>1</sub>	2,45	16,56	83,77	29,76	11,46	3,24	50,10	22,78	34,39
M <sub>1</sub>	8,25	0,35	5,92	25,33	32,79	0,42	21,79	4,27	21,67
M <sub>2</sub>	0,79	1,85	3,01	24,53	3,04	0,90	4,47	4,50	2,19
K <sub>2</sub>	1,66	23,54	80,75	32,25	8,42	4,36	45,63	31,46	32,20
M <sub>3</sub>	0,25	6,69	3,43	23,99	0,94	2,40	3,76	17,00	2,60
K <sub>Cu</sub>	1,41	26,50	77,32	33,70	7,48	4,70	41,87	34,00	29,60

Густина испитиваног узорка одређена је стандардном методом помоћу стакленог пикнометра. Вредност густине дефинитивног концентрата бакра износи 3,80 t/m<sup>3</sup>.

The density of the tested sample was determined by a standard method using a glass pycnometer. The density of the final copper concentrate was 3.80 t/m<sup>3</sup>.

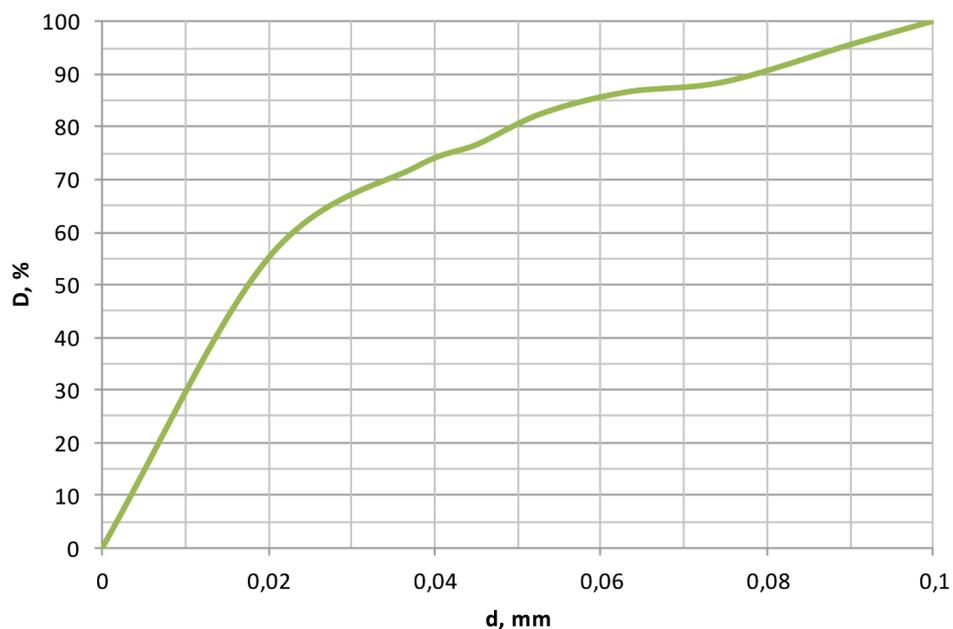
Одређивање гранулометријског састава полазног узорка концентрата бакра извршено је мокрим просејавањем на серији сита типа "IMPACT TEST", а резултати су приказани у табели 2 и на слици 2.

Grain size distribution of the initial copper concentrate sample was carried out by wet sieving on the "IMPACT TEST" sieves and the results are shown in Table 2 and Figure 2.

Табела 2, Гранулометријски састав узорка дефинитивној концентрата бакра

Table 2, Grain size distribution of the final copper concentrate

Класа крупноће / Size class d (mm)	m (%)	R (%)	D (%)
+0,090	4,5	4,50	100,00
-0,090+0,075	7,0	11,50	95,50
-0,075+0,063	2,0	13,50	88,50
-0,063+0,053	4,0	17,50	86,50
-0,053+0,045	6,0	23,50	82,50
-0,045+0,038	4,0	27,50	76,50
-0,038+0,020	17,5	45,00	72,50
-0,020+0,000	55,0	100,00	55,00



Слика 2, Гранулометријски састав узорка дефинитивној концентрата бакра

Figure 2, Grain-size distribution of the final copper concentrate

Према резултатима приказаним на слици 2 може се уочити значајно присуство ситних класа (испод 20  $\mu\text{m}$ ) у узорку концентрата.

#### ОДРЕЂИВАЊЕ ПАРАМЕТАРА ЗГУШЊАВАЊА ДЕФИНИТИВНОГ КОНЦЕНТРАТА БАКРА

У циљу испитивања параметара згушњавања дефинитивног концентрата бакра, урађен је опит таложења концентрата у мензури запремине 1000  $\text{cm}^3$ . Мензура је опремљена милиметарском траком за очи-

The results in Figure 2 show a significant presence of the finest classes (below 20  $\mu\text{m}$ ) in the copper concentrate sample.

#### DETERMINATION OF THE THICKENING PARAMETERS OF THE FINAL COPPER CONCENTRATE

The examination of the parameters of the final copper concentrate thickening was performed in the graduated cylinder of 1000  $\text{cm}^3$ . The graduated cylinder was equipped with a millimeter tape

тавање висине формираног стуба згустуе пулпе. Ради јасног уочавања границе између избистреног нивоа течности и згустуе пулпе, коришћен је електрични извор светлости.

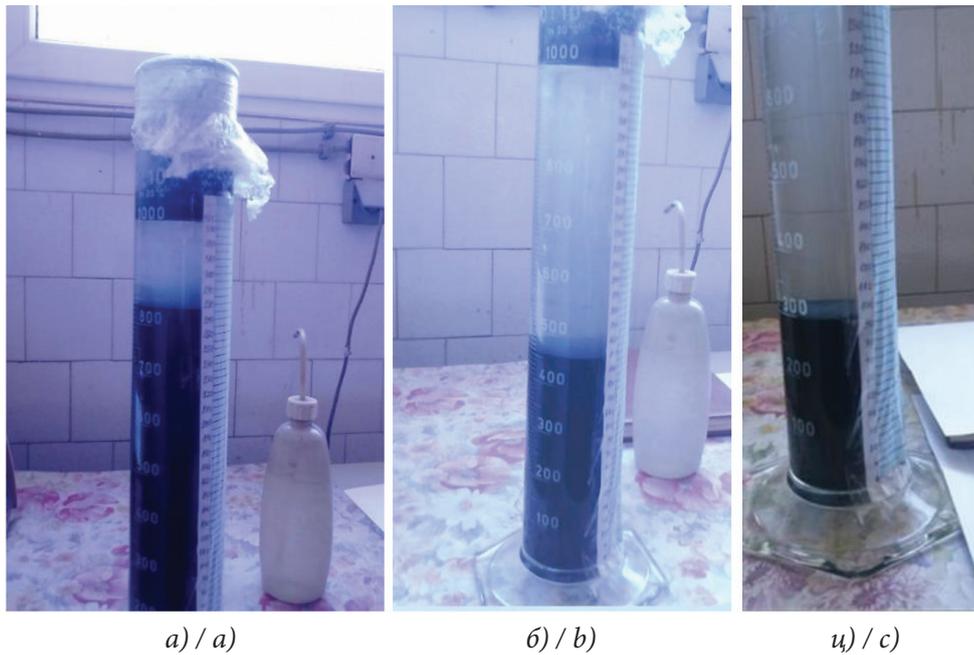
Експеримент таложења честица концентрата у мензури изведен је при почетној густини пулпе од  $1,284 \text{ t/m}^3$ , односно при садржају чврсте фазе од 30%. Овај садржај чврсте фазе у пулпи усвојен је на основу искустава из индустријске праксе у различитим погонима РТБ Бор (постројења за флотацијску концентрацију у Великом Кривељу и Мајданпеку).

Очитавање висине формираног стуба згустуе пулпе (односно висине нивоа бистре зоне) у мензури извршено је у одређеним временским интервалима. На слици 3 а), б) и ц) дат је приказ извођења експеримента таложења у различитим периодима од почетка процеса седиментације.

for reading the height of thickened pulp. In order to clearly see the boundary between the clear level of liquid and the thickened pulp, an electric light source was used.

The experiment of sedimentation of concentrate particles in the graduated cylinder was carried out at an initial pulp density of  $1.284 \text{ t/m}^3$ , i.e. with a solid phase content of 30%. This content of the solid phase in the pulp was adopted based on the experience of industrial practice in various plants of MSC Bor (flotation concentration plants in Veliki Krivelj and Majdanpek).

The height of the thickened pulp (or the clear zone height) in the graduated cylinder was reading at certain time intervals. An overview of the sedimentation experiment at different times from the beginning of the sedimentation process was presented in Figure 3 (a, b and c).



Слика 3, Седиментација дефинитивној концентрацији бакра у мензури: а) након 12 минути таложења; б) након 45 минути таложења; ц) након 250 минути таложења

Figure 3, Sedimentation of final copper concentrate in the graduated cylinder: a) after 12 minutes of sedimentation; b) after 45 minutes of sedimentation; c) after 250 minutes of sedimentation

## РЕЗУЛТАТИ ИСПИТИВАЊА И ДИСКУСИЈА

Резултати промене висине зоне бистре течности са временом, као и промене вредно-

## RESULTS AND DISCUSSION

Changes in the height of the zone of clear liquid with time, as well as changes in the volume

сти запреминске концентрације чврстих честица у пулпи приказани су у табели 3.

concentration of solid particles in the pulp are shown in Table 3.

Почетна концентрација чврстих честица у пулпи ( $C_0$ ) одређена је према обрасцу:

Initial concentration of solid particles in the pulp ( $C_0$ ) is determined according to the formula:

$$C_0 = \frac{m_k}{V} = \frac{385,1}{1000} = 0,385 \left[ \frac{\text{t}}{\text{m}^3} \right]$$

где је:

where:

$m_k$  – маса узорка концентрата, g;  
 $V$  – запремина мензуре (коју чини збир запремина воде и концентрата),  $\text{cm}^3$ .

$m_k$  – mass of the concentrate sample, g;  
 $V$  – volume of the graduated cylinder (sum of water and concentrate volumes),  $\text{cm}^3$ .

Табела 3, Резултати седиментације чврстих честица дефинитивној концентрати бакра  
 Table 3, Results of sedimentation of the final copper concentrate solid particles

Редни број мерења No of measurement	Време Time t (min)	Висина стуба згуснуте пулпе Thickened pulp height H (mm)	Висина бистре зоне Clear zone height $H_1$ (mm)	Концентрација Concentration $C_k$ (t/m <sup>3</sup> )	$C_k/C_0$
1.	0	335	0	0,385	1,000
2.	0,5	333	2	0,387	1,006
3.	1	330,5	4,5	0,390	1,014
4.	2	324,5	10,5	0,397	1,032
5.	3	318,5	16,5	0,405	1,052
6.	4	312,5	22,5	0,413	1,072
7.	5	307,5	27,5	0,419	1,089
8.	6	302,5	32,5	0,426	1,107
9.	8	293	42	0,440	1,143
10.	10	283,5	51,5	0,455	1,182
11.	15	261,5	73,5	0,493	1,281
12.	20	241	94	0,535	1,390
13.	25	220	115	0,586	1,523
14.	30	200	135	0,645	1,675
15.	40	163	172	0,791	2,055
16.	50	132	203	0,977	2,538
17.	60	115,5	219,5	1,117	2,900
18.	80	108,5	226,5	1,189	3,088
19.	100	105	230	1,228	3,190
20.	150	99	236	1,303	3,384
21.	200	96	239	1,343	3,490
22.	250	94	241	1,372	3,564
23.	300	93,5	241,5	1,379	3,583
24.	400	93	242	1,387	3,602
25.	500	92,8	242,2	1,390	3,610
26.	1200	92,5	242,5	1,394	3,622
27.	2000	92,5	242,5	1,394	3,622

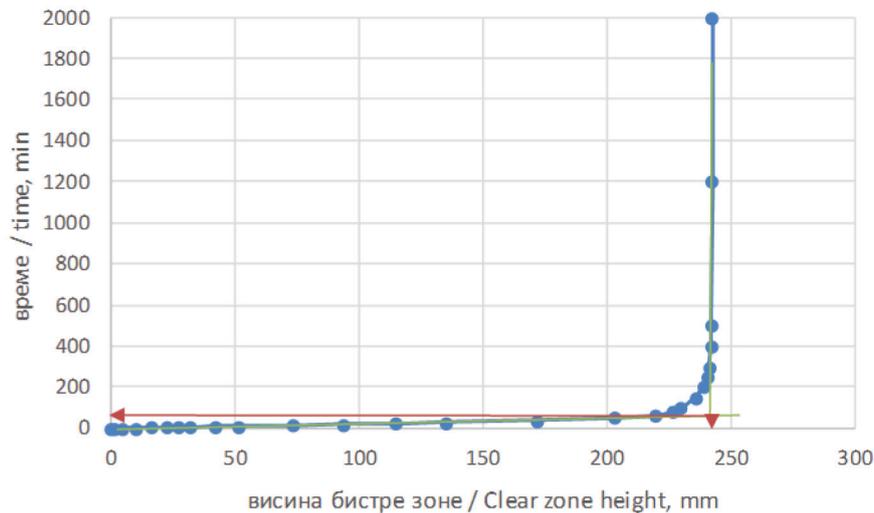
Поред тога, концентрација чврстих честица ( $C_k$ ) у делу запремине коју заузима згуснута пулпа након времена  $t$ , одређена је на основу обрасца:

$$C_k = C_0 \frac{H_0}{H} \left[ \frac{t}{m^3} \right]$$

где је:

$H_0$  – почетна висина пулпе у мензурни, mm;  
 $H$  – висина стуба згуснуте пулпе након времена  $t$ , mm.

Да би се утврдила средња брзина таложења честица концентрата бакра, зависност између висине бистре зоне и времена таложења концентрата приказана је графички (слика 4).



Слика 4, Седиментациона крива узорка дефинитивној концентрата бакра  
 Figure 4, Sedimentation curve of the final copper concentrate sample

За одређивање брзине таложења изабрана је метода проф. Митрофанова. У тачки пресека правих које карактеришу зону таложења и зону компресије (на слици 4 ове праве су означене зеленом бојом) очитане су одговарајуће вредности висине бистре зоне и времена таложења концентрата. На бази ових података, средња брзина таложења ( $v$ ) износи:

$$v = \frac{H_1}{t_1} = \frac{0,2419}{0,8412} = 0,27 \frac{m}{h}$$

где је:

$H_1$  – висина бистре зоне очитана са седиментационе криве, m;  
 $t_1$  – време које одговара висини  $H_1$ , h.

In addition, the concentration of solid particles ( $C_k$ ) in the part of the volume taken by the thickened pulp after time  $t$ , is determined on the basis of the equation:

where:

$H_0$  – initial height of pulp in the graduated cylinder, mm;  
 $H$  – height of column of thickened pulp after time  $t$ , mm.

To determine the mean rate of concentrate particles sedimentation, the dependence between the clear zone and the concentrate sedimentation time is shown graphically (Figure 4).

The method of prof. Mitrofanov was chosen for sedimentation rate determination. At the point of intersection of the straight lines characterizing the sedimentation and compression zones (in Figure 4 these lines are colored green), the corresponding values of the clear zone height and concentrate sedimentation time can be read. On the basis of this data, the mean sedimentation rate ( $v$ ) is:

where:

$H_1$  – height of the clear zone, read from the sedimentation curve, m;  
 $t_1$  – time corresponding to height  $H_1$ , h.

Након утврђивања средње брзине таложења, могуће је одредити специфичну површину згушњавања (s) на основу израза:

$$s = \frac{C_z - C_0}{C_z \cdot C_0 \cdot v} = \frac{0,925 - 0,385}{0,925 \cdot 0,385 \cdot 0,27} = 5,605 \frac{\text{m}^2}{\text{t/h}}$$

где је:

$C_z$  – завршна концентрација честица концентрата која одговара садржају чврстог у згуснутој пулпи од 55%. Овај садржај чврстог изабран је на основу података из индустријске праксе у погонима РТБ Бор.

Добијени резултати указују на то да се концентрат бакра таложи повољном брзином и има релативно малу потребну специфичну површину згушњавања при задатим условима. Наиме, кроз индустријску праксу у погонима РТБ Бор, при овим условима, оствариване су нешто веће вредности специфичних површина згушњавања [6].

## ЗАКЉУЧАК

За одређивање релевантних индикатора процеса згушњавања концентрата бакра рудног лежишта Борска река извршена су испитивања у лабораторијским условима методом таложења у мензури. Концентрат бакра је добијен оптималним технолошким процесом, а анализом гранулометријског састава утврђено је значајно присуство класа испод 20  $\mu\text{m}$ .

Резултати добијени методом таложења у мензури показују повољну средњу брзину таложења од 0,27 m/h што захтева релативно малу потребну специфичну површину згушњавања од 5,605 m<sup>2</sup>/t/h. Вредности које су добијене се односе на густину улазне пулпе од 1,284 t/m<sup>3</sup> и садржај чврсте фазе у згуснутом производу од 55%.

## ЗАХВАЛНОСТ

Овај рад је настао као резултат Пројекта TR33007 “Имплементација савремених техничко-технолошких и еколошких решења у постојећим производним системима РББ и

After determining the mean sedimentation rate, it is possible to define required surface area for thickening (s) based on the expression:

where:

$C_z$  – final concentration of particles corresponding to the solid content of 55% in the thickened pulp. This solid content has been chosen on the basis of data from industry practice in MSC Bor plants.

The obtained results indicate that the copper concentrate is sedimented at a favorable rate and has a relatively low required surface area for thickening under the given conditions. Namely, considering the industrial practice in MSC Bor plants, somewhat higher values of surface area for thickening were achieved under these conditions [6].

## CONCLUSION

To determine relevant indicators of the thickening process of copper concentrate from the “Borska Reka” deposit, tests were carried out in laboratory conditions using the graduated cylinder sedimentation method. The copper concentrate was obtained using an optimal technological process, and the analysis of the granulometric composition determined the significant presence of classes below 20  $\mu\text{m}$ .

The results obtained by the graduated cylinder sedimentation method show a favorable average sedimentation rate of 0.27 m/h, which requires a relatively small required specific densification surface area of 5.605 m<sup>2</sup>/t/h. The values obtained refer to an input pulp density of 1.284 t/m<sup>3</sup> and a solids content in the thickened product of 55%.

## ACKNOWLEDGMENT

This paper is a result of the Projects No. TR 33007 “Implementation of the Modern Technical, Technological and Ecological Design Solutions in the Existing Production Systems of the Copper

РБМ” и Пројекта ТР34025 “Развој еколошких поступака третмана штетних материја применом ферата (VI) и електрохемијске оксидације или редукције” које финансира Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Петровић Д., Свркота И., Стојадиновић С., Милић В., Пантовић Р., Милићевић Ж.: Рудно тело «Борска Река», будућност експлоатације у Борској Јами, Подземни радови 21, 2012, стр. 1–7.
- [2] Милић В., Свркота И., Петровић Д.: Фазно отварање рудног тела “Борска Река” (Phase development of the Borska Reka ore body), Рударски радови 1/2012, 2012, стр. 89–104.
- [3] Milić V., Svrkota I., Petrović D.: Analysis of current situation, possibilities and perspective of underground mining in Jama Bor. In: Proceedings of 43th International October Conference on Mining and Metallurgy 12–15 October, Kladovo, 2011, pp. 521–524.
- [4] Đurđevac Ignjatović Lj., Ignjatović D., Ljubojev M., Mitrović M.: Change the uniaxial compressive strength of paste backfill depending on change the parameters. Mining and Metallurgy Engineering Bor 1/2016, 2016, pp. 17–24.
- [5] Kržanović D., Ljubojev M., Jovanović I., Vušović N.: An analysis the effects of changes in price of metal and operating costs to the profit in exploitation the copper ore deposits, a case study: Copper mine Majdanpek, Serbia. Mining and Metallurgy Engineering Bor 3-4/2017, 2017, pp. 51–58.
- [6] Магдалиновић Н., Митровић З., Профировић С., Кржановић С.: Верификација процеса одводњавања концентрата бакра и пирита у флотацијама Бора и Великог Кривеља, Архива ИРМ Бор, 1985, 27 стр.

Mine Bor and Copper Mine Majdanpek” and No. 34025: “Development of Environmentally Friendly Methods for Treatment of Harmful Substances using Ferrate(VI) and Electrochemical Oxidation or Reduction”, funded by the Ministry of Education, Science and Technological Development of the Republic of Serbia.

## LITERATURE

- [1] Petrović D., Svrkota I., Stojadinović S., Milić V., Pantović R., Milićević Ž.: Rudno telo “Borska Reka”, budućnost eksploatacije u Borskoj Jami, Podzemni radovi 21, 2012, pp. 1–7 (In Serbian).
- [2] Milić V., Svrkota I., Petrović D.: Fazno otvaranje rudnog tela “Borska Reka” (Phase development of the Borska Reka ore body), Rudarski radovi 1/2012, 2012, pp. 89–104 (In Serbian).
- [3] Milić V., Svrkota I., Petrović D.: Analysis of current situation, possibilities and perspective of underground mining in Jama Bor. In: Proceedings of 43th International October Conference on Mining and Metallurgy 12–15 October, Kladovo, 2011, pp. 521–524.
- [4] Đurđevac Ignjatović Lj., Ignjatović D., Ljubojev M., Mitrović M.: Change the uniaxial compressive strength of paste backfill depending on change the parameters. Mining and Metallurgy Engineering Bor 1/2016, 2016, pp. 17–24.
- [5] Kržanović D., Ljubojev M., Jovanović I., Vušović N.: An analysis the effects of changes in price of metal and operating costs to the profit in exploitation the copper ore deposits, a case study: Copper mine Majdanpek, Serbia. Mining and Metallurgy Engineering Bor 3-4/2017, 2017, pp. 51–58.
- [6] Magdalinović N., Mitrović Z., Profirović S., Kržanović S.: Verifikacija procesa odvodnjavanja koncentrata bakra i pirita u flotacijama Bora i Velikog Krivelja, Arhiva IRM Bor, 1985, 27 str. (In Serbian).



ПРЕГЛЕД ТЕХНИЧКИХ РЕШЕЊА ЗА  
ПОДЗЕМНИ РУДНИК У ПРОЈЕКТУ „ЈАДАР“

REVIEW OF TECHNICAL SOLUTIONS FOR  
UNDERGROUND MINE IN PROJECT „JADAR“

DOI: 10.5937/RG2402073P

Стручни рад  
Expert Paper

Огњен Поповић<sup>1</sup>

Саша Јовановић<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Рударски институт д.о.о. Београд

<sup>2</sup> Факултет техничких наука,

Универзитет у Приштини, Косовска Митровица

ognjen.popovic@ribeograd.ac.rs

Ognjen Popović<sup>1</sup>

Saša Jovanović<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Рударски институт д.о.о. Београд

<sup>2</sup> Faculty of Technical Sciences,

University of Priština, Kosovska Mitrovica

ognjen.popovic@ribeograd.ac.rs

Примљен 5. јуна 2024; Рецензиран 6 децембра 2024; Прихваћен 9 децембра 2024.  
Received 5 June 2024; Received in revised 6 Decembre 2024; Accepted 9 Decembre 2024

**Сажетак:** Пројекат „Јадар“ је већ неко време у центру пажње, не само у Србији, већ и у Европи. Многе информације су тренутно неизвесне, што узрокује бројне погрешне интерпретације, као и изношење у јавности информације које нису проверене. Овај рад ће се фокусирају на предлоге техничких решења за подземни рудник, која укључују отварање рудника, припремне просторије, методе откопавања, ушвар и транспорт до површине, као и све додатне информације повезане с овим чињеницама, које су потврђене званичним документима објављеним од стране инвеститора или организација повезаних с њима. Овај рад неће обухватити никакву процену утицаја на животну средину и фокусираће се искључиво на инжењерска решења за подземни рудник.

**Кључне речи:** ПОДЗЕМНА ЕКСПЛОАТАЦИЈА, ЛИТИЈУМ, БОР, ПРОЈЕКАТ „ЈАДАР“

**Abstract:** Project “Jadar” has been center of attention for some time now, not just in Serbia, but in Europe. A lot of information is unknown currently, which causes a lot of misinterpretation, as well as some information that is unverified. This paper will focus on propositions of technical solutions given for an underground mine, which includes underground opening infrastructure, development work, preparation underground rooms, excavation method, load and transport method to the surface and all additional information connected to these facts, that are verified by official documents published by investors or organizations associated with them. This paper will not include any type of environmental impact assessment and will solely focus on engineering solutions for the underground mine.

**Key words:** UNDERGROUND MINING, LITHIUM, BORON, PROJECT „JADAR“

## УВОД

Пројекат „Јадар“ је планиран да се реализује у западном делу Србије, близу града Лознице. Укупна површина потребна за

## INTRODUCTION

Project “Jadar” is planned to be realized in western part of Serbia, near city of Loznica. The total area needed for mining activities is

рударске активности износи 854,8 хектара, што укључује инфраструктуру за приступ руднику, површинске објекте и сам подземни рудник. Само рудно лежиште је веома специфично, са ендемским минералом јадаритом ( $\text{LiNaSiB}_3\text{O}_7(\text{OH})$ ) као носиоцем овог лежишта. Из хемијске формуле може се видети да је то минерал литијума и бора, који су оба веома вредна у данашње време.

У распореду, лежиште има површину од  $12 \text{ km}^2$ , у којем су означена три нивоа (слоја) са јадаритом. Ове зоне се састоје од рудних тела која садрже јадарит, која су слојевито-сочивастог облика, са дубинама од 250-750 m. [1]

Дебљина рудних тела разликује се од једног до другог, али се генерално креће од 3,5 до 10 метара у вишим слојевима, са 10 до 50 метара у најнижем слоју, који је економски интересантан за ископавање. Количина истражених билансних минералних резерви износи 158647256 тона, са просечним садржајем  $\text{Li}_2\text{O}$  – 1,8% и  $\text{B}_2\text{O}$  – 14,8%.

## ПРИПРЕМНИ РАДОВИ

Просечна годишња производња рудника је 1,6 милиона тона, са максималном производњом од 1,8 милиона тона, што би обезбедило производњу од 286000 тона борне киселине, 58000 тона литијум-карбоната и 259000 тона натријум-сулфата.

С обзиром на то, са просечном дубином рудног тела од око 400 m, усвојен је систем два окна (транспортно и вентилационо) као начин отварања рудника. Транспортно окно је дубине 433,45 m, док је вентилационо окно дубине 380,3 метра. Транспортно окно има пречник од 8,5 m, док вентилационо окно има пречник од 6,5 m. Ова два окна су повезана спојним ходником који обезбеђује вентилацију. Овај ходник је дуг 182,6 m и има попречни пресек са димензијама 8x8 m (10x8 m на делу где је перионица). Ово је приказано на слици 1.

Као што се види на слици 1, основне припремне просторије су направљене као прстен око рудног тела, тако да се могу лако

854.8 ha, and that includes infrastructure for approach to the mine, surface objects for the mine and underground mine itself. Mine deposit is very specific, with endemic mineral jadarite ( $\text{LiNaSiB}_3\text{O}_7(\text{OH})$ ) as a main value of this deposit. It can be seen from chemical formula that the it is the mineral of lithium and boron, both very valuable in today's time.

In layout, mine deposit has an area of  $12 \text{ km}^2$ , in which are marked three levels (zones) with jadarite. These zones are consisted of ore bodies containing jadarite, which are layered-lens shaped, with depths of 250-750 m. [1]

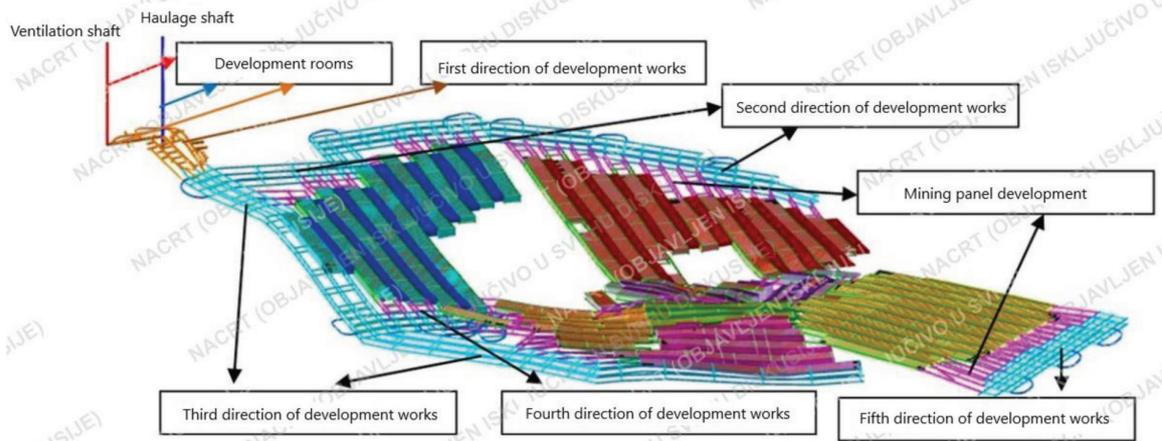
Thickness of ore bodies differ from one to the other, but it is generally around 3.5-10 meters in higher layers, with 10-50 meters in the lowest layer, which is economically interesting for excavation. Quantity of explored balance mineral reserves is 158647256 tons, with average content of  $\text{Li}_2\text{O}$  – 1.8% and  $\text{B}_2\text{O}$  – 14.8%.

## DEVELOPMENT WORKS

Average annual production of a mine is planned to be an average 1.6 millions of tons, with maximal production of 1.8 Mt, which would provide production of 286000 t of boric acid, 58000 t of lithium-carbonate and 259000 sodium-sulfate.

Taken that into consideration, with average depth of a ore body at around 400 m, system of two shafts (haulage and ventilation) is adopted as an opening method. The haulage shaft is 433.45 m deep, and ventilation shaft is 380.3 meters deep. Haulage shaft has a diameter of 8.5 m, while ventilation shaft has 6.5 m. These two shafts are connected with snicket gate that secures good ventilation. This gate is 182.6 meters long and has a cross-section with dimensions 8x8 m (10x8 m where the washer is). This can be seen on Figure 1.

As seen from the Figure 1, basic development rooms are made as a ring around an ore body, so that they can be easily expanded into mining panels. Every panel has four development



Слика 1, План рудника  
 Figure 1, Mine plan

проширити у ревиру. Сваки ревр има четири развојне просторије, две при подини и две при кровини рудног тела.

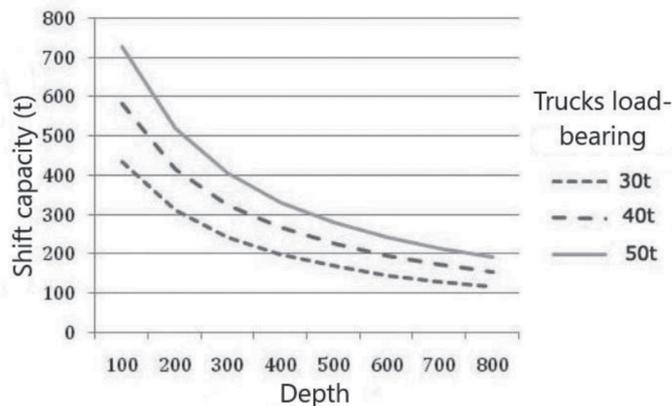
Два главна начина отварања рудника су рампа и вертикално окно. Приликом избора оптималног начина отварања, исплативост је главни фактор одлучивања. Потребно је пронаћи најјефтинији начин за отварање подземног лежишта минералних сировина, али да се задовоље одређени фактори. Главни фактори које треба узети у обзир при избору начина отварања су капацитет рудника и дубина рудног тела. Оба фактора су кључна за прорачун оптималног начина транспорта, а самим тим и за одређивање начина отварања. [2]

Када су камиони средство основног транспорта, капацитет драстично опада са повећањем дубине рудника (Слика 2).

rooms, two next to the footwall and two next to the hanging wall.

Two main ways of opening a mine are ramp and vertical shaft. When deciding for optimal opening method, the economy is the main decider. It is needed to find the cheapest way to open an underground ore body (bodies), but to satisfy some factors. The main factors that are needed to be taken into consideration when deciding method of opening an underground mine is the production of a mine and the depth of an ore body. Both factors are crucial to calculate optimal transport method, and by that to determine the best opening works. [2]

When the basic transport tools are trucks, capacity drastically falls with the depth of a mine (Figure 2).



Слика 2, Промена капацитета камиона са променом дубине  
 Figure 2, Capacity change with depth change

Са слике 2 види се да је капацитет транспорта камионима за лежишта на дубини од 400 м упола мањи у поређењу са рудним телима на дубини од 100 м. Такође се примећује да камиони са већом носивошћу имају већи дубински лимит на којем је транспорт камионима јефтинији од транспортног скип-окна. Инжењерска пракса генерално прихвата да је транспорт камионима конкурентан до дубине од 300 м и годишње производње од 300.000 тона, што су ниже вредности од оних коришћених у овом пројекту. Важно је помнути и могућност отварања рудника рампом уколико се користи континуално откопавање (или нека друга метода откопавања високог капацитета), чиме је употреба транспортних трака оправдана за аутоматизацију и убрзавање читавог процеса.

Једна ствар која може бити проблематична су димензије спојног ходника који спаја два окна, који се налази на дубини од око 380 м и има димензије 8x8 метара. Ове димензије су прилично велике за ову дубину, али с обзиром на то да нису дати подаци о спецификацији стенске масе, верује се да је процена стабилности стена правилно урађена.

Након завршетка радова на отварању и припреми и успостављања потребног вентилационог система путем пролазног ходника, изводе се радови на развоју рудног тела. Прва фаза обухвата изградњу просторија за приступ при подини, док друга фаза обухвата изградњу просторија за приступ при кровини. Висинска разлика између просторија у подини и просторија у кровини једнака је дебљини рудног тела, што је висина ревира (слике 3 и 4).

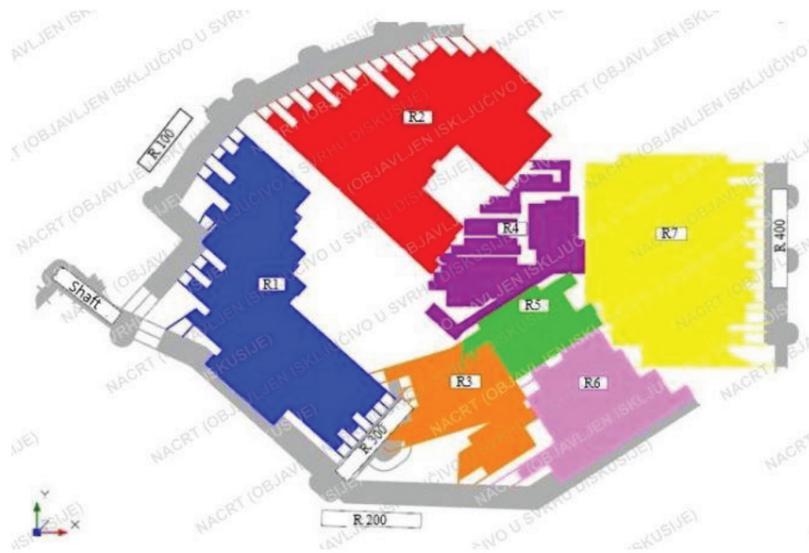
Као што се види, рудно тело је подељено на 7 ревира. Такође је закључено да су припремне просторије паралелне једна другој са висинском разликом која је једнака дебљини рудног тела. Овај развојни систем је познат у рударству, са спојним ходницима за вентилацију, и углавном се користи у експлоатацији угља методом широког чела, када се транспорт угља обавља транспортним тракама (слика 5). [3, 4]

From Figure 2, it is seen that capacity of truck transport for ore bodies at 400 m depth is twice as lower as for ore bodies at 100 m depth. It is also noted that trucks with higher load-bearing have a higher depth limit where the trucks transport is cheaper than skip shaft. It is generally accepted as an engineering practice that truck transport is competitive up to 300 m depth and annual production of 300000 t, which are lower values than values used in this project. Also worth mentioning is the capability of opening a mine with ramp if the mechanical (continual) excavation is used (or some other high capacity mining method), so that usage of conveyor belts is justified to automate and speed up the whole process.

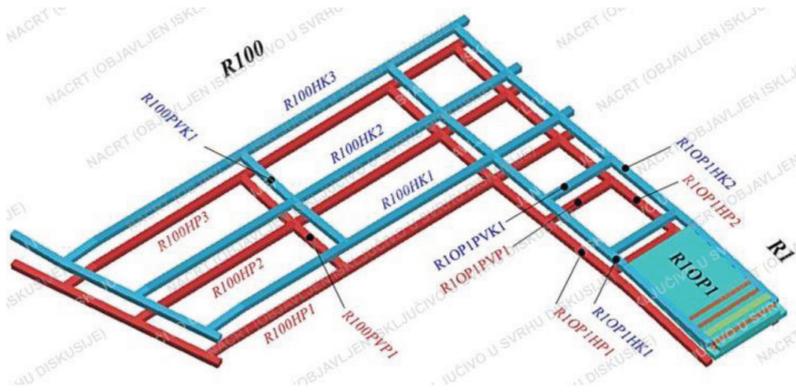
The one thing that can be problematic is dimensions of snicket gate, which is located at around 380 m of depth and has dimensions of 8x8 meters. These dimensions are quite big for this depth, but since no information is given about specification of rock mass, it is trusted that rock stability assessment is correctly done.

After opening works are done and required ventilation system established by snicket gate, ore body development works are done. The first phase consists of rooms construction to access next to the foot wall, while in the second phase rooms to access next to the hanging wall are constructed. The height difference between foot wall rooms and hanging wall rooms is equal to the thickness of ore body, which is the height of mining districts (Figures 3 and 4).

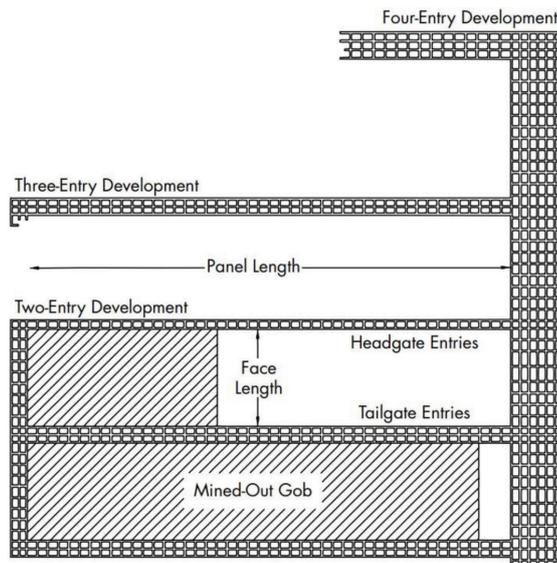
As seen, ore body is divided into 7 mining districts. It is also concluded that development rooms are parallel to each other with height difference that is equal to the thickness of ore body. This development system is familiar in mining, with connecting gates for ventilation, and it is used mostly in longwall coal mining, when the transport of coal is done by conveyor belts (Figure 5). [3, 4]



Слика 3, Подела лежишта на ревице  
 Figure 3, Mining districts



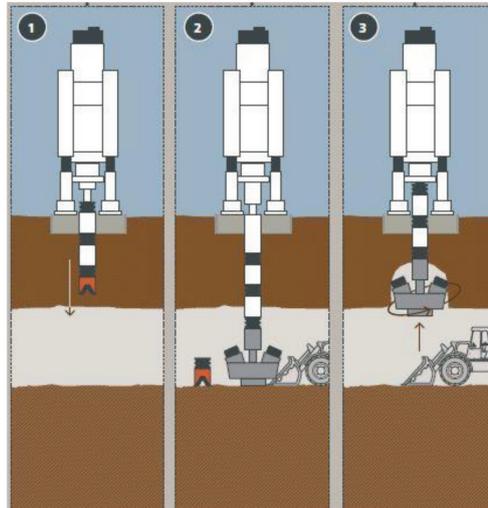
Слика 4, Пријемне просторије при кровини (плава боја) и при једини (црвена боја)  
 Figure 4, Development rooms next to the foot wall (red) and next to the hanging wall (blue) with mining panel



Слика 5, Широко чело и пријемни радови за ојкојавање уља  
 Figure 5, Longwall coal mining development

Окна су предвиђена да буду изграђена бушењем и минирањем, док ће вентилационе везе (пречника 3 м) бити изграђени “raise boring” методом, слика 6. [5]

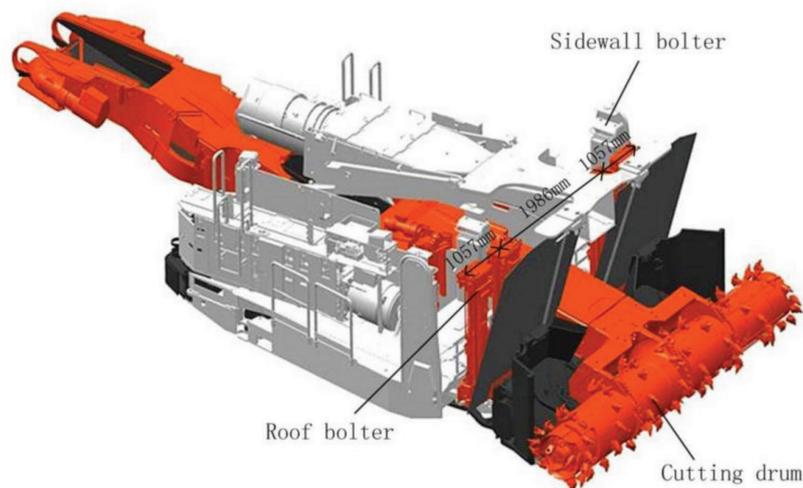
Shaft are predicted to be constructed with drill and blasting technology, while the vertical ventilation gates (diameter 3 m) will be done with raise boring method, Figure 6. [5]



Слика 6, Израда окна „Raise boring” методом  
Figure 6, Raise boring shaft construction

Планирано је да се израда хоризонталних и косих просторија до 15° врши и механизовано и методом бушења и минирања. Све просторије са попречним пресеком 5x5 m биће изграђене помоћу машине Continuous Bolter Miner (CBM) (слика 7). Просторије са мањом ширином биће рађене помоћу Roaheader-а или методом бушења и минирања. Просторије са висином већом од 6,2 м биће изграђене методом бушења и минирања у нивоима. Предвиђена подграда се састоји од анкера, челичне мреже и торкрет бетона.

Construction of horizontal and angled rooms up to 15° is planned to be both mechanized and drill and blasting. All rooms with cross-section 5x5 m would be done by Continuous Bolter Miner (CBM) machine (Figure 7). [6] Rooms with smaller width would be constructed with Roaheader or drilling and blasting. Rooms with height above 6.2 m would be constructed by drill and blasting in levels. Predicted support consists of anchors, steel mesh and guniting.



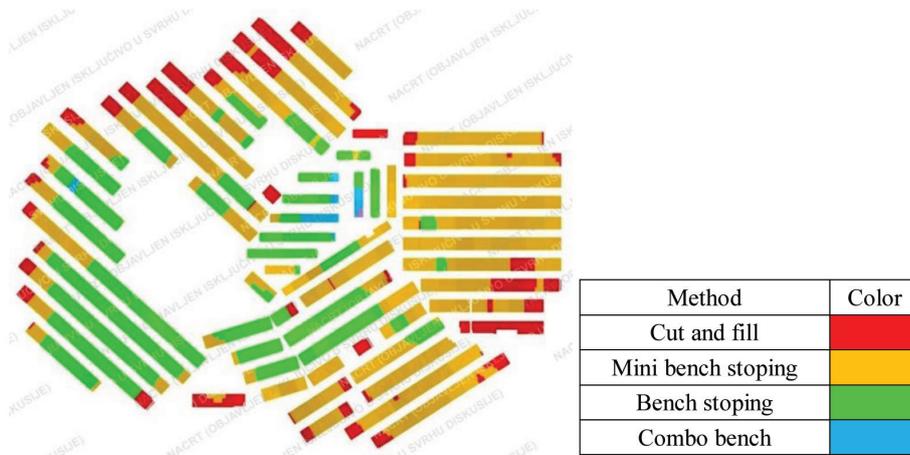
Слика 7, CBM машина фирме Sandvik  
Figure 7, CBM machine of Sandvik company

## МЕТОДЕ ОТКОПАВАЊА И ОДРЖАВАЊЕ РУДНИКА

Користиће се неколико метода откопавања, а имплементација ових метода зависи од висине откопа: метода етажног откопавања са засипавањем (3-8 m), метода панелног откопавања са засипавањем са нижим откопима (8-22 m), метода панелног откопавања са засипавањем са вишим откопима (22-32 m) и комбинована метода панелног откопавања са засипавањем (>34 m). Просторна примена ових метода приказана је на слици 8.

## EXCAVATION METHODS AND MAINTAINANCE

Several excavation methods will be used, and the implementation of these methods depends on height of a face.: cut and fill (3-8 m), mini bench stoping (8-22 m), bench stoping (22-32 m) and combo bench (>34 m). Spatial application of these methods is shown in Figure 8.



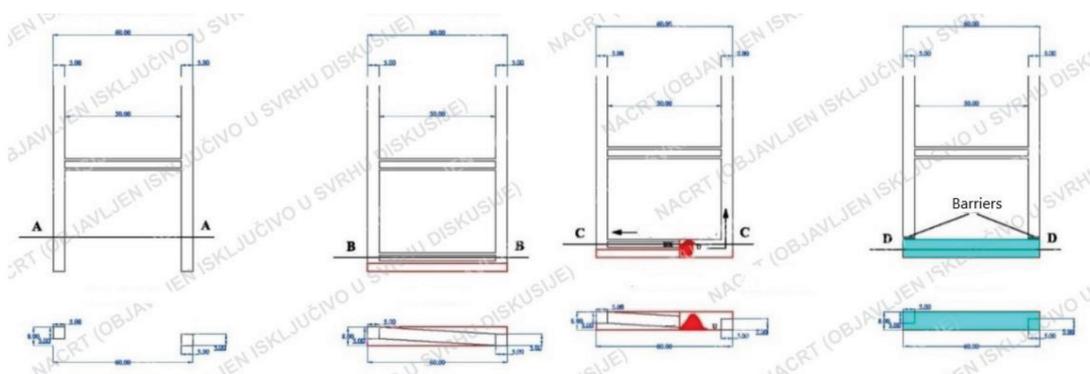
Слика 8, Просторна примена метода откопавања  
 Figure 8, Spatial application of excavation methods

Слика такође показује да је рудно тело најтање на ободима, док се његова дебљина повећава према средини рудног тела.

The figure also shows that the ore body is the thinnest around the edges, while its thickness increases towards the middle of ore body.

Метода етажног откопавања са засипавањем предвиђена је за делове рудног тела чија је дебљина максимално 8 m и са максималном ширином чела 60 m (слика 9).

Cut and fill method is foreseen to be used for parts of ore body which thickness is maximum 8 m and will have a face with a width of 60 m (Figure 9).

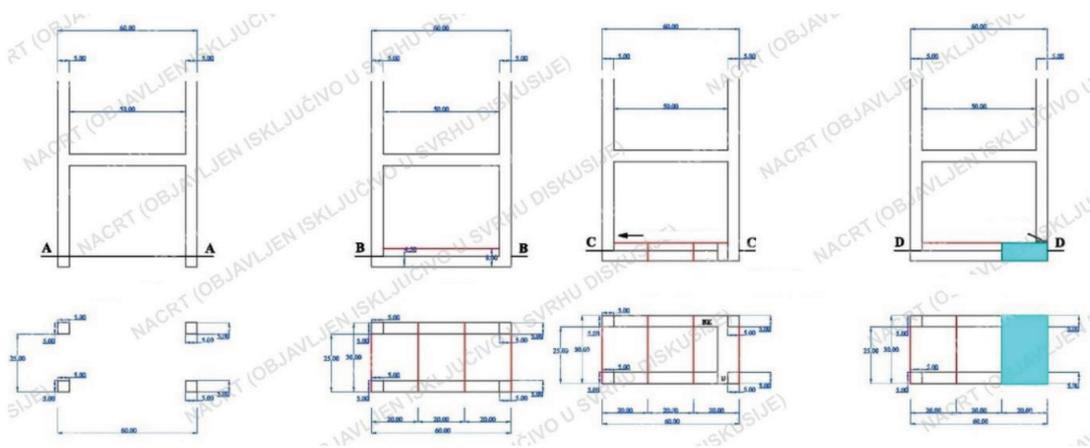


Слика 9, Метода етажног откопавања са засипавањем  
 Figure 9, Cut and fill excavation method in this mine

Пошто постоји много варијација ове методе, која је примењива за широк спектар рудних тела, њено главно ограничење је цена засипа (везивни агенси, транспорт, постављање, цевоводи итд.). Ове околности значе да се ова метода користи када је вредност руде висока и када се висок коефицијент ископишћења са минималним осиромашењем, тако да се рудно тело не може економски оправдано откопати методама са зарушавањем. [4]

У овом случају, етажно откопавање са засипавањем подразумева да су изведена два приступна ходника с обе стране чела. Један ходник је изведен у кровини, а други у подини. Ова два ходника су затим повезана рампом, чиме се формира чело висине 8 m. Уз напредовање, ископани простор се попуњава засипом.

Панелно откопавање са засипавањем се користи за висине веће од 8 метара, уз мале варијације. Главна идеја је да се рудно тело подели на панеле, са различитим димензијама које су условљене димензијама рудног тела (слика 10).



Слика 10, Панелно откопавање са засипавањем  
Figure 10, Cut and fill excavation method in this mine

Четири ходника су изведена са висинском разликом од 20 m и хоризонталним размаком од 50 m. Панел се затим ископава блок по блок, са димензијама блока 30x20 m. Цео панел се ископава одједном, а затим се попуњава пастом. Минимално 14 дана је потребно да паста очврсне. Ископавање се обавља лепезастим бушењем из горњег ту-

Since there are a lot of variations of cut and fill method, which is a method applicable to a wide variety of ore bodies, its main restraint is the cost of fill material (binding agents, transport, placement, pipelines etc.). These conditions means that this method is favored when the ore value is high and the high recovery rate with minimal dilution can't be done by stoping or caving methods. [4]

In this case, two access drifts were done on both sides of the face. One drift is done in hanging wall, and the other in the footwall. These two drifts are then connected with a ramp which then forms a face with height of 8 m. With a progression, excavated space is filled with some type of filling material.

Bench stoping is a variation of sublevel stoping method. This method is used with height higher than 8 meters, with small variations. The main idea is to divide the ore body into sections, with different dimensions conditioned by ore body dimensions (Figure 10).

Four drifts are done with vertical distance of 20 m and horizontal distance of 50 m. The section is then excavated block by block, with block dimensions of 30x20 m. The whole section is excavated at once and then filled with paste. Minimal 14 days is the time needed for paste to harden. The excavation is done with ring drilling from upper drift.

нела. Анкери се користе у горњим тунелима за осигурање крова.

Пошто је речено да ће дебљи делови рудног тела бити ископавани у панелима, који могу бити више од 34 m високи (максимална висина није наведена), може доћи до проблема са стабилношћу стенског масива. Геомеханичке карактеристике стенске масе нису објављене широј јавности, а цела просторија ширине 60 m и висине 34+ m би остала без потпоре (осим анкера у крову) минимум 14-28 дана (колико је потребно да паста засип очврсне). Поред тога, паста засип никада не може попунити целу запремину откопаног слоја. Узевши у обзир ове факторе, морају се извршити детаљни и пажљиви прорачуни и процене како би се предвидело понашање стена у овим условима.

Утовар и транспорт су планирани да се обављају подземним утоваривачима и камионима од чела до транспортног окна (скипова). Планирано је да скипови раде 335 дана годишње, 20 сати дневно. Рад ће се обављати у 3 смене, са ефективним радним временом од око 6,5 сати.

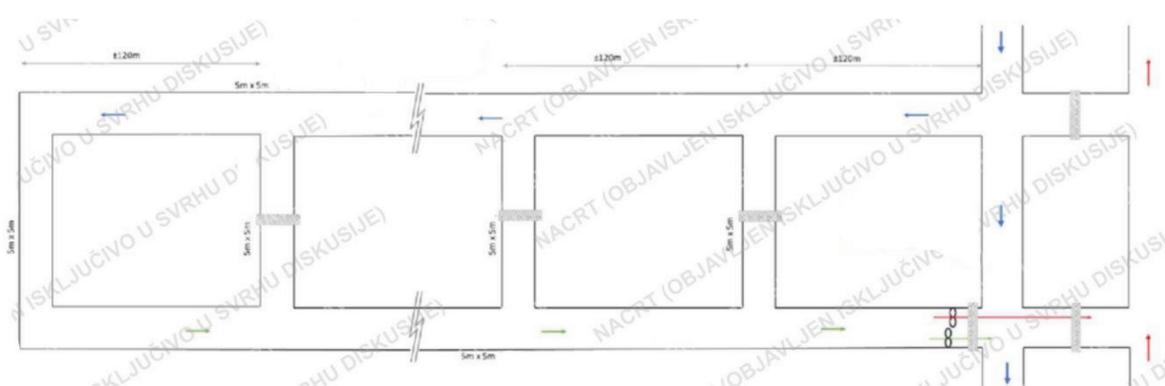
Вентилација је планирана као вентилација по потреби, са циљем да се одређени (радни) делови рудника снабдеју свежим (охлађеним) ваздухом, пошто је хлађење неопходно да би се испоштовали српски прописи у погледу максималне температуре у подземним рудницама. Панели ће имати веома сличан вентилациони систем као рудници угља (слика 11).

Anchors are used in upper drifts to secure the roof.

Since it is said that thicker parts of the ore body will be excavated in sections, which can be more than 34 m high (maximum height is not specified), a problem with rock stability may occur. The exact specification of rock is not shared with the public, and the whole room with 60 m width and 34+ m height would be unsupported (except for roof anchors) for minimum 14-28 days (how long is needed for paste to harden). Besides that, paste can never fill the whole excavated section. Taken that into consideration, detailed and careful calculations and estimations must be done to predict rock behavior under these circumstances.

Underground loading and transport are planned to be by underground loaders and trucks from faces to the haulage shaft (skips). It is planned that skips work 335 days/year, 20 hours/day. Work would be done in 3 shifts, with effective work time of around 6.5 hours.

Ventilation is planned to be as ventilation on demand which has the goal to supply some (working) parts of an underground mine with fresh (cooled) air, since the cooling is necessary to comply with Serbian regulations in terms of maximum temperature in underground mines. Sections will have very similar ventilation system as coal mines (Figure 11).



Слика 11, Вентилација панела  
Figure 11, Section ventilation

Вентилациона врата се користе за усмеравање свежег ваздуха. Пошто је планирано да максимална производња буде 2046. године, вентилација би у том тренутку била најзахтевнија. Планирани проток ваздуха је 500 m<sup>3</sup>/s, са 2 главна вентилатора са притиском-депресијом од 4,2 kPa и комбинованом снагом од 2800 kW.

Вреди напоменути да је планирано коришћење потпуно електричних подземних возила, с обзиром на проблеме са температурама у том подручју, што би у великој мери смањило захтеве вентилације.

Пошто се рудник налази у плавном подручју, где је терен с времена на време поплављен, одводњавање је такође важно техничко питање. Основна концепција је да се обезбеди довољан капацитет за одводњавање рудника у најгорем сценарију (поплава). Утврђено је да је проток воде око 38 l/s. Планирано је да систем одводњавања буде састављен од једне главне пумпне станице (постављене у близини транспортног окна) и 8 ободних пумпних станица распоређених кроз рудник. Максимални проток воде у главној пумпној станици је 58 l/s, а 30 l/s по ободној станици. Укупна динамичка висина за главну пумпну станицу је 450 m, а 156 m по ободној станици. Главна пумпна станица има 6 пумпи, док свака прстенаста пумпна станица има 3 пумпе.

## ЗАКЉУЧАК

Техничка решења за подземни рудник пројекта „Јадар“ нису много различита од техничких решења многих других подземних рудника широм света. У овом раду истакнути су потенцијални проблеми као што су стабилност стенског масива и димензије просторија, при чему геомеханичке карактеристике стенске масе тренутно нису познате широј инжењерској јавности. Важно је напоменути да се процене не могу извршити без детаљних карактеристика стенске масе, тако да је овај закључак заснован не на познатим чињеницама, већ на инжењерском искуству. Већина података и чињеница о овом пројекту већ је објављена у нацрту Студије о процени утицаја на животну сре-

Air-doors are used to direct fresh air. Since the uniform maximum production is planned to be in 2046., ventilation demand would be highest at that point. Air flow is planned to be 500 m<sup>3</sup>/s, with 2 main ventilators with a pressure-depression of 4.2 kPa and combined power of 2800 kW.

It is worth mentioning that fully electrical underground vehicles are planned to be used, given the problems with temperatures at that area, which would immensely lower demands of ventilation.

Since the mine is located in a floodplain, where the area has been flooded from time to time, dewatering is also an important technical solution. Basic conception is to have enough capacity to dewater the mine in the worst-case scenario (flood). It is determined that the inflow of water is around 38 l/s. The dewatering system is planned to be made from one main pump station (located near haulage shaft) and 8 ring pump stations scattered through the mine. Maximum water flow in main pump station is 58 l/s and 30 l/s per ring station. Total dynamic head for main pump station is 450 m and 156 m per ring station. Main pump station has 6 pumps, while every ring pump station has 3 pumps.

## CONCLUSION

Technical solutions for underground mine of project “Jadar” are not that different from technical solutions of many other underground mines across the world. In this paper, the potential problems are highlighted as rock stability and room dimensions, with the rock specification currently unknown to the broad engineering public. It is important to mention that the evaluations can't be done without extensive specification of rock mass, so this conclusion is not based on known facts, just on engineering experience. The most figures and facts about this project is already published in the draft of Environmental impact assessment [1]. Technical solutions are based on references given in the said Assessment (f.e. SRK – Early Access Study, 2011.; Prefeasibility studies A and

дину [1]. Техничка решења су заснована на референцама наведеним у поменутој Студији (нпр. SRK – Прелиминарна студија, 2011.; Префизибилити студије А и Б итд.), али ове референце нису доступне јавности.

Веома је важно нагласити да је Студија о процени утицаја на животну средину у овом стадијуму нацрт, објављен како би се подстакла дискусија, што значи да техничка решења дата у њој нису коначна, већ само предлог.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Faculty of Mining and Geology, University of Belgrade: Studija o proceni uticaja na životnu sredinu projekta podzemne eksploatacije ležišta litijuma i bora Jadar, postrojenja za obogaćivanje rude i odlaganje jalovine pri rudarskim aktivnostima – nacrt teksta studije, 2024.
- [2] Torbica S., Lapčević V.: Metode podzemnog otkopavanja, Faculty of Mining and Geology, University of Belgrade, 2020.
- [3] Genčić B.: Tehnološki procesi podzemne eksploatacije slojevitih ležišta, University of Belgrade, 1972.

B etc.), but these references are not available to the public.

It is very important to underline that the Environmental impact assessment is a draft at this stage, published to encourage discussion, which means that technical solutions given in it are not final, but just a proposition for now.

## LITERATURE

- [4] Darling P.: SME Mining Engineering Handbook, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc., 2011.
- [5] Master Drilling, <https://www.masterdrilling.com/services/raise-boring/>
- [6] Xie Z., Zhang Nong, Qian D., Han C., An Y., Wang Y.: Rapid Excavation and Stability Control of Deep Roadways for an Underground Coal Mine with High Production in Inner Mongolia, Sustainability, MDPI, 10/1160, 2018. DOI: 10.3390/su10041160.



ИЗ ИСТОРИЈЕ РУДАРСТВА СРБИЈЕ  
РУДНИК КАМЕНОГ УГЉА ДОБРА СРЕЋА 1884 – 1970.

FROM THE HISTORY OF SERBIAN MINING  
HARD COAL MINE DOBRA SREĆA 1884 – 1970.

DOI: 10.5937/RG2402085M

Приказ

Expert Review

Светомир Максимовић  
Марко Бабовић  
Академија инжењерских наука Београд,  
Србија  
АД „Електропривреда Србије“, Србија  
svetomir.maksimovic@gmail.com

Svetomir Maksimović  
Marko Babović  
Academy of Engineering Sciences of Serbia,  
Serbia  
Joint stock company „Elektroprivreda Srbije“, Serbia  
svetomir.maksimovic@gmail.com

Примљен 26 септембра 2024; Рецензиран 9 децембра 2024; Прихваћен 9 децембра 2024.  
Received 26 Septembre 2024; Received in revised 9 Decembre 2024; Accepted 9 Decembre 2024

**Сажетак:** Овај рад је настао као резултат потребе да се укаже на потешкоће са којима се сусретала угљарска привреда Србије, почев од периода својег настајања 1835. (рудник угља Милица, код Деснојовца), па до момента када су многи рудници са подземном експлоатацијом угља затворени због ниске цене нафте и гаса, тешких услова рада и недовољне изражености. При писању овог рада највећим делом коришћена је postojeћа литература: Ј. Грѓашевић, Рударство у Србији, В. Симић, Развој угљенекоја и угљарске привреде у Србији, П. Јовановић, Рударство на тлу Србије II/1 и Геолошки услови терена између Подвиса и Добре Среће и перспективни развој ових рудника, Рударски институт Београд. Такође смо делом користили документацију којом је располагала породица Сибиновић и која до сада није објављивана.

**Кључне речи:** ИСТОРИЈА РУДАРСТВА, ПОДЗЕМНА ЕКСПЛОАТАЦИЈА, УГЉ, ПРЕДУЗЕТНИШТВО

**Abstract:** This paper was created as a result of the need to point out the difficulties faced by the coal economy of Serbia, starting from the period of its creation in 1835. Until the moment when many mines with Kama coal exploitation were closed due to the low price of oil and gas, difficult conditions work and insufficient research. When writing this paper, the existing literature was mostly used: J. Grgašević, Mining in Serbia, V. Simić, Development of coal mines and coal industry in Serbia, P. Jovanović, Mining on the soil of Serbia II/1 I Geological conditions of the terrain between «Podvis» and «Good luck» and prospective development of these mines, Mining Institute Belgrade. We also partially used the documentation that was available to the Sibinović family and which has not been published until now.

**Key words:** HISTORY OF MINING, PIT EXPLOITATION, COAL, ENTREPRENEURSHIP

## УВОД

Подземни рудник угља Добра Срећа налази се у селу Вини 12 km од Књажевца, односно

## INTRODUCTION

The Dobra Sreća underground coal mine is located in the village of Vini, 12 km from

5 km од Ргошке бање. Са утоварном железничком станицом Језава” на прузи Ниш – Прахово, био је повезан пругом дугом 12,7 km, уског колосека ширине 60 cm. Спада у ред већих подземних рудника каменог угља у Србији (слика 1). Отворен је крајем XIX века, као и већина рудника са подземном експлоатацијом угља.

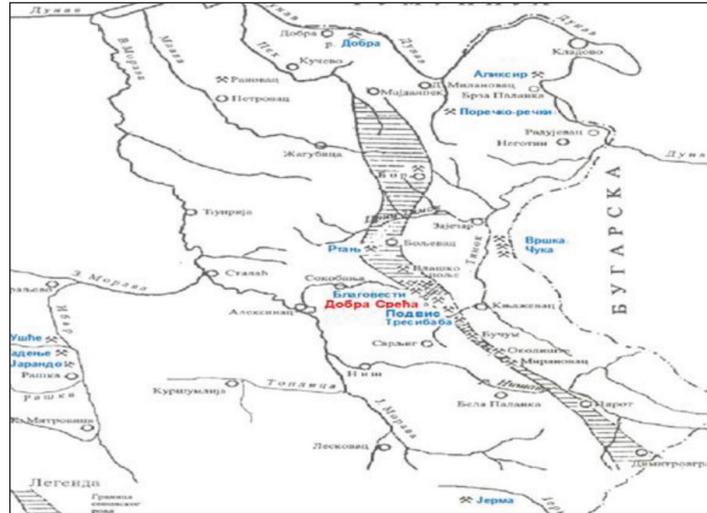
Рудници угља отворани су за потребе Топливнице у Крагујевцу, бродова на парни погон на Дунаву, војних гарнизона, ковачница и за потребе локалног становништва. Почетак рада већине рудника одвијао се у веома тешким природним и друштвеним условима. Скромна сазнања, непостојање искусних рудара, а највећи проблем, у то време, је био непостојање путне инфраструктуре. Пласман угља је био ограничен на веома мали простор, а напредовање рудника се одвијало споро, са великим трошковима и повременим затварањима у ишчекивању бољих услова. Како је производња угља битно покренула остале привредне гране, тако је порасло и интересовање државе да финасира у путну инфраструктуру и руднике у државном власништву.

У местима где су отворени рудници започео је један нови живот. Отворане су амбуланте, школе, млинови, ковачнице, локална железница, ливнице, електро – машинске радионице, продавнице и други објекти. Током Првог и Другог светског рата рудници су уништавани што од стране непријатеља при напуштању Србије, а неке је запалила и минирала наша војска како би се избегло снабдевање непријатеља угљем. После Другог светског рата приватни рудници су конфисковани и њима надаље управља држава. Појава јефтине нафте и гаса, изградња великих површинских копова угља у Србији, шездесетих и седамдесетих година XX века утицали су на затварање великог броја рудника са подземном експлоатацијом угља. Из истих разлога, до 1972. затварани су и рудници у књажевачком крају. Затворени су и због нерентабилности, јер железница, која је била највећи купац, више није користила угљ као погонско гориво. Међу њима затворен је и рудник каменог угља Добра Срећа.

Knjaževac, i.e. 5 km from the Rogoška spa. It was connected with the “Jezava” loading railway station on the Niš – Prahovo by a 12.7 km long railway line, 60 cm wide narrow track. It is one of the largest underground hard coal mines in Serbia (Figure 1). It was opened at the end of the 19th century like most underground coal mines.

Coal mines were opened for the needs of the Smeltery in Kragujevac, steam-powered ships on the Danube, military garrisons, forge shops and for the needs of the local population. The beginning of the operation of most mines took place in very difficult natural and social conditions. Modest knowledge, lack of experienced miners, and the biggest problem, at that time being the lack of road infrastructure. Coal placement was limited to a very small area, and mining progress was slow, with high costs and occasional closures pending better conditions. As the production of coal significantly boosted other industrial branches, so did the state's interest in financing road infrastructure and state-owned mines.

In the places where the mines were opened, a new life began. Health centres, schools, mills, forge shops, local railways, foundries, electro-mechanical workshops, shops and other facilities were opened. During the First and Second World Wars, the mines were destroyed by the enemy when leaving Serbia, and some were set on fire and blasted by our army in order to avoid supplying the enemy with coal. After the Second World War, private mines were confiscated and are still managed by the state. The phenomenon of cheap oil and gas, construction of large surface coal mines in Serbia in the 1960s and 1970s led to closure of a large number of underground coal mines. For the same reasons, until 1972, the mines in the Knjaževac region were also closed. They were also closed due to unprofitability, because the railway, which was the biggest customer, no longer used coal as fuel. Among them, the Dobra Sreća coal mine was closed.



Слика 1, Положај рудника каменој угља  
(Добра Срећа, Подвис и Тресибабa)  
Figure 1, Location of the hard coal mine  
(Dobra Sreća, Podvis and Tresibaba)

#### ОСНОВНЕ ГЕОЛОШКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ ЛЕЖИШТА УГЉА

У Сенонском рову источне Србије најпознатији рудници са подземном експлоатацијом каменој угља су: Ртањ, Влашко Поље, Благовести, Добра Срећа, Подвис и Тресибабa. Највећи међу њима је угљенокоп Ртањ па затим рудник Добра Срећа.

Дебљина угљоносне серије износи у просеку од 900 m до 1.000 m . Главни угљени слој се налази приближно у средини ове серије [1]. Бројни су угљени слојеви у самој угљоносној серији. Једино је сигурно, на основу досадашњих проучавања, да се угаљ не јавља у иноцерамским лапорцима као ни у „црвеним слојевима“. Сви остали чланови ове серије садрже по један, а некад и знатно више угљених слојева без економске вредности. Они су интересантнији при проучавању седиментационих и климатских услова који су постојали за време настанка угља [1].

Са привредног аспекта, на терену Подвиса и Добра Среће, једино је од економског интереса главни угљени слој. Његова просечна дебљина је 2 m до 3 m. Постоје знатна локална задебљања која прелазе и 20 m, а нису

#### BASIC GEOLOGICAL CHARACTERISTICS OF COAL DEPOSITS

In the eastern Serbian Senonsko trench the most famous hard coal underground mines are: Rtanj, Vlaško Polje, Blagovesti, Dobra Sreća, Podvis and Tresibaba. The largest among them is the Rtanj coal mine followed by the Dobra Sreća mine.

The thickness of the coal series is on average of 900 m to 1,000 m. The main coal seam is located approximately in the middle of this series [1]. There are numerous coal seams in the coal series itself. The only thing that is certain, based on studies so far, is that coal does not occur in inoceramus-marls, nor in “red seams”. All other members of this series each contain one, and sometimes considerably more, coal seams without economic value. They are more interesting when studying the sedimentation and climatic conditions that existed during the formation of coal [1].

From an economic point of view, in the area of Podvis and Dobra Sreća, the main coal seam is the only one of economic interest. Its average thickness is from 2 m to 3 m. There are significant local thickenings that exceed 20 m, and completely sterile zones are not rare. All

ретке и потпуно стерилне зоне. Све то даје угљу изразито сочивасти облик [1].

Рудник Добра Срећа у подини својих угљева располаже резервама угљних шкриљаца о којима нема значајнијих података јер нису били предмет одговарајућег истраживања.

## ИСТОРИЈСКИ ПРИКАЗ РУДНИКА

Први власник овог рудника био је Стеван Сибиновић, рођен 1850. Након завршена два разреда основне школе, посветио се браварско – ковачком занату. Међу првима, је био који је свој еснап куповао у иностранству. Са 30 година је отпутовао у Пешту, обилазио пештанске фабрике и видео употребу каменог угља. Отуда су сва његова радозналост и упорност усмерене ка истраживању постојања фосилног горива у близини Књажевца [2].

Након доласка у Књажевац, удружио се са десеторицом другова уложивши, свако по 10 дуката (тадашњих 1200 динара). Тако је основано акционарско друштво под именом Књажевачко рударско друштво са посебним интересовањем за фосилни угаљ. Друштво је брзо престало са радом због недостатка финансијских средстава и целокупна даља активност на отварању рудника Добра срећа свела се на првог власника Стевана Сибиновића [2].

Почетни неуспеси на истраживању терена нису га обесхрабрили и он је 1885. затражио искључиво право истраживања и затим повластицу на 20 рудних поља. Успео је да добије само 10 рудних поља те исте године. Даља његова истраживања укључују једног радника који је раније радио на отварању рудника Вршка Чука. Уз његову помоћ отворен је поткоп „3“ и дошло се до слоја угља дебљине 8 m. Након тога отворени су поткоп „1“ и пресечан један мањи слој угља и поткоп „2“ у дужини од 120 m којим је пресечен слој угља дебљине од 6 m до 7 m. До 1906. застали су радови због оскудице у превозним средствима и скупог превоза, производња угља није била рентабилна. Стеван Сибиновић је потрошио сав свој иметак и остао без свеукупне зараде. Отварањем радова на

this gives the coal a distinctly lenticular shape [1].

The Dobra Sreća mine has reserves of oil shale in the floor of its coals, on which there is no significant data because they were not the subject of corresponding research.

## HISTORICAL DESCRIPTION OF THE MINE

The first owner of this mine was Stevan Sibirnović, born in 1850. After completing two grades of elementary school, he dedicated himself to the locksmith and blacksmith trade. He was among the first to buy his eSnap abroad. At the age of 30, he travelled to Pest, visited the Pest factories and saw the use of hard coal. Hence, all his curiosity and persistence were directed towards researching the existence of fossil fuel near Knjaževac [2].

After arriving in Knjaževac, he teamed up with ten friends, each investing 10 ducats (1200 dinars at the time). Thus, a joint-stock company was founded under the name of Knjaževac mining company with special interest in fossil coal. The company quickly stopped working due to lack of financial resources and all further activities on the opening of the Dobra sreća mine came down to the first owner, Stevan Sibirnović [2].

Initial failures in exploring the terrain did not discourage him, and in 1885 he claimed the exclusive right to explore and later on the privilege to own 20 ore fields. He managed to get only 10 ore fields that same year. His further research included a worker who used to work on the opening of the Vrška Čuka mine. With his help, underground mine “3” was opened and an 8 m thick coal seam was reached. After that, edit “1” was opened and a smaller coal seam was cut, and also edit “2” being 120 m in length, cutting a coal seam with a thickness of 6 m to 7 m. Until 1906, the works stopped due to the lack of transport means and expensive transport and therefore coal production was not profitable. Stevan Sibirnović spent all his assets and was left with no earnings. With the opening of works on the Knjaževac – Niš railway line in 1906,

железничкој прузи Књажевац – Ниш, 1906. створили су се услови за наставак радова у руднику.

Рудник је радио са прекидима због Балканских ратова, све до краја 1915. Доласком Немаца у Тимочка Крајину, они преузимају све руднике и интензивирају производњу. Од рудника Добра Срећа до Књажевца, 1917. изграђен је нов пружни колосек. Пред краја рата, Немци су упалили и потпуно уништили рудник.

Позајмљени капитал омогућио им је да обнове рудник, отпочели су радове са поткопом „4“ и тако дошли до слоја угља који је омогућио даљи развој рудника са рентабилном производњом. Рудник се брзо опоравља и 1926. су изграђени брикетирница капацитета 12 t/h, пралиште и сушара. Створени су услови да рудник може понудити тржишту већи асортиман производа: орах, ковачки, ситни угаљ и брикет [2].



Слика 2, Колонија са њрвим њошкoјoм  
Извор: документација њорoдице Сибиновић,  
Београд, 2009.

Figure 2, Colony with the first excavation  
Source: documentation of the Sibinović family, Belgrade,  
2009.

Сибиновићи су били власници рудника све до 1946/1947. када им је сва имовина конфискована и пренета у својину државе Федеративне Народне Републике Југославије.

Инфраструктура рудника до краја Другог светског састојала се од следећих некретнина:

conditions were created for continuation of work in the mine.

The mine worked with interruptions due to the Balkan wars, until the end of 1915. With the arrival of the Germans in Timočka Krajina, all the mines were taken over by them and production was intensified. From the Dobra Sreća mine to Knjaževac, a new railway track was built in 1917. Towards the end of the war, the Germans set fire to it and completely destroyed the mine.

The borrowed capital enabled them to rebuild the mine; they started work with the edit “4” and thus reached the coal seam that enabled further development of the mine with profitable production. The mine recovered quickly and in 1926 a briquetting plant with a capacity of 12 t/h, a washing chamber and a drier were built. Conditions were provided so that the mine could offer the market a larger range of products: nut-sized coal, forged, small coal and briquettes [2].



Слика 3, Рудник Добра Срећа у Вини,  
Извор: Завичајни музеј, Књажевац

Figure 3, Dobra Sreća Mine in Vina,  
Source: Native Museum, Knjaževac

The Sibinović family were the owners of the mine until 1946/1947. when all their property was confiscated and transferred to the state property of the Federal People's Republic of Yugoslavia.

The infrastructure of the mine until the end of the Second World War consisted of the following properties:

- Објекти: електрична централа са целокупним постројењем, прашиште са постројењем, радионице, ливница, магацин животних намерница, канцеларије извозног окна, млин, резервоар за воду, извозна машина, пекара, мерништво, кречана, магацин за уље, ложионица, купатило, станови за раднике, касапница са пушницом, кафана, амбуланта, штала, шупа за дизалицу итд.
- Машине и алати: браварска радионица, ковачка радионица, машинаска радионица, електричарска радионица, столарска радионица, алатница, разне машине ван погона, прашиште, јамски инвентар, млин за млевење жита, далековод Вина – Књажевац и Вина – Благовести, возни парк итд. [3].
- Facilities: electrical power station with complete plant, washing chamber with plant, workshops, foundry, warehouse of food provisions, offices of the export shaft, mill, water tank, export machine, bakery, surveying, lime-burning factory, oil warehouse, boiler room, bathroom, apartments for workers, a butcher's shop with a smokehouse, tavern, health care centre, barn, crane shed, etc.
- Machines and tools: locksmith's workshop, blacksmith's workshop, mechanical workshop, electrical workshop, carpentry workshop, tool room, various out-of-service machines, washing facility, pit inventory, grain grinding mill, power line Vina – Knjaževac and Vina – Blagovesti, car fleet, etc. [3].

На угљенокопу је радило просечно од 500 до 600 радника. Радовима је руководио директор, рударски и електромашински инжењер, пословођа, мерач, три главна и дванаест сменских надзорника. Већи део производње је пласиран државним железницама [2].

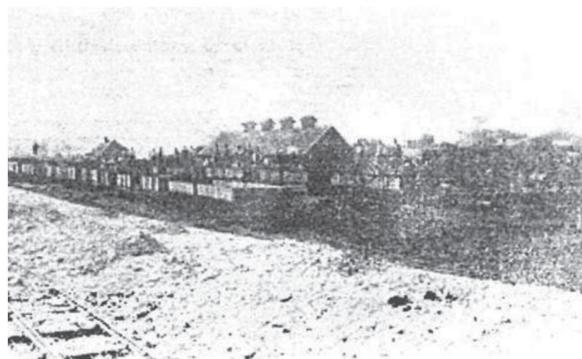


Слика 4, Рудничка колонија  
Figure 4, Mining colony

Неки објекти рудника Добра Срећа су и данас сачувани. Породична кућа власника рудника Добра Срећа Сибиновића саграђена 1906. сада је завичајни музеј општине Књажевац (слика 6).

Улаз у рудник Добра Срећа, место окупљања и подсећања рудара, њихових породица и туриста (слика 7).

An average of 500 to 600 workers worked at the coal mine. The works were managed by the director, a mining and electrical and mechanical engineer, a foreman, a surveyor, three main and twelve shift supervisors. Most of the production was marketed by state railways [2].



Слика 5, Утоварна станица код Вујашевца  
Figure 5, Loading station near Vujaševac

Some facilities of the Dobra Sreća mine are still preserved today. The house of the Sibinović family, who was the owner of the Dobra Sreća mine, built in 1906, is now the local museum of the municipality of Knjaževac (Figure 6).

The entrance to the Dobra Sreća mine, a gathering and memorial place for miners, their families and tourists (Figure 7).



Слика 6, Породична кућа Сибиновића, данас Завичајни музеј у Књажевцу  
Figure 6, The house of the Sibinović family, today the local museum in Knjaževac



Слика 7, Улаз у рудник Добра Срећа  
Извор: аутори рада (снимљено 2024.)  
Figure 7, Entrance to the Dobra Sreća mine  
Source: authors of the paper (recorded in 2024)

## РУДАРСКЕ АКТИВНОСТИ

Радови на отварању рудника почињу 1886. а подаци о производњи постоје од 1890. Управо те године је произведено 214,5 тона са ценом од 18 динара по тони. Угаљ је продаван војном гарнизону у Књажевцу и крагујевачкој фабрици оружја за ковачнице. Даља будућност рудника је зависила преваходно од саобраћајне инфраструктуре и превозних средстава. Потребе за угљем у Књажевцу су биле мале, а дужи превоз је био нерентабилан. У 1902. произведено је 400 тона угља по поручбини књажевачког гарнизона, а следеће 1903. 250 тона са четири запослена радника. У 1906. произведено је 340,5 тона угља са пет радника. Од 1907. до 1910. производило се од 600 тона до 800 тона годишње [2].

Током Првог светског рата Немци су из овог рудника извукли око 40.000 тона угља. Како се угаљ могао добро коксовати Немци су намеравали да из овог рудника снабдевају Борски рудник коксом. Након завршетка Првог светског рата рудник је брзо враћен у производњу и 1919. производи 4.560 тона угља. У 1922. произведено је 19.618 тона са 534 радника. Од 1923. до 1930. нема података о раду рудника [2].

Брикетирница је подигнута 1926. капацитета 12 t/h. Од постројења рудник располаже са пралиштем капацитета 30 t/h. Подигнута је и сушара 1927. чији капацитет није познат. Брикетирница је 1929. произвела 2.993

## MINING ACTIVITIES

Work on the opening of the mine began in 1886, and production data exists from 1890. Actually, that year, 214.5 tons were produced at a price of 18 dinars per ton. Coal was sold to the military garrison in Knjaževac and the Kragujevac weapons factory for blacksmiths. The further future of the mine depended primarily on the traffic infrastructure and means of transport. The need for coal in Knjaževac was small, and longer transportation was unprofitable. In 1902, 400 tons of coal were produced on the order of the Knjaževac garrison, and in 1903, 250 tons were produced by four employed workers. In 1906, 340.5 tons of coal were produced by five workers. From 1907 to 1910, 600 tons to 800 tons were produced annually [2].

During the First World War, the Germans extracted about 40,000 tons of coal from this mine. Since the coal could be coked well, the Germans intended to supply the Bor mine with coke from this mine. After the end of the First World War, the mine quickly turned back to its production and in 1919 it produced 4,560 tons of coal. In 1922, 19,618 tons were produced by 534 workers. From 1923 to 1930, there is no data on the operation of the mine [2].

The briquetting plant was built in 1926 with a capacity of 12 t/h. The facilities of the mine include a washing chamber with a capacity of 30 t/h. A drying chamber was built in 1927, the capacity of which is unknown. In 1929,

тона брикета без додавања везивних средстава.

Благодарећи великим количинама испарљивих материја, угаљ из рудника Добра Срећа користио се за парне котлове. Брикет је коришћен од обичних пећи до централног грејања и парних локомотива.

the briquetting plant produced 2,993 tons of briquettes without adding binders.

Thanks to large quantities of volatile substances, coal from the Dobra Sreća mine was used for steam boilers. Briquettes have been used starting from ordinary stoves to district heating and steam locomotives.

Табела 1, Производња уља у руднику Добра Срећа од 1890. до 1970.

Table 1, Coal production in the Dobra Sreća mine from 1890 to 1970.

Година Year	Производња Production	Година Year	Производња Production	Година Year	Производња Production	Година Year	Производња Production
1890	214	1910	684	1930	41.925	1950	79.159
1891	115	1911	987	1931	73.322	1951	65.639
1892	200*	1912	1.000*	1932	44.068	1952	69.041
1893	291	1913	1.000*	1933	50.000*	1953	55.062
1894	248	1914	800*	1934	55.110	1954	59.701
1895	120	1915	-	1935	59.129	1955	69.000
1896	17	1916	-	1936	55.000*	1956	73.700
1897	21	1917	-	1937	38.162	1957	84.100
1898	62	1918	30.000*	1938	26.321	1958	79.100
1899	165	1919	4.560	1939	35.330	1959	92.400
1900	180*	1920	9.158	1940	22.189	1960	95.100
1901	-	1921	7.206	1941	19.102	1961	84.700
1902	400	1922	19.618	1942	14.944	1962	62.600
1903	250	1923	35.762	1943	20.057	1963	65.500
1904	280*	1924	18.015	1944	9.995	1964	78.400
1905	300*	1925	28.610	1945	20.000*	1965	72.600
1906	340	1926	29.275	1946	29.399	1966	44.800
1907	380*	1927	52.500	1947	58.154	1967	37.000
1908	450*	1928	39.665	1948	78.631	1968	61.000
1909	500*	1929	41.283	1949	79.266	1969	59.800

\*Укључене су процене у годинама без података, укупно 160.290 тона

\*Estimates in years without data are included, totaling 160,290 tons

Производња рудника је престала 1969. Рудник је затворен 1972.

Крајем 1970. резерве А+Б+Ц износиле су 8.340.000 тона.

The mine ceased production in 1969. The mine was closed in 1972.

At the end of 1970, the reserves of A+B+C amounted to 8,340,000 tons.

Произведено у власништву породице Сибиновић (1890 – 1945), 909.310 тона

Произведено у власништву државе (1946 – 1969), 2.276.904 тона

Укупна производња рудника (1890 – 1969), 3.186.214 тона

Produced by the Sibinović family (1890 – 1945), 909,310 tons

State-owned production (1946 – 1969), 2,276,904 tons

Total mine production (1890 – 1969), 3,186,214 tons

Извори: В.Симић, Развој угљенокопа и угљарске привреде у Србији, стр.124/125, таб.19, период (1890 – 1955) /  
Sources: V. Simić, Development of Coal Mines and Coal Industry in Serbia, pp.124/125, tab.19, period (1890 – 1955)

Документација, ЕПС Дирекција за производњу угља, аутори, период (1955 – 1969)

Documentation, EPS Directorate for Coal Production, authors, period (1955 – 1969)

Квалитет угља је током вишедеценијске експлоатације осциловао. Анализе из ранијег периода имале су следеће вредности (табела 2).

The quality of the coal fluctuated during the decades of extraction. Analyses from the earlier period had the following values (Table 2).

Табела 2, Анализа уља продавана државним железницама

Table 2, Analysis of coal sold to state railways

Врста угља Coal type	Влага / Moisture %		Сумпор / Sulphur %		Пепео Ash %	Кокс Coke %	Испар. матер. Evaporation of material %	Сагор. матер. Combustion of material %	Топлотна моћ Calorific value KJ/kg	
	Груба Rough	Хигрос. Hygros.	Сагор. Combustible	Несагор. Uncombustible					Доња Net	Горња Gross
Орашаста Nut-sized coal	3,2	0,6	5,3	1,1	12,7	63,4	36,0	86,7	28.596	29.571
Ковачки Blacksmith	4,2	0,7	5,3	1,1	14,2	68,9	30,4	85,1	27.130	27.938
Ситан Small	3,2	0,7	6,25	0,41	18,4	63,9	31,6	80,9	25.757	26.774
Брикет опека Briquette brick	1,3		4,6	1,2	16,0	60,5	38,2	82,7	26.744	27.737
Брикет Јаје Briquette egg	5,3		4,8	1,1	20,4	63,6	31,1	76,3	24.765	25.686

Извор: М. Здравковић, Уљеве Југославије као гориво, Београд, 1933. (за угљ намењен железници) П. Јовановић, Прерада угља у Краљевини Југославије, Београд, 1931. (за брикети) / Source: М. Здравковић, The coals of Yugoslavia as fuel, Belgrade, 1933. (for coal intended for railways) P. Jovanović, Coal processing in the Kingdom of Yugoslavia, Belgrade, 1931 (for briquettes)

Временом и квалитет угља је опадао, 1955. забележен је следећи квалитет: пепела 29,84 %, сумпора 8,19 %, горња топлотна моћ 22.550 kJ/kg и доња 21.587 kJ/kg.

Over time, the quality of coal also decreased, and in 1955 the following quality was recorded: ash 29.84%, sulphur 8.19%, upper calorific value 22,550 kJ/kg and lower 21,587 kJ/kg.

## ЗАКЉУЧАК

Отварање и рад рудника са подземном експлоатацијом угља били су интензивни у другој половини XIX века и почетком XX века. То је тада, за осиромашену Србију, био наговештај оживљавања целокупне њене скромне привреде.

Рудник угља Добра Срећа допринео је развоју привреде Књажевачке општине у источној Србији. У почетку је угљ био

## CONCLUSION

The opening and operation of underground coal mines were intensive in the second half of the 19th century and the beginning of the 20th century. At that time, for impoverished Serbia, it was a hint of the revival of its entire modest economy.

The Dobra Sreća coal mine contributed to the economic development of the Knjaževac municipality in eastern Serbia. In the beginning,

намењен Тополивници у Крагујевцу, гарнизону у Књажевцу, ковачницама, разним установама, потребама становништва Књажевачког рејона.

Бржи и обимнији развој угљарства је био ограничен лошом или непостојећом путем инфраструктуром, као и изузетно сложенем геолошком грађом лежишта угља. Такви проблеми су се озбиљно одразили и на животни век и пословање рудника Добра Срећа. Угљенокопи су углавном отворани у сиромашним и заосталим срединама. Није постојала радничка класа. Највећи део становништва су били сељаци. Први рудари су постајали, управо од приученог сеоског становништва. Рад рудника угља је знатно подигао квалитет живота у тим срединама. Отворане су школе, амбуланте, млинови, стругаре, прве железничке пруге, насипани путеви. Управо су рудници Ртањ и Добра Срећа предњачили у тим активностима.

После Другог светског рата уследио је веома динамичан развој у свету. Све већи значај добија нафта и гас а потискује се угљ. Реструктурирање индустрије угља већ је започело у развијеним државама света. Затварају се рудници угља са подземном експлоатацијом, отварају се велики површински копови угља са далеко већим капацитетима и већом производњом, превходно за подмиривање термоенергетских капацитета.

Шездесетих и седамдесетих година, прошлог века, затвара се већина рудника угља са подземном експлоатацијом у Србији и то управо у срединама са највећом незапосленосту. Није оставрена нека друга, алтернативна производња која би надоместила производњу угља. Рудари рудника Добра Срећа по затварању рудника одлазе да раде у друге активне руднике у Србији. Све претходно поменуто условило је стагнацију у развоју општине Књажевац. Даља судбина угљарства, односно поновно оживљавање и развој рударства у општини Књажевац је неизвесна. У овом тренутку није реално да ће се у скороје време десити било какве промене у смислу његовог активирања.

the coal was intended for the Smeltery in Kragujevac, the garrison in Knjaževac, forge facility, various institutions, and the needs of the population in the Knjaževac region.

Faster and more extensive development of coal mining was limited by poor or non-existent road infrastructure, as well as by the extremely complex geological structure of the coal deposits. Such problems had a serious impact on the lifespan and operations of the Dobra Sreća mine. Coal mines were mostly opened in poor and backward areas. There was no working class. The majority of the population were peasants. The first miners came from the semi-skilled rural population. The operation of coal mines has significantly raised the quality of life in those areas. Schools, health care centres, mills, sawmills, the first railway lines, and filled roads were opened. Actually the Rtanj and Dobra Sreća mines took the lead in these activities.

After the Second World War, a very dynamic development in the world followed. Oil and gas were gaining more and more importance, and coal was being suppressed. The restructuring of the coal industry has already begun in the developed countries of the world. Underground coal mines are being closed, large surface coal mines are being opened with much larger capacities and higher production, primarily in order to meet the needs of thermal energy capacities.

In the 1960s and 1970s, the majority of underground coal mines in Serbia were closed, precisely in the areas with the highest rate of unemployment. No other alternative production that would replace coal production has been achieved. The miners of the Dobra Sreća mine are looking for work in other active mines in Serbia after the closure of this mine. All of the aforementioned has caused stagnation in the development of the municipality of Knjaževac. Further fate of coal mining, i.e. the revival and development of mining in the municipality of Knjaževac, is uncertain. At this point, it is not realistic to expect that any changes will happen in the near future in terms of its activation.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Николић П.: Геолошки услови терена између Подвиса и Дobre Среће и перспективни развој ових рудника, Београд, 1963.
- [2] Симић В.: Развој угљокопа и угљарске привреде у Србији, Београд, 1958.
- [3] Породична документација В.Сибиновић,
- [4] Вујић С., Јовановић Б., Јордовић Ч. и Максимовић С.: Осам хиљада година рударења на тлу централног Балкана, Београд, 2003.
- [5] Максимовић С.: Рудник каменог угља Добра Срећа 1884 – 1970.

## LITERATURE

- [1] Nikolić P.: Geološki uslovi terena između Podvisa i Dobre Sreće i perspektivni razvoj ovih rudnika, Beograd, 1963.
- [2] Simić V.: Razvoj ugljokopa i ugljarske privrede u Srbiji, Beograd, 1958.
- [3] Porodična dokumentacija V.Sibinović,
- [4] Vujić S., Jovanović B., Jordović Č. i Maksimović S.: Osam hiljada godina rudarenja na tlu centralnog Balkana, Beograd, 2003.
- [5] Maksimović S.: Rudnik kamenog uglja Dobra Sreća 1884 – 1970.



МОДЕЛ ОПТИМИЗАЦИЈЕ ИЗБОРА МЕХАНИЗАЦИЈЕ И  
ТРАНСПОРТНИХ СРЕДСТАВА НА ПРИМЕРУ ДИСКОНТИНУАЛНОГ  
ОТКОПАВАЊА И ТРАНСПОРТА УГЉА НА ЛОКАЛИТЕТУ СКОБАЉ  
(„ТАМНАВА ЗАПАДНО ПОЉЕ“) ПРИМЕНОМ ЛИНЕАРНОГ  
ПРОГРАМИРАЊА И ПОУЗДАНОСТИ СИСТЕМА

MODEL OF OPTIMIZATION OF THE CHOICE OF MACHINERY AND  
MEANS OF TRANSPORT ON THE EXAMPLE OF DISCONTINUOUS  
COAL MINING AND TRANSPORT AT THE SKOBALJ SITE  
(„TAMNAVA WEST FIELD“) BY APPLYING LINEAR  
PROGRAMMING AND SYSTEM RELIABILITY

DOI: 10.5937/RG2402097C

Стручни рад  
Expert Paper

Саша Цвијић  
Колубара Грађевинар, Лазаревац  
sasac@kglgrad.com

Saša Cvijić  
Kolubara Građevinar, Lazarevac  
sasac@kglgrad.com

Примљен 5 јуна 2024; Рецензиран 16 децембра 2024; Прихваћен 17 децембра 2024.  
Received 5 June 2024; Received in revised 16 Decembre 2024; Accepted 17 Decembre 2024

**Сажетак:** Ефикасан избор механизације и транспортних средстава може значајно утицати на продуктивност и трошкове експлоатације. У раду се анализирају две варијанте, коришћењем линеарног програмирања узимајући у обзир поузданост система, са циљем смањења трошкова уз задовољење дневне капацитетности. Циљ рада је развијати модел који минимизује укупне трошкове дисконтинуалног откопавања и транспорта угља, уз поштовање ограничења капацитетности и производних захтева.

**Кључне речи:** ДИСКОНТИНУАЛНО ОТКОПАВАЊЕ, ТРАНСПОРТ, МАШИНЕ, ЛИНЕАРНО ПРОГРАМИРАЊЕ, ПОУЗДАНОСТ СИСТЕМА

**Abstract:** An efficient choice of machinery and means of transport can significantly affect productivity and labour costs. This paper analyzes two variants, using linear programming taking into account the reliability of the system, with the aim of reducing costs while satisfying daily capacity. The aim of this paper is to develop a model that minimizes the total cost of discontinuous coal mining and transportation, while respecting capacity constraints and production requirements.

**Key words:** DISCONTINUOUS EXCAVATION, TRANSPORT, MACHINES, LINEAR PROGRAMMING, SYSTEM RELIABILITY

## УВОД

Привредно друштво за извођење грађевинских радова у рударској инфраструктури и

## INTRODUCTION

The company for construction works in mining infrastructure and excavation of non-

експлоатацију неметала “Колубара Грађевинар” из Лазаревца бави се пружањем услуга из области грађевинарства, производњом асфалта, бетона и столарије, изнајмљивањем транспортних средстава и механизације, производњом воћних садница, експлоатацијом неметала (ватро-стално-керамичка глина, кречњак као ТГК и карбонатна сировина, гранодиорит као АГК и ТГК) и производњом креча.

Од половине 2022. године, предузеће „Колубара-Грађевинар” из Лазаревца ангажовано је на послу дисконтинуалног откопавања угља на локалитету „Скобаљ” и транспорту откопаног угља до „Дробилане” – „Тамнава Западно поље”. У периоду од половине јуна 2022. године до краја априла 2024. године откопано је и транспортовано 1.425.000 тона угља.

#### ЛОКАЦИЈА, ОПИС РАДОВА И ПЛАНИРАНИ УЧИНАК

На слици 1 приказана је деоница по којој се транспортује откопани угаљ. Транспорт откопаног угља врши се макадамским путем (насутим шљаком) по радилишту/површинском копу, мрежом асфалтираних локалних путева у оквиру површинског копа до магистралног пута М22 (Е-763) („Ибарска магистрала”), и даље до „Тамнавске петље”, а затим регионалним путем Р145 до места истоваара (Дробилане). Просечна дужина транспортне деонице износи 17 километара.

Посао дисконтинуалног откопавања и транспорта угља организован је у једној смени (са прерасподелом радног времена) у трајању од 12 часова, сваки дан у години. Радови на дисконтинуалном откопавању изводе се по Упрошћеном рударском пројекту „Дисконтинуално откопавања и транспорта угља на локалитету „Скобаљ”.

Планирани дневни учинак на откопавању и транспорту износи 2.000 тона угља дневно, односно око 145 м<sup>3</sup>/h.

metals of „Kolubara Građevinar” (“Kolubara Constructor”) from Lazarevac is engaged in the provision of services in the field of construction, production of asphalt, concrete and joinery, rental of means of transport and mechanization, production of fruit seedlings, extraction of non-metals (refractory ceramic clay, limestone as TGK and carbonate raw material, granodiorite as AGK and TGK) and production of lime.

Since mid-2022, the company “Kolubara-Građevinar” has been engaged in the work of discontinuous coal mining at the “Skobalj” site and transport of the excavated coal to “Drobilana” – “Tamnava West Field”. In the period from mid-June 2022 to the end of April 2024, 1,425,000 tons of coal were drawn out and transported.

#### LOCATION, DESCRIPTION OF WORKS AND PLANNED EFFECT

Figure 1 shows the section on which the excavated coal is transported. Transport of excavated coal will be carried out by macadam road (filled with slag) on the site/open-pit mine, along the network of asphalted local roads within the open-pit mine to the main road M22 (E-763) (“Ibar Highway”), and further to the “Tamnava Interchange”, and then by regional road R145 to the place of unloading (Drobilane). The average length of the transport section is 17 kilometers.

The work of discontinuous mining and transport of coal is organized in one shift (with the redistribution of working hours) for 12 hours, every day of the year. Works on discontinuous excavation are carried out in accordance with the Simplified Mining Project “Discontinuous Mining and Transport of Coal at the “Skobalj” Site.

The planned daily output on excavation and transport is 2,000 tons of coal per day, or about 145 m<sup>3</sup>/h.



Слика 1, Приказ транспортне деонице од места дисконтинуалног откопавања угља до места истовара

Figure 1, Presentation of the transport section from the place of discontinuous coal mining to the place of unloading

## ПОЛАЗНЕ ОСНОВЕ ЗА ИЗБОР МАШИНА

Неопходно је нагласити, да је откопка на простору на коме се врши дисконтинуално откопавање угља уклоњена пре десетак година, тако да је сам технолошки процес откопавања и транспорта угља подељен на следеће радне операције:

- откопавање угља,
- утовар у камионе,
- транспорт угља до Дробилане,
- истовар угља.

Због специфичних лежишних услова, габарита механизације и транспортних средстава примењене су две варијанте за обављање посла дисконтинуалног откопавања и транспорта угља. У табели 1 дат је приказ изабране механизације и транспортних средстава са којима се реализује дисконтинуално откопавање и транспорт угља. Приказане су две варијанте које могу задовољити потребе технолошког процеса (слика 2).

## STARTING POINTS FOR CHOOSING A MACHINE

It is necessary to emphasize that the overburden in the area where the discontinuous coal mining is carried out was removed about ten years ago, so that the technological process of coal mining and transport is divided into the following work operations:

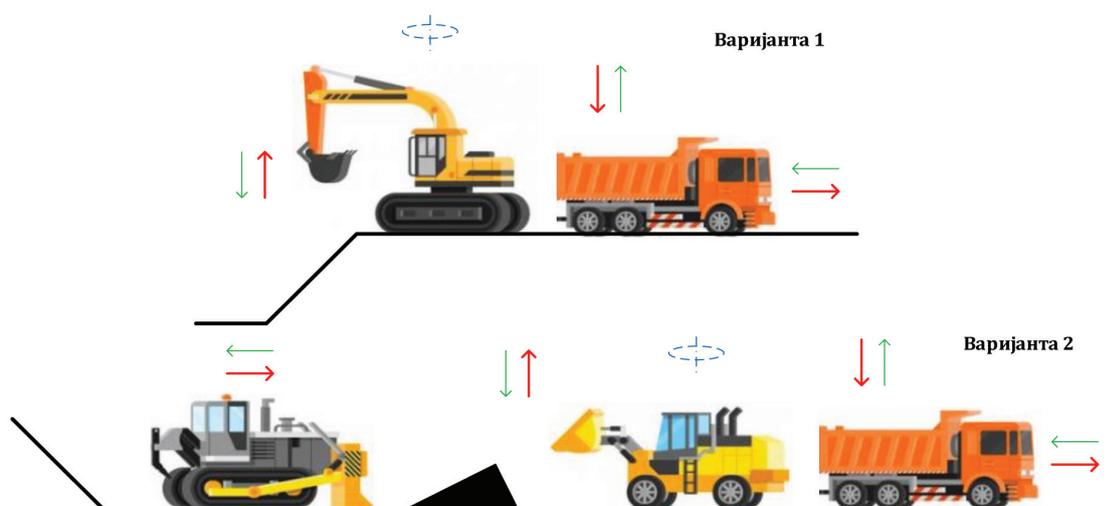
- coal mining,
- loading into trucks,
- transport of coal to the plant.
- unloading of coal.

Due to the specific reservoir conditions, the dimensions of the machinery and the means of transport, two variants were used to perform the work of discontinuous excavation and transport of coal. Table 1 provides an overview of the selected machinery and means of transport with which continuous mining and transport of coal is carried out. Two variants are shown that can meet the needs of the technological process (Figure 2).

Табела 1, Шире избор механизације и транспортних средстава

Table 1 Wider choice of machinery and means of transport

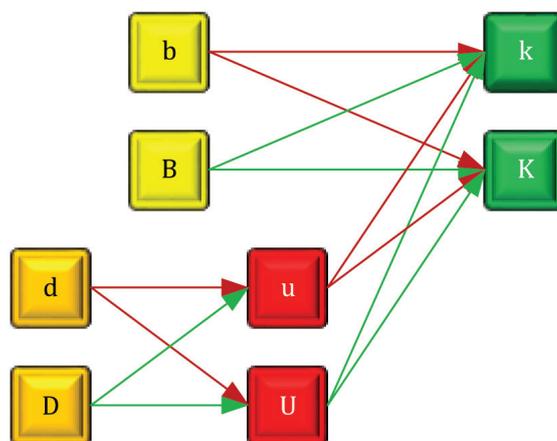
Варијанта Variant	Машина Machine	Радна операција Working operation		
		Ископ Excavation	Утовар Loading	Транспорт и истовар Transport and unloading
1	Багер / Bagger	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	Камион / Truck			<input type="checkbox"/>
2	Булдозер / Bulldozer	<input type="checkbox"/>		
	Утоваривач / Loader		<input type="checkbox"/>	
	Камион / Truck			<input type="checkbox"/>



Слика 2, Приказ технолошког процеса по варијантама  
 Figure 2, Presentation of the technological process by variants

С обзиром на горе изнето, две варијанте разматрања технолошког процеса за дисконтинуално откопавање и транспорт угља сведе се на дванаест верзија радних група машина (слика 3 и табела 2).

In view of the above, the two variants of considering the technological process for discontinuous coal mining and transport are reduced to twelve versions of machine working groups (Figure 3).



Слика 3, Могуће верзије технолошког процеса  
 Figure 3, Possible versions of the technological process

## ПОЛАЗНИ ПАРАМЕТРИ

У наредној табели 2 приказани су полазни параметри механизације и транспортних средстава која се користи у послу и на основу којих би требало да добијемо (изаберемо) оптималну варијанту. Под овим параметрима се подразумевају врста и тип машине, цена радног сата, поузданости и практични учинак и преузети су из документационог материјала предузећа „Колубара-Грађевинар“.

Табела 2, Подаци о механизацији и транспортним средствима  
 Table 2, Data on machinery and means of transport

i	j	Врста машине Machine	Ознака Mark	Марка и тип Brand and type	Цена радног сата Hourly rate [€/h]	Поузданост Reliability	Учинак Performance [m <sup>3</sup> /h]	
							Варијанта Variant	
							1.	2.
1	1	Булдозер Bulldozer	d	Caterpillar CAT D6	100,00	0,9375030		379
1	2	Булдозер Bulldozer	D	Caterpillar CAT D8	135,00	0,9544080		558
2	1	Багер Bagger	b	LiuGong 925E	66,70	0,9548700	135	
2	2	Багер Bagger	B	Hyundai R290E	70,00	0,9604560	146	
3	1	Утоваривач Loader	u	LiuGong CLG 856	67,50	0,9655170		437
3	2	Утоваривач Loader	U	XCMAG ZL50GV	76,00	0,9664940		470
4	1	Камион Track	k	Iveco Trakker (8x4)	61,00	0,8749970	12,2	12,8
4	2	Камион Track	K	Iveco Trakker (4x2)	63,50	0,8964060	17,1	18,1

## ДЕФИНИСАЊЕ ФУНКЦИЈЕ И РЕШЕЊЕ (КОНАЧНИ ИЗБОР МАШИНА)

Циљна функција је концепт који се често користи у математичком програмирању и операционим истраживањима. То је математички израз који треба оптимизовати, односно максимизирати или минимизирати, у оквиру задатог проблема оптимизације. Циљна функција обично зависи од једног или више променљивих и може имати различите облике, у зависности од природе проблема. Неки од основних аспеката циљне функције су:

## STARTING PARAMETERS

The following table 2 shows the initial parameters of machinery and means of transport used in the business and on the basis of which we should obtain (choose) the optimal variant. These parameters include the type and kind of machine, price of working hours, reliability and practical performance which are taken from the documentation material of the company «Kolubara-Gradevinar».

## DEFINING THE FUNCTION AND SOLUTION (FINAL SELECTION OF THE MACHINE)

A target function is a concept that is often used in mathematical programming and operations research. It is a mathematical expression that needs to be optimized, that is, maximized or minimized, within a given optimization problem. A target function usually depends on one or more variables and can take different forms, depending on the nature of the problem. Some of the basic aspects of the target function are:

- |  |   |
|--|---|
| – дефинисање проблема (конкретни циљ), | – definition of the problem (specific objective), |
| – променљиве,                          | – variable  |
| – ограничења.                          | – restrictions.                                   |

Циљна функција може се написати као:

The target function can be written as:

$$F_{min} = \sum_{i=1, N_k; j=1, n_i} \frac{Crs_{ij}}{P_{ij} \cdot Up_{ij,k}} \cdot X_{ij} \left[ \frac{\text{€}}{\text{m}^3} \right]$$

где су:

where they are:

$Crs_{ij}$  – цена радног сата машине [€/h];

$Crs_{ij}$  – the cost of working hour of the machine [€/h];

$P_{ij}$  – поузданост машине;

$P_{ij}$  – the reliability of the machine;

$Up_{ij}$  – практичан учинак машине [m<sup>3</sup>/h];

$Up_{ij}$  – the practical effect of the machine [m<sup>3</sup>/h];

$X_{ij}$  – број машина;

$X_{ij}$  – the number of machines;

$N$  – број различитих врста машина у варијанти  $k$ .

$N$  – the number of different types of machines in variant  $k$ .

Услови ограничења изражавају се преко једначине:

The conditions of restriction are expressed in terms of the equation:

$$\sum_{j=1}^{n_i} P_{ij} \cdot Up_{ij,k} \cdot X_i \geq Q_d \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right], i = 1, N; x_{ij} \geq 0$$

где је:

where they are:

$Q_d$  – дневни капацитете на дисконтинуалном откопавању и транспорту угља [m<sup>3</sup>/h].

$Q_d$  – daily capacities for discontinuous coal mining and transport [m<sup>3</sup>/h].

#### ВАРИЈАНТА 1

#### VARIANT 1

Циљна функција коју треба минимизирати је:

The target function to be minimized is:

$$\min F_1 = \frac{135}{66,7 \cdot 0,95487} \cdot X_b + \frac{146}{70 \cdot 0,960456} \cdot X_B + \frac{12,2}{61 \cdot 0,874997} \cdot X_k + \frac{17,1}{63,5 \cdot 0,896406} \cdot X_K$$

$$\min F_1 = 2,12 \cdot X_b + 2,17 \cdot X_B + 0,229 \cdot X_k + 0,3 \cdot X_K$$

Ограничења циљне функције су:

The limitations of the target function are:

$$1. 66,7 \cdot 0,95487 \cdot X_b + 70 \cdot 0,960456 \cdot X_B \geq 145$$

$$63,7 \cdot X_b + 67,2 \cdot X_B \geq 145$$

$$2. 61 \cdot 0,874997 \cdot X_k + 63,5 \cdot 0,896406 \cdot X_K \geq 145$$

$$53,4 \cdot X_k + 56,9 \cdot X_K \geq 145$$

Добијене вредности, ради прегледности приказане су у „simplex“ табели 3:

For the sake of clarity, the obtained values are shown in the “simplex” table 3:

Табела 3, Добијене вредности променљивих  $S_1$ ,  $S_2$  и  $F$

Table 3, Obtained values of variables  $S_1$ ,  $S_2$  and  $F$

Променљива Variable	$X_b$	$X_B$	$X_k$	$X_K$	Слободни члан Free item
$S_1$	129	140	0	0	145
$S_2$	0	0	10,7	15,3	145
F	-0,517	-0,499	-8,52	-6,1	0

ВАРИЈАНТА 2

VARIANT 2

Циљна функција коју треба минимизирати је:

The target function to be minimized is:

$$\begin{aligned} \min F_2 = & \frac{379}{100 \cdot 0,937503} \cdot X_d + \frac{558}{135 \cdot 0,954408} \cdot X_D + \frac{437}{67,5 \cdot 0,965517} \cdot X_u + \\ & + \frac{470}{76 \cdot 0,966494} \cdot X_U + \frac{12,8}{61 \cdot 0,874997} \cdot X_k + \frac{17,1}{63,5 \cdot 0,896406} \cdot X_K \\ \min F_2 = & 4,04 \cdot X_d + 4,33 \cdot X_D + 6,71 \cdot X_u + 6,4 \cdot X_U + 0,24 \cdot X_k + 0,3 \cdot X_K \end{aligned}$$

Ограничења циљне функције су:

The limitations of the target function are:

- $100 \cdot 0,937503 \cdot X_b + 135 \cdot 0,954408 \cdot X_B \geq 145$   
 $93,8 \cdot X_b + 129 \cdot X_B \geq 145$
- $67,5 \cdot 0,965517 \cdot X_u + 76 \cdot 0,966494 \cdot X_U \geq 145$   
 $65,2 \cdot X_u + 73,5 \cdot X_U \geq 145$
- $61 \cdot 0,874997 \cdot X_k + 63,5 \cdot 0,896406 \cdot X_K \geq 145$   
 $53,4 \cdot X_k + 56,9 \cdot X_K \geq 145$

Добијене вредности, ради прегледности приказане су у „simplex“ табели 4:

for the sake of clarity, the obtained values are shown in the “simplex” table 4:

Табела 4, Добијене вредности променљивих  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  и  $F$

Table 4, Obtained values of variables  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  and  $F$

Променљива Variable	$X_d$	$X_D$	$X_u$	$X_U$	$X_k$	$X_K$	Слободни члан Free item
$S_1$	355	533	0	0	0	0	145
$S_2$	0	0	422	454	0	0	145
$S_3$	0	0	0	0	11,2	15,3	145
F	-0,281	-0,253	-0,16	-0,167	-8,13	-6,1	0

Решење линеарног програмског проблема извршено је коришћењем програмског алата *Excel Solver*:

The solution of a linear programming problem is accomplished using a programming tool *Excel Solver*:

**Први корак**, за варијанту 1 је унос података у *Excel* радни лист:

**The first step**, for variant 1, is to enter the data into an *Excel* worksheet:

- Унос коефицијената циљне функције и ограничења у *Excel* табелу.

- Entering target function coefficients and constraints into an *Excel* table.

Вредности циљне функције се уносе: у ћелију B3, 135 (вредност за  $X_b$ ), у ћелију

The values of the target function are entered: in cell B3,135 (value for  $X_b$ ), in cell C3,146

C3, 146 (вредност за  $X_B$ ), у ћелију D3, 12,2 (вредност за  $X_K$ ) и у ћелију E3, 17,1 (вредност за  $X_K$ ).

Вредности за ограничење циљне функције се уносе: у ћелију B7, 63,7 (вредност за  $X_b$ ), у ћелију C7, 67,2 (вредност за  $X_B$ ), у ћелију D8, 53,4 (вредност за  $X_K$ ) и у ћелију E3, 56,9 (вредност за  $X_K$ ). У ћелије D7, E7, B8 и C8 уноси се вредност 0 (нула).

- Унос иницијалних вредности.  
У ћелије B4, C4, D4 и E4 уноси се 0 (нула), иницијалне вредности за  $X_b$ ,  $X_B$ ,  $X_K$  и  $X_K$ .
- Унос формула за циљну функцију.  
У ћелију F3 уноси се формула =SUMPRODUCT(B3:E3;B\$4:E\$4).
- Унос формула за ограничење.  
У ћелију F7 уноси се формула =SUMPRODUCT(B7:E7;B\$4:E\$4).  
У ћелију F8 уноси се формула =SUMPRODUCT(B8:E8;B\$4:E\$4).
- Унос формула за усвојене (коначне) вредности – заокруживање иницијалних вредности (на први већи, цели број).  
У ћелију B9 уноси се формула =ROUNDUP(B4;0).  
У ћелију C9 уноси се формула =ROUNDUP(C4;0).  
У ћелију E9 уноси се формула =ROUNDUP(E4;0).

(value for  $X_B$ ), in cell D3,12,2 (value for  $X_K$ ), and in cell E3,17,1 (value for  $X_K$ ).

The values for the target function constraint are entered: in cell B7, 63.7 (value for  $X_b$ ), in cell C7, 67.2 (value for  $X_B$ ), in cell D8, 53.4 (value for  $X_K$ ), and in cell E3, 56.9 (value for  $X_K$ ). In cells D7, E7, B8, and C8, enter the value 0 (zero).

- A few initial values.  
Cells B4, C4, D4, and E4 contain 0 (zero), the initial values for  $X_b$ ,  $X_B$ ,  $X_K$ , and  $X_K$ .
- A formula for a target function.  
In cell F3, enter the formula =SUMPRODUCT(B3:E3;B\$4:E\$4).
- A formula for the restriction.  
In cell F7, enter the formula =SUMPRODUCT(B7:E7;B\$4:E\$4).  
In cell F8, enter the formula =SUMPRODUCT(B8:E8;B\$4:E\$4).
- Entering formulas for adopted (final) values – rounding the initial values (to the first larger, integer).  
In cell B9, enter the formula =ROUNDUP(B4;0).  
In cell C9, enter the formula =ROUNDUP(C4;0).  
In cell E9, the formula = ROUNDUP(E4;0).

	A	B	C	D	E	F
1						
2		$X_b$	$X_B$	$X_K$	$X_K$	
3	Функција Function	0,517	0,499	8,52	6,1	0
4	Иницијалне вредности Initial values	0	1,03571	0	9,47712	
5						
6						
7	Ограничења Limitations	129	140	0	0	0
8		0	0	10,7	15,3	0
9	Усвојене вредности Taken values	0	0	0	0	0

Слика 4, Изглед радној листи у Excel-у после уноса података (за варијанту 1)

Figure 4, Layout of a worksheet in Excel after data entry (for variant 1)

- Унос формуле за исписивање тачне вредности после решења циљне функције и усвојених вредности.

У ћелију F9 уноси се формула =SUMPRODUCT(B9:E9;B\$3:E\$3).

Изглед *Excel* радног листа после уноса података описаног у првом кораку приказан је на слици 4.

**Други корак**, за варијанту 1 је покретање програмског алата *Excel Solver*.

- Отварање *Excel Solver*.

На картици *Data (Podaci)* у *Excel*-у групи *Solver* кликнути на *Solver*<sup>1</sup>.

- Постављање параметара у *Excel Solver*.

Када се отвори картица *Solver Parameters* у *Set Objective*: неопходно је изабрати ћелију F3 (ћелија са циљном функцијом). Код опције *To*: изабрати дугме за опцију *Min*. У опцији *By Changing Variable Cells*: изабрати ћелије од B4 до E4.

- Додавање ограничења.

Кликнути на дугме *Add*. У картици *Add Constraint*, у прозору *Cell Reference*: изабрати ћелију B7, а у прозору *Relation*: изабрати ">=" и на крају у прозору *Constraint*: уписати 145 (планирани дневни учинак) (слика 5). Затим поново треба притиснути дугме *Add* да би се додало друго ограничење. У прозору *Cell Reference*: изабрати ћелију C7, а у прозору *Relation*: изабрати ">=" и на крају у прозору *Constraint*: поново уписати 145. С обзиром да су унета сва ограничења, потребно је притиснути дугме *OK*, да би се вратили у прозор *Solver Parameters*.

- Entering a formula to print the exact value after solving the target function and the adopted values

In cell F9, enter the formula =SUMPRODUCT(B9:E9; B\$3:E\$3).

The layout of the *Excel* worksheet after entering the data described in the first step is shown in Figure 4.

**The second step**, for variant 1, is to run the *Excel Solver* programme tool.

- Opening *Excel Solver*.

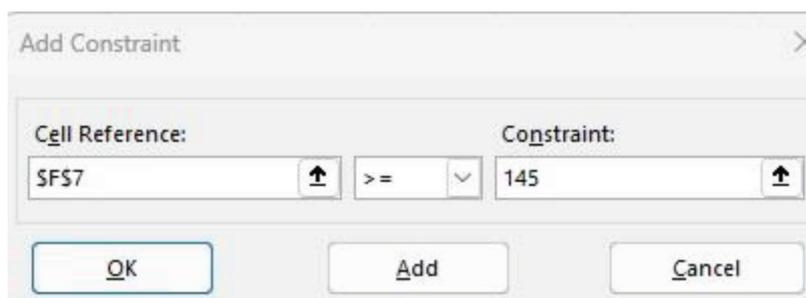
On the *Data tab* in *Excel*, in the *Solver* group, click *Solver*<sup>1</sup>.

- Setting parameters in *Excel Solver*.

When the *Solver Parameters* tab is opened in *Set Objective*: it is necessary to select cell F3 (the cell with the target function). *To* option: Select the button for the *Min* option. In the *By Changing Variable Cells* option: select cells from B4 to E4.

- Adding restrictions

Click on the *Add* button. In the *Add Constraint* tab, in the *Cell Reference*: select cell B7, in the *Relation*: select "> =" and finally in the window *Constraint*:, type 145 (planned daily output) (Figure 5). Then the *Add* button should be pressed again to add another constraint. In the window *Cell Reference*: select cell C7, and in the window *Relation*: select "> =" and finally in the *Constraint* window, type 145 again. Since all the constraints have been entered, you need to press the *OK* button to return to the *Solver Parameters* window.



Слика 5, Приказ картице *Add Constraint* (унос првог ограничења *Xb* у варијанти 1)

Figure 5, Display of the *Add Constraint* tab (entering the first constraint *Xb* in variant 1)

<sup>1</sup> Ако се не види команда *Solver* неопходно је инсталирати *Solver* тако што се оде у *Excel Options* у групу *Add-ins*.



	A	B	C	D	E	F
1						
2		$X_b$	$X_B$	$X_k$	$X_K$	
3	Функција Function	0,517	0,499	8,52	6,1	58,327
4	Иницијалне вредности Initial values	0	1,03571	0	9,47712	
5						
6						
7	Ограничења Limitations	129	140	0	0	145
8		0	0	10,7	15,3	145
9	Усвојене вредности Taken values	0	2	0	10	61,998

Слика 7, Изглед радног листа у Excel-у са добијеним решењима после примене програмошког алатија Excel Solver (за варијанту 1)

Figure 7, Layout of a worksheet in Excel with the resulting solutions after applying the Excel Solver program tool (for variant 1)

Решење за варијанту 1 је:

The solution for variant 1 is:

$$X_b=0; X_B=2; X_k=0; X_K=10$$

$$\min F_1 = 62,00 \frac{\text{€}}{\text{m}^3}$$

С обзиром да је поступак уноса података за програмски алат Excel Solver детаљно описан у варијанти 1, за варијанту 2 само ће се приказати изглед радног листа у Excel-у после примене програмошког алатија Excel Solver (слика 8).

Since the data entry procedure for Excel Solver is described in detail in Variant 1, for Variant 2, only the appearance of the worksheet in Excel after applying Excel Solver will be displayed (Figure 8).

	A	B	C	D	E	F	G	H
1								
2		$X_d$	$X_D$	$X_u$	$X_U$	$X_k$	$X_K$	
3	Функција Function	0,281	0,253	0,16	0,167	8,13	6,1	57,9326
4	Иницијалне вредности Initial values	0	0,27205	0	0,31938	0	9,47712	
5								
6								
7	Ограничења Limitations	355	533					145
8				422	454			145
9						11,2	15,3	145
10	Усвојене вредности Taken values	0	1	0	1	0	10	61,42

Слика 8, Изглед радног листа у Excel-у са добијеним решењима после примене програмошког алатија Excel Solver (за варијанту 2)

Figure 8, Layout of a worksheet in Excel with the resulting solutions after applying the Excel Solver program tool (for variant 1)

Решење за варијанту 2 је:

The solution for variant 2 is:

$$X_d=0; X_D=1; X_u=0; X_U=1; X_k=0; X_K=10$$

$$\min F_2 = 61,42 \frac{\text{€}}{\text{m}^3}$$

На основу добијених решења долази се до закључка да варијанта 2 има минималну вредност циљне функције и задатих ограничења:

On the basis of the solutions obtained, it is concluded that variant 2 has a minimum value of the target function and the given constraints:

$$F = \min\{F_1; F_2\} = F_2 = 61,42 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Практичан учинак радова за изабрану варијанту 2 (булдозер већи – утоваривач већи – камион већи) износи:

The practical effect of the works for the selected variant 2 (bulldozer larger – loader larger – truck larger) is:

$$U_{p.radova} = \min \left\{ \sum_{j=1}^{n_i} X_{ij} \cdot P_{ij} \cdot U_{Pij}, k=2 \right\} = 1 \cdot 0,9544080 \cdot 558 + 1 \cdot 0,9664940 \cdot 470 + 10 \cdot 0,8964060 \cdot 18,1$$

$$U_{p.radova} = \min \{535; 454; 160\} = 160 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} > 145 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

## ЗАКЉУЧАК

## CONCLUSION

Варијанта 2 је изабрана јер има минималну вредност циљне функције и задатих услова ограничења. На основу изабраног, процењена вредност радова на дисконтинуалном откопавању и транспорту угља износи 61,42 €/m<sup>3</sup>. За реализацију, било би потребно да се ангажује један (већи) булдозер, један (већи) утоваривач и десет (већих) камиона.

Variant 2 is chosen because it has a minimum value of the target function and the given constraint conditions. Based on the selected, the estimated value of the works on discontinuous mining and transport of coal is 61.42 €/m<sup>3</sup>. To achieve this, it would be necessary to hire one (larger) bulldozer, one (larger) loader and ten (larger) trucks.

Разлика у цени између варијанте 2 и варијанте 1 износи 0,58 €/m<sup>3</sup>, односно 0,944%. Код количина од на пример милион кубика угља, разлика је 580.000 €.

The price difference between variant 2 and variant 1 is 0.58 €/m<sup>3</sup>, or 0.944%. For example, one million cubic meters of coal, the difference is €580,000.

Као кључно ограничење овог модела намеће се немогућност сагледавања свих реалних услова на терену и недовољна тачност улазних података. У случају промене параметара модел би давао другачије резултате. Неопходно је испитати његову осетљивост у зависности од промене сваког од релевантних параметара како би се пронашли они који имају највећи утицај и како би се истима посветила посебна пажња у смислу пажљивијег осматрања и бележења реалних вредности.

The key limitation of this model is the inability to perceive all real conditions in the field and insufficient accuracy of the input data. In case of changing the parameters, the model would give different results. It is necessary to examine its sensitivity depending on the change in each of the relevant parameters in order to find those that have the greatest impact and to pay special attention to them in terms of more careful observation and recording of real values.

Оптимальный выбор механизации и транспортных средств зависит от снижения затрат при удовлетворении емкости и надежности. Модель, представленная в этой статье, является хорошей основой для принятия решений при выборе механизации и транспортных средств при дисконтинуальной работе.

The optimal choice of machinery and means of transport depends on reducing costs while satisfying capacity and reliability. The model presented in this paper provides a good basis for decision-making when choosing machinery and means of transport in discontinuous operation.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Драгојевић М., Дуран А., Прашчевић Н.: Модел економске оптимизације избора грађевинске механизације за земљане радове приликом приступа линеарног програмирања, XLVI Симпозијум о операционим истраживањима, Кладово, 2019, стр. 565-570.
- [2] Игњатовић Д., Шубарновић Т., Ђенадић С.: Машина и помоћни радови на површинским коповима, Рударско геолошки факултет, 2021.
- [3] Игњатовић Д., Јованчић П.: Збирка задатака Машина и уређаји за површинску експлоатацију и транспорт, Рударско геолошки факултет, 2012.
- [4] Wayne L. Winston,; Microsoft Excel 2019 Data Analysis and Business Modeling, Microsoft Press, 2020.
- [5] Документациони материјал предузећа „Колубара-Грађевинар“ из Лазареваца.

## LITERATURE

- [1] Dragojević M., Duran A., Prašćević N.: Model ekonomske optimizacije izbora građevinske mehanizacije za zemljane radove primenom pristupa linearnog programiranja, XLVI Simpozijum o operacionim istraživanjima, Kladovo, 2019, str. 565-570.
- [2] Ignjatović D., Šubarnović T., Đenadić S.: Mašine i pomoćni radovi na površinskim kopovima, Rudarsko geološki fakultet, 2021.
- [3] Ignjatović D., Jovančić P.: Zbirka zadataka Mašina i uređaji za površinsku eksploataciju i transport, Rudarsko geološki fakultet, 2012.
- [4] Wayne L. Winston,; Microsoft Excel 2019 Data Analysis and Business Modeling, Microsoft Press, 2020.
- [5] Dokumentacioni materijal preduzeća „Kolubara-Građevinar“ iz Lazarevca



**88 ГОДИНА ГЕОЛОШКИХ ИСТРАЖИВАЊА ЛИГНИТА У  
КОЛУБАРСКОМ УГЛЈОНОСНОМ БАСЕНУ, СРБИЈА – ГОДИНЕ  
ИСТРАЖНОГ БУШЕЊА (ОД 1936 ДО 2024. ГОДИНЕ)**

**88 YEARS OF GEOLOGICAL EXPLORATION OF LIGNITE IN THE  
KOLUBARA COAL BASIN, SERBIA – YEARS OF EXPLORATION  
DRILLING (SINCE 1936. UP TO 2024. YEAR)**

DOI: 10.5937/RG2402111V

Приказ

Expert Review

Богољуб Вучковић  
Електропривреда Србије А.Д., Огранак  
РБ Колубара, ОЦ „Пројект”,  
Лазаревац, Србија  
bogoljub.vuckovic@eps.rs

Bogoljub Vučković  
Joint stock company Elektroprivreda Srbije,  
Kolubara coal basin, Division “Project”,  
Lazarevac, Serbia  
bogoljub.vuckovic@eps.rs

Примљен 24 октобра 2024; Рецензиран 13 децембра 2024; Прихваћен 20 децембра 2024.  
Received 24 Octobre 2024; Received in revised 13 Decembre 2024; Accepted 20 Decembre 2024

**Сажетак:** У раду је дајен приказ геолошких достижња током 88 година истраживања геолошких истраживања. Колубарски угљосни басен, са центром у Лазаревицу, налази се приближно 50 km јужно од Београда. Основна минерална сировина је меки мрки угљ – лигнит. Експлоатација лигнита врши се на неколико површинских којева, од којих су неки започели са радом почетком 50-тих година XX века. Носилац рударских активности је рудник РБ „Колубара“. Тренутно, годишња производња на свим активним којевима износи  $\approx 30\text{Mt}$  лигнита. Ошковиане количине лигнита користе се у термоенергетским капацитетима – ТЕ „Никола Тесла А и Б“ – за процес производње електричне енергије. Овај рудник представља окосницу рударске и енергетске привреде Србије. Геолошка истраживања заочела су знајно пре отварања површинских којева, надовезујући се на јамску експлоатацију лигнита, која је у овом региону заочела крајем XIX века. Савремена геолошка истраживања доводе се са почетком истраживања 1936. године. Током 8 деценија истраживања се изводе у континуирану, и предстоји фаза обимној додатој истраживања. Од првих година рада, на простору од  $220\text{ km}^2$  избушено је више од 7.400 истражних бушотина и истражено је више од 4.100.000.000 t лигнита. Током прошеклих 32.000 геолошких дана геолози Колубаре су непрекидно на свака 4 дана додали по једну нову истражну бушотину укупном фонду геолошке документације.

**Кључне речи:** ГЕОЛОГИЈА, РУДАРСТВО, ИСТРАЖИВАЊА, ИСТРАЖНО БУШЕЊЕ

**Abstract:** This paper presents a brief overview of the geological achievements during 88 years period of continuously geology explorations. These geological explorations of coal span two centuries (the XX and XXI centuries) and are still ongoing Kolubara Coal Basin, with its center in Lazarevac is located 50 km south of Belgrade. The basic mineral raw material is soft brown coal – lignite. The exploitation of lignite is carried out on several surface mines, some of which began to operate in the early 1950s. The carrier of mining activities is a mine Kolubara Coal Mines (KCM<sup>1</sup>). Currently, annual production on all active mines is  $\approx 30\text{Mt}$  lignite. The

1 KCM – Kolubara Coal Mines

entire quantities of lignite dug out are used in Thermal Power Plants „Nikola Tesla A & B“ for the electricity generation process. As such, this mine is the backbone of the mining and energy industries of Serbia. Geological exploration began well before the opening of surface mines, building on the underground mining of lignite, which began in this region at the end of the 19th century. Modern geological exploration is related to the beginnings of exploratory drilling in 1936, and over the course of 8 decades, exploration has been carried out continuously. In early 2024, a phase of extensive additional exploratory drilling is forthcoming. Since the first years of operation, more than 7.400 exploratory boreholes have been drilled in an area of 220 km<sup>2</sup>; > 4.100.000.000 t of lignite has been explored. Over the past 32.000 geological days, Kolubara geologists have continuously added one new exploration borehole every 4 days to the total geological fund of documentation.

**Key words:** GEOLOGY, MINING, EXPLORATION, DRILLING, BOREHOLES

## РЕГИОНАЛНИ ПОЛОЖАЈ КОЛУБАРСКОГ УГЉОСНОГ БАСЕНА

Лежишта лигнита „Колубара“ део су колубарског угљоносног басена. Површина басена је 220 km<sup>2</sup> и налази се западној Србији, на 50 km јужно од Београда (Слика 1). Колубарски угљоносни басен изграђен је од метаморфних, магматских и првенствено седиментних стена Палеозоика, Мезозоика и Кенозоика.

## REGIONAL SETTINGS OF KOLUBARA COAL BASIN

Kolubara Coal Mines (KCM) are part of Kolubara Coal Basin. It seats in western Serbia, 50 km southwest of Belgrade with 220 km<sup>2</sup> area (Figure 1). Kolubara Coal Basin represent a complex metamorphic, magmatic and sedimentary lithological suite of Paleozoic (Pz), Mesozoic (Mz) and Cenozoic (K) age.



Слика 1, Прегледна географска мапа југоисточне Европе са позицијом колубарског угљоносног басена (бела тачка), 50 km јужно од Београда

Figure 1, Overview geographic map of southeastern Europe with Kolubara Coal Basin position (transparent dot), 50 km south of Belgrade

## ИСТОРИЈАТ ГЕОЛОШКИХ ИСТРАЖИВАЊА

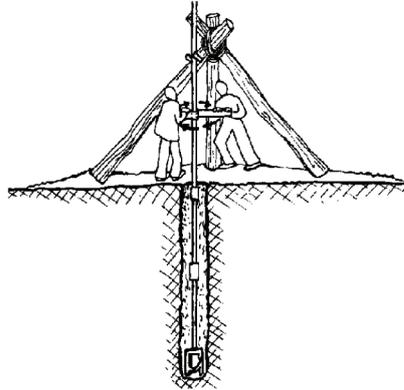
Средином 30-их година двадесетог века почињу савремена геолошка истраживања овог подручја. Прва истраживања почела су 1936. године бушењем 17 бушотина, са око

## HISTORY OF KOLUBARA COAL MINES GEOLOGY EXPLORATIONS AT THE BEGINNING

During the twentieth century, at mid-30s start modern geological research in this area. The first explorations began in 1936 with the drilling of 17 boreholes, with about 1,600 m of drilling.

1.600 m бушења. Бушено је старим типовима истражних гарнитура (слика 2).

It was drilled with old types of exploratory drilling rigs, so-called shot drilling (Figure 2).

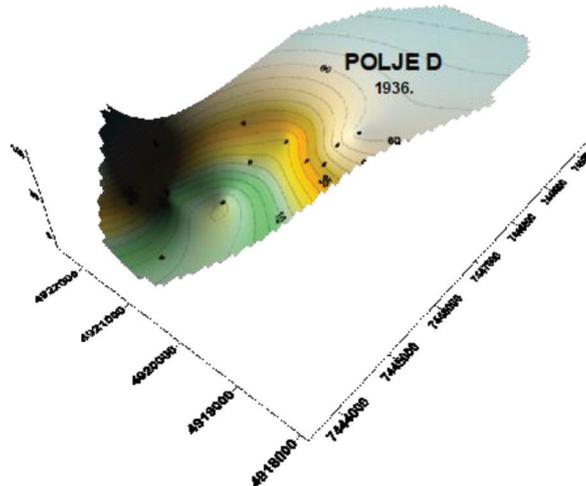


Слика 2, Стари тип гарнитура за истражно бушење; ручно или машинско покретање бушаћих шийки; карактеристично за период пре II светској рата (www.Wikipedia.com)

Figure 2, Old type of exploratory drilling rig; manual or mechanical starting of drill rods; characteristic before World War II (www.Wikipedia.com)

Највећи број бушотина налази се у рејону села Вреоци, на простору данас познатом као поље Д. Након тих првих 365 геолошких дана, геолози су делимично схватили морфологију угљеног слоја, а да су могли, компјутерски би моделирали подину угљеног слоја (слика 3).

The largest number of boreholes are located in the region of the village of Vreoci, in the area known today as field D. After those first 365 geological days, geologists partially observed the morphology of the coal seam, and if they could, they would have modeled the bottom of the coal seam on a computer (Figure 3).



Слика 3, Бушотине из 1936. године у аџару села Вреоци, данас познатијем као површински кољ „Поље Д“; 3Д модел године главне уљене слоја на бази њек неколико бушотина

Figure 3, Boreholes from 1936. year in the area of the village Vreoci, today better known as the open pit „Field D“; 3D floor model of the main coal seam based on just few drill holes

#### ТИПОВИ БУШАЋИХ ГАРНИТУРА ПОСЛЕ 40-ТИХ ДО ДАНАС

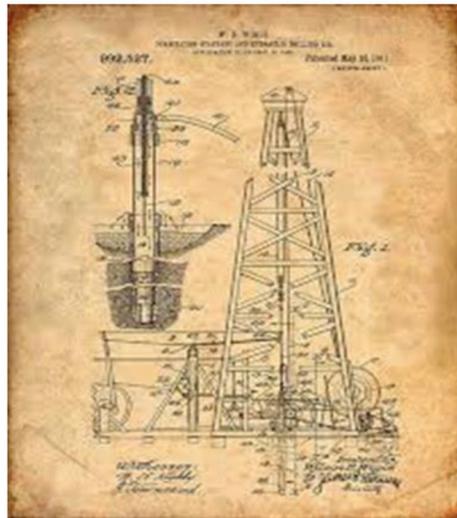
#### TYPES OF DRILLING SETS AFTER 40's AND UP TO THESE DAYS

После тога, као ни за време Другог светског рата, није било бушења. Прва наред-

After that period, as well as during World War II, no drilling was done. The first subsequent

на бушотина избушена је 1945. године, а након тога се све више бушило. Од 1945, до данас, геолошка истраживања се врше континуирано, истражним бушењем са језгровањем са површине терена. Истраживања су била усклађена са развојем површинских копова, а у појединим деценијама се више бушила источна, а потом и западна половина Колубарског Угљоносног Басена. Такође, временом је у употреби било све више савремених типова уређаја за бушење (слике 4-7).

well was drilled in 1945, and after that, more and more were drilled. Observed up to the present day, geological research is carried out continuously, using exploratory drilling with coring from the surface of the terrain. Research was coordinated with the development of surface mines, and in some decades the eastern and then the western half of the Kolubara coal-bearing basin was drilled more. Also, over time, more and more modern types of drilling rigs were in use (Figures 4-7).



Слика 4, Тип иарнијуре за истражно бушење карактеристичан за период након II светској рата (www.Wikipedia.com)

Figure 4, Type of exploratory drilling rig typical of the period after World War II (www.Wikipedia.com)



Слика 5, Тип иарнијуре за истражно бушење карактеристичан за период 70/80-тих година XX века (www.Wikipedia.com)

Figure 5, Type of exploratory drilling rig typical for the period of the 70s/80s of the 20th century (www.Wikipedia.com)



Слика 6, Тип иарнијуре за истражно бушење карактеристичан за период 90-тих година XX века ([www.Wikipedia.com](http://www.Wikipedia.com))

Figure 6, Type of exploratory drilling rig typical of the 1990s of the 20th century ([www.Wikipedia.com](http://www.Wikipedia.com))



Слика 7, Тип иарнијуре за истражно бушење карактеристичан за почетак XXI века ([www.Wikipedia.com](http://www.Wikipedia.com))

Figure 7, Type of exploratory drilling rig typical of the beginning of the XXI century ([www.Wikipedia.com](http://www.Wikipedia.com))

## ИСТРАЖНО БУШЕЊЕ ПО ДЕКАДАМА

Током протеклих 88 година у руднику „Колубара“ је обављен низ репрезентативних савремених геолошких истраживања са радовима у циљу утврђивања количине

## BORE DRILLING BY DECADES

At last 88 years at KCM were performed a suite of representative modern geological explorations with economic geology explorations as principle. Surface exploration core drilling,

и квалитета угља, као доминантним. Истражно бушење вертикалних бушотина са површине терена (са континуираним језгровањем и са преко 7.400 бушотина и преко 600.000 m укупне дужине), била је главна техника истраживања. Истраживања је спроводила Геолошка служба рудника, која се као оперативна налази на активним површинским коповима, али и у седишту предузећа у Лазаревцу, као пројектна геолошка група. Најзначајни резултат је око 4,1 милијарде тона истражених ресурса лигнита у бројним истражним/експлоатационим пољима угља, уз додатне ресурсе неметаличних минералних сировина (кварцни песак, шљунак, глине, дијатомит...). Шест важних лежишта (чији је век експлоатације завршен) било је у експлоатацији површинским коповима. То су копови: „поље А“ које завршило рад крајем 50-их година XX века и коп „Тамнава – Источно Поље“ које је започело рад 1980 у XX веку а завршило рад у XXI веку, односно 2004. године; такође површински коп/лежиште „Велики Црљени“ делимично је откопано (равничарски део) до краја 2016. године, док је коп/лежиште „Поље Б“ откопано до краја 2017. године. Површински коп/лежиште „поље Ц“ углавном је откопано до краја 2023. године; Највећи и најзначајнији површински коп/лежиште лигнита „Поље Д“ завршио је свој животни век 2016. године. Површински коп „Поље Г“ је још увек у раду почетком 2024. године. Почетком 2017. године почињу радови на површинском копу „Поље Е“ и у току су радови на копу „Тамнава – Западно Поље“. На том копу теренски рударски радови су у току од 1990. године. Преостала поља (Радљево, Поље Ф) су планирана за ископавање у наредним декадама.

Остала лежишта (боље рећи рудна поља) су распрострањена по целом колубарском седиментном басену са сопственим степеном геолошке истражености. На пример, имамо лежишта која су у раним фазама геолошких истраживања, а са друге стране и добро истражена лежишта која су у експлоатацији. Последњи дефинишу економичност компаније. Резултати истраживања би се могли приказати у неколико аспеката, у природним и економским параметрима.

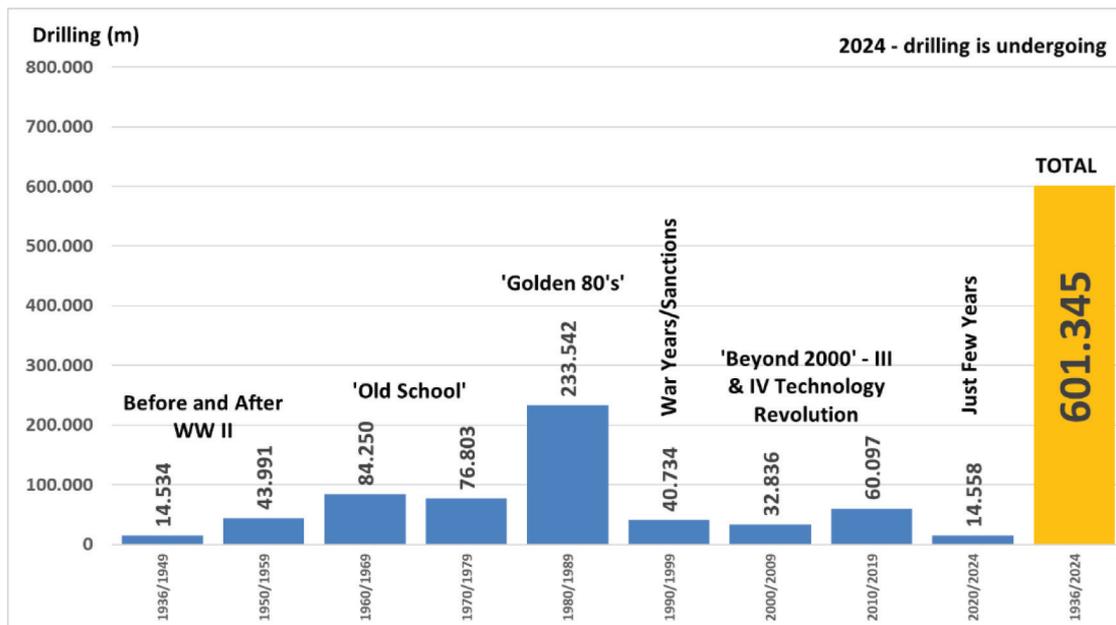
with >7,400 boreholes and >600.000 m, was major exploration method. Mentioned explorations were conducting by the KCM Geology Survey, which seat on active open pits as operative department and in enterprise headquarter in Lazarevac, as designing division. By the way, as summary, we can talk of about 4,1B tons of explored lignite resources in numerous exploration/exploitation coalfields, with additional non-metallic resources (quartz sands, gravels, clays, diatomites...). Six of important deposits were under open pit running and all of them reach its dead end. Deposits „ore Field A“ at late 50's of XX century and „Tamnava-East Field“ which star at 1980 in XX century and reach dead end at 2004. In XXI century, are examples. Also, open pit „Veliki Crljeni“ in 2016. is partially dug out, only in its flat area. Another one, open pit „Field B“ is fully mined out in 2017. Open pit „Field C“ is almost dug out at 2023. The largest and most important surface mining of lignite „Field D“ finalized its lifetime at 2016. Open pit „Field G“ is still under partially running at the early 2024. In early 2017. opening mining works start at surface mine „Field „ and full mining operations are undergoing. In open pit „Tamnava-West Field“ mining operations are undergoing since 1990 and still is ongoing. The remaining fields (Radljevo, Field F) are planned for excavation in next decades.

The other deposits (better to say ore fields) are widespread all over Kolubara sedimentary basin with its own level of geological exploration. We have deposits that are under early phases of geological exploration, and from the other side well explored deposits that are under mining operations. The last ones define economy of the company. The exploration results could report in a few aspects of view, in naturally and semi-economic parameters.

For the most part were performed by core drilling, with vertical boreholes from the surface. Exploration drilling regularly monitored and other geological works, such as a detailed geological mapping and sampling of core, hydrogeological and geotechnical research/testing, mineralogical and petrographic examination of coal and accompanying sediments. Modern detailed geological exploration begins

Највећим делом изведено је бушење са језгро-вањем, вертикалним бушотинама са површине терена. Истражно бушење редовно прате и други геолошки радови, као што су детаљно геолошко картирање и узорковање језгра, хидрогеолошка и геотехничка истраживања/испитивања, минералозна и петрографска испитивања угља и пратећих седимената. Савремена детаљна геолошка истраживања почињу 1936. бушењем 17 истражних бушотина. Бушотине су се углавном налазиле у атару села Вреоци, на простору који је данас познат као лежиште и површинско коп „поље Д“. Истраживања су настављена до данас. Једини прекид био је током Другог светског рата, крајем 1945. године избушена је наредна 18. бушотина. Током ових 88 година рада, у складу са развојем науке и технологије, примењиване су различите методе детаљних геолошких истраживања. Са календарске тачке гледишта, геолошка истраживања се такође могу поделити на деценије (слика 8).

in 1936. by drilling 17 exploratory holes. The holes were mostly located in the area of the village Vreoci, in the area known today as the deposit and surface mine „field D“. Research has continued to the present day. The only interruption was during WW II, in late 1945. was drilled the next 18th hole. During these 88 years of work, in accordance with the development of science and technology, various methods of detailed geological research were applied. From a calendar point of view, geological surveys can also be divided into decades (Figure 8).



Слика 8, Преиледни приказ обима истражної бушења у Колубарском Угљоносном Басену, по декадама, за период 1936-2024.

Figure 8, Outline of exploration drilling in the Kolubara Coal Basin, by decades, for the period 1936.-2024.

## ИСТРАЖНО БУШЕЊЕ У XX ВЕКУ

Из приказа на слици 8 уочава се да је у почетним годинама истраживања обим бушења био мањи, на пример свега 14.000 m до краја

## XX CENTURY DRILLING

It can be seen that in the initial years of exploration, the volume of drilling was smaller, for example only 14.000 m by the end of the 40s of

40-их година 20-тог века. До краја 70-тих година 20-тог века бушило се интензивно у већем броју истражних поља. Такозвана „стара школа“ геолога извела је преко 160.000 m бушења уз све пратеће геолошке радове (картирање језгра, опробавање, израда документације...). Најзначајније су 80-те године 20 века када је избушено рекордних 233.000 m бушења и тај период је назван „златне године“ за геологију на овом руднику. Могло би се рећи да тада некако и престаје основно геолошко истраживање угља те да су слојеви угља дефинисани како просторно, тако и по дубини. Већ почетком 90-тих година прелази се у фазу експлоатационих (рудничко-геолошких) истраживања и тај вид геолошких истраживања траје до данашњих дана. Нажалост рат у бившој Југославији и санкције према Србији успориле су ритам бушења и током 90-тих избушило се колико се могло, односно 40.000 m бушења.

#### ИСТРАЖНО БУШЕЊЕ У XXI ВЕКУ

„После 2000“ улазимо у 21 век. Истраживања су фокусирана на простор у активним површинским коповима, а то су типична експлоатациона истраживања која се изводе у циљу бољег дефинисања дубине и дебљине угљених слојева, њихове раслојености и одређивању квалитета. Свет улази у III-ћу а такође и у IV-ту технолошку револуцију. У руднику Колубара повећана пажња се посвећује хидрогеолошким и геотехничким истраживањима, истраживањима неметалних минералних сировина, еколошким и технолошким карактеристикама лигнита. У првих 20 година 21-вог века избушено је око 93.000 m бушења уз пратеће геолошке радове. Након 2020. године изводе се убрзана геолошка истраживања са циљем припреме квалитетне геолошке документације за рад на проширењу површинских копова и отварању нових. Ови геолошки истражни радови су у току и трајаће наредних неколико година. Повећан је обим лабораторијских испитивања, буши се са савременијим бушаћим гарнитурама. За те прве три године (2021 –почетак 2024) избушено је око 15.000 m.

the XX century. The so-called „old school“ of geologists during 60s and 70s performed over 160.000 m of drilling along with all accompanying geological works (core mapping, testing, documentation preparation...). The most significant are the 80s of the XX century when a record 233.000 m of drilling was drilled and that period was called the “golden years” for geology at this mine. It could be said that then the basic geological exploration of coal somehow ends and that the coal layers are defined both spatially and in depth. At the beginning of the 1990s, the phase of exploitation (mining-geological) research began, and this type of geological research continues to this day. Unfortunately, the war in the former Yugoslavia and the sanctions against Serbia slowed down the pace of drilling, and during the 90s, as much as possible was drilled, that is, 40.000 m of drilling.

#### XXI CENTURY DRILLING

„Beyond 2000“ we enter the XXI century. The research is focused on the area in active surface mines, it is typical exploitation research that is carried out in order to better define the depth and thickness of the coal layers, their stratification and quality determination. The world is entering the III and IV technological revolution. In the KCM, increased attention is paid to hydrogeological and geotechnical exploration, exploration of non-metallic mineral raw materials, ecological and technological characteristics of lignite. In the first 20 years of the XXI century, about 93.000 m of drilling was drilled with accompanying geological works. After 2020, accelerated geological exploration is being carried out with the aim of preparing high-quality geological documentation for work on the expansion of surface mines and the opening of new ones. These geological exploration works are ongoing and will continue for the next few years. The scope of laboratory tests has been increased, drilling is done with better quality drilling sets. In those first three years (2021 – early 2024) about 15.000 m were drilled.

## ИСТРАЖНО БУШЕЊЕ У XX И XXI ВЕКУ

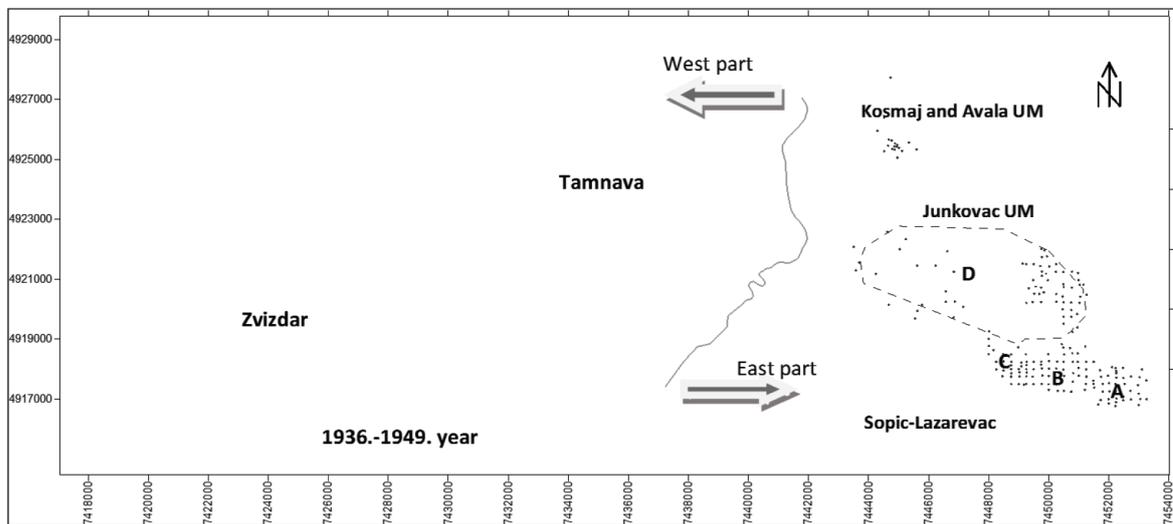
Може се констатовати да је после 32.000 геолошких дана избушено 600.000 m, а да су геолози Колубаре додали по једну нову истражну бушотину на свака 4 дана. Тиме се повећавао обим фондовске геолошке документације.

Почетни период примењених детаљних геолошких истраживања био је од 1936. до 1949. године (207 бушотина са 14.500 m бушења (слика 9)) и био је уводни за целокупну геологију Колубарског Басена. Након овог периода, Рудник лигнита Колубара почиње свој успешан радни век.

## XX-XXI CENTURY DRILLING

The conclusion is that after 32.000 geological days, that 600.000 m of drilling was drilled, and that KCM geologists added one new exploratory borehole every 4 days. Thus, the scope of the fund geological documentation was increasing.

The initial period of detailed geological surveys applied was from 1936 to 1949 and was most significant for the entire geology of the Kolubara Basin. After this period the Kolubara Lignite Mine begins its successful working life. During this period, 207 holes were drilled with 14.500 m of drilling (Figure 9).



Слика 9, Колубарски Угљоносни Басен истражне бушотине за период 1936-1949. – источни део, у пољима „А“, „Б“, „Ц“ и „Д“; у мањој мери око јама „Космај“ и „Авала“; црне тачкице – истражне бушотине, црна крива линија – река Колубара

Figure 9, Kolubara Coal Basin Boreholes from 1936-1949. – Eastern part in the fields „A“, „B“, „C“ and „D“; partly around the „Kosmaj“ and „Avala“ UM; black dots – drill holes, black curved line – Kolubara River

Током ових почетних година, одвија се једино подземна експлоатација, а површински копови су у фази развоја/пројектовања. Подземна експлоатација обављала се у 12 рударских окана, како у источном тако и у западном делу басена. Потрошња угља је била скромна, као и његова производња. Прва Термоелектрана у Србији „Колубара А“, отворена 1936. године, у селу Велики Црљени, је захтевала значајније количине лигнита и праћење његовог квалитета. Ова потражња за лигнитом је, супротно претходним годинама, наметнула почетак оз-

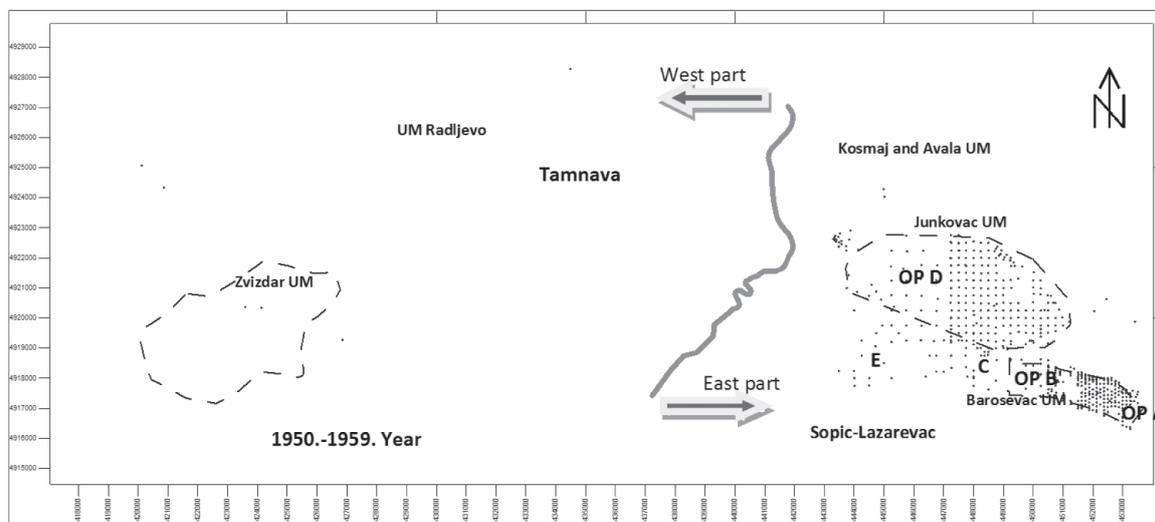
During these initial years, only underground mining takes place, surface mines are in the development/design stage. Underground exploitation was carried out in 12 mining shafts, both in the eastern and western parts of the basin. Coal consumption was modest, as was its production. The first thermal power plant in Serbia, „Kolubara A“, opened in 1936, in the village of Veliki Crljeni, required significant quantities of lignite and monitoring of its quality. This demand for lignite, contrary to previous years, forced the beginning of more serious geological research. After the WW II, very

билијних геолошких истраживања. После Другог светског рата, веома брзо, 1950. године, отворен је и први површински коп на угљу у Србији/Југославији „Поље А“.

Период од 1950. до 1959. године значајан је због отварања првих површинских копова ливита у Србији (површински коп „Поље А“ 1950. године). Током ове деценије избушено је 545 бушотина са 44.000 m бушења (Слика 10). Започете су припреме за отварање још два површинска копа – „Д“ и „Б“, а оба су отворена почетком 60-их година XX века.

quickly, in 1950, the first surface coal mine in Serbia/Yugoslavia, „Field A“, was opened.

The period from 1950. to 1959. is significant for the opening of the first lignite surface mines in Serbia (open pit „Field A“ in 1950.). During this decade, 545 boreholes were drilled with 44,000 m of drilling (Figure 10). There were preparations for opening two additional open pits „D“ and „B“, both in early 60s.



Слика 10, Колубарски Уљоносни Басен, истражне бушотине за период 1950-1959. – источни део у пољима „А“, „Б“, „Ц“ и „Д“; црне тачкице – истражне бушотине, црна крива линија – река Колубара

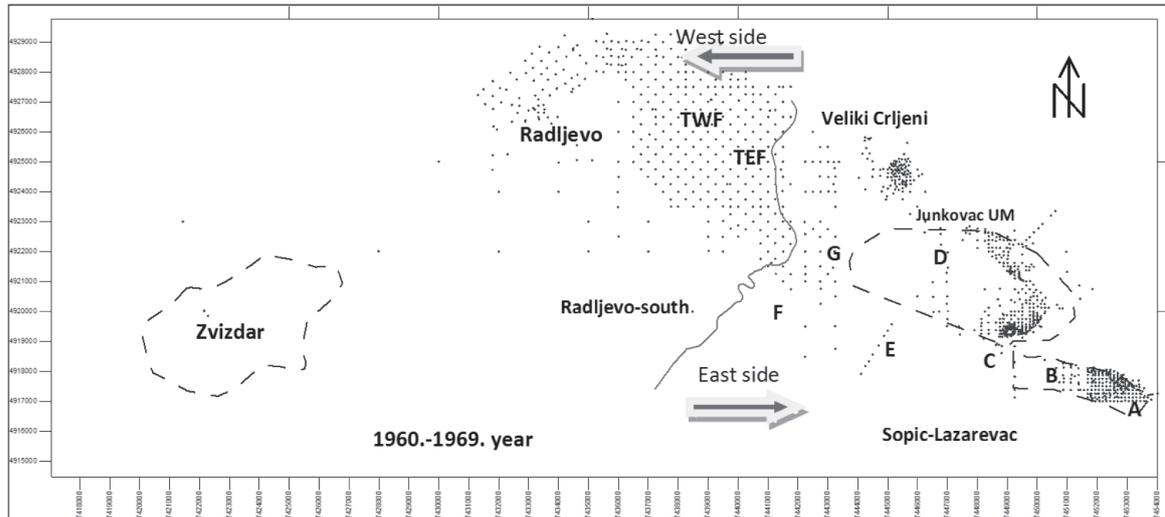
Figure 10, Kolubara Coal Basin drill holes from 1950-1959. – eastern part, in the fields „A“, „B“, „C“, „D“ and „E“; black dots – drill holes, black curved line – Kolubara River

Изузетно значајан период за геолошка истраживања био је између 1960. и 1969. године, када су истраживања такође по први пут прешла у западни део басена (поља „Радљево“ и „Тамнава“). Иако су у том западном делу басена биле у функцији две активне јаме угља („Звиздар“ и „Радљево“), озбиљна геолошка истраживања на том подручју (површине више од 100 km<sup>2</sup>) почела су тек почетком 60-их година XX века. Компанија разматра отварање нових површинских копова и на том подручју. У овом периоду избушено је 1.269 бушотина са 84.250 m бушења (Слика 11). Током 70-тих година настављају се геолошка истраживања на целом простору Колубарског Басена, у скоро подједнакој мери како у

An extremely significant period for geological exploration was between 1960. and 1969., when the exploration also for the first time moved to the western part of the basin (the fields „Radljevo“, „Tamnava“). Although two active underground coal pits „Zvizdar“ and „Radljevo“ were in operation in that Western part of the basin, serious geological research in that area (area of more than 100 km<sup>2</sup>) began only at the beginning of the 60s of XX century. The company is considering opening new surface mines in that area as well. During this period, 1.269 boreholes were drilled with 84.250 m of drilling (Figure 11). During the 1970s, geological explorations continued throughout the Kolubara Coal Basin, almost equally in the eastern and western parts of the area. Intensive drilling

источном, тако и у западном делу области. Интензивно се буши у зони отварања будућег површинског копа „Тамнава-Источно Поље“. Тај површински коп је отворен 1980. године.

is underway in the opening zone of the future surface mine „Tamnava-East Field“. That surface mine was opened in 1980.



Слика 11, Колубарски Уљоносни Басен, истражне бушоштине за период 1960-1969. – источни гео басена, у пољима „Б“, „Ц“, „Д“, „Е“, „Ф“, „Г“; у значајној мери око јама „Космај“ и „Авала“; у западном делу басена велики обим бушења у пољима „Тамнава-Источно и Западно поље“, „Радљево“; црне тачкице – истражне бушоштине, црна крива линија – река Колубара

Figure 11, Kolubara Coal Basin, drill holes from 1960-1969. year, the eastern part – in the fields „B“, „C“, „D“, „E“, „F“, „G“; significant around the „Kosmaj“ and „Avala“ UM; in the western part – in the fields Radljevo, Tamnava West and East Field (TWF, TEF), t; black dots – drill holes, black curved line – Kolubara River

Најзначајнији период за геолошка истраживања у Колубарском Басену био је од 1980. до 1989. године. На основу обима истраживања назван је и „Златно Доба“ геологије. У овом периоду избушено је 2.287 бушотина са 233.000 m (Слика 12). Буши се у целом басену, комбинујући класична истражна бушења везана за истраживање дистрибуције угља са експлоатационим рударско-геолошким бушењем на активним површинским коповима.

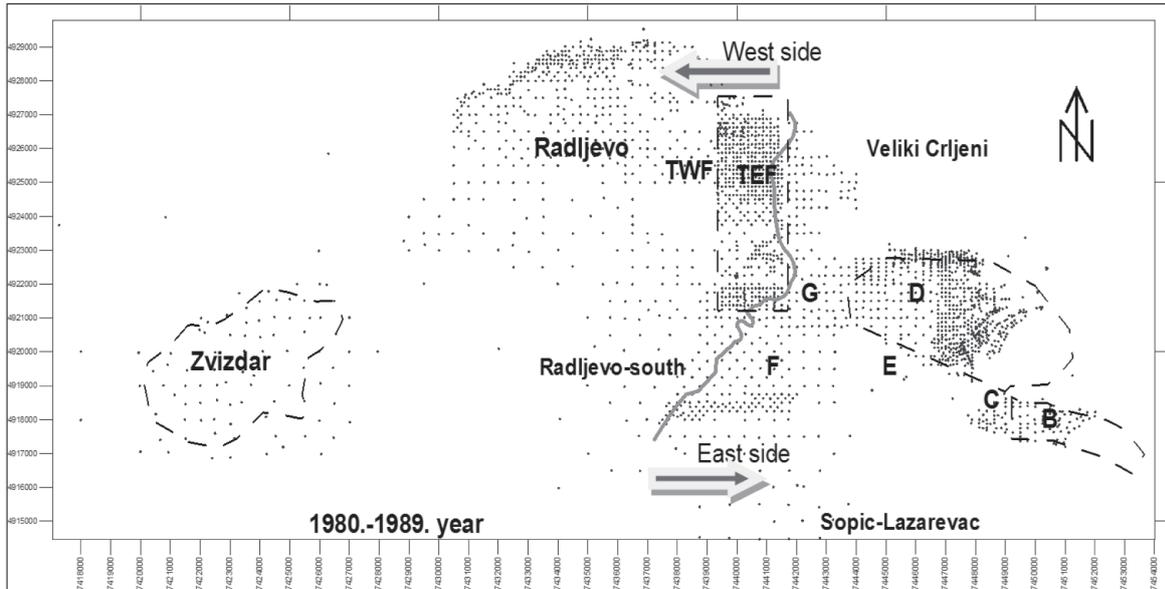
The most significant period for geological exploration at the KCM was from 1980 to 1989. Based on the scope of the research, it was also called the “golden age” of geology. During this period, 2,287 boreholes were drilled with 233,000 m of drilling (Figure 12). It is drilled throughout the basin, combining classic exploratory drilling related to the exploration of coal distribution with exploitative mining-geological drilling in running open pits.

Од 1990. до 2024. године фокус је био на погушћењу мреже истражних бушотина и оперативним рударско-геолошким истраживањима. Обим истражног бушења се постепено повећава, при чему се значајна пажња поклања повећању броја лабораторијских анализа на угљ.

From 1990. to 2024., the focus was on the densification of the exploration boreholes grid and operational mine-geological surveys. The volume of exploratory drilling is gradually increasing, with considerable attention being paid to increasing the number of coal tests taken.

Прошло је 88 година геолошких истраживања. Почело је ручним – сондажним гарнитурима, а у употреби су били и други

There have been 88 years of geological exploration past. It began with drilling with a shotgun, various technological types of drilling sets were in use, at the beginning of the III

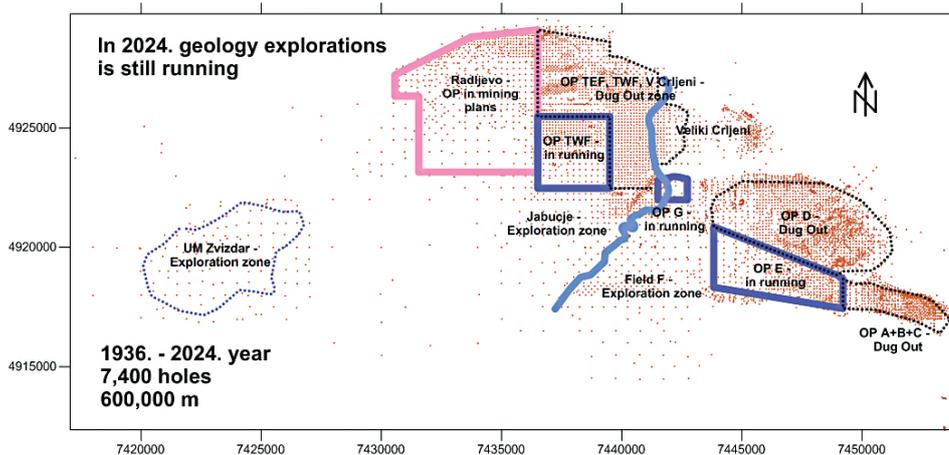


Слика 12, Колубарски Уљоносни Басен, истражне бушењине за период 1980-1989. – источни гео басена, у њојима „Б“, „Ц“, „Д“, „Е“, „Ф“, „Г“, „Велики Црљени“; у западном делу басена велики обим бушења у њојима „Тамнава-Источно и Западно њоље“, „Радљево“; значајно бушење у области око јаме „Звиздар“; црне тачкице – истражне бушењине, црна крива линија – река Колубара

Figure 12, Kolubara Coal Basin, holes from 1980-1989. year, the eastern part – in the fields „B“, „C“, „D“, „E“, „F“, „G“; Veliki Crljeni; in the western part – the fields „Tamnava-West“ and „Tamnava-East“, „Radljevo“, in high scope around the closed Zvizdar UM; black dots – drill holes, black curved line – Kolubara River

технолошки типови гарнитура за бушење. Почетком трећег миленијума у току је трећа, па чак и четврта светска технолошка револуција. Користе се најсавременије гарнитуре за бушење. У протеклих 32.000 геолошких дана на Колубарски површинским коповима је ископано 1,1 милијар-

millennium, the third and, sometimes, the fourth world technological revolution were underway, using the most modern drilling sets. In the past 32.000 geological days, 1.1 billion tons of coal were excavated at the Kolubara lignite mine, 7.400 exploratory boreholes were drilled, and every 4 days one



Слика 13, Све бушењине из периода 1936/2024. године у Колубарском Уљоносном Басену; укупно 7.400 бушењина, односно 600.000 т бушења; њлава крива линија – река Колубара

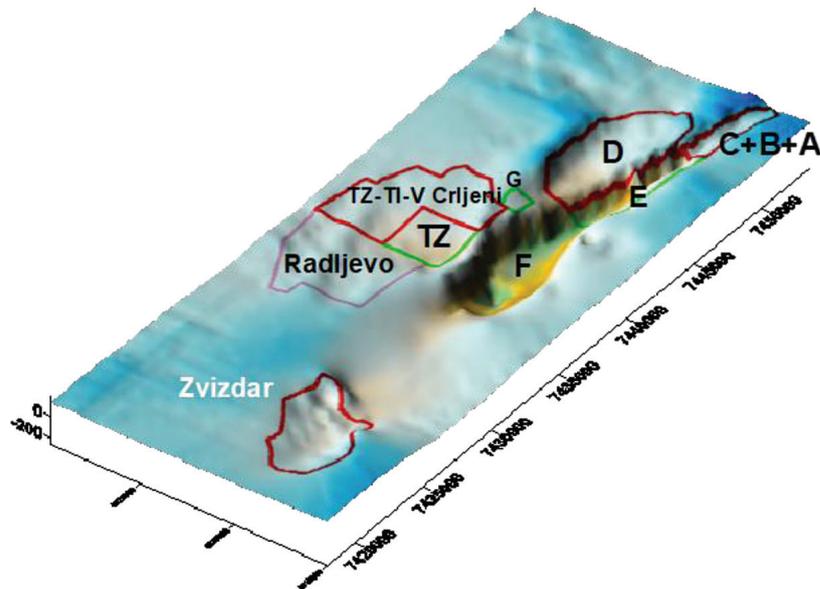
Figure 13, Kolubara Coal Basin, all drill holes from 1936. up to early 2024. year; in total 7.400 boreholes, and 600.000 m of core drilling; blue curved line – Kolubara River

ду тона угља, избушено је 7.400 истражних бушотина, а на свака 4 дана укупним геолошким подацима Колубарског басена додавана је по једна нова бушотина. У овом периоду избушено је укупно 600.000 метара бушотине (Слика 13).

Просторно, истражне бушотине су позициониране у најпродуктивнијем делу Колубарског угљоносног Басена. Морфологија подине слоја главног угљеног слоја може се сагледати са великом тачношћу (слика 14).

new hole was added to the total geological database of the Kolubara basin. A total of 600.000 meters of drilling were drilled during this period (Figure 13).

Spatially, these exploration boreholes are positioned throughout the most productive part of the Kolubara Coal Basin. The morphology of the floor layer of the main coal bed can be seen with great accuracy (Figure 14).



Слика 14, Заротирирани 3Д приказ године главној угљеној слоја у Колубарском угљоносном басену, хоризонтална размера 1:6.000, вертикална размера 1:1.000; црвено – ископана лежишта/копови А, Б, Ц, Д, Тамнава-Источно поље, и северни део која Тамнава Западно поље, као и део лежишта Велики Црљени; зелено – копови у раду Е, Г, јужни део Тамнава-Западно поље; розе – планирани кој Радљево; црвена фигура лево – лежиште Звиздар

Figure 14, Rotated 3D view of the floor of the main coal seam in the Kolubara coal basin, horizontal scale 1:6,000, vertical scale 1:1,000; red – Dug out beds/mines A, B, C, D, Tamnava-East field and the northern part of the Tamnava-West field mine, as well as part of the Veliki Crljeni deposit; light green – mines in operation C, E, G, part of the Tamnava West field mine – south parts; light violet surface mine Radljevo; red figure bottom left – Zvizdar deposit

Конечно, након свих ових година и бројних геолошких података (са више од 35.000 појединачних лабораторијских анализа угља, са преко 500.000 појединачних лабораторијских мерења, и бројним осталим лабораторијским резултатима/одредбама); са геолошком базом података о бушењу и лабораторијским резултатима; а након компјутерског моделовања могу се знатно поузданије моделовати морфолошке карактеристике угљених слојева

Finally, after all these years and numerous geological data (more than 35.000 individual laboratory coal analyses, with over 500.000 individual laboratory assaying, and numerous other laboratory determinations); with the geological database of drilling and laboratory; and after computer modeling, the morphological characteristics of the coal seams of the Kolubara Coal Basin can be modeled much more reliably. The presence of a depression in

Колубарског угљоносног басена. Уочава се присуство депресије у јужном делу Колубарског угљоносног басена, са најдубљим нивоом подине у „пољу Ф“ на -280 м.п.в., односно на 400 м од површине терена. Површински копови су започели са радом пре много година у најповољнијем делу басена, тамо где су угљени слојеви велике дебљине, мање раслојени јаловином и налазе се близу површине терена. Током декада рада површинских копова, изишло се из најповољнијих зона, а тренутно се експлоатација одвија у раслојеним и дубоко залежућим деловима лежишта, са све сложенијим условима за површинску експлоатацију. Овакви отежани геолошко-рударски услови захтевају убрзавање и повећање обима геолошких истраживања и испитивања, првенствено истражног бушења и одређивања квалитета угља, тако да се сада изводе додатна обимна комплетна и комплексна геолошка истраживања.

## ЗАКЉУЧАК

Данас, у предузећу Рудник Угља „Колубара“, укупно ради око 50 геолога са Рударско-Геолошког Факултета Београдског Универзитета који су распоређени у Геолошким одељењима на површинским коповима (оперативна рудничка геологија) и Геолошким одељењима за пројектовање (Пројектни биро „Колубара-Пројект“). Такође, у последњих 88 година многобројни геолошки претходници (из самог предузећа, као и са Геолошког Факултета Универзитета у Београду, ГеоИнститута и ГеоЗавода, оба Београд и др. ...) уложили су изузетан научни и стручни напор да пројектују, истраже и моделирају ово огромно налазиште лигнита. Упоредо са тим, обављају се и обимни додатни геолошки радови (геотехника, хидрогеологија, геоекологија, ...) који су у вези са експлоатацијом површинских копова угља. Сви геолошки истражни и експлоатациони радови су у току и биће убрзани.

the southern part of the Kolubara Coal Basin is observed, with the deepest subsoil level in „field F“ at -280 m.s.l., i.e. at 400 m from the surface of the terrain. Surface mines started working many years ago in the most favorable part of the area, where the coal layers are very thick, not layered with tailings and are located close to the surface of the terrain. During the decades of operation of surface mines, the most favorable zones were left, currently exploitation takes place in layered and deep-lying parts of deposits, which complicates and increases the problems related to surface exploitation. Such difficult geological-mining conditions require speeding up and increasing the scope of geological research/examination, primarily exploratory drilling and determination of coal quality, so that additional large-scale of complete and complex geological research is now being carried out.

## CONCLUSIONS

Today, in the company KCM, a total of 50 geologists from the Faculty of Mining and Geology of the University of Belgrade are employed, who are assigned to the Geological Departments at surface mines (operational mine geology) and the Geological Design Department (Project Office “Kolubara-Project”). Also, in the last 88 years, numerous geological predecessors (from the company itself, as well as from the Faculty of Geology of the University of Belgrade, GeoInstitute and GeoZavod, both Belgrade and others...) have made an extraordinary scientific and professional effort to design, explore and model this huge lignite site. At the same time, extensive additional geological works (geotechnics, hydrogeology, geocology, etc.) related to the exploitation of surface coal mines are carried out. All geological exploration and exploitation works are ongoing and will be accelerated.

[

## ЛИТЕРАТУРА / LITERATURE

- [1] Vučković B., Nešić D., Bogdanović V., Ilić Z.: Sustainable Development in Kolubara Coal Mines, Serbia – Non Metallic Resources as a Significant Additional Coal Open Pit's Income (Possible \$ Scenario) – VII International Brown Coal Mining Congress, 13-17 April, Belchatow, Poland, 2011., pp. 727-734
- [2] Vučković B., Nešić D.: Beyond 2010, Sustainable Development in Kolubara Coal Mines, Serbia – SGEM 11th International Multidisciplinary Scientific GeoConference, 20-25 June, Albena, Bulgaria, 2011., pp. 727-734
- [3] Vučković B., Nešić D., Anđelković N., Radovanović B., Ranković A., 2012: Analysis of the geological exploration of the ore fields of the Kolubara coal basin, Serbia – 3rd Symposium with International Participation «Mining 2012», 07-10. May 2012., Zlatibor Mt, 2012, pp. 99-107.
- [4] Vučković B., Nešić D., Anđelković N.: Geological Exploration Investments – What Does it Worth? (Review of Kolubara Coal Mines, Serbia) – SGEM 12th International Multidisciplinary Scientific GeoConference, 17-23 June, Albena, Bulgaria, 2012., pp. 593-602.
- [5] Vučković B.: Geological exploration of coal in the field "G", Kolubara Coal Basin – previous and planned, with a special focus on sulfur – X Conference with international participation, Environmental protection and sustainable development "Energy and Mining 2014", 11-13. March 2014., Tara Mt, Srbija, 2014, pp. 403-415.
- [6] Vučković B., Radosavljević S., Ignjatović M., Bakić V.: Investments in Geology Explorations – Results (Review of the Kolubara Coal Mines, Serbia) – 47th IOC, International October Conference on Mining and Metallurgy, 04-06 October, Bor Lake, Bor, Serbia, 2015., pp. 41-44.
- [7] Vučković B., Simić Z., Stevanović-Petrović N., Radovanović B.: Geological and Exploitation reserves of coal deposit Veliki Crljeni, Kolubara Coal Basin – a view of exploitation in the period of exploitation – VI International Conference "COAL 2015", 14-17. October 2015., Zlatibor Mt, Srbija, 2015, pp. 459-466.
- [8] Vučković B., Stojković H., Ignjatović M., Šubaranović T., Rakijaš M.: Comparison of Kolubara lignite value (with selected natural and artificial materials) – natural indicators – 13th International Symposium Continuous Surface Mining "ISCSM 2016", 11-14. Sept. 2016, Belgrade, Serbia, 2016, pp. 657-673. ISBN: 978-86-83497-23-2
- [9] Vučković B., Baćanac V., Bakić V.: Operating costs of geological surveys in selected deposits of lignite – Mining Basin Kolubara, Serbia – 1st International Symposium "Investments, New Technologies In Mining And Sustainable Development 2016", 24-25. November 2016., Sabac, Srbija, 2016, pp. 79-87, ISBN: 978-86-80464-04-6
- [10] Vučković B., Dimitrijević B.: Investments in geological exploration and affectation on mining operating cash costs at lignite open pits Kolubara (Lazarevac), Serbia – 14th International Symposium Continuous Surface Mining "ISCSM 2018", 23-26. Sept. 2018, Thessalonica, Greece, book of abstracts, 2018.
- [11] Vučković B., Dimitrijević B., Radovanović B., Simić Z., Stojković H.: Geological explorations of lignite on the "E field" and affectation on mining operations designing, Mining Basin Kolubara, Serbia – 13th International Conference of Surface Mining OMC 2018, 17-20 Oct. 2018, Zlatibor mt, Serbia, 2018.
- [12] Vučković B., Dimitrijević B., Ilić S.: Geology exploration costs and operating cash costs at Kolubara lignite open pits, Serbia; (Selected deposit review) – II International Symposium Mining and Geology Today, 04 Dec 2018, Belgrade, Serbia, Proceedings, 2018, pp. 102-114, ISBN: 978-86-82673-14-9
- [13] Vučković B., 2019: 4 Milijarde tona uglja – 85 Godina rada geologa Kolubare – XV Sajam Energetike, Beogradski Sajam, 03-05. Oktobar 2019., Beograd, Predavanje po pozivu, 2019.
- [14] Vučković B., Životić D., Radovanović B., Stojković H., 2019: 85 godina geoloških istraživanja lignita u Kolubarskom ugljonosnom basenu, dekade rada i rezultati, pregledni prikaz – 9th International Conference "COAL 2019", 23-26. October 2019., Zlatibor, Serbia, 2019, pp. 445-459, ISBN: 978-86-83497-24-9
- [15] Vučković B.: Evaluation of coal quality parameters of the Kolubara Coal Basin – Geology Faculty, Belgrade University, 2020.
- [16] Vučković B. Periodi geoloških istraživanja lignita Kolubarskog Ugljonosnog Basena – ostvareni prirodni pokazatelji i pravci daljih aktivnosti – XII Simpozijum sa

- међународним уčešћем ”RUDARSTVO 2021”, 01-04. Jun 2021., Vrnjačka Banja, Serbia, 2021, pp. 140-162, ISBN: 978-86-80420-24-0
- [17] Vučković B., Radovanović B., Životić D.: Tehnološke karakteristike lignita Kolubarskog Ugljonosnog Basena, Srbija – XIV Simpozijum sa međunarodnim učešćem ”RUDARSTVO 2022”, 23-26. Maj 2022., Vrnjačka Banja, Serbia, 2022, pp. 140-162, ISBN: 978-86-80420-24-0
- [18] Anđelković N., Vučković B., i dr.: Elaborat o rezervama uglja polja ”F”, stanje 31.12.2009. godine – PD RB ”Kolubara”, Ogranak ”Projekt”, RJ Geološko projektovanje, Lazarevac, 2010.
- [19] Babić M., Vučković B., i dr.: Elaborat o rezervama uglja istražnog polja ”E”, stanje 31.12.2006. godine, PD RB Kolubara, Lazarevac – PD RB ”Kolubara”, Ogranak ”Površinski kopovi Baroševac” i ”Projekt”, RJ Geološko projektovanje, Lazarevac, 2008.
- [20] Blečić N., Kondžulović R., Vučković B., Terzić B.: Projekat detaljnih geoloških istraživanja uglja ležišta Tamnava-Zapadno polje – RGF Beograd i JP RB ”Kolubara”, DP ”Kolubara-Projekt”, RJ Geološko projektovanje, Lazarevac, 2004.
- [21] Bogdanović V., Vučković B., i dr.: Studija istražnih radova na lokaciji ”Istočna Kipa” u cilju utvrđivanja tehnoloških uslova za otkopavanje – PD RB ”Kolubara”, Ogranak ”Projekt”, RJ Geološko projektovanje, RGF Beograd, Lazarevac, 2007.
- [22] Ilić Z., Vučković B., i dr.: Dopunski rudarski projekat eksploatacije ležišta Tamnava-Istočno polje do kraja eksploatacije, JP RB Kolubara, Lazarevac – JP RB ”Kolubara”, DP ”Kolubara-Projekt”, RJ Geološko projektovanje, RJ Rudarsko projektovanje, Lazarevac, 2003.
- [23] Ilić Z., Vučković B., i dr.: Dopunski rudarski projekat eksploatacije uglja ležišta Tamnava-Zapadno polje, JP RB Kolubara, Lazarevac – JP RB ”Kolubara”, DP ”Kolubara-Projekt”, RJ Geološko projektovanje, RJ Rudarsko projektovanje, Lazarevac, 2004.
- [24] Ilić Z., Vučković B., i dr.: Studija izbor ograničenja i otvaranja površinskog kopa ”Južno Polje” u kolubarskom ugljonosnom basenu – PD RB ”Kolubara”, Ogranak ”Projekt”, RJ Geološko projektovanje, RGF Beograd, Lazarevac, 2007.
- [25] Jevtić B., Vučković B., i dr.: Studija izbor ograničenja i otvaranja površinskog kopa ”polje E” za kapacitet od 12 miliona tona uglja godišnje – JP RB ”Kolubara”, DP ”Kolubara-Projekt”, RJ Geološko projektovanje, RJ Rudarsko projektovanje, Lazarevac, 2005.
- [26] Kitanović Z., Vučković B., i dr.: Elaborat o rezervama uglja ležišta Tamnava-Zapadno polje, stanje 31.12.2004. godine, JP RB Kolubara, Lazarevac – JP RB ”Kolubara”, DP ”Kolubara-Površinski kopovi”, Baroševac i DP ”Kolubara-Projekt”, RJ Geološko projektovanje, Lazarevac, 2005.
- [27] Kitanović B., Terzić B., Vučković B. i dr.: Idejni projekat sa studijom opravdanosti proširenja granica površinskog kopa ”polje D” – JP RB ”Kolubara”, DP ”Kolubara-Projekt”, RJ Geološko projektovanje, Lazarevac, 2005.
- [28] Kitanović B., Vučković B.: Idejni program sa studijom opravdanosti otvaranja i izgradnje površinskog kopa ”polje E” – PD RB ”Kolubara”, DP ”Kolubara-Projekt”, RJ Geološko projektovanje, RJ Rudarsko projektovanje, Lazarevac, 2007.
- [29] Krstić V., Simić Ž., Vučković B., i dr.: Tehnički rudarski projekat otkopavanja otkrivke i uglja u južnoj kosini površinskog kopa polje ”D” – PD RB ”Kolubara”, Ogranak ”Projekt”, RJ Geološko projektovanje, RJ Rudarsko projektovanje, Lazarevac, 2015.
- [30] Krstić V., Vučković B.: Studija izvodljivosti eksploatacije ležišta polje ”E” – Ogranak RB ”Kolubara”, Organizaciona celina ”Projekt”, RJ Geološko projektovanje, RJ Rudarsko projektovanje, 2018.
- [31] Kulić Z., Vučković B.: Glavni rudarski projekat Površinskog kopa polje ”E” – Ogranak RB ”Kolubara”, Organizaciona celina ”Projekt”, RJ Geološko projektovanje, RJ Rudarsko projektovanje, 2018.
- [32] Marinković I., Petronijević Lj., Vučković B., i dr.: Elaborat o rezervama uglja polja F, stanje 31.12.2002. godine, JP RB Kolubara, Lazarevac – JP RB ”Kolubara”, DP ”Kolubara-Površinski kopovi”, Baroševac i DP ”Kolubara-Projekt”, RJ Geološko projektovanje, Lazarevac, 2004.
- [33] Mičić P., Vučković B., i dr.: Elaborat o rezervama uglja ležišta Tamnava-Istočno polje, stanje 31.12.2003. godine, JP RB Kolubara, Lazarevac – JP RB ”Kolubara”, DP ”Kolubara-Površinski kopovi”, Baroševac i DP ”Kolubara-Projekt”, RJ Geološko projektovanje, Lazarevac, 2004.
- [34] Nešić D., Nešić G., Terzić B., Vučković B. i dr.: Glavni rudarski projekat površinskog kopa

- “Veliki Crljeni” – JP RB “Kolubara”, DP “Kolubara-Projekt”, RJ Geološko projektovanje, Lazarevac, 2005.
- [35] Nešić D., Spasić A., Vučković B.: Idejni projekat sa Studijom opravdanosti eksploatacije PK “polje C” sa otkopavanjem odlagališta “Istočna Kipa” – PD RB “Kolubara”, “Kolubara-Projekt”, RJ Geološko projektovanje, RGF Beograd, 2008.
- [36] Petronijević Lj., Marinković I., Vučković B., i dr.: Elaborat o rezervama uglja ležišta Veliki Crljeni, JP RB Kolubara, Lazarevac, stanje 31.12.2002. godine – JP RB Kolubara, DP Kolubara-Projekt, RJ Geološko projektovanje, Lazarevac, 2003.
- [37] Radovanović J., Spasić A., Vučković B., i dr.: Glavni rudarski projekat proširenja površinskog kopa “polje C” – JP EPS, PD RB “Kolubara”, Ogranak “Projekt”, RJ Geološko projektovanje, Lazarevac, 2009.
- [38] Radovanović B., Vučković B., i dr.: Elaborat o resursima i rezervama uglja polje “D”, kolubarski ugljonosni basen, stanje 31.12.2014. godine – PD RB “Kolubara”, Ogranak “Projekt”, RJ Geološko projektovanje, Lazarevac, 2016.
- [39] Radovanović B., Vučković B., i dr.: Projekat istraživanja ležišta “Zvizdar” izvođenjem primenjenih – stadijum detaljnih geoloških istraživanja – JP EPS, Ogranak PD RB “Kolubara”, Organizaciona celina “Projekt”, RJ Geološko projektovanje, Lazarevac, 2018.
- [40] Sabov D., Vučković B., i dr.: Idejni projekat otvaranja i izgradnje površinskog kopa “Polje G” – PD RB “Kolubara”, Ogranak “Projekt”, RJ Rudarsko i Geološko projektovanje, RGF Beograd, 2011.
- [41] Sabov D., Vučković B., i dr.: Dopunski rudarski projekat eksploatacije uglja ležišta “Tamnava-Zapadno polje”, PD RB Kolubara, Lazarevac – PD RB “Kolubara”, Ogranak “Projekt”, RJ Geološko projektovanje, RJ Rudarsko projektovanje, Lazarevac, 2013.
- [42] Sabov D., Vučković B., i dr.: Glavni rudarski projekat površinskog kopa “polje G” – JP EPS, PD RB “Kolubara”, Ogranak “Projekt”, RJ Geološko projektovanje, Lazarevac, 2014.
- [43] Sabov D., Vučković B., i dr.: Studija izvodljivosti eksploatacije otkrivke i uglja na površinskom kopu polje G – JP EPS, PD RB “Kolubara”, Ogranak “Projekt”, RJ Geološko projektovanje, Lazarevac, 2014.
- [44] Simić Ž., Vučković B., i dr.: Dopunski rudarski projekat površinskog kopa polje “C”, RB Kolubara, Lazarevac – PD RB “Kolubara”, Ogranak “Projekt”, RJ Geološko projektovanje, RJ Rudarsko projektovanje, Lazarevac, 2014.
- [45] Simić Ž., Vučković B., i dr.: Dopunski rudarski projekat proširenja površinskog kopa “Veliki Crljeni”, RB Kolubara, Lazarevac – PD RB “Kolubara”, Ogranak “Projekt”, RJ Geološko projektovanje, RJ Rudarsko projektovanje, Lazarevac, 2015.
- [46] Vučković B., Radovanović B., Bogdanović V., Buhač D.: Projekat geoloških istraživanja uglja “polja E” – JP RB “Kolubara”, DP “Kolubara-Projekt”, RJ Geološko projektovanje, Lazarevac, 2006.
- [47] Vučković B., Radovanović B., Bogdanović V., Bukvić B.: Projekat geoloških istraživanja uglja ležišta “polje Radljevo” kolubarski ugljonosni basen – JP EPS, PD RB “Kolubara”, Ogranak “Projekt”, RJ Geološko projektovanje, Lazarevac, 2009.
- [48] Vučković B., Radovanović B.: Elaborat o rezervama uglja polja “Veliki Crljeni”, stanje 31.12.2008. godine – PD RB “Kolubara”, Ogranak “Projekt”, RJ Geološko projektovanje, Lazarevac, 2009.
- [49] Vučković B., Radovanović B. i dr.: Elaborat o resursima i rezervama uglja polje “Veliki Crljeni”, kolubarski ugljonosni basen, stanje 31.12.2014. godine – PD RB “Kolubara”, Ogranak “Projekt”, RJ Geološko projektovanje, Lazarevac, 2015.
- [50] Vučković B.: Projekat primenjenih geoloških istraživanja dela južne kosine PK “Polje E” za potrebe projektovanja i izgradnje TC Zeoke VIII – Ogranak RB “Kolubara”, OC “Projekt”, RJ Geološko projektovanje, Lazarevac, 2023.
- [51] Vučković B.: Projekat primenjenih geoloških istraživanja uglja ležišta “Polje E” – Ogranak RB “Kolubara”, OC “Projekt”, RJ Geološko projektovanje, Lazarevac, 2023.
- [52] EPS, Kolubara Coal Mines, Technical & Designing Documents
- [53] EPS, Designing Division “Project”, Technical & Designing Documents
- [54] www.EPS.co.rs



## ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ / PhD THESIS

Др Јасмина Нешковић, дипл.инж.рударства

Dr Jasmina Nešković, mining engineer

### ХИДРАТАЦИЈА НОВОСИНТЕТИЗОВАНОГ БЕЛИТНОГ ЦЕМЕНТА СА МИНЕРАЛНИМ ДОДАЦИМА

### HYDRATION OF NEWLY SYNTHESIZED BELITE CEMENT WITH MINERAL ADDITIVES

Универзитет у Београду, Технички факултет у  
Бору, 29. 02. 2024.

University of Belgrade Technical Faculty in Bor,  
29.02.2024

ментори проф. др Милан Трумић,  
Универзитет у Београду,  
Технички факултет у Бору  
и проф. др Снежана Вучетић,  
Универзитет у Новом Саду,  
Технолошки факултет у Новом Саду

mentors prof. dr Milan Trumić,  
University of Belgrade,  
Technical Faculty in Bor  
and prof. dr Snežana Vučetić,  
University of Novi Sad,  
Faculty of Technology Novi Sad

**Сажетак:** Експериментална истраживања која су изведена у оквиру докторске дисертације имала су за циљ припрему нових врста алитних и белитних малтера који у свом саставу садрже пепео и згруу као индустријске отпадне минералне додатке. Након вештачки изазваних пукотина на њима, спроведена су лечења на три начина: 1) продуженом хидратацијом у условима чесменске и Дунавске воде 2) потапањем у суспензију лековитог агенса (10 мас% суспензије новосинтетизованог белита у дестилованој води) 3) био-индукованим зацељењем спољашњом апликацијом лековитог агенса (суспензија бактерије *Sporosarcina pasteurii* DSM 33) у контролисаним условима стерилне деминерализоване и Дунавске воде

**Abstract:** The experimental research carried out as part of doctoral dissertation aimed to prepare new types of alite and belite mortars that contain fly ash and blast furnace slag as industrial waste mineral additives. After artificially induced cracks, they were treated in three ways: 1) prolonged hydration in the conditions of tap water and Danube water, 2) by immersion in a suspension of the healing agent (10 mass% suspension of newly synthesized belite in distilled water) and 3) bio-induced healing by application of external healing agent, a suspension of the bacteria *Sporosarcina pasteurii* DSM 33 in controlled conditions of sterile demineralized and Danube water.

Узимајући у обзир све добијене резултате у оквиру докторске дисертације могуће је констатовати неколико значајних науч-

Taking into account all of the obtained results within the doctoral dissertation, it is possible to state several significant scientific achievements in relation to existing publications both at the national and international level. This novelty is primarily reflected in the fact that the self-

них достигнућа у односу на постојеће публикације, како на националном тако и на међународном нивоу. Ове новине се пре свега огледају у чињеници да је процес самозацељена праћен у присуству бактеријске културе на стандардним цементним малтерима са минералним додацима, као и на белитним малтерима који у свом саставу такође имају минералне додатке. Такође, значајну новину представља и неговање малтера у суспензији новосинтетизованог белита, а нарочито неговање малтера током процеса био-индукованог самозацељења у Дунавској води, што је значајан корак у преласку научних резултата са лабораторијског нивоа на реалне системе. На крају, резултати имају изразити мултидисциплинарни карактер јер иако вештачке неуронске мреже имају широку примену у многим областима друштвених и техничких наука још увек су у фази развоја у области примене праћења ефикасности био-индукованог зацељења цементних малтера.

Др Жељко Праштало, дипл.инж.рударства

ОДЛУЧИВАЊЕ У СЛУЧАЈУ  
ДИФЕРЕНТНОСТИ ПРОЈЕКТНИХ  
РУДНИЧКИХ РЕШЕЊА УПОРЕДНИМ  
ЈЕДНО И ВИШЕКРИТЕРИЈУМСКИМ  
МОДЕЛОВАЊЕМ

Универзитет у Београду,  
Рударско геолошки факултет, 10.07.2024.  
ментор проф. др Игор Миљановић,  
Универзитет у Београду,  
Рударско геолошки факултет

**Сажетак:** Предмет истраживања докторске дисертације је упоредна примена једно и вишекритеријумске анализе у решавању проблема у рударству, и питање доношења управљачких одлука када су решења диферентна. У сврху одређивања приоритетних снабдевача кречњачком минералном силовином, 2014. године урађена је „Студија о могућности снабдевања кречњаком за потребе одсумпоравања димних гасова (ОДГ) ТЕ Костолац, ТЕ Никола Тесла и нових тер-

healing process was monitored in the presence of bacterial culture on standard cement mortars with mineral additives as well as on belite mortars that also have mineral additives in their composition. Also, a significant novelty is the curing of mortar in a suspension of newly synthesized belite, and especially the curing of mortar during the process of bio-induced self-healing in Danube water, which is a significant step in the transfer of scientific results from the laboratory level to real systems. In the end, the results have a distinct multidisciplinary character because although artificial neural networks are widely used in many areas of social and technical sciences, they are still in the development phase in the field of application of monitoring the effectiveness of bio-induced healing of cement mortars.

Dr Željko Praštalo, mining engineer

DECISION MAKING IN CASE OF  
DIFFERENCE OF PROJECT MINING  
SOLUTIONS BY COMPARATIVE ONE  
AND MULTICRITERIA MODELING

University of Belgrade,  
Faculty of Mining and Geology, 10.07.2024  
mentor prof. dr Igor Miljanović,  
University of Belgrade,  
Faculty of Mining and Geology

**Abstract:** The subject of research of doctoral dissertation is parallel use of single and multiple criteria analysis on problem solving in mining industry and a question of decision making of management decisions when solutions are different. Purposefully, to decide priority suppliers of limestone as a mineral material, in the year 2014., the “Study of the possible supply of limestone for desulfurization of flue gases TE Kostolac, TE Nikola Tesla and new thermal capacities” was made, in which multiple criteria analysis was used for individual segments needed for a decision. It would have been more desirable that, instead of this “segment” analysis, the analysis which would include all the elements needed for quality decision making in one unified model for decision making. Aim of research is try to solve this problem in

мо капацитета“ у којој се користила више-критеријумска анализа појединих сегмената потребних за одлучивање. Пожељније би било да је уместо ове „сегментне“ анализе, урађена анализа која би објединила све елементе потребне за квалитетно одлучивање у једном јединственом моделу за одлучивање. Покушај решавања овог проблема у јединственом методолошком приступу, са циљем могућности проналаска модела који би објединио све важне факторе који утичу на избор најквалитетнијег решења при одлуци о избору начина снабдевања термоелектрана кречњачким агрегатом за процес одсумпоравања димних гасова. Анализа осетљивости рангова показала је да мале до ниже средње промене ентитетских параметара не утичу на стабилност решења, што упућује на закључак да би вишеатрибутно конституисан план снабдевања био такође релативно постојан. Међутим, тестирање осетљивости рангова са различитим релативним тежинама атрибута, показало је јаку повезаност, што упозорава да тежине морају бити промишљено и објективно дефинисане. Разлике моделских резултата које су готово извесне, могуће је премостити преферирањем критеријума, најчешће економетријског, у овом случају коришћена је цена кречњака, пондерисањем или другим приступом.

unique methodological approach and possibility to find model which would unite all the major factors that impact the choice of the most quality solution when decision making about the way to supply thermal power plants with limestone for desulfurization process of flue gases. Analysis of rank sensitivity showed that small to small-medium changes of entity parameters do not impact stability of a solution, from which can be concluded that multiple criteria made plan of supply plan would be also relatively stable. However, testing of rank sensitivity with different relative attribute weights showed strong connection, which indicates that the weights must be thoughtfully and objectively defined. Differences between model results which are almost certain can be resolved with preferred criteria, most likely econometric. In this case the price of limestone is used by weighting or other approach.



## ЗНАЧАЈНИ ДОГАЂАЈИ / SIGNIFICANT EVENTS

III МЕЂУНАРОДНИ СИМПОЗИЈУМ РУДАРСТВО И ГЕОЛОГИЈА ДАНАС, одржан у Београду 28-29. новембра 2024, организатор Рударски институт д.о.о. Београд уз подршку Министарства науке, технолошког развоја и иновација и Електропривреде Србије.

У раду Симпозијума учествовало је 115 аутора из Србије, Румуније, Хрватске, Немачке, Финске, Аустрије, Швајцарске, Републике Српске БиХ, Бугарске, Словеније и САД.

Материјалну подршку организацији Симпозијума пружили су: Министарство науке, технолошког развоја и иновација, Електропривреда Србије, Рударски институт д.о.о. Београд, Zijin mining Бор, Geobruigg Хрватска, Рудник Рудник, WBM Београд, Рудник Ковин и Balkan Gold Београд.

Према оцени учесника, Симпозијум је веома успешно организован. Галерија фотографија са Симпозијума се може погледати на сајту Рударског института <https://ribeograd.ac.rs/>.

Приредила Јасмина Нешковић

III INTERNATIONAL SYMPOSIUM MINING AND GEOLOGY TODAY, held in Belgrade 28-29. Novembre 2024, organizers Mining institute Ltd. Belgrade with support Ministry of Science, Technological Development and Innovation and Joint Stock Company „Elektroprivreda Srbije”.

The Symposium was participated by 115 authors from from Serbia, Romania, Croatia, Germany, Finland, Austria, Switzerland, Republika Srpska BiH, Bulgaria, Slovenia and USA.

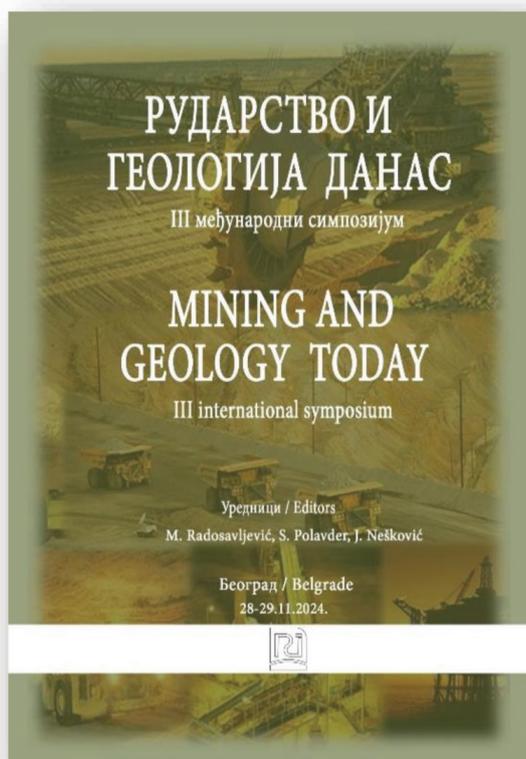
Material support for the Symposium organization was provided by the Ministry of Science, Technological Development and Innovation, Electric Power Industry of Serbia, Mining Institute Ltd. Belgrade, Zijin mining Bor, Geobruigg Croatia, Rudnik Rudnik, WBM Belgrade, Rudnik Kovin and Balkan Gold Belgrade.

According to the general participant evaluation, the Symposium was organized very successfully. The photo gallery from the Symposium can be viewed on the Mining Institute website <https://ribeograd.ac.rs/>.

Edited by: Jasmina Nešković



КЊИГЕ / BOOKS



ЗБОРНИК РАДОВА III МЕЂУНАРОДНОГ СИМПОЗИЈУМА РУДАРСТВО И ГЕОЛОГИЈА ДАНАС, СР 55(082), 622(082), COBISS.SR-ID 156422665, DOI префикс 10.5937/RGD24, организатор и издавач Рударски институт д.о.о. Београд уз подршку Министарства науке, технолошког развоја и иновација и Електропривреде Србије. Извршни организатор и издавач Рударски институт д.о.о. Београд, ISBN 978-86-82673-24-8, 423 стране. Штампање књиге омогућили Рударски институт д.о.о. Београд и Министарство науке, технолошког развоја и иновација. Уредници др Милинко Радосављевић, др Светлана Полавдер, др Јасмина Неškовић.

BOOK OF PROCEEDINGS III INTERNATIONAL SYMPOSIUM MINING AND GEOLOGY TODAY, COBISS.SR-ID 156422665, DOI prefix 10.5937/RGD24, organizers and publishers Mining institute Ltd, Belgrade with support Ministry of Science, Technological Development and Innovation and Joint Stock Company „Elektroprivreda Srbije”. Executive organizers and publisher Mining institute Ltd, Belgrade, ISBN 978-86-82673-24-8, 423 pages. The printing of the book was enabled by Mining institute Ltd, Belgrade and Ministry of Science, Technological Development and Innovation. Editors dr Milinko Radosavljević, dr Svetlana Polavder, dr Jasmina Nešković.

Симпозијум је одржан 28-29 новембра 2024. у Београду. Теме симпозијума односиле су се на експлоатацију минералних сировина (подземну, површинску, подводну, комбиновану, експлоатација нафте и гаса), припрему минералних сировина, логистичке рудничке процесе, геологију (рудничка геологија, инжењерска и хидрогеологија, геотехника, геофизика и др.), заштиту животне и радне средине, заштиту рудника и одлагалишта од вода, рекултивацију, ревитализацију и уређење деградираних површина, економику минерално-сировинског комплекса, стандарде, законску и нормативну регулативу, ризике и управљање ризицима, образовање рударских и геолошких стручњака, рударство и археологију, вештачку интелигенцију и њену примену у рударству и геологији, одрживо рударство. У Зборнику радова на 423 страна публиковано је 42 рада, 115 аутора из 11 земаља.

Приредила Јасмина Нешковић

The Symposium was held 28-29. Novembre 2024 in Belgrade. The topics of the Symposium were related to the Exploitation of mineral resources (underground, surface, underwater, combined, exploitation of oil and gas), Mineral Processing, Logistical mining processes, Geology (mining geology, engineering and hydrogeology, geotechnics, geophysics, etc.), Environmental protection and occupational safety, Water protection of mines and landfills, Recultivation, revitalization and restoration of degraded surfaces, Economics of the mineral resource complex, Standards, legislative and normative regulations, Risks and risk management, Education of mining and geological experts, Mining and Archeology, Artificial Intelligence – application in Mining and Geology, Sustainable Mining. Proceedings of the papers on the 423 pages published 42 papers, 115 authors from 11 countries.

Edited by: Jasmina Nešković

ЈЕДИНСТВЕНА ИДЕНТИФИКАЦИЈА АУТОРА  
OPEN RESEARCH AND CONTRIBUTOR ID (ORCID)

Срећко Стопић / Srećko Stopić.....	0000-0002-1752-5378	стр. / п. 7
Ненад Николић / Nenad Nikolić.....	0000-0002-5730-7391	стр. / п. 7
Драгана Животић / Dragana Životić.....	0000-0002-2202-3356	стр. / п. 7
Милена Росић / Milena Rosić.....	0000-0001-7093-187X	стр. / п. 7
Фридрих Бернд / Friedrich Bernd.....	0000-0002-2934-2034	стр. / п. 7
Сорин Михаи Раду / Sorin Mihai Radu.....	0000-0002-1263-9130	стр. / п. 29
Драган Милошевић / Dragan Milošević.....	0000-0003-3714-1950	стр. / п. 41
Тања Миладиновић / Tanja Miladinović.....	0000-0002-1174-5599	стр. / п. 41
Жељко Праштало / Željko Praštalo.....	0000-0001-5459-4076	стр. / п. 41
Снежана Јаковљевић / Snežana Jakovljević.....	0000-0003-2163-9631	стр. / п. 41
Ивана Јовановић / Ivana Jovanović.....	0000-0002-7450-6632	стр. / п. 63
Сања Петровић / Sanja Petrović.....	0000-0001-5197-1614	стр. / п. 63
Јасмина Нешковић / Jasmina Nešković.....	0000-0002-1798-1656	стр. / п. 63
Павле Стјепановић / Pavle Stjepanović.....	0000-0001-5458-7968	стр. / п. 63
Огњен Поповић / Ognjen Popović.....	0000-0001-9005-0092	стр. / п. 73
Саша Јовановић / Saša Jovanović.....	0009-0006-9728-0695	стр. / п. 73



## УПУТСТВО АУТОРИМА INSTRUCTION FOR AUTHORS

### Подношење чланака

Сва кореспонденција, укључујући подношење чланака и поступак рецензије, обавља се путем е-маил адресе главног и одговорног уредника.

Чланци се разврставају у категорије у складу са Правилником о категоризацији и рангирању научних часописа („Службени гл. РС”, бр 159/20, Прилог 1) и то као:

#### *Научни чланци*

Оригиналан научни рад  
Прегледни рад  
Претходно саопштење  
Научна критика

#### *Стручни чланци*

Стручни рад  
Информативни прилог  
Приказ  
Стручна критика

### Припрема радова

Часопис Рударски гласник нема ограничења у дужини чланака, али исти не би требало да буду краћи од 5 страница. Чланке треба писати на српском (ћирилицом) и енглеском језику, са следећом структуром: наслов, имена и презимена аутора, назив установе аутора (афилијације), е-маил аутора за кореспонденцију, ORCID број свих аутора (уколико их имају), сажетак, кључне речи,

### Submission of articles

All correspondence, including the submission of articles and the requests for revisions, will be done through the e-mail address of editor in chief.

**Types of Contribution** („Službeni gl. RS”, br 159/20, Prilog 1):

#### *Scientific articles*

Original Scientific Paper  
Review  
Preliminary Report  
Critical Review

#### *Expert articles*

Expert Paper  
Informative article  
Expert Review  
Expert Criticism

### Preparation of articles

Journal Bulletin of Mines has no restrictions on the length of the articles, but articles should not be shorter than 5 pages. Articles should be written in Serbian (Cyrillic) and English, with the following structure: title, authors, affiliations, e-mail of corresponding author, ORCID number of all authors (if they have), abstract, key words, main text, acknowledgements (option), references. In main text use no numbered headings for the following sections: introduction, experimental, results, discussion and conclusions.

текст чланка, захвалница (уколико постоји) и литература. У тексту чланка не користити нумерисане наслове за следећа поглавља као што су: увод, експериментална истраживања, резултати, дискусија и закључак.

Радове треба припремити на стандардном А4 формату (210×297 mm). Све маргине треба подесити на 25 mm (горња, доња, лева и десна) са величином заглавља од 12,7 mm. Текст рада писати у Times New Roman fontu, 12 pt, justified, проред један ред (single). Размак пре и после пасуса подесити на 0 pt. Сажетак не би требало да прелази 200 речи. За опис садржаја рада, испод сажетка, треба навести највише пет кључних речи.

Све табеле и илустрације (слике) треба да имају одговарајући назив и да буду нумерисане редоследом појављивања у тексту, уз обавезно позивање на њих у тексту. Нумерације и називе табела писати увек изнад табела. Нумерације и називе илустрација (слика) писати увек испод илустрација (слика). Уколико илустрација (слика) није изворни допринос аутора обавезно је навођење извора (ако је илустрација већ објављена), односно аутора од којег је преузета (ако илустрација још није објављена).

Обавезно је позивање на литературу у тексту чланка. Литературе се не преводе на језик рада. Наслови цитираних домаћих часописа дају се у оригиналном, пуном или скраћеном, али никако у преведеном облику.

Листу литературе треба припремити за различите врсте референци на следећи начин:

- [1] Аутор, А.Б., Аутор, Б.Ц, Наслов чланка, Наслов часописа, 48 (1), 2024, 10-20.
- [2] Аутор, Ц, Наслов чланка, Назив конференције, Град, Држава, ISBN Зборника, 2024, 21-41.
- [3] Аутор, Д, Наслов књиге, бр. издање, Издавач, Град, 2020, стр., ISBN књиге
- [4] Аутор, Е. Наслов поглавља, Наслов књиге (Е. Уредник), Издавач, Град, 2022, 17-29, ISBN књиге

The articles should be prepared on the standard A4 format (210×297 mm). All the margins should be set at 25 mm (top, bottom, left and right) and even pages with header and footer size of 12,7 mm.

Text of the article should be written in Times New Roman, 12 pt, justified, single line spacing. Spacing before and after paragraphs 0 pt. The Abstract should not exceed 200 words. A maximum of five key words should be indicated below the abstract to describe the content of the article.

All tables and figures should have an appropriate title and be numbered in the order of appearance in the text, with mandatory reference to them in the text. Table numbers and titles are always above the tables. The numbering and titles of the pictures are always below the pictures. If the figures is not the original contribution of the author, it is mandatory to cite the source (if the figures has already been published), or the author from whom it was taken (if the figures has not yet been published).

References in the text of the article are mandatory. References to literature are mandatory in the text of the article. References are not translated into the language of the paper. Titles of cited domestic journals are given in the original, full or abbreviated form, but never in translated form.

Reference list should be prepared for different types of references, as follows:

- [1] Author, A.B., Author, B.C, Article title, Journal title, 48 (1), 2024, 10-20.
- [2] Author, C, Article title, The name of the Conference, City, Country, Proceedings ISBN, 2024, 21-41.
- [3] Author, D, Book title, No. Edition, Publisher, City, 2020, pages, ISBN of the book
- [4] Author, E, Chapter title, Book title (E. Editor), Publisher, City, 2022, 17-29, ISBN of the book

[5] Аутор, Е. Наслов дисертације, Универзитет, Град, Држава 2022, стр.

[6] Аутор, Ф. Наслов извештаја, 2021, линк веб страница, (датум приступа).

Од аутора се тражи да наведу да је достављени чланак оригиналан рад или проширени конференцијски рад.

Уколико се ради о проширеном раду са конференције, аутори треба да дају резиме који објашњава примењена побољшања у верзији чланка за часопис. Рад треба проширити до величине истраживачког чланка са најмање 30% новог садржаја. Одговарајући рад са конференције треба цитирати и забележити на првој страни проширеног чланка. Моле се аутори да уз достављени чланак приложе и свој релевантни, раније објављени рад.

### **Обавештење**

Часопис Рударски гласник излази једанпут у годину дана као двоброј. Чланци се објављују на српском и енглеском језику, а објављивање је бесплатно.

Пристигле чланке прегледају рецензенти који су стручњаци у датој области. Обавештење о прихватању чланка, аутори добијају од стране уредника.

Чланак који је већ објављен у неком од часописа не може се објавити у часопису Рударски гласник.

[5] Author, E, Dissertation title, University, City, Country 2022, pages

[6] Author, F, Report title, 2021, link of web pages, (accessed date).

Authors are asked to disclose that the submitted article is original work or extended conference paper.

If it is extended conference paper, authors should be provide summary explaining the improvements made in the journal version. The article should be expanded to the size of a research article with at least 30 % of new data. The conference paper should be cited and noted on the first page of the submitted article. Authors are requested to attach to the submitted articles their relevant, previously published paper.

### **Notification**

Journal Bulletin of Mines is published as a double-issue, once a year. Articles will be published in Serbian and English, publication is free of charge.

Submitted articles will be reviewed by reviewers who are experts in the given area of research. Authors will be notified of the acceptance of the article by the editor.

A article that has already been published in one journal cannot be published in journal Bulletin of Mines.



CIP - Каталогизација у публикацији  
Народна библиотека Србије, Београд

622+55

**РУДАРСКИ гласник** = Bulletin of mines / главни и одговорни уредник Јасмина Нешковић. - 1962, бр. 1- .  
- Београд : Рударски институт, 1962- (Београд : Klik commerce). - 30 cm

Годишње. - Текст на срп. (ћир.) и енгл. језику.  
Прекид у излажењу од 2000 - 2013. год. - Наставља традицију часописа «Рударски гласник» из 1903.  
Друго издање на другом медијуму: Рударски гласник (Online) = ISSN 2956-2457  
ISSN 0035-9637 = Rudarski glasnik  
COBISS.SR-ID 4226050





ISSN 0035-9637