



# РУДАРСКИ ГЛАСНИК

## BULLETIN OF MINES

---

---

Број 1-2, год. CXV, 2018.

No 1-2, Vol CXV, 2018.



## РУДАРСКИ ГЛАСНИК

### Главни и одговорни уредник

Академик проф. др Слободан Вујић

### Издавачи:

РУДАРСКИ ИНСТИТУТ БЕОГРАД  
Београд, Батајнички пут бр. 2; тел. 011 21 99 277  
факс 011 26 14 632; [www.ribeograd.ac.rs](http://www.ribeograd.ac.rs)

АКАДЕМИЈА ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА СРБИЈЕ  
Одељење рударских, геолошких и системских  
наука, 11000 Београд, Краљице Марије 16,  
тел. 011/33 70 652, [www.ains.rs](http://www.ains.rs)

### За издаваче:

Др Милинко Радосављевић, директор РИ  
Проф. др Бранко Ковачевић, председник АИНС

### Штампа:

Colorgrafx, Београд

### Тираж:

300 примерака

### Место и година издања:

Београд, 2018.

YU ISSN 0035-9637

### Адреса:

Редакција Рударског гласника  
11000 Београд, Батајнички пут бр. 2  
е-пошта: [editorial.board@ribeograd.ac.rs](mailto:editorial.board@ribeograd.ac.rs)

### Copyright ©

РУДАРСКИ ИНСТИТУТ БЕОГРАД, 2018.  
АКАДЕМИЈА ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА СРБИЈЕ

## BULLETIN OF MINES

### Editor in Chief

Academician Prof. Dr. Slobodan Vujić

### Publishers:

MINING INSTITUTE BELGRADE  
Belgrade, Batajnički put 2, tel: +381 11 21 99 277  
fax: +381 11 26 14 632; [www.ribeograd.ac.rs](http://www.ribeograd.ac.rs)

ACADEMY OF ENGINEERING SCIENCES OF  
SERBIA, Division of mining, geology and system  
sciences, 11000 Belgrade, Kraljice Marije 16, Serbia,  
tel: +381 11 33 70 652, [www.ains.rs](http://www.ains.rs)

### For publishers:

Dr. Milinko Radosavljević, Director of the MI  
Prof. Dr. Branko Kovačević, President of the AESS

### Press:

Colorgrafx, Belgrade

### Circulation:

300 copies

### Place and year of the issue:

Belgrade, 2018.

YU ISSN 0035-9637

### Address:

Editorial Board of the Bulletin of Mines  
11000 Belgrade, Serbia, Batajnički put 2  
e-mail: [editorial.board@ribeograd.ac.rs](mailto:editorial.board@ribeograd.ac.rs)

### Copyright ©

MINING INSTITUTE, BELGRADE, 2018.  
ACADEMY OF ENGINEERING SCIENCES OF SERBIA

## РЕДАКЦИЈА

Академик проф. др Слободан Вујић, гл. и одг. уредник  
Др Милинко Радосављевић, зам. гл. и одг. уредника  
Др Светлана Полавдер, секретар редакције

Емеритус проф. Надежда Ђалић, проф. др Александар  
Милутиновић, проф. др Раде Јеленковић, проф. др  
Драгана Животић, проф. др Лазар Кричак, проф. др  
Предраг Лазић, проф. др Милош Танасијевић, проф. др  
Владимир Чебашек, доц. др Томислав Шубарановић,  
проф. др Срђан Костић, Јасмина Нешковић, Павле  
Стјепановић, Желько Праштало, Владан Чановић,  
Сандра Петковић, Стеван Ђорлука. Марко Павловић

## МЕЂУНАРОДНИ ИЗДАВАЧКИ САВЕТ

Академик проф. др Валентин А. Чантурија, *Руска академија наука, Институтију комплиексне експлоатације минералних ресурса Н. В. Мельников, Москва, Русија*  
Академик проф. др Владан Ђорђевић, *Српска академија наука и умјетности, Београд*  
Академик проф. др Александар Грубић, *Академија наука и умјетности Републике Српске, Бања Лука*  
Академик проф. др Недо Ђурић, *Академија наука и умјетности Републике Српске, Бања Лука*  
Проф. др Виктор Н. Опарин, *Годисни члан Руске академије наука, Рударски институти, Новосибирск, Русија*  
Др Светомир Максимовић, *Рударски институти Београд*  
Проф. др Венцислав Иванов, *Бугарска*  
Проф. др Зоран Панов, *Универзитет Гоце Делчев, Факултет природних и техничких наука, Штип, Македонија*  
Др Марјан Худеј, *РГП Велење, Словенија*  
Проф. др Марек Цала, *АГХ Универзитет за науку и технологију, Краков, Пољска*  
Проф. др Аруна Манталпади, *Национални институти за технологију, Рударски одсек, Карнатака, Индија*  
Проф. др Бахтијар Инвер, *Хаџетије универзитет, Одсек за рударско инжењерство, Анкара, Турска*  
Проф. др Маријан Долипски, *Силесијан универзитет за технологију, Руд. геол. факултет, Гливице, Пољска*  
Проф. др Раул Кастро, *Универзитет Чиле, Одсек за рударско инжењерство, Аниофајаста, Чиле*  
Проф. др Владимир Сливка, *ВСБ Технички универзитет, Руд. геол. факултет, Острава, Чешка*  
Проф. др Тунцел М. Јегулалп, *Колумбија универзитет, Рударска школа Хенри Крумб, Њујорк, САД*  
Проф. др Вереш Јоел, *Универзитет у Пешишану, Рударски факултет, Румунија*  
Проф. др Карстен Дребенштет, *ТУ Рударска академија Фрајберг, Инсит. за рударство, Немачка*  
Проф. др Милован Урошевић, *Кршн Универзитет, Перт, Аустралија*

## EDITORIAL BOARD

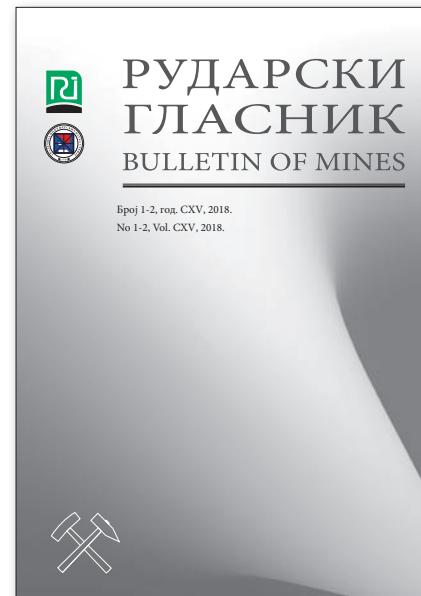
Academician Prof. Dr. Slobodan Vujić, Editor in Chief  
Dr. Milinko Radosavljević, Deputy Editor in Chief  
Dr. Svetlana Polavder, Editorial Secretary

Emeritus Prof. Nadežda Čalić, Prof. Dr. Aleksandar Milutinović, Prof. Dr. Rade Jelenković, Prof. Dr. Dragana Životić, Prof. Dr. Lazar Kričak, Prof. Dr. Predrag Lazić, Prof. Dr. Miloš Tanasijević, Prof. Dr. Vladimir Čebašek, Assist. prof. Dr. Tomislav Šubaranović, Prof. Dr. Srđan Kostić, Jasmina Nešković, Pavle Stjepanović, Željko Praštalo, Vladan Čanović, Sandra Petković, Stevan Čorluka, Marko Pavlović

## INTERNATIONAL PUBLISHING COUNCIL

Academician Prof. Dr. Valentin A. Chanturiya, *Russian Academy of Sciences, Institute of Complex Exploitation of Mineral Resources N. V. Melnikov, Moscow, Russia*  
Academician Prof. Dr. Vladan Đorđević, *Serbian Academy of Sciences and Arts, Belgrade*  
Academician Prof. Dr. Aleksandar Grubić, *Academy of Sciences and Arts of the Republika Srpska, Banja Luka*  
Academician Prof. Dr. Nedо Đurić, *Academy of Sciences and Arts of the Republika Srpska, Banja Luka*  
Prof. Dr. Victor N. Oparin, *Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Institute of Mining, Novosibirsk, Russia*  
Dr. Svetomir Maksimović, *Mining Institute Belgrade*  
Prof. Dr. Vencislav Ivanov, *Bulgaria*  
Prof. Dr. Zoran Panov, *University Goce Delčev, Faculty of Natural and Technical Sciences, Štip, Macedonia*  
Dr. Marjan Hudej, *RGP Velenje, Slovenia*  
Prof. Dr. Marek Cala, *AGH University of Science and Technology, Krakow, Poland*  
Prof. Dr. Aruna Mangalpady, *National Institute of Technology, Department of Mining, Karnataka, India*  
Prof. Dr. Bahtiyar Ünver, *Hacettepe University, Department of Mining Engineering, Ankara, Turkey*  
Prof. Dr. Marian Dolipski, *Silesian University of Technology, Faculty of Mining and Geology, Gliwice, Poland*  
Prof. Dr. Raúl Castro, *University of Chile, Department of Mining Engineering, Antofagasta, Chile*  
Prof. Dr. Vladimir Slivka, *VSB-TU, Faculty of Mining and Geology, Ostrava, Czech Republic*  
Prof. Dr. Tuncel M. Yegulalp, *Columbia University, Henry Krumb School of Mines, New York, USA*  
Prof. Dr. Vereş Ioel, *University of Petrosani, Faculty of Mining, Romania*  
Prof. Dr. Carsten Drebendstedt, *TU Bergakademie Freiberg, Institute of Mining, Germany*  
Prof. Dr. Milovan Urošević, *Curtin University, Perth, Australia*

**САДРЖАЈ / TABLE OF CONTENTS**



**РАДОВИ / PAPERS**

РУДЕ И РУДНИЦИ КОСОВА И МЕТОХИЈЕ ORES AND MINES IN KOSOVO AND METONIJA.....	5
C. Вујић, М. Радосављевић, С. Максимовић S. Vujić, M. Radosavljević, S. Maksimović	
ПОЗНАВАЊЕ НАПОНСКОГ СТАЊА У СТЕНСКОЈ МАСИ ОСНОВА ЗА ОПТИМАЛНА ПРОЈЕКТНА РЕШЕЊА У РУДАРСТВУ И ГЕОТЕХНИЦИ KNOWLEDGE OF THE STRESS STATE OF THE ROCK MASS IS THE BASIS FOR OPTIMAL SOLUTIONS IN MINING AND GEOTECHNICS .....	25
B. Иванов / V. Ivanov	
НАСТАНАК И ТЕКТОНСКА СВОЈСТВА ДУРМИТОРСКОГ ФЛИШНОГ КОМПЛЕКСА И ЊИХОВ УТИЦАЈ НА СТАБИЛНОСТ КОСИНА FORMATION AND TECTONIC PROPERTIES OF THE DURMITOR FLYSCH COMPLEX AND THEIR IMPACT ON SLOPE STABILITY.....	47
A. Голијанин / A. Golijanin,	
ПОРЕЂЕЊЕ КРИСТАЛОГРАФСКО-ХЕМИЈСКИХ КАРАКТЕРИСТИКА СФАЛЕРИТА ИЗ РУДНОГ ЛЕЖИШТА КИЖЕВАК СА НЕКИМ ДРУГИМ РУДНИМ ЛЕЖИШТИМА, ДЕО II: КОНСТРУИСАЊЕ ЧЕТВОРО-КОМПОНЕНТНОГ $A_0$ -FES-P-T ДИЈАГРАМА (ОПЦИЈА I) И ОДРЕЂИВАЊЕ УСЛОВА ПОСТАНКА COMPARISON OF THE CRYSTALLOGRAPHIC-CHEMICAL CHARACTERISTICS OF SPHALERITES FROM THE KIŽEVAK ORE DEPOSIT WITH SOME OTHER DEPOSITS, PART II: CONSTRUCTION OF THE FOUR-COMPONENT $A_0$ -FES-P-T DIAGRAM (OPTION I).....	59
П. Танчић/ P. Tančić	

ОСОБЕНОСТИ ХЕМИЈСКОГ САСТАВА РУДНИЧКИХ ВОДА РУДНИКА УГЉА У КАРПАТО-БАЛКАНИДИМА ИСТОЧНЕ СРБИЈЕ CHARACTERISTICS OF CHEMICAL COMPOSITION OF MINE WATERS FROM COAL MINES IN THE CARPATHO-BALKANIDES OF EASTERN SERBIA .....	75
Б. Миладиновић / B. Miladinović	
 ГЕОЛОШКА ИСТРАЖИВАЊА ПОДИНСКОГ ПРОДУКТИВНОГ СЛОЈА ЛЕЖИШТА GEOLOGICAL STUDY OF THE UNDERLYING PRODUCTIVE LAYER OF THE GARAJEVAC.....	91
С. Полавдер, С. Грујићић, Б. Јовановић S. Polavder, S. Grujičić, B. Jovanović	
 ФАЗИ ЛОГИЧКИ МОДЕЛ ОЦЕНЕ СИГУРНОСТИ ФУНКЦИОНИСАЊА МЕХАНИЗАЦИЈЕ НА ПОВРШИНСКИМ КОПОВИМА FUZZY LOGICAL MODEL OF ASSESSING FOR THE DEPENDABILITY OF MECHANISATION ON OPEN PITS MINES.....	99
Д. Јагодић Крунић, М. Танасијевић, С. Вујић D. Jagodić Krunić, M. Tanasijević, S. Vujić	
 ПРИМЕНА ФАЗИ ЛОГИЧКОГ МОДЕЛОВАЊА КОД ОЦЕНЕ СИГУРНОСТИ ФУНКЦИОНИСАЊА МЕХАНИЗАЦИЈЕ НА ПОВРШИНСКИМ КОПОВИМА APPLICATION OF FUZZY LOGICAL MODELING WHEN ASSESSING THE DEPENDABILITY OF MECHANIZATION ON OPEN PITS .....	107
Д. Јагодић Крунић, М. Танасијевић, С. Вујић D. Jagodić Krunić, M. Tanasijević, S. Vujić	
 МОДЕЛ РЕКУЛТИВАЦИЈЕ НА РУДНИКУ ЗА ПОДВОДНУ ЕКСПЛОАТАЦИЈУ УГЉА КОВИН THE RECULTIVATION MODEL OF THE UNDERWATER COAL MINE KOVIN .....	121
Ж. Праштalo, Д. Милошевић, Н. Мака, И. Филипов Ž. Praštalo, D. Milošević, N. Makar, I. Filipov	
 КАРАКТЕРИЗАЦИЈА ПЕПЕЛА, ШЉАКЕ И ГИПСА ЗА ПОТРЕБЕ РАЗВОЈА ТЕХНОЛОГИЈЕ ЊИХОВОГ ОДЛАГАЊА CHARACTERIZATION OF ASH, BOTTOM ASH AND GYPSUM FOR THE DEVELOPMENT OF THE TECHNOLOGY OF THEIR DISPOSAL .....	133
Ј. Нешковић, П. Стјепановић, К. Конц Јанковић, Д. Лазић, И. Јовановић J. Nešković, P. Stjepanović, K. Konc Janković, D. Lazić, I. Jovanović	
 УТИЦАЈ ВАЗДУШНОГ СТРУЈАЊА НА ВЕЗИВНА СВОЈСТВА ПЕПЕЛА, ШЉАКЕ И АДИТИВА THE INFLUENCE OF AIR FLOW ON THE BINDING PROPERTIES OF ASH, SLAG AND ADDITIVES.....	147
М. Павловић, М. Гигов, С. Петковић, Ј. Нешковић, П. Стјепановић M. Pavlović, M. Gigov, S. Petković, J. Nešković, P. Stjepanović -	
 ОСТАЛО / OTHER	
КЊИГЕ / BOOKS .....	159
ЗНАЧАЈНИ ДОГАЂАЈИ У 2018. / SIGNIFICANT EVENTS IN 2018.....	161
СЕЋАЊЕ / IN MEMORIAM.....	167

РУДЕ И РУДНИЦИ КОСОВА И МЕТОХИЈЕ  
ORES AND MINES IN KOSOVO AND METOHIA

DOI: 10.25075/BM.2018.01

Слободан Вујић  
Милинко Радосављевић  
Светомир Максимовић  
*Rударски институт Београд*  
*slobodan.vujic@ribeograd.ac.rs*

Slobodan Vujić  
Milinko Radosavljeić  
Svetomir Maksimović  
*Mining Institute Belgrade*  
*slobodan.vujic@ribeograd.ac.rs*

**Сажетак:** Рудно богатство Косова и Метохије је реалан, стратешки значајан капитал чија вредност расте због високе и све веће исцрпености минералних ресурса у Европи и шире. Вредновање минерално-сировинског комплекса Косова и Метохије је вишезначично, веома захтевно, не може се упрошћено сводити само на показатеље као што су резерве, садржаји корисних компоненти у руди или њена тренутна тржишна вредност, без сагледавања свих опредељујућих параметара. Рад је посвећен рудним ресурсима Косова и Метохије и њиховој експлоатацији, пре свега то су велике резерве угља повољне за површинску експлоатацију, полиминерале руде обожених и племенитих метала, неметаличне минералне сировине и термоминерале воде.

**Кључне речи:** руде, рудници, Косово и Метохија

**Summary:** The mining wealth of Kosovo and Metohija is a real, strategically significant capital with value growing due to the high and ever-increasing exhaustion of mineral resources in Europe and beyond. Evaluation of the mineral and raw material complex of Kosovo and Metohija is multifaceted, highly demanding, cannot be reduced only to indicators such as reserves, the content of useful components in ore or its current market value, without considering all the determining parameters. The paper is devoted to the mining resources of Kosovo and Metohija and their exploitation, primarily vast reserves of coal suitable for open-pit mining, polyminerals of non-ferrous and precious metal ores, non-metallic mineral raw materials and thermal mineral water.

**Keywords:** ores, mines, Kosovo and Metohija

---

## УВОД

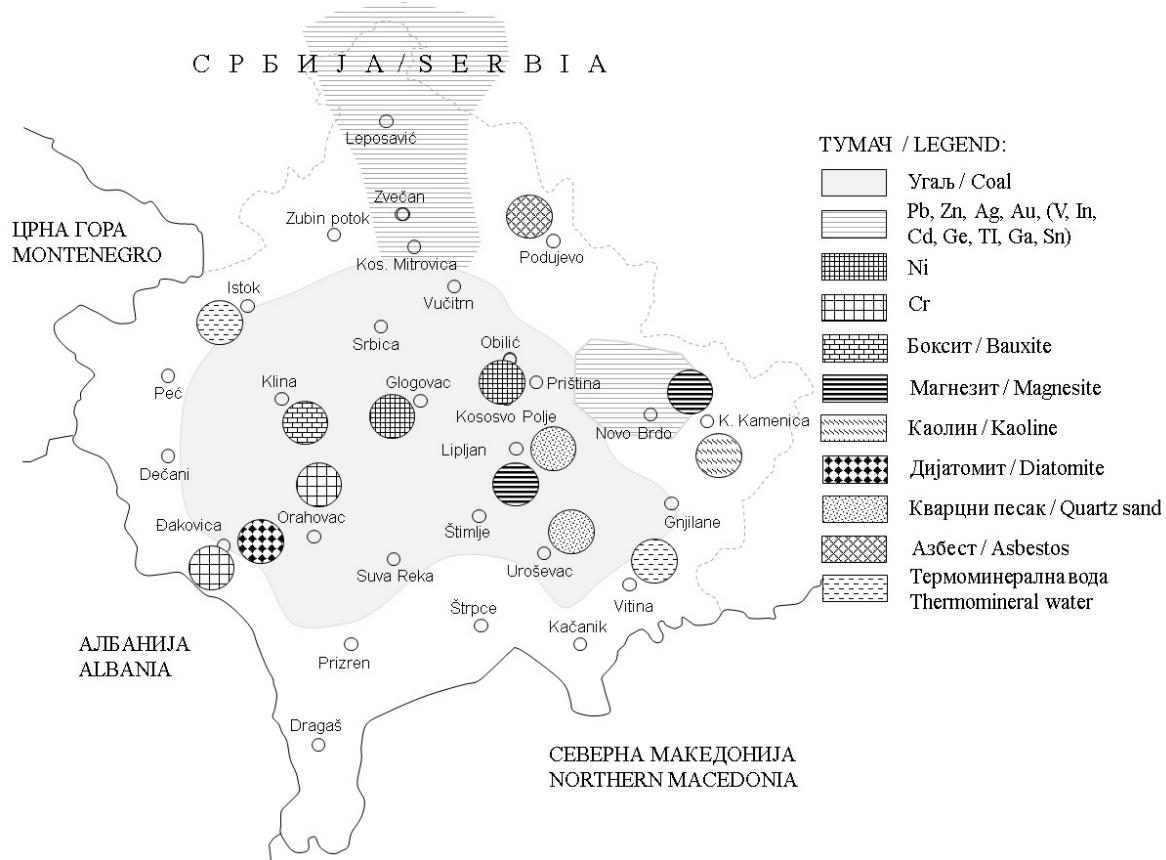
Рудно богатство је међу важним, чак кључно важним данашњим питањима везаним за Косово и Метохију. Расправе и текстови у јавности о рудном богатству Косова и Метохије оптерећени су непровереним и непоузданим подацима, противречним оценама генерисаним више емоцијама мање стручношћу, погрешним приступима и непознавањем минерално-сировинског комплекса, статичким посматрањем њене потенцијалности, конструкцијом „аргумената“

## INTRODUCTION

Mineral wealth is one of the most important, even crucial current issues related to Kosovo and Metohija. Discussions and publications about the mineral wealth of Kosovo and Metohija are burdened with unverified and unreliable data, contradictory estimates made more emotionally and less expertly, wrong approaches and lack of knowledge about the mineral and raw material complex, static observation of its potentiality, construction of “arguments” by counting closed and active mines, their capaci-

пребројавањем затворених и активних рудника, њихових капацитета, контрадикторним вредновањем рудних ресурса, несагледавањем значаја рудног блага Косова и Метохије у националном и међународном контексту, итд. Овај ускопојасни конгломерат импровизација постојано се дограђује дезинформацијама којима се дезавуише наша наука, стручност и знање, сервирају неистине о ризицима геолошких истраживања равним коцкарским хазардима, о баснословним улагањима у геолошка истраживања и отварања рудника, о нашој финансијској немоћи и слично. Циљ је амнезија и успаваност да се не бисмо сетили и предаторе на рудно богатство омели у намери.[1]

ties, contradictory evaluation of mining resources, disregarding the importance of the mineral wealth of Kosovo and Metohija in the national and international context, and more. This narrow-minded conglomerate of improvisations has been continuously upgraded by disinformation that denies our science, expertise, and knowledge, serves falsehoods about the risks of geological exploration equaling them to gambling hazards, about lavish investments in geological exploration and opening of mines, about our financial impotence, and so on. The goal is amnesia and somnolence in order for us not to remember and hinder predators in their intention to get ore wealth. [1]



Слика 1, Лежишта и појаве минералних сировина на Косову и Метохији  
 Figure 1, Mineral deposits and occurrences in Kosovo and Metohija [1]

Вредновање минерално-сировинског комплекса је вишезначично, стручно озбиљно и захтевно питање, не може се упрошћено сводити на нивелету показатеља као што су количина, садржај корисне компоненте и тржишна вредност сировине, без сагледавања свих опредељујућих показатеља – енергетских, индустриских, путних, инфраструктурних, водопривредних, демографских, социјалних, здравствених, школских, културних, регионалних и других, без сагледавања значаја за

Evaluation of the mineral and raw material complex is a multifaceted, professionally serious and demanding issue; it cannot be reduced to the level of indicators such as the quantity, the content of a useful component, and the market value of the raw material, without considering all the determining indicators - energetic, industrial, road, infrastructure, water management, demographic, social, healthcare, education, cultural, regional and other, without allowing for the significance for the security and safety of the country,

сигурност и безбедност земље, за мању осетљивост на геополитичка превирања, спољне утицаје, за независност и сувереност земље.[3]

Рудни потенцијали Косова и Метохије су неспорни, то су пре свега велике резерве лигнита повољних услова за експлоатацију, полиминералне руде обојених и племенитих метала, неметаличне минералне сировине и термоминералне воде.

Рудно богатство Косова и Метохије је реалан, стратешки значајан капитал чија вредност расте са све већом исцрпености минералних ресурса Европе.[1]

## РУДЕ И РУДНИЦИ КОСОВА И МЕТОХИЈЕ

До 1999. на Косову и Метохији експлоатисане су руде олова, цинка, сребра, злата, никла, алуминијума (боксит), хрома, магнезита, азбеста, каолина, опекарске минералне сировине, термоминералне воде и угља, слика 1. Регистроване су појаве индијума, германијума, галијума, талијума, кадмијума, калаја итд.[2]

### Угаљ

По распортирању и количинама најзначајнији ресурс је угаљ, распостире се на око 60% површине територије Косова и Метохије, слике 1 и 2. Захваљујући истраживањима бројних минералних сировина на угљоносном подручју, Косовско-метохијски угљени басен (поједини аутори раздвајају га на три басена: Косовски, Дренички и Метохијски), геолошки је добро истражен, нарочито у ободним деловима. Угљени басен грађе језерски седименти плиоцене, угаљ је дрвенстог или ксилитског и земљастог типа. Дебљина угљеног слоја је 40–50 m, у деловина басена преко 100 m, слој у облику банкова залеже од исклињења на површини терена до дубине око 300 m.[4]

Просечна доња топлотна вредност ровног угља је 7.950 kJ/kg, процењене геолошке резерве су 12,5–14 милијарди тона, или енергетски еквивалент 2,37–2,65 милијарди тона нафте. На садашњем нивоу потрошње угља у Србији, експлоатабилне резерве угља Косовско-метохијског басена довољне су за наредних 180–200 година.[1]

*Подземна експлоатација угља:* Почетком прошлог века један од највећих српских индустријалаца Милош Савчић био је први власник дела угљеног басена на простору од Косовске Митровице до Качаника. Савчић је 1921. фор-

for lower vulnerability to geopolitical turmoil, external influences, for independence and sovereignty of the country. [3]

The mining potentials of Kosovo and Metohija are indisputable; they primarily include all vast reserves of lignite favorable for exploitation, polymetallic ores of non-ferrous and precious metals, non-metallic mineral raw materials, and thermal mineral water.

The mining wealth of Kosovo and Metohija is a real, strategically significant capital with value growing due to the high and ever-increasing exhaustion of mineral resources in Europe. [1]

## ORES AND MINERALS IN KOSOVO AND METOHIA

Until 1999, minerals of lead, zinc, silver, gold, nickel, aluminum (bauxite), chromium, magnesite, asbestos, kaolin, brick mineral raw materials, thermal mineral waters, and coal were exploited in Kosovo and Metohija, Figure 2. The occurrences of indium, germanium, gallium, thallium, cadmium, tin, and more have been recorded. [2]

### Coal

By distribution and quantities, the most significant resource is coal, spreading over about 60% of the territory of Kosovo and Metohija, Figures 1 and 2. As a result of research of many mineral raw materials in the coal-bearing area, the Kosovo-Metohija coal basin (some authors separate it into three basins: Kosovo, Drenica and Metohija), is geologically well explored, especially in peripheral parts. The coal basin is built of lake sediments of Pliocene; the coal is of xylite and/or lignite type. The coal layer is 40-50 m thick, in some parts of the basin over 100 m thick; the bank-shaped layer stretches from the surface wedging out to a depth of about 300 m. [4]

The average lower heat value of open pit coal is 7,950 kJ/kg; the estimated geological reserves are 12.5-14 billion tons (energy-equivalent to 2.37-2.65 billion tons of oil). At the present level of coal consumption in Serbia, the exploitable coal reserves of the Kosovo-Metohija basin are sufficient for the next 180-200 years. [1]

*Underground coal mining:* At the beginning of the last century, one of the greatest Serbian industrialists, Miloš Savčić, was the first owner of a part of the coal basin in the area from Kosovska Mitrovica to Kačanik. In 1921, Savčić formed the Mining-In-

мирао Рударско-индустријско акционарско друштво Косово, била је то највећа акционарска компанија у Србији до Другог светског рата. Породице Савчић и Ацовић отвориле су рудник Косово са подземном експлоатацијом, изградиле жичару за превоз угља од железничке станице у Обилићу, термоелектране ( $\approx 50$  kW) и прву рудничку стамбену колонију. Рудник Косово је до 1940. произвео 647.127 t угља. До Другог светског рата отворена су још два рудника, Сивовац 1930. кратко је радио и произвео 990 t угља, и мали површински коп Александар 1937, нема податако о његовој производњи.

После Другог светског рата отворен је 1948. рудник Крушевац, у руднику Сивовац поново је покренута производња 1952, рудник Нова јама отворен је 1955, а Мухадџер Бабуш 1970. После пожара (највероватније саботажа) у рудницима Крушевац и Косово, обустављена је производња 1968.

Од 1922. до 1988. када је последњи рудник са подземном експлоатацијом Мухадџер Бабуш затворена, на Косову и Метохији подземном екс-

dustrial Joint Stock Company of Kosovo, which was the largest joint stock company in Serbia before World War II. The Savčić and Acović families opened Kosovo mine with underground mining, built a cable car for transferring coal from the railway station in Obilić, thermal power plants ( $\approx 50$  kW) and the first mining residential colony. By 1940, the Kosovo mine produced 647,127 t of coal. Two other mines were opened before World War II, Sibovac in 1930 that worked briefly and produced 990 t of coal, and small open pit mine Aleksander in 1937 (there is no data on its production).

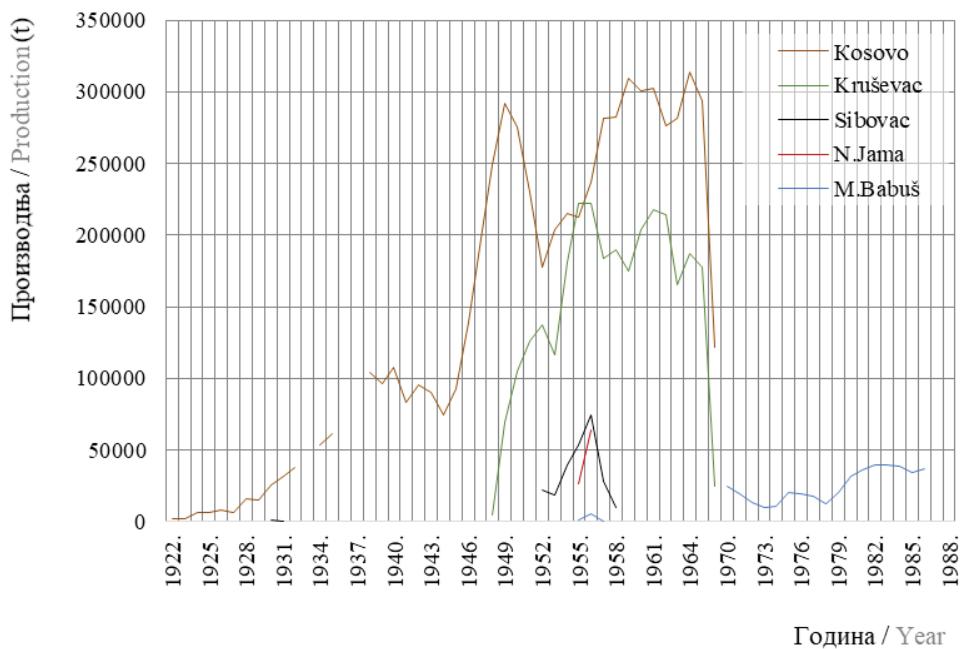
After World War II, Kruševac mine was opened in 1948, mine production was restarted in Sibovac mine in 1952, and Nova jama and Muhadžer Babuš mines were opened in 1955 and 1970, respectively. After the fire (most likely sabotage) in Kruševac and Kosovo mines, production was stopped in 1968.

From 1922 to 1988, when the last mine with underground mining Muhadžer Babuš was closed, close to 10 million tons of lignite was excavated



Слика 2, Рудници угља  
 Figure 2, Coal mines

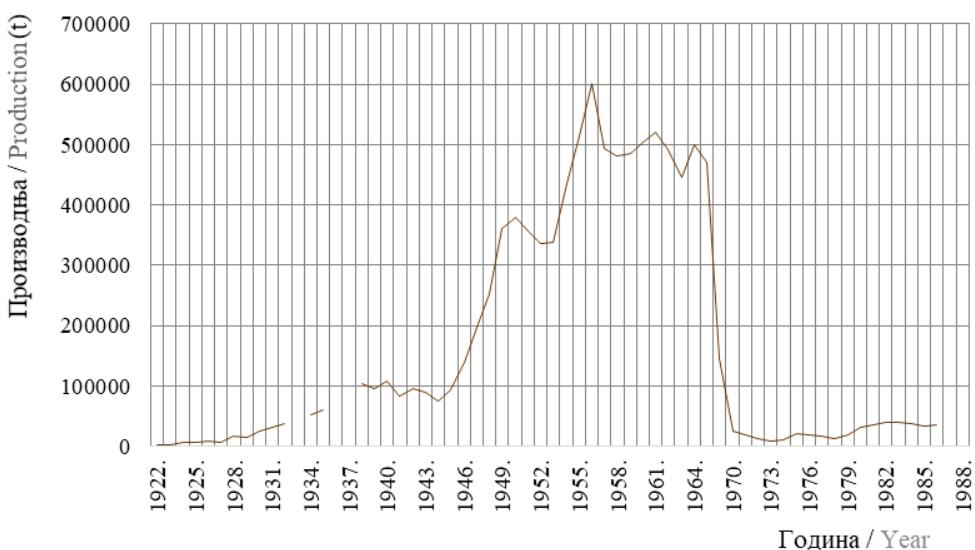
**Тумач:** 1-Косово, 2-Крушевац, 3- Мухадџер Бабуш, 4-Сивовац, 5-Добро Село, 6-Белаћевац, 7-Сивовац  
**Legend:** 1-Kosovo, 2-Kruševac, 3- Muhadžer Babuš, 4-Sibovac, 5-Dobro Selo, 6-Belačevac, 7-Sibovac



Слика 3, Производња угља у рудницима са подземном експлоатацијом, 1922-1988.  
 Figure 3, Production of coal in mines with underground mining, 1922-1988

плоатацијом откопано је близу 10 милиона тона лигнита. На откопавању коришћена је коморна метода веома ниског искоришћењем лежишта, од шездесетих година уводи се метода са зарушавањем. Производња рудника угља с подземном експлоатацијом графички је приказана на сликама 3 и 4. У више наврата обављана је модернизација јама новом опремом и увођењем нових експлоатационих технологија.[2]

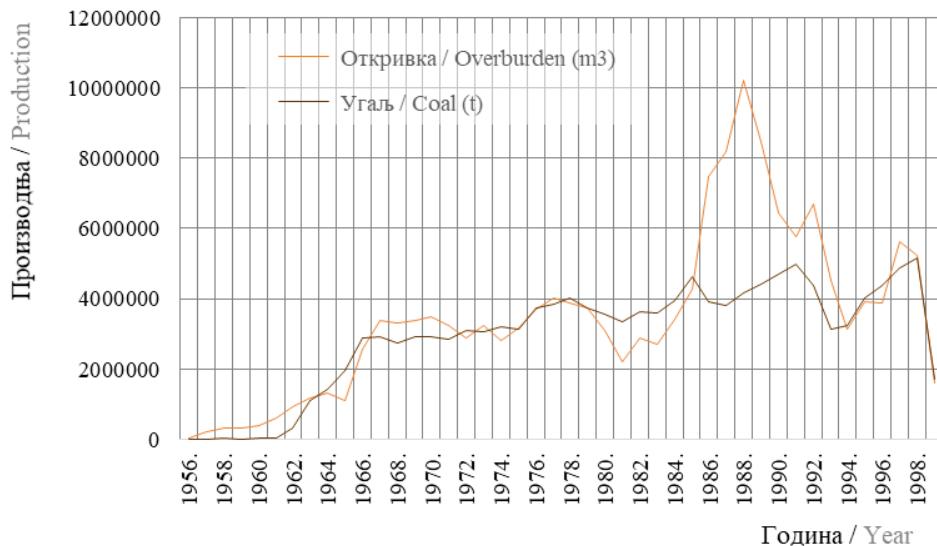
by underground mining in Kosovo and Metohija. It's used chamber method of excavation with very low utilization of the deposit, from the sixties is introduced a caved goaf method. Production of coal by underground mining is graphically shown in Figures 3 and 4. On several occasions, pits were modernized with new equipment and the introduction of new exploitation technologies. [2]



Слика 4, Збирна производња угља рудника са подземном експлоатацијом на Косову и Метохији, 1922-1988  
 Figure 4, Collective production of coal in mines with underground mining of Kosovo and Metohija, 1922-1988

**Површинска експлоатација угља:** Интезивирањем детаљних геолошких истраживања угљеносног басена, 1952–1956, изведене су припреме за отварање површинског копа (ПК) Добро Село и градњу првог блока Термоелектране Косово А снаге 65 MW (Косово А: 1962. прва фаза 65 MW, затим блокови 1964. 125 MW, 1970. 200 MW, 1971. 200 MW, 1975. 210 MW, укупно 800 MW. Косово Б: 2x300 MW, изградња почела 1977). Отварање ПК Добро Село пројектованог капацитета 3,6 милиона тона угља годишње започето је 1956. а прве тоне угља произведене 1961, слика 5.

**Open pit mining:** By intensifying the detailed geological investigations of the coal-bearing basin in 1952-1956, preparations were made for the opening of open pit mine (OPM) Dobro Selo and the construction Thermal power plant Kosovo A of a 65MW (Kosovo A: 1962 first phase up to 65 MW, then blocks 1964 125 MW, 1970 200 MW, 1971 200 MW, 1975 210 MW, total 800 MW. Kosovo B: 2x300 MW, construction started 1977). The opening of OPM Dobro Selo of the annual designed capacity of 3.6 million tons of coal began in 1956, and the first tons of coal were obtained in 1961, Figure 5.



Слика 5, Производња ПК Добро Село, 1956-1999.  
 Figure 5, Production of OPM Dobro Selo, 1956-1999

На ПК Добро Село од 1956. до 1999. откопано је 153.027.274 m<sup>3</sup> јаловине и произведено 129.742.164 t угља, просечно годишње 3.089.099 t угља, највећа производња 5.158.019 t угља остварена је 1998, слика 5. Коефицијента откопивке просечне вредности 1,18 m<sup>3</sup>/t , варира између 0,57 и 2,72 m<sup>3</sup>/t, слика 7. [2]

Отарање ПК Белаћевац започето је 1964, а производња угља 1969. До 1999. откопано је 164.585.567 m<sup>3</sup> јаловине и произведено 98.100.441 t угља. Просечна годишња производња угља ПК Белаћевац је 3.164.530 t , највећа производња 6.465.234 t угља остварена је 1988, слика 5. Коефицијент откопивке просечне вредности 1,68 m<sup>3</sup>/t варира између 0,81 и 3,79 m<sup>3</sup>/t, слика 6.

Површинском експлоатацијом од 1956. до 1999. на Косову и Метохији, откопано је 317.612.841 m<sup>3</sup> јаловине и произведено 227.842.605 t угља, слика 5.

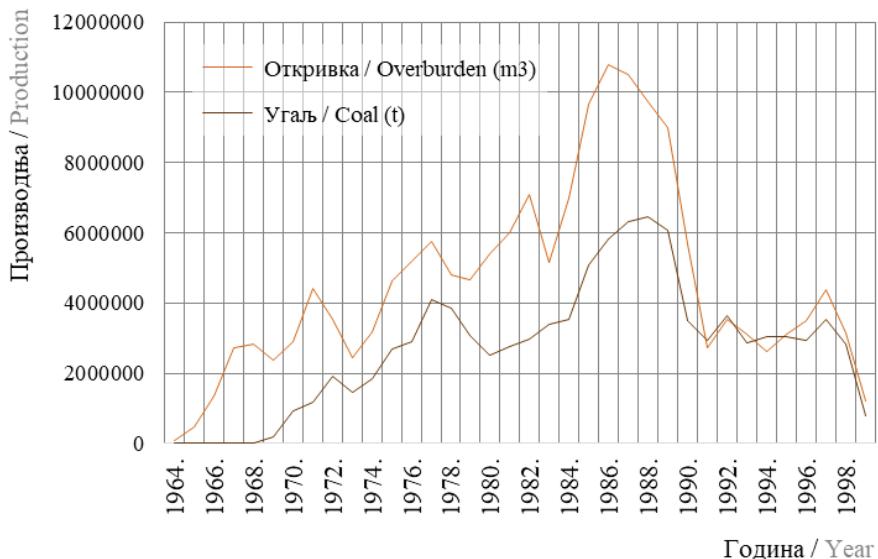
153,027,274 m<sup>3</sup> of tailings was excavated, and 129,742,164 t of coal was produced in OPM Dobro Selo from 1956 to 1999 (an average of 3,089,099 t of coal annually), and the highest production of coal amounting to 5,158,019 t was recorded in 1998, Figure 5. The average stripping ratio of 1.18 m<sup>3</sup>/t varies between 0.57 and 2.72 m<sup>3</sup>/t, Figure 7. [2]

The opening of open-pit mine Belačevac and coal production therein began in 1964 and 1969, respectively. By 1999, 164,585,567 m<sup>3</sup> of tailings was excavated, and 98,100 t of coal was produced. The average annual production of coal was 3,164,530 t, the highest production of 6,465,234 t of coal was recorded in 1988, Figure 6. The average stripping ratio of 1.68 m<sup>3</sup>/t varies between 0.81 and 3.79 m<sup>3</sup>/t, Figure 6.

From 1956 to 1999 in Kosovo and Metohija, 317,612,841 m<sup>3</sup> of tailings was excavated and 227,842,605 t of coal was produced using open-pit

ка 8, енергетски еквивалентно 39.972.387 t нафте, са просечним коефицијентом отк rivke 1,39 m<sup>3</sup>/t, што је за економику експлоатације веома значајно и знатно повољније у односу на површинске копове у Костолачком и Колубарском угљеном басену.[2]

mining, Figure 8, energy-equivalent to 39,972,387 t of oil, with the average stripping ratio of 1.39 m<sup>3</sup>/t, which is, in terms of exploitation economics, very significant and significantly more favorable relative to open-pit mines in Kostolac and Kolubara coal basins. [2]



Слика 6, Производња ПК Белаћевац, 1964-1999.

Figure 6, Production of OPM Belačevac, 1964-1999

Отварање ПК Сивовац започето је јула 2007, а снабдевање термоелектрана угљем са овог површинског копа септембра 2010. Производња на површинским коповима Добро Село и Белаћевац обустављена је 2012.

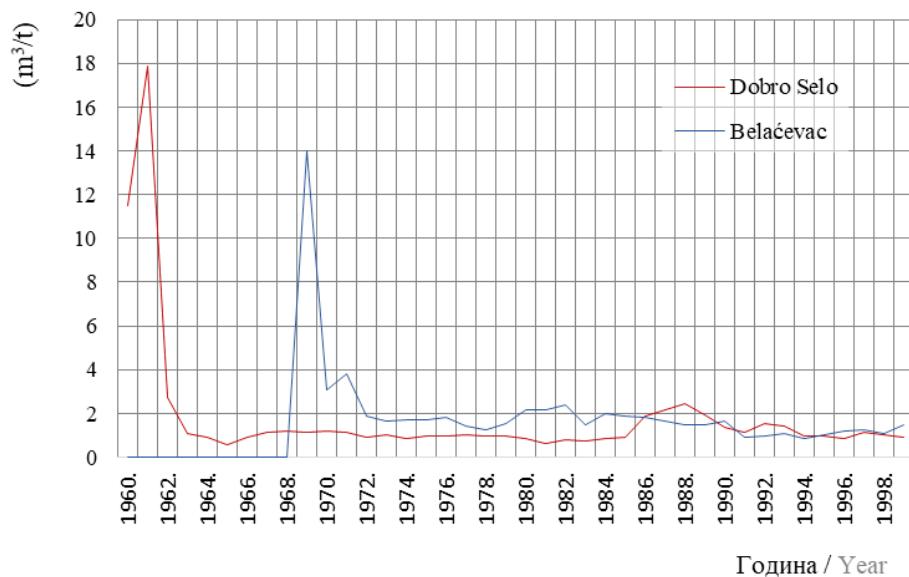
Од 1922. до 1999. подземном и површинском експлоатацијом на Косову и Метохији произведено је 237.563.665 t угља, енергетски еквивалент 45.078.494 t нафте. У време ембарга, санкција и бројних других Србији наметнутих проблема, захваљујући стручности и пожртвованости запослених у Косовским рудницима, инжењерима Дирекције за производњу угља Електропривреде Србије, оперативном особљу из Колубаре, Костолца, Гоше и других предузећа, од 1991. до 1999. произведено је 61.524.334 t угља и откопано 67.655.836 m<sup>3</sup> јаловине, од тога ПК Добро Село 35.943.509 t угља и 40.347.419 m<sup>3</sup> јаловине, а ПК Белаћевац 25.580.825 t угља и 27.308.417 m<sup>3</sup> јаловине. [2]

До 1964. на ПК Добро Село на откопавању и утовару отк rivке и угља ангажовани су багери кашикари запремине кашике 2,3 – 4,6 m<sup>3</sup> (Шкода E-25, ЕКГ-4 и ЕКГ-4,6) и драглајни запремине кашике 4 m<sup>3</sup> (ЕШ-4/40), а на транспорту шински систем са вагови запремине 25 m<sup>3</sup> за отк rivku, 50 m<sup>3</sup> за угља и локомотивама на електрични погон радне тежине 70 t.

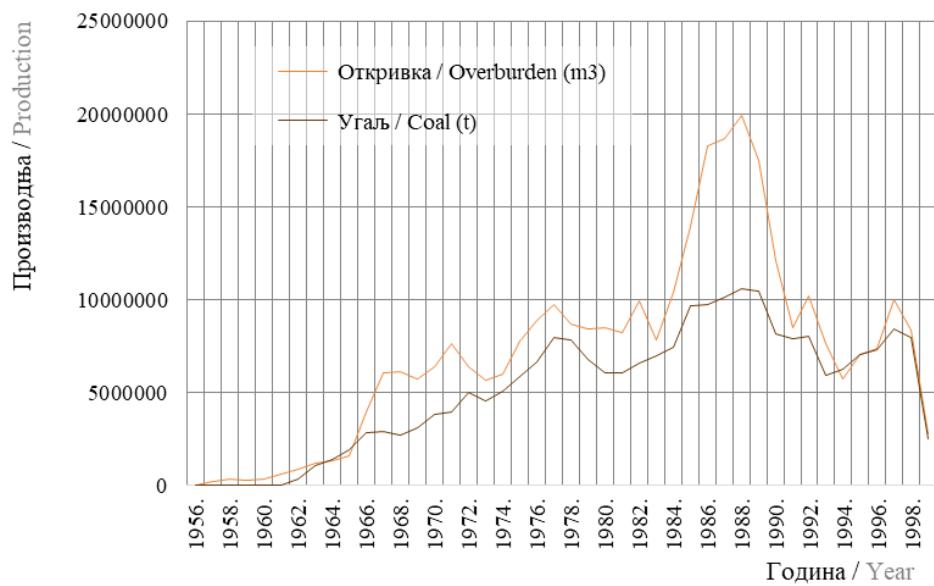
The opening of OPM Sibovac started in July 2007, and the supply of thermal power plants with coal from this open-pit mine began in September 2010. Production in open-pit mines Dobro Selo and Belačevac was suspended in 2012.

From 1922 to 1999, underground and open-pit mining in Kosovo and Metohija produced 237.563.665 t of coal, which is energy-equivalent to 45.078.494 t of oil. During the embargo, sanctions and many other problems imposed on Serbia, thanks to the expertise and dedication of the teams of the Electric Power Industry of Serbia, consisting of engineers from the Directorate for Coal Production and machine operators from Kolubara and Kostolac, from 1991 to 1999 61,524,334 t of coal was produced and 67,655,836 m<sup>3</sup> of tailings was excavated, of which 35,943,509 t of coal and 40,347,419 m<sup>3</sup> of tailings in OPM Dobro Selo, and 25,580,825 t of coal and 27,308,417 m<sup>3</sup> of tailings in OPM Belačevac. [2]

Until 1964, at the OPM Dobro Selo on excavation and loading overburden and coal, were used excavators, digger bucket volumes 2.3 – 4.6 m<sup>3</sup> (Škoda E-25, EKG-4 and EKG-4,6), drrag-line volume 4 m<sup>3</sup> (EŠ-4/40), and on the transport locomotive haulage system, with wagons of volume 25 m<sup>3</sup> for overburden, 50 m<sup>3</sup> for coal and locomotives with electric drive weighing 70 t.



Слика 7, Варирање коефицијенти откривке на ПК Добро Село и Белаћевац  
 Figure 7, Variation of stripping ratios in OPM Dobro Selo and Belačevac



Слика 8, Збирна производња ПК Добро Село и Белаћевац, 1956-1999.  
 Figure 8, Collective production of OPM Dobro Selo and Belačevac, 1956-1999

Од 1964. до обуставе радова на површинским коповима Добро Село и Белаћевац, било је ангажовано 19 роторних багера: пет багера SRs-470.15/3.5; пет багера SRs-470.20/3; четири багера SRs-1300.26/5; два багера SchRs650; по један багер SRs-470.17/15, SRs-400.14/1 и SchRs250 (позајмљен из Колубара). Ангажовано је 8 одлагача и 13 самоходних транспортера: два одлагача ARs-B2500x50; један одлагач ARsB3000x50; три одлагача A2RsB4400x60+BRs;

From 1964 to the suspension of works on open-pit mines Dobro Selo and Belačevac, 19 bucket-wheel excavators were engaged: five excavators SRs-470.15/3.5; five excavators SRs-470.20/3; four excavators SRs-1300.26/5; two excavators SchRs 650; one excavator SRs-470.17/15, one excavator SRs-400.14/1 and one excavator SchRs 250 (borrowed from Kolubara). There were 8 belt conveyor spreaders and 13 self-propelled belts employed: two spreaders ARs-B2500x50, one spreader ARsB3000x50, three

и два A2RsB5200x55 + BRs; 11 самоходних транспортера BRs-1200.29/32 и два BRs-1600.29.1/31. Укупна дужина транспортера са трака ширине 1000, 1200, 1400, 1600 и 1800 mm била је 55 km. На извођењу помоћних радова коришћени су багери дреглајни запремине кашике 5-10 m<sup>3</sup> (ЕШ-5/45, 6/45 and 10/70).

*Прерада угља:* Паралелно са отварањем површинских копова и термоелектрана, одвијале су припреме за изграду објеката прераде угља. Од 1964. до 1972. изграђена су:

СУШАРА I, капацитета 600.000 t сушеног угља годишње, изграђена 1964. за потребе Железаре Скопље. Испоставило се да лигнит из сушаре технолошки не одговара Железари.

Постројење за гасификацију угља, годишњег капацитета 480 милиона нормалних m<sup>3</sup> чистог гаса топлотне моћи 14.500 – 16.500 kJ/m<sup>3</sup>, градња започета 1965. Технолошка структура постројења: генератор са кондензацијом и постројењем за тер, јединица за производњу гаса и постројење за пречишћавање гаса. Железара Скопље снабдевала се гасом из овог постројења гасоводом дугим око 80 km. На овај крак гасовода касније су приклучени фабрика креча у Каћанику, градска топлана у Приштини и Азотара. На други крак гасовода изграђен ка Косовској Митровици за снабдевање Трепче, која гас није користила због неприпремљености својих инсталација, приклучена је Фабрика поцинкованог лима у Вучитруну.

Топлана, капацитета милион тона технолошке паре годишње, изграђена је 1970. Технолошка структура постројења: два котла номиналног капацитета по 120 t/h паре, притиска 96 bara, температура прегрејане паре 535°C; две турбине, једна против притиска са генератором снаге 16 MW, друга кондензациона са два регулисана одузимања 12 и 7 bara и генератором снаге 25 MW.

Постројење за производњу кисеоника и азота, пуштено у рад 1970, капацитет: кисеоник 12.000 m<sup>3</sup>/h чистоће 96% или 50 m<sup>3</sup>/h чистоће 99,5%; азот 12.000 m<sup>3</sup>/h чистоће 97,5% или 10.000 m<sup>3</sup>/h чистоће 99,99%.

Постројење за пречишћавање воде загађене фенолом, капацитет 100 m<sup>3</sup>/h загађене воде - улазна концентрација фенола 4000 mg/l, пуштено у рад 1970. Концентрација фенола у води након пречишћавања 1 mg/l.

Азотара, градња започета 1967. а пуштена у пробни рад 1972. Технолошка структура: постројење за фракциону дестилацију гаса (из постројења за гасификацију), постројење за

spreaders A2RsB4400x60+BRs and two spreaders A2RsB5200x55+BRs; 11 self-propelled belts BRs-1200.29/32 and two self-propelled belts BRs-1600.29.1/31. The total length of 1000, 1200, 1400, 1600 and 1800 mm wide conveyor belts was 55 km. On auxiliary works they were used excavators dreg-line volume 5-10 m<sup>3</sup> (EŠ-5/45, 6/45 and 10/70).

*Coal processing:* Parallel to the opening of the open pit mines and thermal power plants, preparations were made for the construction of coal processing facilities. From 1964 to 1972, the following were built:

Drying plant I, with the annual capacity of 600,000 t of dried coal, built in 1964 for the needs of Skopje ironworks. It turned out that the lignite from the drying plant was not technologically suitable for the ironworks.

Coal gasification plant, with the annual capacity of 480 million of normal m<sup>3</sup> of pure gas with a heat capacity of 14,500-16,500 kJ/m<sup>3</sup>; the construction started in 1965. Technological structure of the plant: condensing generator with a tar plant, gas production unit, and gas treatment plant. Skopje ironworks was supplied with gas from this plant through an 80 km long pipeline. The lime factory in Kačanik, the city heating plant in Priština and the nitrogen plant were later connected to this branch of the pipeline. The galvanized sheet metal factory in Vučitrn was connected to the second branch of the gas pipeline, built toward Kosovska Mitrovica for the supply of Trepča that did not use gas due to their lack of preparation in installations.

Heating plant, of the annual capacity of million tons of technological steam, was built in 1970. Technological structure of the plant: two boilers with the nominal capacity of 120 t/h of steam, 96 bar pressure, superheated steam temperature 535°C; two turbines, one of counter-pressure type with a 16 MW generator, the other condensing with two 12 and 7 bar controlled extraction ports and a 25 MW generator.

Oxygen and nitrogen production plant, commissioned in 1970, oxygen capacity: 12.000 m<sup>3</sup>/h of 96% purity or 50 m<sup>3</sup>/h of 99.5% purity; nitrogen capacity 12.000 m<sup>3</sup>/h of 97.5% purity or 10,000 m<sup>3</sup>/h of 99.99% purity.

Phenol-contaminated water treatment plant, with a capacity of 100 m<sup>3</sup>/h of contaminated water - inlet phenol concentration 4000 mg/l, commissioned in 1970. Phenol concentration in water after purification 1 mg/l.

Nitrogen plant, the construction started in 1967, and the plant was commissioned in 1972. Technological structure: fractional gas distillation plant (from gasification plant), ammonia synthesis

синтезу амонијака, постројење за производњу азотне киселине и постројење за производњу кречног амонијум нитрата са 27% азота. Пројектовани капацитети нису никада достигнути, производња је углавном била мања за 50%. У постројењу за амонијак ни то није остварено, изузев пробних 1000 t, за производњу вештачког ђубрива амонијак је набављан од других производаца. Разлози оваквог стања су бројни, рад азотаре је потпуно обустављен крајем осамдесетих година прошлог века.

Сушара ii, капацитет 600.000 t сушеног угља гођишње, fleissner-ов поступак сушења, изграђена је 1972. за потребе постројења за гасификацију угља.

До НАТО агресије 1999. производњу и прерарду угља технолошки и организационо обједињавало је Јавно предузеће Површински копови Косово – Обилић, као део пословног система Електропривреде Србије. Прогон око 200 инжењера и других високо образованих стручњака, више од 4.000 техничара, квалификованих радника и руковаоца машина српске националности, довео је до производног колапса. Производња угља 2000. у односу на 1998. била је мања 270%.

## ОЛОВО И ЦИНК

Јужно од Копаоника, на простору од Лепосавића до Приштине и Новог Брда, бурна геолошка прошлост оставила је у наслеђе бројна лежишта руда олова, цинка, сребра и злата, слика 9. Због вишедеценијског изостанка улагања у геолошка истраживања, садашње стање минералних ресурса обожених и племенитих метала Косова и Метохије није поуздано сагледиво, посебно просторних параметара, количина и садржаја корисних компоненти у рудама, те нема смисла давати процене резерви. С друге стране, процена заснована на геолошким индикаторима, искуству и ранијим сазнањима, допушта уопштени закључак да је велика минерално-сировинска потенцијалност подручја.[3]

На овом рудосном подручју, традиција експлатације руда олова, цинка, сребра и злата досеже до Римског доба и средњовековне Србије. Модерни развој почиње 1924. с истраживањима минерално-сировинске потенцијалности Трепче и формирањем компаније Trepča Mines Limited 1927. у власништву британског капитала. Отварањем рудника Стари Трг, на локацији рудника из средњег века, производња је почела 1930.[2]

За 70 година, од 1930. до 2000, у Трепчи је произведено око 36 милиона t руде с просечним садржајем олова 5,9%, цинка 3,9%

plant, nitric acid production plant, and plant for the production of lime-ammonium nitrate with 27% of nitrogen. The designed capacities were never achieved; the production was mostly lower by 50%. In the ammonia plant not even 50% was achieved, with the exception of the test 1000 t, for the production of artificial fertilizers ammonia was purchased from other manufacturers. The reasons for this situation are numerous; the work of nitrogen plant was discontinued entirely at the end of the eighties of the last century.

Drying plant II, with the annual capacity of 600.000 t of dried coal, the Fleissner drying process, built in 1972 for the needs of the coal gasification plant.

Until the NATO aggression in 1999, the production and processing of coal were technologically and organisationally merged in public enterprise Open Pit Mines Kosovo - Obilić, as part of the business system of the Electric Power Industry of Serbia. The persecution of about 200 engineers and other highly educated experts, more than 4,000 technicians, skilled workers and machine operators of Serbian nationality, led to a production collapse. Coal production in 2000 was 270% lower compared to 1998.

## Lead and zinc

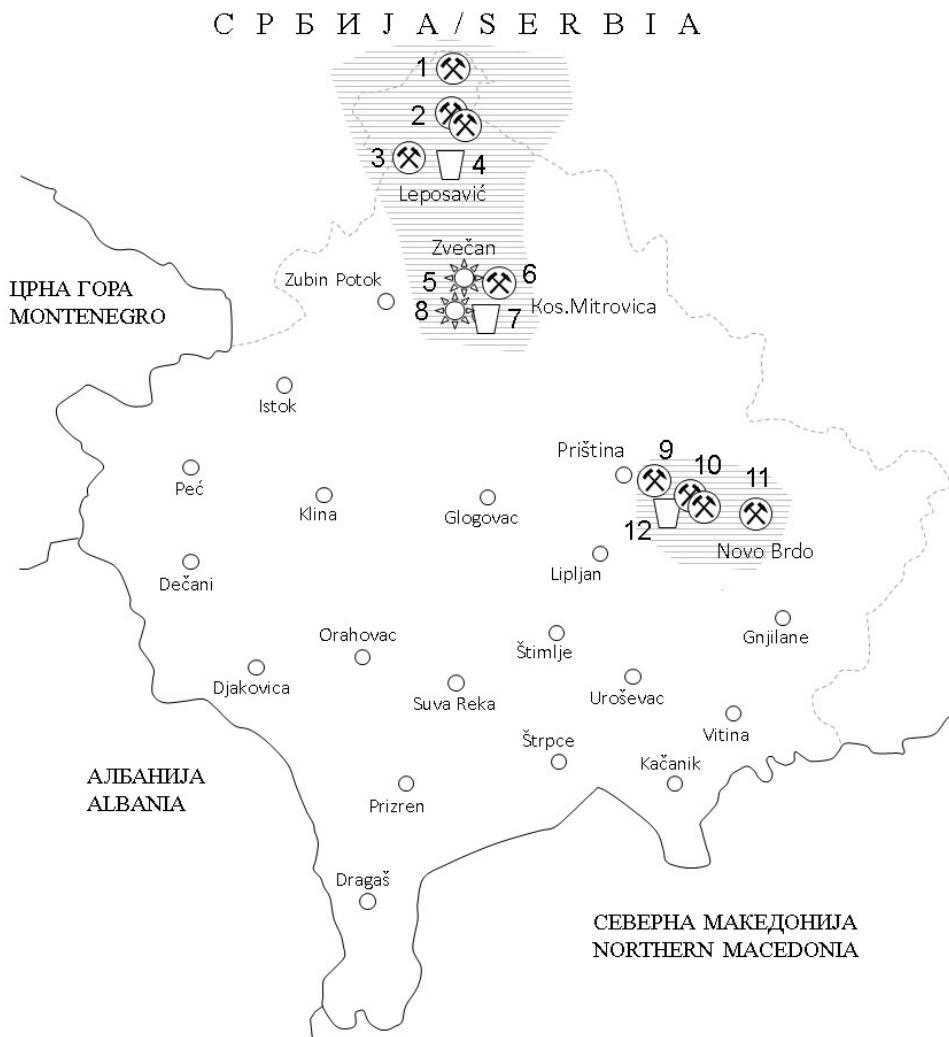
South of Kopaonik, in the area from Leposavić to Priština and Novo Brdo, the turbulent geological past has left the heritage of numerous deposits of lead, zinc, silver and gold ore, Figure 9. Due to the decades-long lack of investments in geological exploration, the present state of mineral resources of non-ferrous and precious metals in Kosovo and Metohija is not reliably observable, especially in terms of spatial parameters, quantities and content of useful components in ores, so it makes no sense giving estimates of reserves. On the other hand, an assessment based on geological indicators, experience, and prior knowledge allows a general conclusion that the mineral-raw material potential of the area is significant. [3]

In this ore-bearing area, the tradition of exploitation of zinc, silver and gold ore minerals can be traced back to the Roman era and medieval Serbia. Modern development began in 1924 with the research of mineral and raw material potentials of Trepča and the establishment of Trepča Mines Limited company in 1927, owned by British capital. With the opening of Stari Trg mine, at the location of a medieval mine, production began in 1930. [2]

For 70 years, from 1930 to 2000, about 36 million tons of ore were produced in Trepča with an average content of lead 5.9%, zinc 3.9%, and silver 85 g/t. 2,143,515 t

и сребра 85 g/t. Произведено је 2.143.515 т метала олова и 1.414.975 т цинка. Просечна годишња производња била је 514.552 т руде, највећа 702.718 т остварена је 1984. а најмања 10.712 т 1993. У два периода, Други светски рат и последња декада 20. столећа, производња је била значајно мања, слике 10 и 11. С највећим садржајем олова 12,6% откопано је 1931. 292.281 т руде, а 1994. с најнижим садржајем цинка 8,8% откопано је 1932. 481.001 т руде, а с најнижим 1,77% 1986. 647.078 т руде. Вре-

of lead metal and 1,414,975 t of zinc metal were produced. Average annual production was 514,552 t of ore, the highest quantity of 702,718 t was recorded in 1984 and the least of 10,712 t in 1993. In two periods, World War II and the last decade of the 20<sup>th</sup> century, the production was significantly lower, Figures 10 and 11. 292,281 tons of ore with the highest lead content of 12.6% was excavated in 1931, while 32,475 t of ore with the lowest lead content of 2.28% was recorded in 1994. 481,001 t of ore with the highest content of zinc, 8.8%, was excavated in 1932, while 647,078 t of ore with the lowest zinc content of 1.77% was recorded in

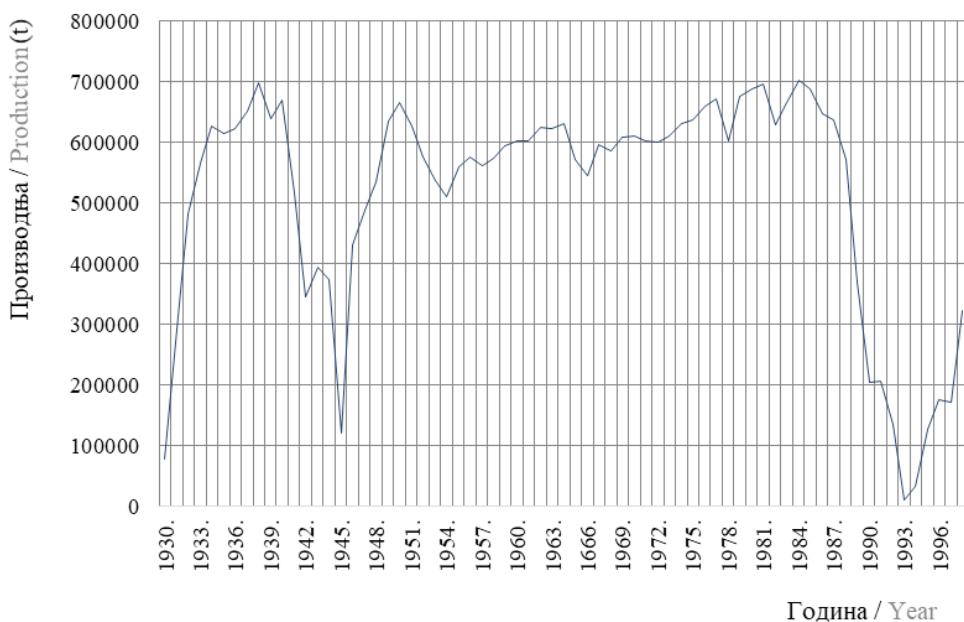


Слика 9, Рудници, флотације и металургија постројења Трепче на Косову и Метохији  
 Figure 9, Mines, floatations and metallurgy plants of Trepča in Kosovo and Metohija [1]

**Тумач:** 1-Рудник Бело Брдо, 2-Рудник Жута прлина и површински коп Копорић, 3-Рудник Црнац, 4-Флотација Лепосавић, 5-Топионица олова Звечан, 6-Рудник Стари Трг, 7-Флотација Први Тунел, 8-Рафинација цинка Косовска Митровица, 9-Рудник Ајвалија, 10-Рудници Кишиница и Бадовац, 11- Рудник Ново Брдо, 12-Флотација Бадовац.  
**Legend:** 1 - Belo Brdo mine, 2 - Žuta prlina mine and Koporić open pit mine, 3 - Crnac mine, 4 - Leposavić flotation, 5 - Zvečan lead smelter, 6 - Stari Trg mine, 7 - Prvi Tunel flotation, 8 - Kosovska Mitrovica zinc refinery, 9 - Ajvalija mine, 10 - Kišnica and Badovac mines, 11 - Novo Brdo mine, 12 - Badovac flotation.

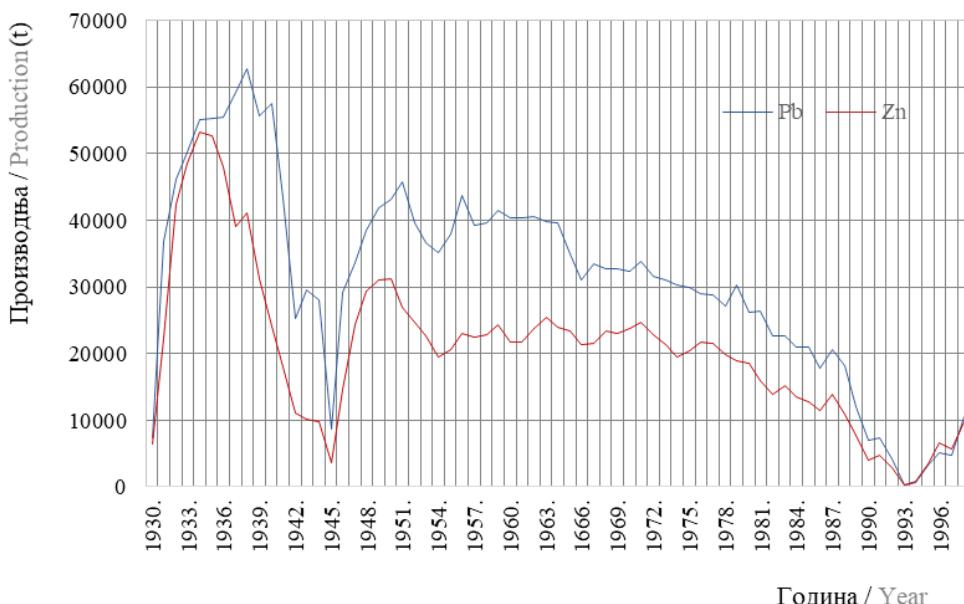
менски посматрано од почетка радова 1930. до данас, садржај метала у руди пада, идентично трендовима у свету, слика 12. Поредећи прву (1930-1939) и последњу (1990-2000) производну декаду, слика 13, садржај метала у руди мањи је три пута.

1986. Observed by a timeline from the beginning of the works in 1930 to the present, the metal content in the ore has dropped, identically to the world trends, Figure 12. Comparing the first (1930-1939) and the last (1990-2000) production decade, Figure 13, the metal content in the ore is three times lower.



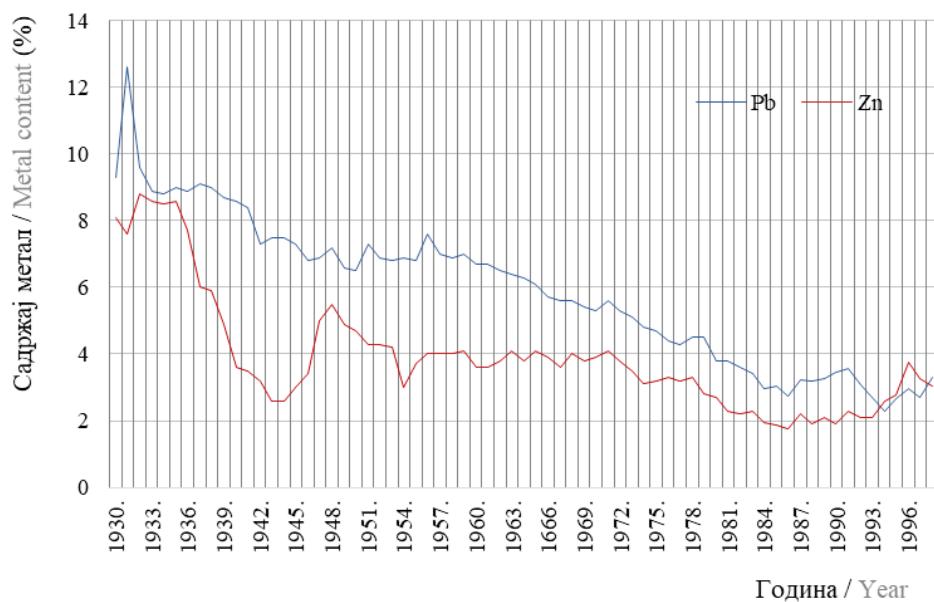
Слика 10, Трепча, производња руде, 1930-1997.

Figure 10, Trepča, production of ore, 1930-1997

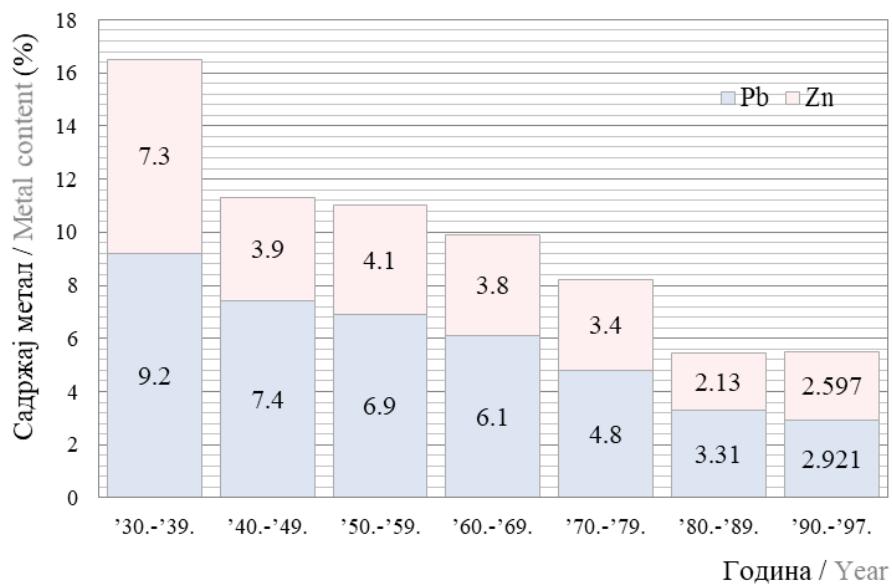


Слика 11, Трепча, производња Pb и Zn, 1930-1997.

Figure 11, Trepča, production of Pb and Zn, 1930-1997



Слика 12, Трепча, садржаји Pb и Zn у руди, 1930-1997.  
 Figure 12, Trepča, contents of Pb and Zn in the ore, 1930-1997



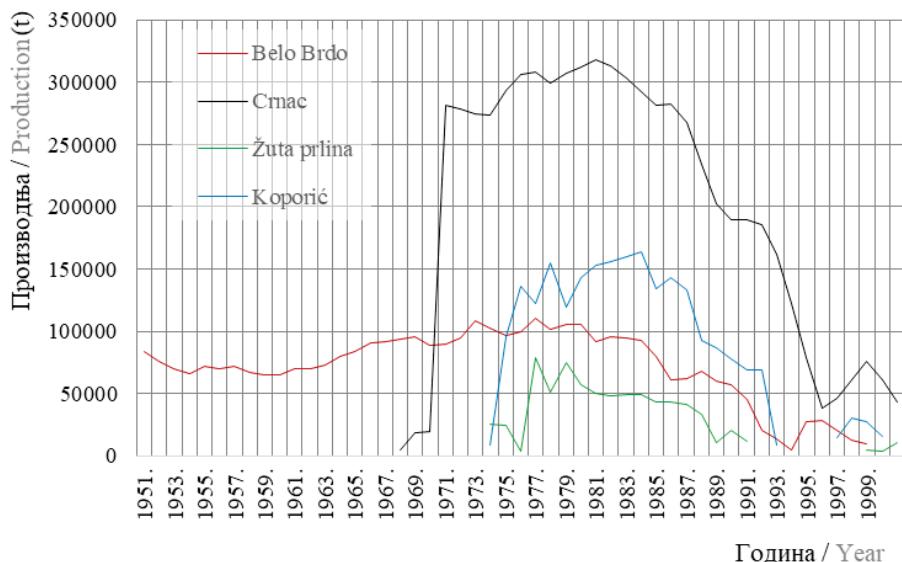
Слика 13, Трепча, десетогодишњи просечни садржаји Pb, Zn и укупног метала у руди, 1930-1997.  
 Figure 13, Trepča, ten-year average contents of Pb, Zn and total metal in the ore, 1930-1997

У систему Трепече на Косову и Метохији су још две групе рудника, на југу Ајвалија, Кишница, Бадовац и Ново Брдо са заједничком флотацијом у Бадовцу капацитета 600.000 т руде годишње, а на северу Бело Брдо, Црнац, Жута Прлина и Копорић, с флотацијом у Лепосавићу пројектованог капацитета 350.000 т руде годишње, тренутно флотација прерађује 100-120 хиљада т руде годишње. На локација-

In the Trepča system in Kosovo and Metohija, there are two other groups of mines, Ajvalija, Kišnica, Badovac and Novo Brdo in the south with a joint flotation in Badovac with the annual capacity of 600,000 t of ore, and Belo Brdo, Crnac, Žuta Prlina and Koporić in the north with a flotation in Leposavić, with the designed annual capacity of 350,000 t of ore; currently, the flotation processes 100-120 thousand t of ore annually. At the locations of these mines, the exploitation

ма ових рудника експлоатација руда обојених и племенитих метала изводи се с прекидима од средњег века и римско доба. После Другог светског рата, рудник Бело Брдо произвео је 3.580.156 t руде с просечним садржајем олова 5,48% и цинка 4,48%, рудник Црнац 1.826.821 t руде с просечним садржајем олова 4,68% и цинка 2,45%, рудник Жута Прлина 732.641 t руде с просечним садржајем олова 2,88% и цинка 2,50%, а рудник Копорић 2.312.019 t руде с просечним садржајем олова 2,22% и цинка 2,25%, слике 14 и 15. У руди рудника Бело Брдо просечан садржај метала је највећи 9,96%, а најнижи из Копорића 4,47%, слика 16. И за руде ових рудника карактеристичан је пад садржаја металу, слика 17.[1]

of non-ferrous and precious metal ores has been carried out with interruptions since the Middle Ages and the Roman era. After World War II, Belo Brdo mine produced 3,580,156 t of ore with an average content of lead and zinc of 5.48% and 4.48%, respectively, Crnac mine produced 1.826,821 t of ore with an average content of lead and zinc of 4.68% and 2.45%, respectively, Žuta Prlina mine produced 732,641 t of ore with an average content of lead and zinc of 2.88% and 2.50%, respectively, and Koporić mine produced 2,312,019 t of ore with an average content of lead and zinc of 2.22% and 2.25%, respectively, Figures 14 and 15. The highest average metal content of 9.96% was recorded in Belo Brdo mine ore, while the lowest was from Koporić, 4.47%, Figure 16. The ores of these mines as well are characterized by a drop in metal content, Figure 17. [1]



Слика 14, Производња руде у рудницима Бело Брдо, Црнац, Жута Прлина и Копорић, 1949-1999.  
 Figure 14, Production of ore in mines Belo Brdo, Crnac, Žuta Prlina and Koporić, 1949-1999

У другој половини 20. века било је више организационих повезивања и раздвајања рудника олова и цинка. У појединим периодима сви рудници олова и цинка у Србији били су у саставу Рударско-металуршко-хемијског комбината Трепча, то је позитивно утицало на улагања у геолошка истраживања, ширење минерално-сировинске базе, модернизацију, изградњу и развој рудника.

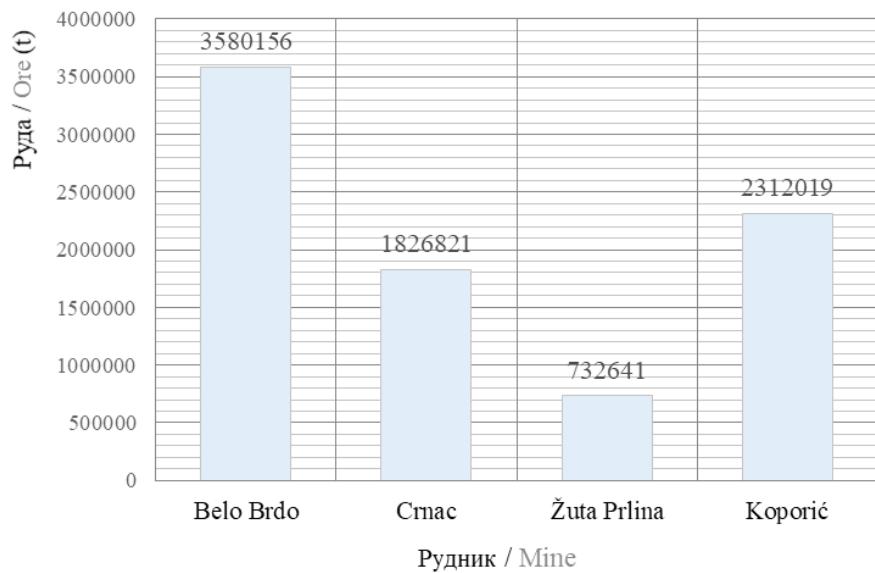
#### Алуминијум – боксит

У близини Клине на падинама Гребничке планине у зони променљиве ширине 0,5-3 km, дужине око 15 km, регистровано је 20 сочивастих длежишта боксита, дијаспорног типа, сложене

In the second half of the 20<sup>th</sup> century, there were more organizational mergers and separations of lead and zinc mines. In some periods, all lead and zinc mines in Serbia were part of the Trepča Mining and Metallurgical-Chemical Combine, which had a positive impact on investments in geological exploration, expansion of the mineral-ram material base, modernization, construction and development of mines.

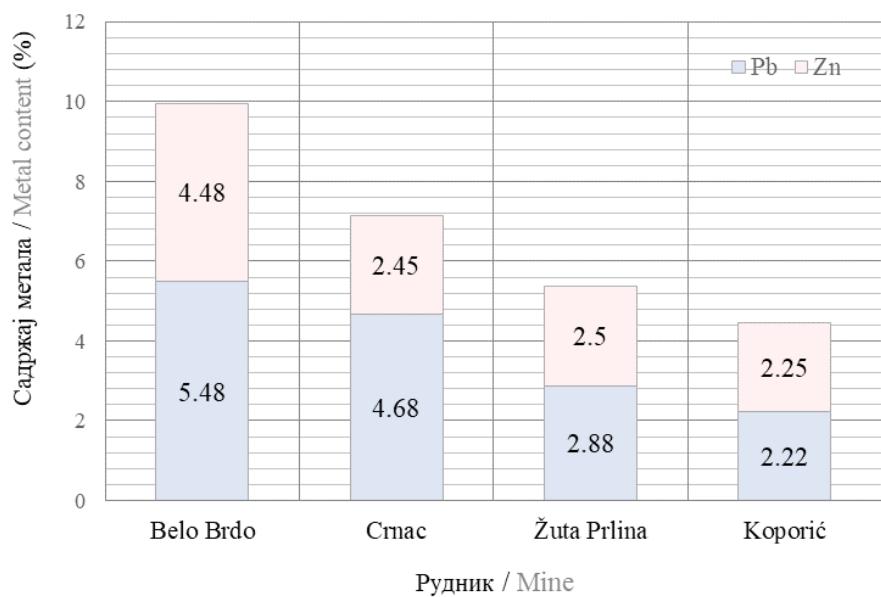
#### Aluminum – bauxite

In the vicinity of Kline on the slopes of the Grebnik Mountain in a 15 km long zone of variable width of 0.5-3 km, there are 20 lens deposits of bauxite, of diasporic type, complex geological structure, wedging



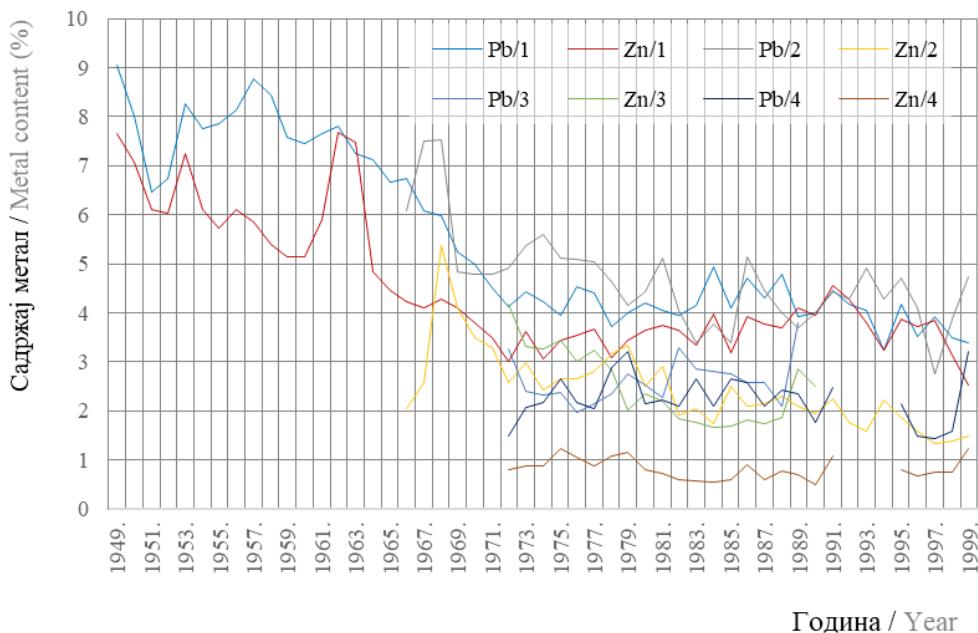
Слика 15, Укупна производња руде у рудницима Бело Брдо, Црнац, Жута Прлина и Копорић, 1949-1999.

Figure 15, Total production of ore in mines Belo Brdo, Crnac, Žuta Prlina and Koporić, 1949-1999



Слика 16, Просечни садржаји Pb, Zn и укупног метала у рудама рудника Бело Брдо, Црнац, Жута Прлина и Копорић, 1949-1999.

Figure 16, Average contents of Pb, Zn and total metal in the ores of mines Belo Brdo, Crnac, Žuta Prlina and Koporić, 1949-1999



Слика 17, Садржаји Pb и Zn у рудама рудника Бело Брдо, Црнац, Жута Прлина и Копорић, 1949-1999.

Figure 17, Contents of Pb and Zn in the ores of mines Belo Brdo, Crnac, Žuta Prlina and Koporić, 1949-1999

геолошке грађе, залегања до 200 м. Кровину и подину лежишта граде кречњаци. Садржај  $\text{Al}_2\text{O}_3$  је 46 – 48%,  $\text{SiO}_2$  2 – 4%, садржај  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  је повећан. За овај тип боксита технологије наших фабрика глинице нису биле прилагођене, па је комплетна производња остварена површинском експлоатацијом извожена у Румунију.[2,3]

## Никл

Површинском експлоатацијом два силикатно латеритска лежишта никла Главница код Приштине и Глоговац, рудом је снабдевано постројење фероникла у Глоговцу. Од 1988. до 1994. произведено је 3.191.497 t руде садржаја никла 1,082–1,25%, слике 18 и 19. [2,3]

## Хром

Сиромашне хромитске руде откопаване су у Ђаковичком масиву - рудник Дева, Брезовици, у Ораховачком масиву, откривено више од 80 појава лежишта, и на још неколико локација где су повремено откопаване мале количине. У постројењу за концентрацију сиромашних хромитских руда у руднику Дева код Ђаковице годишње је прерађивано око 15.000 t. Укупно је откопано више од 500.000 t хромитске руде.[2,3]

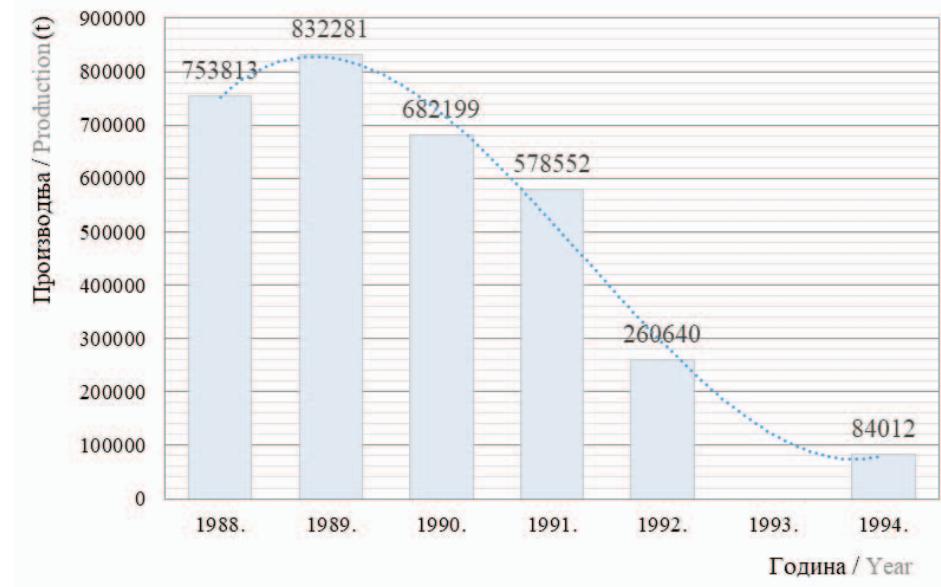
out up to 200 m. The roof and floor layers of the deposit consist of limestone. The content of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  is 46 - 48%,  $\text{SiO}_2$  2 - 4%, the content of  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  is increased. The technologies of our alumina factories were not adapted to this type of bauxite, so the complete production achieved by open pit mining was exported to Romania [2,3]

## Nickel

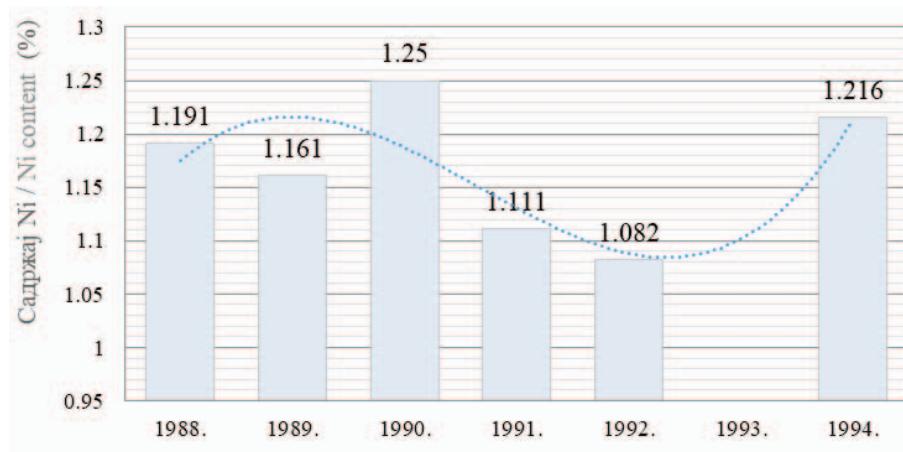
Open pit mining of two silicate lateritic nickel ore deposits of Glavnica near Priština and Glogovac supplied a ferronickel plant in Glogovac. From 1988 to 1994, 3,191,497 t of ore with a nickel content of 1.082-1.25 % was produced, Figures 18 and 19. [2,3]

## Chromium

Poor chromite ores were excavated in Đakovica massif - Deva mine, in Brezovica, in Orahovac massif, with more than 80 occurrences of deposits discovered, and several other locations where small quantities were occasionally excavated. In the plant for the concentration of poor chromite ores in Deva mine near Djakovica, about 15,000 tons were processed annually. More than 500,000 tons of chromite ore was excavated in total [2,3]



Слика 18, Фероникел Глоговац, производња руде, 1988-1994.  
 Figure 18, Ferronickel plan Glogovac, production of ore, 1988-1994



Слика 19, Садржај Ni у руди  
 Figure 19, The content of Ni in the ore

### Дијатомити

Лежишта дијатомита или дијатомејске земље Дањани, Ратковци и Радости у близини су Ораховца. Процењене резерве дијатомита Метохијског басена су 25 милиона тона, од чега 21 милион Ратковци.[2,3]

### Остале минералне сировине.

Лежишта каолина, азбеста, магнезита, кварцног песка, термоминерлан воде итд. на подручју Косова и Метохије, имају такође економски значај.

### Diatomite

The deposits of diatomite or diatomaceous earth Danjani, Ratkovci and Radosti are located near Orahovac. The estimated reserves of diatomite in the Metohija Basin are 25 million tons, of which 21 million is in Ratkovci. [2,3]

### Other mineral raw materials

Deposits of kaolin, asbestos, magnesite, quartz sand, thermal mineral water, etc. in the territory of Kosovo and Metohija are also economically significant.

## УЛАГАЊА И КОРИСТИ

Експлоатација минералних сировина на Косову и Метохији као и у Србији и Југославији, велики успон имала је у другој половини 20. века. На Косову и Метохији годишње се у просеку експлоатисало око 20 милиона тона минералних сировина различите вредности. Поуздана вредносна процена ове производње није изводљива, више је разлога, пре свега то је променљивост цена берзанских производа попут обојених и племенитих метала, условљеност цене минералних сировина као што је угља, социјалним, макроеконмским и политичким интересима, утицаји интереса локалних заједница итд. [1]

Минерално-сировински комплекс Косова и Метохије дао је огроман допринос решавању запослености, социјалних проблема, подизања стандарда живота, образовања, развоја путне инфраструктуре, урбанизације, стамбене изградње, развоја екстрактивне индустрије и слично.

Процена је да је у периоду од Другог светског рата до краја 20. столећа, инвестирано 10-11 милијарди долара у: геолошка истраживања, отварања, опремања и развој рудника, набавку опреме и машина, увођење нових технологија, изградњу инфраструктуре и логистичких рудничких система, изградњу флотација, сепарација, постројења за чишћење и прераду угља, постројења за гасификацију угља, изградњу интерних путева, напојних електро енергетских система, регулацију водних токова, итд. У склопу ових инвестиција су и сва пратећа улагања неопхода за покретање рудничке производње, изградња жељезничке, путне, стамбене и водопривредне инфраструктуре, улагања у здравство, школство, културу, науку, заштиту животне средине, археологију, издавачку делтност, спорт, итд. [1]

## ЗАКЉУЧАК

Минерално-сировински потенцијали Косова и Метохије су неспорно значајни. То се односи на олово, цинк, сребро, злато, никл, магнезит, боксит, а пре свега на велике резерве лигнита с веома повољним лежишним условима за експлоатацију. Реч је о количинама значајним по светским мерилима, садашњу потрошњу угља у Србији ове количине угља могле да подмирују 180 до 200 година. [1]

Одговор на питање да ли је рудно богатство разлог отимања Косова и Метохије, делимично лежи у чињеници да је степен исцрпности минералних ресурса већине земаља Европе веома висок.

## INVESTMENTS AND BENEFITS

The exploitation of mineral resources in Kosovo and Metohija, as well as in Serbia and Yugoslavia, rose considerably in the second half of the 20<sup>th</sup> century. About 20 million tons of mineral raw materials of different values were exploited annually in Kosovo and Metohija. Reliable valuation of this production is not feasible, for several reasons, primarily the variability in prices of stock products such as non-ferrous and precious metals, the conditionality of prices of mineral raw materials such as coal, then social, macroeconomic and political interests, the influence of local community interests, etc. [1]

The mineral and raw material complex of Kosovo and Metohija has made a considerable contribution to solving employment, social problems, raising standards of living, education, development of road infrastructure, urbanization, housing construction, development of extractive industry, etc.

It is estimated that in the period from World War II to the end of the 20<sup>th</sup> century, \$ 10-11 billion was invested in geological exploration, opening, equipping and development of mines, procurement of equipment and machinery, introduction of new technologies, construction of infrastructures and logistic mining systems, construction of flotations, separations, plants for coal treatment and processing, coal gasification plants, construction of internal roads, power supply systems, regulation of water flows, etc. These investments include all accompanying investments necessary for initiating mining production, construction of railway, road, housing and water management infrastructure, investment in healthcare, education, culture, science, environmental protection, archeology, publishing, sports, etc. [1]

## CONCLUSION

The mineral and raw material potentials of Kosovo and Metohija are indisputably significant. This refers to lead, zinc, silver, gold, nickel, magnesite, bauxite, and primarily vast reserves of lignite with very favorable deposit conditions for exploitation. These are quantities significant by world standards; the current coal consumption in Serbia could be supplied by these quantities of coal in the following 180 to 200 years. [1]

The answer to the question whether ore wealth is the reason for seizing Kosovo and Metohija lies partly in the fact that the degree of exhaustion of mineral resources in most of the European countries is very

Уз ову чињеницу, ту су геополитички, војни и други прикривени разлози. Мишљења смо да су у овом конгломерату минерални ресурси озбиљна побуда за отимање Косова и Метохије. [1]

high. With this fact come geopolitical, military and other hidden reasons. We are of the opinion that mineral resources in this conglomerate are a severe motive for seizing Kosovo and Metohija. [1]

## ЛИТЕРАТУРА

1. Вујић С., Грубић А. и др., Српско рударство и геологија у другој половини XX века, АИНС, Матица српска и Рударски институт, Београд 2014, 563 стр.
2. Јанковић С., Јеленковић Р., Вујић С., Минерални ресурси и прогноза потенцијалности металичних и неметаличних минералних сировина Србије и Црне Горе на крају XX века, АИНС, Београд 2003, 876 стр.
3. Николић П., Димитријевић Д., Угљеви Југославије, Проналазаштво, Београд 1990, 462 стр.

## REFERENCES

1. Vujić S., Grubić A. et al., Serbian Mining and Geology in the Second Half of the 20th Century, AEŠS, Matica srpska and Mining Institute, Belgrade 2014, 563 p.
2. Janković S., Jelenković R., Vujić S., Mineral Resources and Forecast of Potential of Metallic and Non-Metallic Mineral Raw Materials of Serbia and Montenegro at the End of the 20th Century, AEŠS, Belgrade 2003, 876 p.
3. Nikolić P., Dimitrijević D., Coals of Yugoslavia, Pronalazaštvo, Belgrade 1990, 462 p.

**ПОЗНАВАЊЕ НАПОНСКОГ СТАЊА У СТЕНСКОЈ МАСИ ОСНОВА  
ЗА ОПТИМАЛНА ПРОЈЕКТНА РЕШЕЊА У РУДАРСТВУ  
И ГЕОТЕХНИЦИ**

**KNOWLEDGE OF THE STRESS STATE OF THE ROCK MASS IS THE  
BASIS FOR OPTIMAL SOLUTIONS IN MINING AND GEOTECHNICS**

DOI: 10.25075/BM.2018.02

В. Иванов  
*Бујараска*

*Инострани члан Академије  
инжењерских наука Србије*  
ivanoven20@gmail.com

V. Ivanov  
*Bulgaria*

*Foreign member of the Academy  
of Engineering Sciences of Serbia*  
ivanoven20@gmail.com

**Сажетак:** Квалитативно, адекватно и успешно решавање било каквог проблему у геомеханичком пројектовању незамисливо без поуздане и сигурне квантитативне карактеризације механичких својстава и напонског стања стенске масе. У прилог томе иду у раду приказана истраживања, почевши од откопавања рудних резерви које су биле "заробљене" у малим рудницима, преко тунела на аутопутевима од националног значаја и подземних електрана, па све до значајних економских, еколошких и социјалних ефеката на најмодернијем површинском копу у земљи.

**Кључне речи:** напонско стање, стенска маса, оптимално пројектно решење

**Summary:** To a qualitative, adequate and successful decision to any geoengineering problem without a reliable and secure quantitative characterization of the mechanical properties and the strained state of the rock mass is unthinkable. In support of that research results shown in the paper, starting with the mining extraction of the "abandoned" reserves in the small mines, proceeding through the national highway tunnel sites and underground power station and ending with the significant economic, environmental and social effects in the most modern open mine in the country prove it. .

**Keywords:** stress state, rock mass, optimal design solution

---

## УВОД

У својој пракси, инжењер геомеханичар заправо настоји да испуни два различита захтева:

У рударству – да се изузме део стенске масе која садржи минералну сировину како би се искористиле рудне резерве без нарушавања природног механичког стања околне рудне масе

У геотехници - да спречи уништавање конструкцијних елемената грађевинских објеката услед губитка отпорности, у условима примењење технологије изградње, а да при томе не дође до

## INTRODUCTION

In his practice the geoengineer actually seeks two alternative goals:

In mining – to destroy part of the rock mass, containing the mineral to absorb the mineral deposits without disturbing the natural mechanical state of the surrounding ore zone rock mass

In geotechnics - to prevent destruction by loss of resistance of the structural elements of the building construction equipment in the condition of building construction technology not to change

промене механичких својстава стенске масе у непосредном окружењу.

У обе наведене ситуације геомеханичко стање природног-тиогеног система, стенска маса у непосредном окружењу/геоинжењерска локација (Host mass/Geoengineering site - HM/GS) је одређено напонским стањем и стањем деформација (SSC) овог система [1, 2, 3]. Основни фактори који одређују SSC и геомеханичку отпорност система HM/GS су управљиви и неуправљиви и могу се комбиновати у следеће групе:

- Механичка и структурна својства стена које грађе стенску масу у непосредном окружењу,
- Напонско стање (примарно - природно и секундарно - изазвано) стенске масе
- Утицаји поједињих технолошких фактора у рударству и/или грађевинарству који доводе до низа геомеханичких промена и појава који се обично називају "реакција стенске масе".

Савремена геомеханика располаже са добро развијеним методама и техникама за лабораторијску и ин-ситу квантитативну карактеризацију прве две неуправљиве групе фактора [4]. Процена и предвиђање реакција стенске масе и изазваног напонског стања и деформација горе наведеног система се данас врши на основу широко примењених нумеричких метода за анализу [5,6]. На тржишту су доступни добро развијени програмски пакети за 2D и 3D нумеричко моделирање који имју могућност широке примене у предметној области.

Сваки HM/GS систем је специфичан по геолошкој структури, својствима, структурним карактеристикама и стању напона. Са друге стране, осетљивост метода за нумеричко моделирање у смислу поузданости, сигурности и тачности квантификације самог нумеричког модела су добро познате. У том смислу, методе, опрема и методологија њихове примене за геомеханичку карактеризацију стене су постале значајно приступачније.

У чланку су описане методе и технике примењене за ин ситу мерење напона у рудницима, као и различита геотехничка опрема за ове потребе.

## МЕТОДЕ ЗА ИСТРАЖИВАЊЕ СТАЊА НАПОНА СТЕНСКЕ МАСЕ

Из разноврсности метода развијених за ту намену, овде разматрамо групу метода мерења

the mechanical condition of the equipment surrounding rock mass.

In both situations mentioned the geomechanical status of the natural-thyogenic system an "Host mass/ Geoengineering site" (HM/GS) is determined by the stressed strain condition (SSC) of this system [1, 2, 3]. The underlying factors that determine the SSC and the geomechanical resistance of the system HM/GS are manageable and non-manageable and can be combined in the following groups:

- The mechanical and structural characteristics of the rocks building the host mass
- The stress condition (naturally and induced) of the rock mass
- The effects of technological impacts in the mining and / or building inducing a series of geomechanical processes and phenomena usually called "reaction of the mass".

Modern Engineering Geomechanics has well-developed methods and techniques for laboratory and in-situ quantitative characterization of the first two unmanageable groups of factors [4]. To evaluate and predict the reaction of the mass and the induced stressed strain condition(SSC) of the mentioned above system, today widely applied are the numerical methods of analysis [5,6]. Well-developed software are available on the market for 2D and 3D numerical modeling with the possibility of wide application in the subject area.

Any HM/GS system is specific in geological structure, properties, structural characteristics and stress condition. On the other hand, the sensitivity of the methods for numerical modeling according to reliability, safety and accuracy of quantification of the numerical model, is well known. In this sense the methods, the equipments and the methodology of their applications for the geomechanical characterization of the rocks became essential.

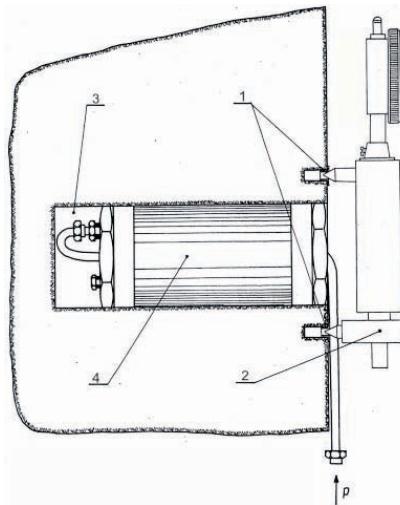
The article describes methods and techniques applied to in situ stress measurements in mines and various geotechnical equipments.

## METHODS FOR THE STUDY OF THE STRESS CONDITION OF THE ROCK MASS

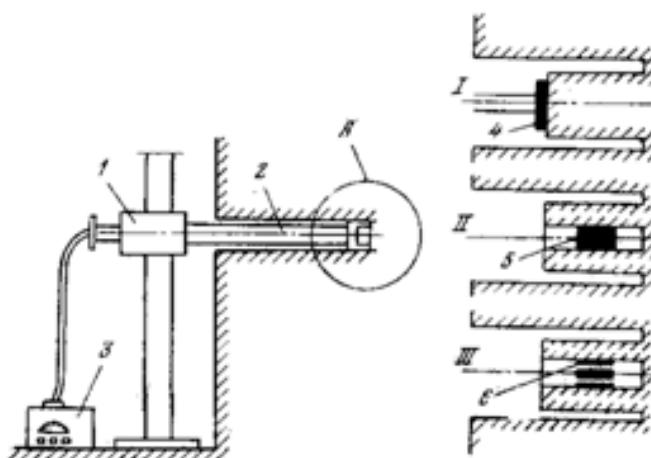
From the diversity of developed for this purpose methods here we considere the methods of the

деформација које смо применили [7,8]. Ова група метода се заснива на мерењу деформација опруге које се ослобађају у масеном елементу приликом делимичног или тоталног ратерчења напона применом технике ундеркоринг/оверкоринг. Након извођења експеримента,рачунају се интезитет и оријентација напона на основу измерених деформација и карактеристика опруге по математичкој теорији еластичности. У зависности од проблема који се решава, мерења се врше на површини и/или у дубини стенске масе одговарајућом методом. Сваком мерењу претходила су репрезентативна истраживања у циљу одређивања својстава стенске масе у зони анализе проблема и која су касније верификоване на мерним локацијама. На сликама 1 и 2 је дат шематски приказ примене поједињих метода мерења.

deformation class applied by us [7,8]. They are based on measuring the deformations of the spring back of the shape of a mass element in its partial or total discharging from the operating stresses through undercoring / overcoring techniques. After the experiment, magnitudes and orientation of the stresses are calculated according to the measured deformations and spring characteristics according to the Mathematical Theory of Elasticity. Depending on the problem that is solved measurements are made on the surface and/or in depth of the rock mass with the corresponding method. Each measurement is preceded from a representative study to determine the characteristics of the problem area from the rock mass and is verified at the measuring locations. On figures 1 and 2 are shown the main application schemes of the types of methods.



Слика 1, Метод за мерење напона на површини стенске масе  
Figure 1, Method for measuring the stress on the surface of the rock mass



Слика 2, Методе за мерење напона у дубини стенске масе  
Figure 2, Methods for measuring the stress in depth of the rock mass

## МЕРЕЊЕ НАПОНСКОГ СТАЊА У РУДАРСТВУ

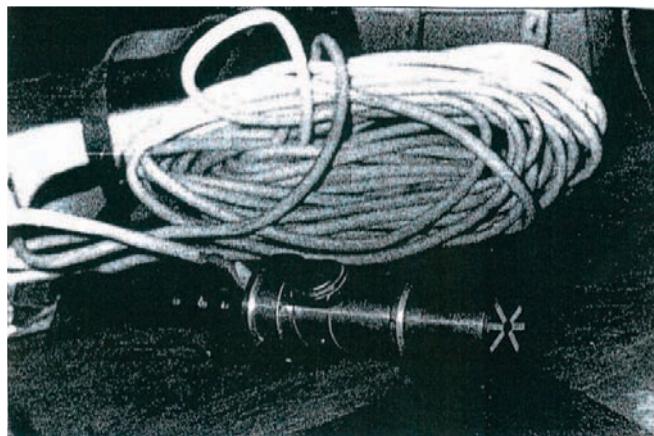
### Рудник Плакалница

У западном делу експлоатационог поља резерве руде у рудном телу "10" се налазе на дубини од 150 метара испод површине, док у рудном телу "20", које се налази североисточно од рудног тела "10", резерве руде се налазе на дубини од 120 м. У подручју рудног тела "10" се, као последица примењене технологије експлоатације, формира празан простор – комора до дубине од 140 м, и са површином од 10 000 м<sup>2</sup>. За осигурање коморе остављена су два стуба - преградни стуб, раван стуб дужине 60 м, ширине 8 м и висине 34 м и други преградни стуб дуг 50 м, широк 10 м и висок 10 м. Циљеви студије су мерење напона у стенској маси која окружује анализирано подручје, као и напона у стубовима, са проценом њихове носивости.

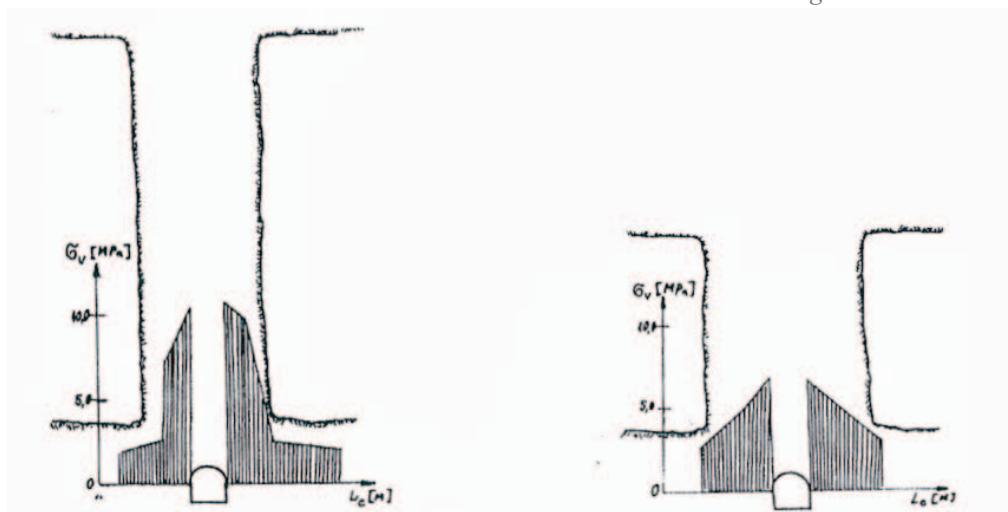
## METHODS FOR MEASURING STRESS CONDITION IN MINING

### Underground mine for complex ore Plakalnitsa

In the western part of the mine field the reserves in the orebody 10 at a depth of 150 meters from the ground, as well as a ore body 20 10 at a depth of 120 meters located NE from the first 10. In the ore body area 10 consequently from the system of operation an empty space is formed, bedding at a depth of 140 meters, and with area 10 000m<sup>2</sup>. For insulation of the void two pillars are left – barrier pillar, level pillar with dimensions 60 meters long, 8 meters wide and 34 meters high and the second panel barrier with dimensions respectively- 50 meters long, 10 meters wide and 10 meters high. The objectives of the study are measuring the stress in the rock mass surrounding the problem area, as well as stresses in the pillars with an estimate of the carrying capacity.



Слика 3, Doorstopper  
деформометар са уређајем за  
оријентацију и постављање у  
мерну бушејину  
Figure 3, The deformometer  
doorstopper with an orientation  
device and delivery in the  
measuring bore



Слика 4, Напони у стубовима а-равни стуб, б-бочни стуб  
Figure 4, Stresses in the pillars a-level pilar, b-side stop pillar

Стенску масу у непосредном окружењу представљају седиментни комплекси доломита и калцитних доломита. Деформациона и механичка својства узорака стена су следећа:

Чврстоћа на притисак  $\sigma_u = 80 \div 110$  MPa, чврстоћа на истезање  $\sigma_t = 6 \div 10$  MPa, кохезија  $C = 8 \div 10$  MPa, угао унутрашњег трења  $\phi = 32 \div 36^\circ$ , Поасонов коефицијент  $v = 0,25 \div 0,31$  и модул еластичности  $E = 4 \div 6$  GPa. Ниже вредности односе се на стene из рудног тела "20". Мерења напона су вршена са методом "Doorstopper" [7]. Деформометар са розетом електроопорних мерних трака је залепљен на дно бушотине у којој се врши мерење. Након тога се врши додатано бушење и формира језгро заједно са деформометром које се одваја од стенске масе. Након растерећења се изводи друга серија мерења и одређују се еластичне деформације у циљу израчунавања интезитета напона. Деформометар је приказан на слици 3.

Тензор напона се овом методом одређује након мерења у три међусобно управне бушотине. У хоризонталним бушотинама извршена су четири мерења са растерећењем на дубини од једног до пет метара, док у вертикалним - два мерења на 1,5 и 3,2 метра. Мерења показују да максимални главни напон има азимут правца од  $v = 30^\circ$  југозападно од зенитне осе и износи  $\sigma_1 = 4,7$  MPa, а измерена величина је већа од геостатичке за 15 - 20%. Хоризонтални напони:  $\sigma_2 = 4,2$  MPa са азимутом  $v = 210^\circ$  и  $\sigma_3 = 3,1$  MPa ( $v = 100 \div 105^\circ$ ). Однос појединачних компоненти поља напона је у размери  $\sigma_1 : \sigma_2 : \sigma_3 = 1,5 : 1,3 : 1$ .

Мерење напона у преградним стубовима извршено је у бушотинама који су постављене у правцу њихове дужине, на левој и десној страни са 5 растерећења. Резултати мерења у бушотинама приказани су на слици 4.

На основу података из ин ситу мерења утврђени су стварна оптерећења, носивост и фактори сигурности. Овде треба напоменути и чињеницу да су у подручју првог преградног стуба припремљене резерве руде у рудном телу "10" биле блокиране, у количинама које одговарају капацитету рудника за два месеца. Моделирање промене ССЦ у стубу приликом откопавања резерви извршено је на основу горе наведених резултата. Увидом у резултате моделирања уочено је да ће откопавањем резерви доћи до формирања напонског стања које је мање од 80% од носивости стуба са фактором сигурности 1,55 и стабилним стањем. Након дужег разматрања, откопавање резерви је успешно извршено.

The host rock mass represents a sedimentary complexes from dolomites and calc dolomites. The deformation strength properties of rock samples presented are as follows:

Compressive strength  $\sigma_u = (80 \div 110)$  MPa, tensile strength  $\sigma_t = (6 \div 10)$  MPa, cohesion  $C = (8 \div 10)$  MPa, angle of internal friction  $\phi = (32 \div 36^\circ)$ , Poisson's ratio  $v = 0,25 \div 0,31$  and elastic modulus (also known as modulus of elasticity)  $E = (4 \div 6)$  GPa. The lower values refer to the rocks from the ore zone 20. Measurements of the stresses are done with the option doorstopper [7]. The deformometer with the rosette of the tensoresistors is glued to the bottom of the measuring borehole. The core is formed with the deformometer which is separated from the rock mass. After unloading second reports are made and elastic deformations are determined to calculate the magnitudes of the stresses. The deformometer is shown in Figure 3

The tensor of the stresses by this method is determined after measurements in three mutually perpendicular boreholes. In horizontal boreholes were made in four unloadings at a depth of one to five meters, in the vertical - two measurements at 1.5 and 3.2 meters. The measurements show that the maximum main principal stress has been diverted from the zenith axis at 30 southwest and is  $B1 = 4.7$  MPa, the measured magnitude exceeds the geostatic with 15-20%. Horizontal stresses:  $B2 = 4.2$  MPa with azimuth  $A = 210^\circ$  and  $B3 = 3.1$  MPa ( $A = 100 \div 105^\circ$ ). The distribution of the field is in proportion  $(B1:B2:B3) - 1.5:1.3:1$ .

Measurement of stresses in the barrier pillars are made of gate ways running along their length, on their left and right sides of 5 unloadings. The results of the boreholes are shown in Figure 4.

According to the data from the in situ measurements the actual loadings, loading capacity and safety factors were determined. In this place it can be noted also the fact that in the area of the level barrier pillar, in ore body 10 prepared ore reserves were blocked, equal to the capacity of the mine for two months. Modeling of the change of SSC on the pillar when encroachment of the reserves was done on the above results. The modeling survey found that encroachment would result in a stress less than 80% from loading capacity with safety factor 1.55 and sustainable condition. After long hesitation the various blocked reserves were encroached successfully.

## Испитивање геомеханичке ситуације у руднику Кошава

Рудник Кошава је једини у земљи који производи гипс. Слој гипса је просечне дебљине 19 м, протеже се у правцу исток-запад, под нагибом од 6 - 16° и залеже до дубине од 250 до 300 м. Стенски масу у непосредној околини чине лапорци са примесама кречњака и глине. Конкретно, изнад слоја корисне сировине на дубини од око 200 м налази се водоносни слој који обезбеђује снабдевање водом у том подручју. Поред тога, терен изнад експлоатационог поља је плодно тло на којем је развијена интензивна пољопривредна производња. Близина реке Дунав и благо залегање терена у правцу корита реке указују да је потребно применити строге критеријуме у циљу спечавања слегања површине терена, као последица рударских радова.

Лежиште је познато скоро 50 година. У основи се примењује коморно-стубна метода експлоатације уз формирање стубова са различитим распоредом:

- Откопавањем се у континуитету формирају стубови и незапуњене коморе, након чега се појединачни стубови откопавају, а заостали стубови су распоређени у облику чешља при чему се коморе запуњавају;
- Откопавањем се формирају равномерно распоређени стубови, квадратног или правоугаоног попречног пресека, и незапуњене коморе и сл.

Запуњавање комора се врши хидрозасисом са песком, који се откопава из Дунава, према претходно описаној методи откопавања при чему је степен искоришћења гипса као корисне минералне сировине мали - мањи од 30%. Из тог разлога се годинама врши секундарна експлоатација гипса из стубова у откопаним деловима лежишта. Као последица претходног су се у многим стубовима појавиле пукотине, док су се појединачни стубови потпуно урушили, а што све заједно указује да су појединачни делови експлоатационог поља у граничном стању стабилности. У више наврата су вршене измене и прилагођавања методе експлоатације у североисточном и централном дела рудника где је дошло до зарушавања стубова, са тенденцијом ширења оштећења ка површини терена и појави слегања.

У циљу проучавања и процене геомеханичког стања у руднику, спроведен је опсежан програм истраживања, при чему је приоритет дат ин-сitu методама испитивања:

## Investigation of the geomechanical situation in Koshava mine

Koshava mine is the only one in the country which produces gypsum. The gypsum layer has an average thickness of 19 m, it stretches east-west direction, it has a slope 6-16° and bedding at a depth of 250 to 300 m. The host rocks are marl stone with inclusions of limestones and clays. Specifically, over bed/stratum about 200 m depth is situated aquiclude horizon that provides water supply in the area. In addition, the field above the mine field is a fertile soil where intensive farming is being developed. The proximity to the Danube River and the slight displacement of the terrain to the river bed impose rigid security requirements of the Earth's surface shrinkage, as a result of mining operations.

The deposit is almost 50 years old. Basically applied is key-room system with panel preparation with different options:

- Continuous rib room pillar and unfilled chambers, with partially taken ones, encroached comb-shape pillars and filled chambers;
- By evenly spaced square or rectangular pillars and unfilled chambers and etc.

For the filling of the chambers is used a hydro filling with sand excavated from the Danube River, together with the already described, the low mining extraction - less than 30% gypsum is a fact. This is the reason why secondary mining of gypsum has been applied in the years from pillars in already exhausted areas. As a result a lot of the pillars cracked, there are also completely destroyed these are signs of the presence of parts of a mine field in the borderline. Multiple adjustments are made in some area failures in northeast and central part of the mine, the latter with deeds on the surface.

To study and evaluate the geomechanical situation in the mine, a large-scale research program has been carried out, with priority being given to in-situ characterization methods of:

- a) Strength and deformation properties of the gypsum varieties in laboratory conditions
- b) Determining of the above characteristics in natural conditions

- a) чврстоће и деформационих својстава различитих врста гипса у лабораторијским условима,
- b) одређивање чврстоће и деформационих својстава у природним условима,
- c) дефинисање структурних својстава и геомеханичка класификација поједињих зона,
- d) "ин ситу" истраживање напонског стања у стенском масиву,
- e) параметарске нумеричке студије.

Лабораторијским испитивањима је утврђена чврстоћа на притисак гипса од  $\sigma_u = 10 - 13$  MPa. У циљу потврде резултата лабораторијских испитивања чврстоће на притисак су, у северозападном и југозападном делу слоја корисне сировине, формирана призматична пробна тела димензија 400x400x400 mm од обе врсте гипса, финозрног и средњезрног гипса (са школјкама). Наведена пробна тела су оптерећена вертикалним оптерећењем, са константним прираштајем сile до лома. Овим испитивањима је потврђена релативно мала вредност чврстоће на притисак гипса и одређени параметри деформационих својстава. За потребе одређивања структурних својстава у истим зонама су избушене су истражне бушотине. Као резултат описаних истраживања, експлоатационо поље је према геомеханичким карактеристикама, од запада према истоку, подељено у четири зоне. У северозападном делу су изведена мерења напонског стања применом "доорстоппер" методе и мерењем у хоризонталној бушотини.

Резултати мерења указују на то да је максимални главни напон у овој зони приближно вертикалан и да има интезитет од  $\sigma_v = 11 - 12$  MPa, са азимутом правца од  $v = 4^\circ$ . Минимални хоризонтални напони су у опсегу  $\sigma_x = 5 - 6$  MPa. Измерене вредности напона су веће од напона од вишележећег стенског масива. Овде треба напоменути да су измерене вредности напонског стања последица рударских радова. Сви добијени резултати коришћени су за процену носивости система стубова и комора, као и утицаја засипавања откопаног простора и процену степена геомеханичког ризика [9].

На основу спроведених истраживања дефинисан је поступак за геомеханичку процену утицаја предложеног концепцијског решења за рационализацију технологије откопавања на промену напонског стања, односно повећање носивости стубова променом њиховог облика. Испитивањима су обухваћени различити односи ширина/висина стубова, и доказано је да

- c) Definition of structural characteristics and geomechanical classification by areas
- d) Investigating in situ the stressed condition of the rock mass
- e) Parametric numerical studies

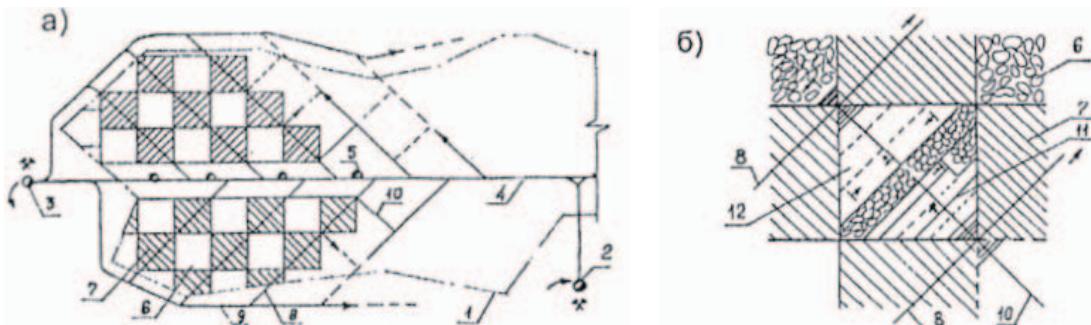
Laboratory tests establish the strength of gypsum of 10-13 MPa. For verification in the Northwestern and Southwest parts of the bed/stratum in both varieties of gypsum - finely grained and medium grained gypsum (shellfish) were performed studies as cut into prisms with dimensions 400x400x400 mm, which are loaded with a vertical load, passed stepwise, till destruction. The experiments confirmed the relatively low gypsum strength and indicated features in its deformation behavior. In defining the structural characteristics in the same areas test holes were drilled. As a result of the described investigations, the mine field is divided from the west to the east into four zones according to its geomechanical condition. In the northwestern part, experiments were carried out on the measurement of the stresses with the doorstopper variant, by measurements in horizontal borehole.

Measurement data indicate that the maximum main voltage in the zone is vertical and has a size of  $\sigma_v = 11-12$  MPa, diverted from the earth's axis  $4^\circ$ . The minimum horizontal stresses are in the range  $\sigma_h = 5-6$  MPa. The measured stresses exceed those of the overlying rocks. It should be noted here that the measured stresses are parameters of the induced field by the mining activities. All the results obtained were used to assess the resistance of the pillars and the chambers, as well as the filling effect and the degree of the geomechanical risk [9].

A geomechanical justification has been developed after the described studies conceptual design for rationalization of mining technology by changing the stressed condition, respectively increasing in the bearing capacity of the pillars by altering their shape. The variation of the width / height ratio has been investigated, and it has been proven that in massive square pillars with a width exceeding 3-4 times the height of the pillar (the same ratio for the mining chambers), the relatively low gypsum strength will be compensated. The option permits local border break down of the roof, over the encroached space, in the rocks is formed a vault over which

ће, код масивних стубова попречног пресека у облику квадрата и ширине која прелази 3 - 4 пута висину стуба (исти однос је и за рударске коморе), релативно ниска чврстоћа на притицак гипса бити компензована. Овакав приступ доводи до појаве делимичног локалног зарушавања стропа изнад откопаног простора, при чему се формира свод, а стенска маса у вишим деловима кровине остаје стабилна. Технолошка шема описане варијанте приказана је на слици 5.

the overlying rock mass remains sustainable. The technological scheme of the described variant is presented in Figure 5.



Слика 5, Шематски дијаграм предложене технологије (а) и шема експлоатације нагиба (б)  
 Figure 5, A schematic diagram of the proposed technology (a) and a mining scheme of the stope (b)

### Испитивање могућности појаве горског удара у рудницима Мадан поља

Експлоатационо поље се налази у јужном делу планине Родопи, има површину од  $3000 \text{ km}^2$  и обухвата 50 суседних лежишта. [10,11].

Лежишта су магматског типа. Лежишта су жична и/или су метасоматска, жична су под нагибом од  $70-90^\circ$  и уобичајене су моћности од 3 - 3,5 m, док су пегматитска лежишта моћности до 10 m. Лежиште је било под интензивним тектонским утицајима и раздељено је са четири главна раседа. Стene у истраживаним рудницима су једре, крте и еластичне. Спроведен је репрезентативан обим лабораторијских испитивања у складу са препорукама ISRM-а [4]. На слици 6 приказане су локације испитиваних рудника.

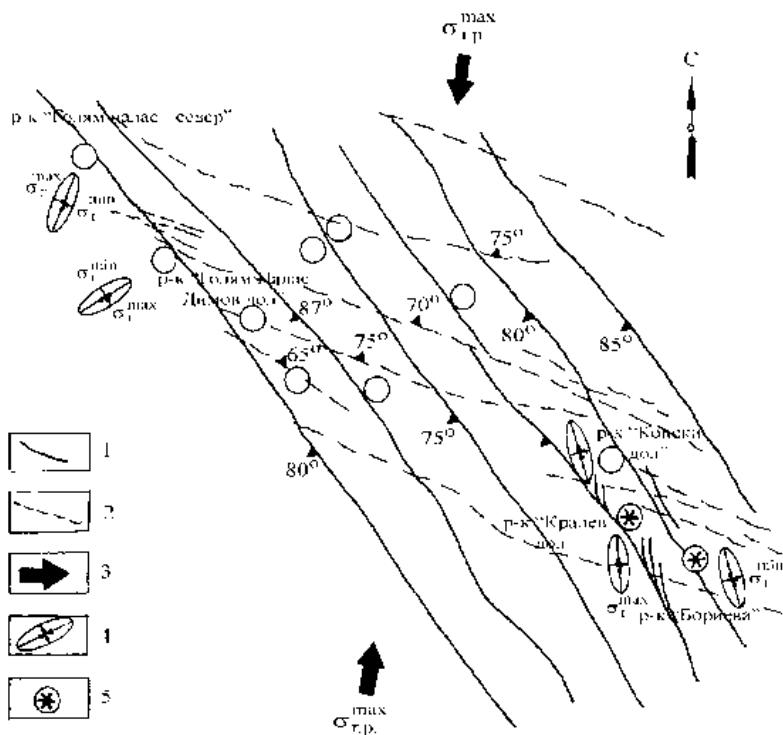
Чврстоћа на притисак јужних рудника је већа од  $\sigma_u = 166 - 186 \text{ MPa}$  и вредностима модула еластичности од  $E > 7.4 \text{ GPa}$ , док у северним деловима рудника ови параметри имају мање вредности. Истраживања напонског стања су извршена у две фазе. Прва фазу је чинила реконструкција поља напона на основу тектонско-физичких података [13,14]. Овом анализом је утврђена оријентација и интезитет тектонских напона. Максимални тектонски притисак  $\sigma_T^{\max}$  оријентисан је субмеридијално, као што је приказано на слици 6. Друга фаза је била експериментална у

### Investigation of the danger of rock burst in the mines of the Madan mine field

The mine field is located in the southern part of the Rodopi mountain, it has an area from  $3000 \text{ km}^2$  and includes 50 nearby located deposits. [10,11].

The deposits are igneous. The ore deposits are veined and / or metasomatic, the veins are pitching ( $70-90^\circ$ ) the predominant ones are 3-3.5 m thick and up to 10 m thick pegmatites. The deposit has undergone intense tectonic effects and is broken by four system bearing faults. The rocks in the studied mines are healthy, brittle and elastic. A representative volume of laboratory tests according to the ISRM requirements were made [4]. Figure 6 shows the location of examined mines.

The compressive strength of the southern mines is higher is  $166-186 \text{ MPa}$ , more fragile are  $E > 7.4 \text{ GPa}$ , as in the northern these parameters are smaller. The study performed on the stress condition is done at two stages. The first is by field reconstruction by techno physical data [13,14]. This analysis established the action of tectonic stresses. Maximum Tectonic Pressure  $\sigma_T^{\max}$  is oriented sub- meridional, as shown in the figure. The second stage is experimental



Слика 6. Положај испитиване руде која се експлоатише у рудницима Мадан  
 Figure 6, Location of the examined ore exploited in the mines of the Madan mine field

оквиру које су одређени: интезитети и правци напона у анализираним рудницима, способност стена да акумулирају и нагло (експлозивно) ослобађају деформациону енергију као последица примењене рударске технологије у циљу процена нивоа ризика. Међусобна близина рудника омогућава да се на основу тумачења добијених резултата изводе уопштени закључци [16,17].

Резултати мерења су приказани у Табели 1, док су локације на којима су изведена истраживања приказане на Слици 6.

Однос појединачних компоненти поља напона за северне руднике је у размери  $\sigma_1 : \sigma_2 : \sigma_3 = 2,9 : 1,7 : 1$ , за јужне руднике тај однос је  $\sigma_1 : \sigma_2 : \sigma_3 = 3,4 : 2,7 : 1$ . Све измерене гравитационе компоненте напона одступају од вертикалне осе од  $10^\circ$  до  $24^\circ$  и веће су од тежине вишележећих стена, а што је такође типично за поља напона са сложеним међусобним утицајем гравитационе сile и текtonских сила које делују у стенској маси.

Уз велике вредности поља напона на стенама, други најважнији фактор је њихова склоност ка појави горских удара. Процена ризика од појаве горских удара извршена је за сваки рудник понаособ. За ове потребе су коришћене најбитније и најчешће коришћена својства, а то су концентрација деформационе енергије SED и индекс релативне чврстоће RSI за ин-

in order to determine the magnitudes and the direction of stresses in the problem mines, the ability of the rocks to accumulate and to give away explosion-like deformation energy, induced by mining technology to assess the risk level. The near distance of the mines allows a generalized interpretation of the obtained results [16,17].

Measurement data are shown in Table 1, the locations of the studies are also indicated in Figure 6.

The ratio between the components  $\sigma_1 : \sigma_2 : \sigma_3$  for the northern mines is 2,9:1,7:1 for southern that ratio is 3,4:2,7:1. All measured gravitational components are deviated from the vertical axis from  $10^\circ$  to  $24^\circ$  exceed the weight of the overlying rocks, which is also typical of stress fields with complex interaction between the gravitational force and the tectonic forces operating in the rock mass.

Along with the high stress on the rocks, the second most important factor is their tendency to the risk of rock burst. The evaluation of the risk of rock burst has been done for each problem mine. The main and most applied characteristics are used. These are the Strain energy density SED and the Relative strength index RSI for a stress index SI and the brittleness index BI [10,15,16]. These

декс напонског стања SI и индекс крости BI [10,15,16]. Ова својства су утврђенана основу резултата претходно описаних лабораторијских и ин ситу истраживања изведенних у рудницима и који су приказани у табели 2.

*Табела 1, Резултати in situ истраживања*  
 Table 1, Results from in situ studies

Рудници / Mines	Главни напони / Main stresses			
	$\sigma_1$ [MPa]	$\sigma_2$ [MPa]	$\sigma_3$ [MPa]	Коментар / Comment
Северни / Northern	11-15	7-9	4-5	$\sigma_{\max}$ верикалан / vertical
Јужни / Southern	20-24	13-19	6-7	$\sigma_{\max}$ хоризонталан / horizontal

Приказани подаци указују да стене из јужних рудника имају висок ризик од појаве горских удара и сеизмичности, док су северни рудници у средњој категорији ризика [15,16]. Приказани подаци потврђени су подацима о овим појавама у рударској пракси. У рудницима на северу су забележена изненадна зарушавања, док су у рудницима на југу забележена два случаја појаве динамичког зарушавања који су такође приказани на слици. У јужним рудницима у фази израде припремних радова и радова на откопавању уочени су такозвани "прекурсори" [18] – појава пукотина, љуспање, пукотина. Како се приближавамо зони концентрације напона, ови феномени се појачавају. Ово је у већој мери уочено у руднику Бориева, где постоји могућност појаве раслојавања извађеног језгра, како је приказано на слици 7.

characteristics are determined by the results of the described laboratory and in situ studies from the mines and are shown in Table 2.

Data show that with high risk of rock burst and seismicity are the rocks from the southern mines, while the northern mines are in the middle category [15,16]. Data show are confirmed from incident data in mining practice. In the northern mines, sudden failures have been documented, while in the south mines there are two cases of areas of dynamic destruction which are also indicated in the figure locally. In the south mines at the stage the preparation of preparatory and cuts works the so-called "precursors" are shown[18] – cracking, scaling/blowing, firing. Approaching the stress concentration zone these phenomena are intensifying. This is more established for the Borieva mine, where still at operational diseing there is a risk of the extracted core, as documented in Figure 7.

*Табела 2, Резултати in situ испитивања*  
 Table 2, Results from in situ studies

Рудник / Mine	Критеријум / Criteria			
	SED [kJ/m <sup>3</sup> ]	RSI	SI	BI
Голуам Палас - север Golyam Palas - north	0.98	0.39	6.9	4.2
Голуам Палас - Димов Дол Golyam Palas - Dimov Dol	0.93	0.38	6.92	7.8
Конски дол Konski dol	1.84	0.44	7.1	11.22
Кралев дол Kralev dol	1.86	0.43	7.36	11.29
Бориева Borieva	2.36	0.41	7.29	13.36

На основу описаних захтева и узимајући у обзир утицај примењене методе откопавања и минерских радова, извршена је комплексна категоризација рудника у којима су уочене наведене проблематичне појаве, као што је приказано у табели 2. На слици 8 графички су приказани механизми појаве лома у појединим групама рудника.

Механизми појаве лома стенске масе [10] представљени су методологијом Stress Path, која се користи у дубоким рудницима [6] за предвиђање типова ломова. Након анализе описаних истраживања, менаџерима рудника у којима су уочене наведене проблематичне појаве дате су емпиријске препоруке за оптимизацију и/или смањење ефеката утицаја примењене технологије експлоатације на ССЦ и на систем БМ/рударско подручје. То је заправо једина група фактора, која је наведена на почетку, а на коју можемо утицати.

Based on the described requirements and taking into account the impact of applied mining methods and blasting works a complex categorization has been carried out of the problem mines, it is shown in Table 2. On Figure 8 are shown graphically in groups of mines the mechanisms of failure.

The mechanisms of failure of the rock mass [10] are represented by the Stress Path methodology, used in deep mines [6] to predict types of failures. After a summary analysis of the described studies, to the managers of the problem mines are given empirical recommendations for optimizing and/or reducing the effects of technological impacts of SSC on the system BM/mining area. This is actually the only group factors listed at the beginning which can be managed.



Слика 7, Раслојавање језгра  
Figure 7, Core discing

Табела 3, Категорија геомеханичког ризика  
Table 3, Category of the geomechanical risk

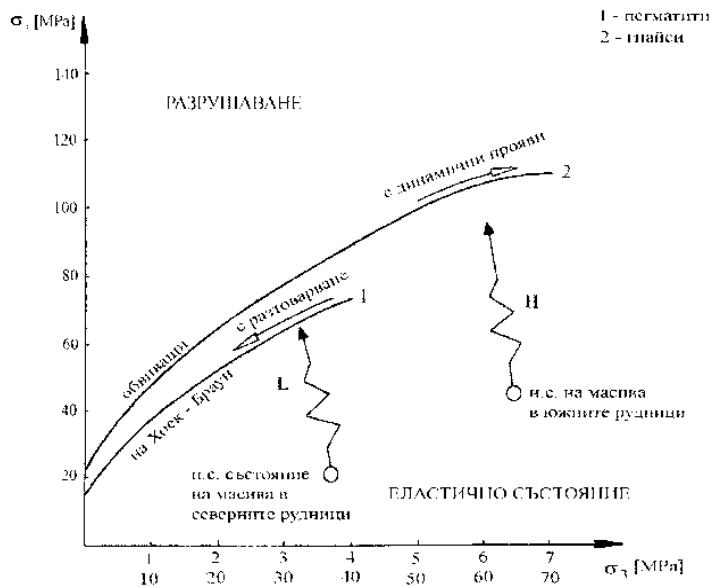
Рудник / Mine	Критеријум / Criteria
Голуам Палас - север Golyam Palas - north	низак / low
Голуам Палас - Димов Дол Golyam Palas - Dimov Dol	низак до умерен / low to moderate
Конски дол Konski dol	просечан / average
Кралев дол Kralev dol	висок / high
Бориева Borieva	веома висок / very high

#### Геотехничка опрема за мерење напонског стања

In situ истраживања напонског стања за ове потребе првенствено подразумевају примену мерења на слободним површинама. У наставку

#### Measurement of stresses in geotechnical equipment

In situ studies of stress in this direction is the priority application of the measurements of the free faces. Described below, experiments have been made



Слика 8, Механизам лома стенске масе у испитиваним рудницима

Figure 8, Mechanism of failure of a rock mass in the examined mines

су описаны експерименти који су изведени применом сложене и напредне верзије методе и одговарајуће опреме [20], која има следеће метролошке и технолошке предности:

- Примењена је вишекомпонентна розета која омогућује већи број независних мерења приликом извођења сваког испитивања и којом се добија скуп података који омогућавају статистичку анализу. [19,21]
- Направљен је вишебазни мобилни екстензометар за мерење померања између парова тачака у различitim правцима [23], те је са овим уређајем постигнуто раздвајање фаза бушења и мерења.
- Механичке константе стенске масе на мерним местима се одређују помоћу хидрауличног клипа који је конструисан за ове потребе (види сл. 1)
- Развијен је нови модел за обраду резултата мерења и развијен је одговарајући PSRM програмски пакет за обраду података [21]
- Направљен је цео низ помоћне опреме за реализацију ових испитивања

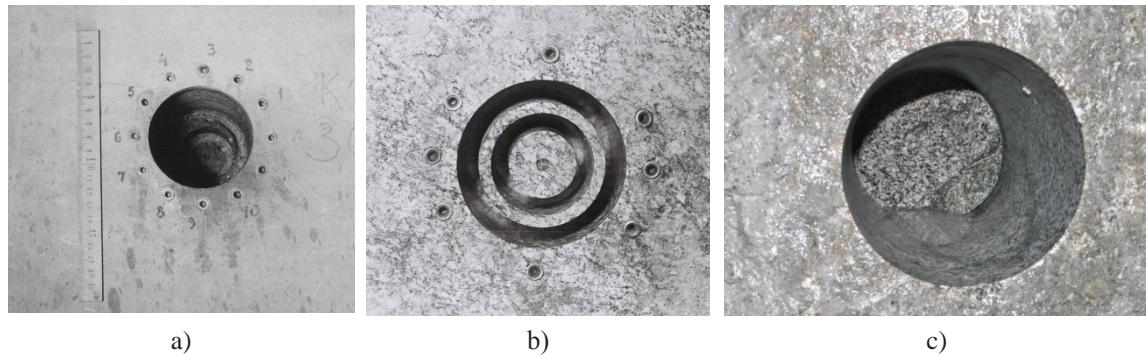
Методу испитивања која је овде описана карактерише једноставност, технолошка решења и поступак извођења који омогућава извођење испитивања са оба поступка, ундеркоринг-оверкоринг. Ова метода омогућава одређивање промене напонског стања стенске масе уз додатна мерења на позицијама која се већ користе за

by a complex advanced version of a method and related equipment [20], which has the following metrological and technological advantages:

- A multi-component rosette was introduced, providing an increased number of independent measurements with which a set of data allowing for statistical evaluation is accumulated in the separate experiment. [19,21]
- A multibased mobile extensometer has been constructed for movement between pairs of points in random directions [23] with the device is achieved separation of the phases of drilling and measurement.
- Determined is the mechanical constants of the rock mass at the measuring locations/ places by a created for that purpose hydraulic jack (see fig 1)
- A new interpretation model of the measurement results has been developed and a corresponding PSRM software has been developed for processing them [21]
- Set of auxiliary equipment for the realization of the experiment was created

The variant described characterizes by simplicity, technology and performance, allows experiments on both circuits (under-overcoring). The method makes it possible to determine the variation of the stresses of the rock mass, by additional measurements in the stations used for momentary

одређивање тренутног напонског стања. [19, 21]. Дефинисана верзија методе растерећења је позитивно потврђена испитивањима и потврђена у лабораторијума за механику стена, како у земљи, тако и иностранству. Сходно томе, њена могућност примене је доказана и у различитим теренским испитивањима, као што је приказано на слици 9.



Слика 9, a - Конструкција бетонске облоге / concrete lining construction; b - површина стне / rock surface; c - транспортни никоп у руднику / transport mine tunnel

#### Мерење напонског стања у тунелу аутопута

Спроведено је истраживање напонског стања групе елемената облоге тунела аутопута са две цеви са растојањем између оса од 50 м. Тунели имају облик потковице и површину попречног пресека од 76 м<sup>2</sup>. Дебљина слоја вишележећих стена у највишем делу износи 80 метара. Стенска маса у којој су тунели изграђени састоји се од конгломерата, аргилита, кварцита и филита. Стene су делимично распаднуте и неравномерно су распоређене у вертикалном профилу. Критични елементи облоге налазе се у подручју где траса мења праволинијски правац и пролази кроз тектонску зону. Мерења се врше у подграђеној тунелској цеви са намером да се одреди ССЦ у тунелској облози и промене које се јављају са приближавањем чела друге тунелске цеви током изградње. Експерименти су изведени у два сегмента облоге, који су један насујују против другог, и у које су уградјена по два мерна уређаја. Извршена су два циклуса мерења да би се одредио утицај напредовања изградње тунела на већ уградјену подграду. Мерењима је утврђено да су компоненте неравномерне и да је расподела напонског стања нехомогена, чак и у истом елементу подградне конструкције. Вертикални напони  $\sigma_v$  су се кретали у распону од 6 до 8 MPa на десној и од 3,1 до 4,9 MPa на левој страни тунела. Веће вредности су у боку облоге, који се налази са спољне стране у односу на

stress determinations. [19, 21]. The created version of the unloading method has been positively tested in rock mechanics laboratories in the country and abroad. Consequently, its suitability has been proven in various field measurements as shown in Figure 9.

#### Measurement of stresses on a highway tunnel

There has been a study of the stress state of a group of lining elements of two pipe highway tunnel, with the distance between the axes 50 m. The tunnels have a horseshoe shape and a 76 square meter section. The thickness of the overburden rocks in its highest part is 80 meters. The rock mass that hosts the tunnels consists of conglomerates, argillites, quartzites and phyllites. The rocks are weakly weathered and unevenly alternating in the height lithologies. The problem lining elements are in a region where the track changes the rectilinear character and crosses a tectonic zone. The measurements are made in the built-in tube and are intended to determine SSC on the tunnel lining and its amendment by approaching the face of the second pipe to be built. The experiments were done with two lining segments with built in two opposite measuring stations for a segment. Two measurement cycles were performed to measure the impact of the progress step of the built tunnel on the built-up support. Measurements identify uneven component and non-homogeneous distributions of stresses even in the same element of the lining structure. Vertical stresses  $\sigma_v$  are in the range of 6-8 MPa vs 3.1 to 4.9 MPa, respectively on the right and left sides. Larger values are in the walls of the lining, external to the pillar. Horizontal voltages vary from 1.5 to 2.7 MPa, but they

стуб. Хоризонтални напони се крећу од 1,5 до 2,7 MPa, али се такође разликују по карактеру. У другом циклусу мерења, расподела напона у тренутку мерења је била слична као у претходном мерењу, али се интезитет напона повећао између 20 и 30%. У свим овим случајевима ССЦ-а, прорачуни показују да подграда тунела задржава чврстоћу. Добијени резултати су коришћени за предвиђање промена у ССЦ и процену носивости и стабилности на основу анализа методом коначних елемената [2, 22].

### Експериментална истраживања природног поља напона стенске масе у зони реверзибилне хидроелектране Чайр

Реверзибилна хидроелектрана Чайр представља главни објекат за производњу електричне струје у оквиру комплекса хидроелектрана Белмекен-Сестримо у Бугарској. Према пројекту подземне електране планирана је изградња две велике подземне коморе. Прва, која је названа "машинска хала", је дужине 112 m, ширине 25 m и висине 43 m, а предвиђена је за уградњу четири реверзибилна хидрогенератора, укупне снаге 900 MW. Друга комора, која је паралелна са првом, има димензије 96 m x 13 m x 20 m, а пројектована је за трансформаторски део. Између ове две коморе је предвиђен стуб ширине од 30 m. Ове коморе треба да се изграде на дубини од 340 m од површине.

Стенска маса је изграђена од чврстих гранита са масивном структуром, а стенски масив пројжима кварцно-пегматитска жица. Стенску масу пресеца и група раседа са релативно малим амплитудама и који нису заначајно пореметили стенску масу. Присутна су четири система пукотина, који су паралелни са раседима. Дуж појединих пукотина долази до процеђивања подземне воде која делује агресивно на бетон. Према геолошким подацима, стенска маса је уједначене литологије, али је подељена у две зоне. На слици 10 приказан је план локације комора на коме су означене две зоне.

Прву зону чине стene које имају чврстоћу на притисак  $\sigma_{\text{u}}^{\text{av}} = 150 - 160 \text{ MPa}$ , док су у другој зони стene са мањим вредностима,  $\sigma_{\text{u}}^{\text{av}} = 120 - 130 \text{ MPa}$ .

Истраживања су обављена у оквиру пилот ходника, који је израђен на 10 метара изнад свода коморе која је пројектована за машинску халу. Одређивање величине и расподеле природног напонског стања је извршена према следећем редоследу:

are also different in character. In the second measurement cycle, the current stresses remain similar in distribution, but increase in magnitude between 20 and 30%. In all these cases SSC, calculations show and lining retain resistant. The results obtained are used to predict changes in the SSC by FEM analysis and resistance assessment [2, 22].

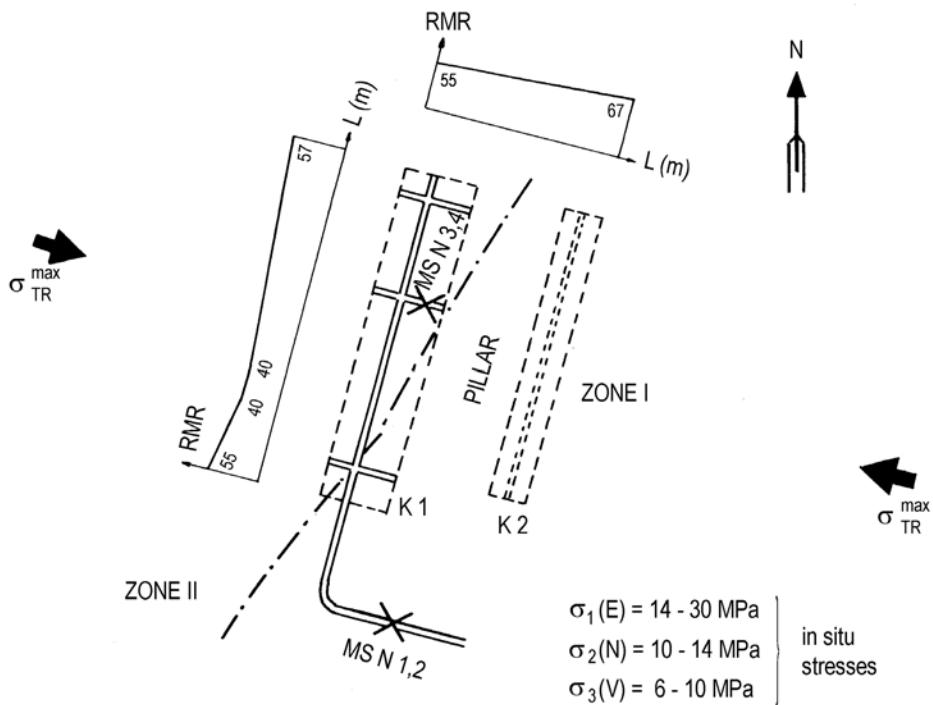
### Experimental study of the natural field of stresses of the rock mass in the area of Pumped Storage Hydro Power Plant Chaira

Chaira PSHPP is the main electrical production structure which formed the hydroelectric complex Belmeken-Sestrimo in Bulgaria. According to the underground power station project the construction of two large-scale underground caverns is planned. The first, called a machine "hall" with a length of 112 m, a width of 25 m and a height of 43 m is provided for installation of four reversible hydro generators, with a total power of 900 MW. The second cavern, which is parallel to the first one, has dimensions 96 m x 13 m x 20 m, respectively is designed for a transformer compartment. Between the two chambers is intended to have a 30 m pillar. The two caverns are set at a depth of 340 m from the surface.

The rock mass is made of solid, solid granites with a massive structure as the rocks are implemented quartz pegmatite streak. The rock mass is undisturbed from bundles of faults with relatively small amplitudes. There are four systems of cracks in it, oriented according to the faults. Some of the cracks drain water that is aggressive to the concrete. According to the geological data the rock mass is with uniform lithology, but it is divided into two areas. Figure 10 shows a plan for the location of the design caverns where the two areas are marked.

In the first area, the rocks are with compressive strength  $\sigma_c^{\text{av}} = 150-160 \text{ MPa}$ , while those in the second area are with lower performance  $\sigma_c^{\text{av}} = 120-130 \text{ MPa}$ .

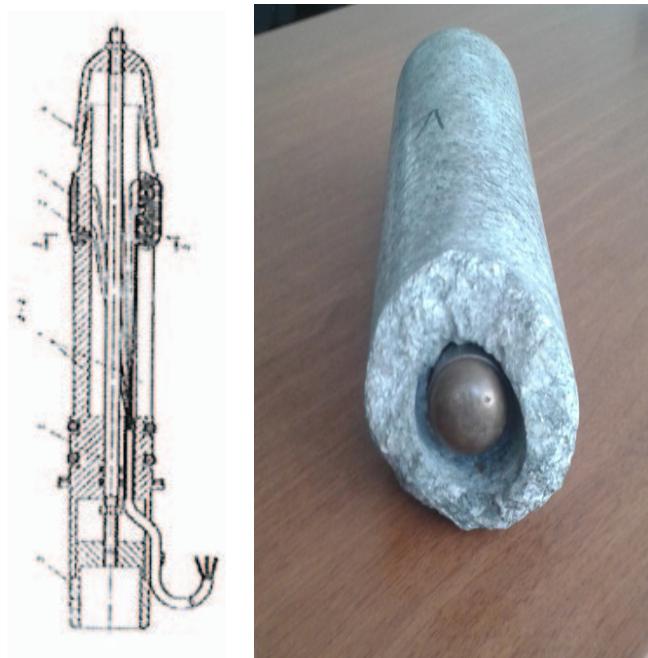
Researches have been done in a pilot project, driven/built 10 meters from the chamber arch designed for the machine area. The determination of the nature and distribution of the natural field is carried out in the following sequence:



Слика 10, План локација просторија  
 Figure 10, Plan of the cavern location

Реконструкција палео рељефа на основу тектонских и физичких података о расподели и кинематици руптурних померања [13,14,25]. Ова прелиминарна анализа омогућила је анализу расподеле тектонских напона и одређивање оријентације дејства максималног тектонског напона са правцем северозапад-југоисток, као што је приказано на слици. Након ове прелиминарне процене извршен је обилазак локације, узимање узорака и испитивање узорака, изабрана је опрема и локације на којима ће бити утрађени уређаји за одређивање интезитета и оријентације напона. Укупно је коришћено четири мерна уређаја, два за сваку зону стенског масива (слика 8). За мерење интезитета и оријентације компонената природног напонског стања примењене су две методе са растерећењем. За мерење дубине стенске масе коришћена је универзална тензорска опрема, произведена у сибирском одељењу Руске академије наука. Ова опрема омогућава одређивање тензора напона у складу са Лимановом шемом, види слику 1. Линеарне деформације се мере деформометром утрађеним у пилот-бушотину малог пречника, након чега се врши растерећење помоћу технике оверкоринга, при чему се добија елемент у облику цилиндра, а затим се мере еластичне деформације након релаксације материјала, као што је приказано на слици 11. На истој слици приказан је Лиманов деформометар.

Reconstruction of the paleo field on tectonic physical data on distribution and the kinematics of the rupture disturbances [13,14,25]. This preliminary analysis provides the availability of tectonic stresses, orientation of action of maximum tectonic stress in the direction northwest-southeast as shown in the figure. After this preliminary assessment and visit, sampling and testing of samples, the choice of equipment and locations of orientation stations was made. They are four in number, two per area (figure 8). To measure the size and orientation of the components of the natural field two methods of unloading are applied. To measure the depth of the rock mass an universal tensor equipment was used, produced in the Siberian ward of Russian Academy of Sciences. It allows determination of the tensor of stress according to Leeman's scheme see figure 1. Linear deformations are measured with deformometer installed in pilot borehole with small diameter after unloading through overcoring technique the element whose elastic recovery deformations are measured has the shape of a cylinder, as shown in Figure 11. On the same figure, the Leeman's deformometer is shown.



Слика 11, Метода још једној распаређења Лиманова шема  
Figure 11, Method of the full unloading Leeman's scheme

Друга примењена метода је метода за мерење напона у боковима истражног ходника, као што је претходно описано, применом поступка ундеркоринг. Обе методе се примењују независно на свакој локацији. Свим испитивањима је вршено мерење тектонског напонског стања. Преглед резултата, који указује да се подаци добијени помоћу обе методе мерења добро слажу, је такође приказан на слици 8.

Природно поље напона је формирало међусобним утицајем гравитационог и тектонског напонског стања, а његова расподела  $\sigma_1:\sigma_2:\sigma_3$  је променљива у односима  $(1,4 \div 2,3):(1,6 \div 2,8):1$  и у свим мерењима вертикална компонента одступа од гравитационе компоненте под углом од  $35^\circ \div 70^\circ$  за појединачна мерна места. Резултати су коришћени за моделирање ССЦ како би се помогло инжењерском пројектовању система подграђивања коморе и утврђивање димензија појединих елемената подграде.

### Мерење напонског стања у стенској маси ПК Елаците

Површински коп Елаците је један од највећих површинских копова бакарне руде, капацитета од преко 12 милиона тона. Као последица дугорочне експлоатације, рударски радови су у потпуности зависни од "ефикасности" постојеће транспортне шеме на површинском копу. Развојним програмом рудника предвиђено је

The second method applied is the stress measurement method on the walls of the exploratory gallery, as described above, undercoring variant. Both methods are applied independently in each location. All experiments establish tectonic stresses. The summary of the results (with good agreement with both measuring methods) is also shown in Figure 8.

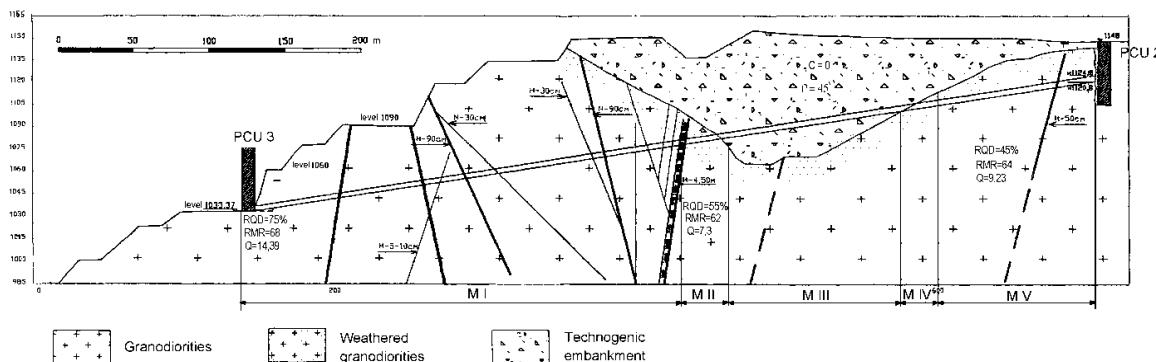
The natural field is formed by the interdependence between gravitational and tectonic impacts, its distribution  $\sigma_1:\sigma_2:\sigma_3$  is changed in ratios  $(1,4:2,3):(1,6:2,8):1$  in all measurements the vertical component is deviated from the ground one at an angle  $35^\circ \div 70^\circ$  for individual measuring places. The results are submitted for SSC modeling to help the engineering project to determine the type of lining system of the cavern and determining the size of its elements.

### Measurement of the stresses in the rock mass in the open-cast mine Elatzite

The open-cast mine Elatzite is one of the largest open-cast mine for copper ore, with a capacity of over 1.2 million tons. As a result of long-term exploitation the mining works are in depth the „efficiency“ of the existing mine's transport scheme. Its development program has been designed to project an incline tunnel for transporting the ore by

да се изради транспортни нископ за транспорт руде транспортером са траком. Транспортни нископ се налази у североисточном делу, изван контура лежишта. Нископ је прав, дужине 560 метара и попречног пресека у облику потковише и површине 106 m<sup>2</sup>. Оријентација осе тунела је у правцу севера ( $\nu = 357^\circ$ ) и падом од  $9^\circ$  у правцу југ-север. На слици 12 је приказан геолошки профил са трасом тунела.

belt conveyance. The transport tunnel is located in NE part, outside the contours of the ore body. The tunnel is straight, has a length of 560 meters and cross section 106 m<sup>2</sup>, and its shape is horseshoe. The axis orientation of the tunnel is north ( $357^\circ$ ) and is inclined in the direction SN  $9^\circ$ . Figure 12 shows a geological section and the track of the tunnel.



Слика 12, Геолошки профил у зони пројектованог нископа  
 Figure 12, A geological section of the project area.

Стенску масу на траси нископа чине исти литолошки типови стена - амфиболитски и амфиболитско-биотитни гранодиорити. Према степену секундарних промена и присуности пукотина по дужини, стенска маса је подељена на пет зона од MI до MV, а које су означене на слици. Зону M III представља текtonски поремећени стенски масив формиран од комада гранодиорита и корнита. Масив је издељен системима пукотина са великим углом залегања и њихов број и учсталост се повећавају, од два на почетку до пет на крају тунела. За потребе овог истраживања избушене су истражне бушотине, из којих је издвојена репрезентативна количина узорака свих врста стена за детаљна лабораторијска испитивања и структурну карактеризацију сваке од наведених зона стенске масе [26].

За потребе ин ситу проучавања стања стенске масе утређене су два мерна инструменти, који су постављени у правцу осе нископа и паралелно челу нископа. Због чињенице да се нископ налази на малој дубини, мерна места се налазе у зони стенског масива MI, где се очекује да ће се јавити највеће вредности напона. Мерења су извршена методом overcoringa, с већим мерним тракама у циљу повећања тачности и поузданости сваког појединачног мерења. На слици 13 је приказан основни екстензометар, а поређењем

The rock mass within the tunnel is one and the same a lithological rock type - varieties - amphibole and amphibolebiotite granodiorites. By degree of secondary changes and cracking in length, the rock mass is divided into five sections indicated in the figure from M I to M V. M III is a technogenic embankment of packed rock pieces granodiorites and hornfels. The massif is cracked by bundles of highly inclined and with increasing number and density (two at the beginning, five at the end of the tunnel) crack systems. For the purpose of the study exploratory drillings were developed, from which a representative volume of samples was obtained of all varieties of rocks for detailed laboratory structurally characterizing each of said areas [26].

To study the state of the rock mass in situ two measuring stations are developed, two measuring stations, oriented along the axis and the face line of the tunnel. Because of its shallow bedding, the measuring sites are located in the MI area, where maximum stresses are expected. Measurements were performed using the overcoring method, with increased measurement bases to increase the toxicity and reliability of the individual measurement. Figure 13 shows the very basic extensometer, and the comparison between Figures

слика 13 и 7 могу се уочити разлике између две технике растерећења undercoring и overcoring.

Мерењима је утврђено да поље напона има неуједначене компоненте при чему највише утицаја имају компоненте тектонског напона. Однос напона је 3: 2: 1. Максимални напон је интезитета  $\sigma_1 = 5$  MPa, док је  $\sigma_2$ , такође, хоризонтално оријентисан ( $260^\circ$ ), а минимални главни напон је вертикални са интезитетом  $\sigma_3 = 1.44$  MPa.

13 and 7 illustrates the differences between the two unloading techniques undercoring/overcoring.

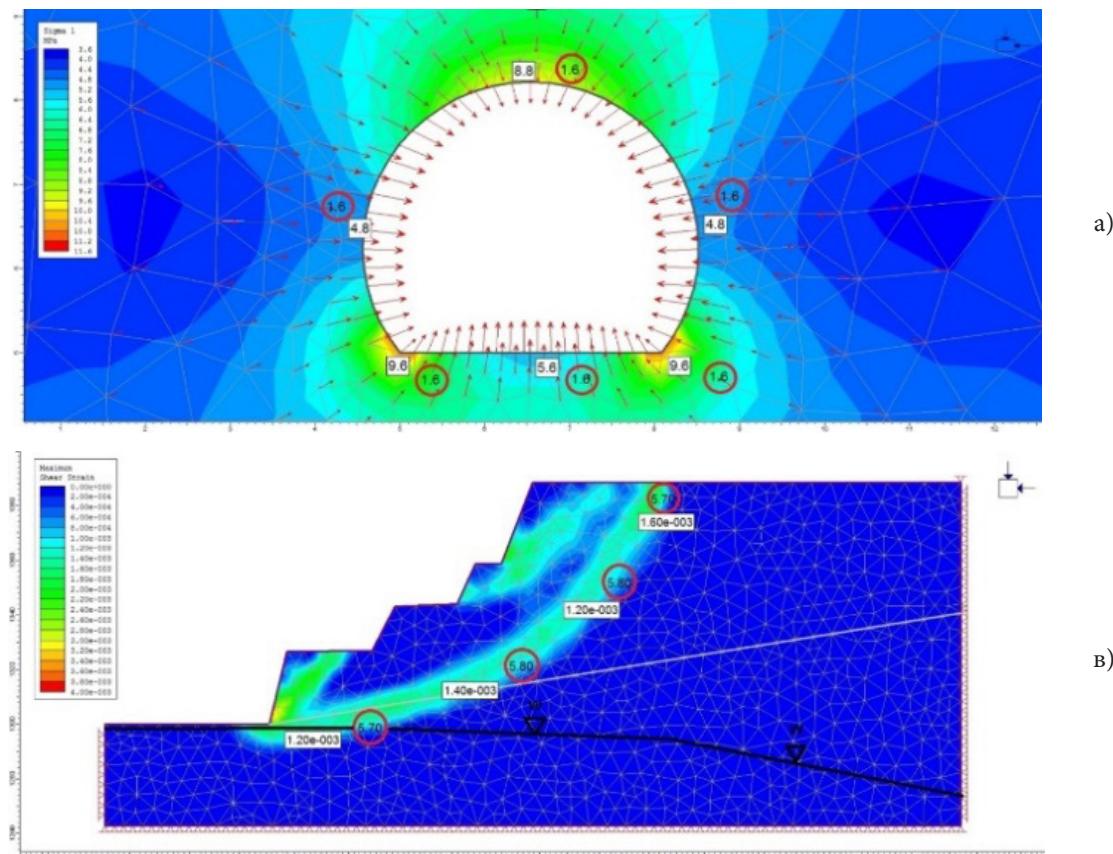
Measurements establish an non-uniform component field with domination of tectonic components. Stress distribution is 3: 2: 1. The maximum stress is 5 MPa,  $\sigma_2$  is also horizontally ( $260^\circ$ ) directed, and the minimum main voltage is the vertical  $\sigma_3 = 1.44$  MPa.



Слика 13, Мерење деформација еластичним растерећењем на мерној локацији/месту  
Figure 13, Mesurement of the deformations of elastic recovery on the experimental site/landing

Потпuna и сложена геомеханичка карактеризација стенске масе која је извршена на основу спроведених мерења, геолошких података и параметара отпора трења су коришћени за конструкцију геомеханичког модела система стенске масе у непосредном окружењу / транспортни нископ (HM/TT) и избор методе за нумеричко моделирање. Параметрске нумеричке анализе су извршене програмским пакетом Phase<sup>2</sup> i SLIDE (W). Одабрани програмски пакети, поред добрих карактеристика подржавају могућност IMPORT/EXPORT за директну размену података, чиме се повећавају могућности анализе. На слици 14 приказани су резултати анализе стабилности нископа и косине портала.

The achieved complete and complex geomechanical characterization of the rock mass the geological data and the geometry of friction have been used to construct a geo-mechanical model of the system host mass / transport tunnel and a HM / TT and the choice of numerical modeling methods. Parametric numerical studies have been carried out with the softwares Phase<sup>2</sup> and SLIDE (W). The selected software in addition to their good characteristics are compatible with the included option IMPORT/EXPORT for direct exchange of the data array, thus increasing the possibilities of the analysis. Figure 14 shows two solutions for the stability of the tunnel and the slope of the portal.



Слика 14, Анализа стабилности а - нископа б – косине портала  
 Figure 14, Analysis of the stability a- on the tunnel b - the slope of the portal

Спроведена сложена геомеханичка истраживања у погледу врсте и обима у потпуности одговарају захтевима и препорукама Светске организација за механику стена ISRM и изградњу тунела ИТА АИТЕС, и исте су коришћене приликом израде и реализације пројекта. Као резултат оптимизације транспортног система на површинском копу "Elatzite" до сада је транспортовано преко 75 милиона тона руде, више од 2,3 милиона тона/км, и на тај начин је извршена уштеда од преко 14 милиона тона горива и преко 50.000 мотор сати рада мотора дамперима у руднику. Смањена је емисије штетних гасова у локалном екосистему за преко 240 хиљада тона.

#### Теренска мерење напона у телу бране

Извршена су ин ситу мерења напона. Мерења су изведена у телу бетонске хидроелектране Саяно-Сушенска. Мерења су извели стручњаци из Лабораторије за истраживање и процену стања стенске масе Института за рударство Сибирског одељења Руске академије наука. Мерење на слободним површинама на брани и на зидовима комора у подножју бране примењена је прет-

The complex geomechanical studies carried out fully correspond to the type and volume of the requirements of the world organizations of rock mechanics ISRM and tunnel construction ITA AITES, and were used in the development and implementation of the project. As a result of the optimization of the transport system of open mine Elatzite up to now over 75 million tons of ore have been transported, more than 2.3 million tons/km and over 14 million tons of fuel have been saved and over 50,000 / hour engine work on mining dumpers. The not emitting harmful emissions in the local ecosystem are over 240 thousands of tons.

#### In situ measurement of stresses of the dam wall

Test measurements of the stresses were performed. The measurements were made on the concrete wall of the Hydro Power Plant Sayano-Sushenska. They were carried out by experts from Laboratory of diagnosis and state of the rock mass at the Mining Institute in the Siberian ward of Russian Academy of Sciences. For the measurements of the exposed surfaces on the dam wall and walls of galleries at

ходно описана метода ундерцоринг. Мерења су извршена помоћу розета мерних трака са већим растојањима између мерних тачака на крајевима розете и већим пречником бушотине [19]. Након упоредне анализе и оцене резултата добијених применом различитих метода, овде описана метода је препоручена за ин ситу мерења оптерећења у елементима наведене хидро-опреме.

## ЗАКЉУЧАК

Нема сумње да је квалитативно, адекватно и успешно решавање било каквог проблему у геомеханичком пројектовању незамисливо без поуздане и сигурне квантитативне карактеризације механичких својстава и напонског стања стенске масе. У прилог томе иду и овде приказана истраживања, почевши од откопавања рудних резерви које су биле "заробљене" у малим рудницима, преко тунела на аутопутевима од националног значаја и подземних електрана, па све до значајних економских, еколошких и социјалних ефеката у најмодернијем површинском копу у земљи. У овом и другим објављеним радовима на ову тему, аутор сматра да је сваки проблем пре него што је постао техногенолошки, економски, еколошки или било који други, уствари у почетку био геомеханички проблем. Разочарајућа је чињеница, осим неколико изузетака који су овде описани, да се у пракси, можда због недовољне информисаности и/или слабог разумевања економске исплативости, геомеханичка истраживања не изводе у потребном квалитету и обиму, па се чак и у неким случајевима потпуно и занемарују. У исто време, лабораторијска, теренска и аналитичка геомеханичке истраживања, која се примењена у складу са најбољим искуствима и пракси и претходе појединим пројектима, омогућавају доношење квалитетних и логичких одлука. Штавише, у техничкој документацији за појединачне објекте која је урађена од стране светски признатих предузећа наведене су све неопходне процедуре за поједине поступке и методе, као и потребан обим геомеханичких истраживања, које су прихватаћене као стандард и изводе се у свакодневној пракси. Ово је правац који би сви требали да пратимо.

the base, and the described variant is applied by unloading the undercoring technique. A measuring rosette with increased distances between the points and the diameter of the borehole was used [19]. After comparative analysis and evaluation of results between different methods, the method described here is recommended for in situ measurements of the loaded elements of the mentioned hydro-equipment.

## CONCLUSION

The author has no doubt that the path to a qualitative, adequate and successful decision to any geoengineering problem without a reliable and secure quantitative characterization of the mechanical properties and the strained state of the rock mass is unthinkable. The presented here studies, starting with the mining extraction of the "abandoned" reserves in the small mines, proceeding through the national highway tunnel sites and underground power station and ending with the significant economic, environmental and social effects in the most modern open mine in the country prove it. In this and other publications on the subject is set the author's position, that any problem that has arisen before it becomes technogenic, economic, ecological or any other problem is with geomechanical genesis. It is disappointing with a few exceptions as described, that in practice, perhaps due to uninformed and / or poorly understood economy geomechanical studies are not performed in the required type and volume, even in some cases are neglected. At the same time, laboratory, field and analytical geomechanical studies in the best practices precede and logise the decisions of the particular project. Moreover, in the documents of structures of the world-wide organizations there are intended procedures for the type, methods and volumes required geomechanical requirements, which are accepted and performed as a standard in practice. This is the trend we shall follow.

## ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Трубецкой К.Н. и др „Горный науки усвоение и сохранение надр земли МАГН, 1997.
2. Иванов В., „Геомеханична логистика на подземния добив на полезни изкопаеми, Научна конференция по подземен добив, Девин, 2008.
3. Нии Т R.E. Geotechnical Engineering Investigation, Handbook, 2005.
4. The complete ISAM suggested methods for Rock Characterisation. Testing and Monitoring: 1974-2006, IRSM TNG, Ankara, 2007.
5. Numerical Methods in Rock Mechanics – review, Int.J of RM,4, 2002.
6. Board Metal “Use of Numerical Modeling for Safe and cost-effective Mine Design. Stability assessment and Support Dimensioning, R.M., 12, 2005.
7. Турганинов ИА „Основи механики горънти пород“, Недра, 1989.
8. Fairhurst C. “Stress estimation in rocks: a brief history and review”, Int.J of RM, 40, 2003.
9. Logistics for increasing the efficiency for Gypsum production at the Koshava deposit, ПОДЕКС, 2008.
10. В.Иванов и др „Геомеханична оценка на рудник „Кошава“, Алхив НИС, МГУ, 199.
11. В.Иванов „Изследване на опасността от скални удари при разработване на Маданското рудно поле“, МГУ, 09, Сб.доклади, С, 2009.
12. В.Иванов „Геомеханична оценка на рудник „Дамов дол“, Маданско рудно поле, Сб.доклади, св II, С, 2007.
13. В.Иванов „Дискуването на сондажната ядка – индикатор за пренатегнатост и индуцирана сейзмичност на вместващия масив“ II НТК, Сб.доклади, Девин 2010.
14. Белов „Методические рекомендации по изучению горных пород МР 41, ВНИИГ, М.1987.
15. Blith F.G.H “A geology for engineers” 7<sup>th</sup> edition, 1988.
16. Wang J.A “Comprehensive prediction of rock burst based on analysis of strain energy in rocks”, TUST, 2001.
17. Lee S.M. et al “Analysis of rock bursts that have occurred in a waterway tunnel in Korea”, SINOROCK, 2004.
18. Hoek E. Rock Engineering, AA Balkema, 2005.
19. Szwedzci T. “Precursors to Rock Mass Failure in Underground Mines” Arh mine Sci, vol 53, 2008.
20. Иванов В. „Развитие на метода на разтоварване за in situ геомеханични изследвания“, Int Conf, 2010.
21. Ivanov V. et al “Deformation Measurement with the Method of Partial stress relief and Geomechanical Proceeding of the results”, FMGM, Zurich, 1983.
22. Иванов В, С.Н.Попов „Планированние експеримента при измерении напрежений методом частичной разгрузки“, Сб.труди, ИГДСО АНССР, Новосибирск, 85.
23. Иванов В, „Екстензометър за много-компонентно измерване“, Патент НРБ №38443/1984.
24. Ivanov V. et al „Multibasis Extensometer for Measurement of Displacements at PSRM of Rock structure”, VI congress of ISM, Harrogate, UK 1985.
25. Ivanov V. et al “Evaluation of the stress state of cast-in-place underground structures by FEM analysis and in situ measurements. Field Measurement in Geomechanics”, Proc.S.Sakurai, Kobe university, Japan ALKEMA, 1988.
26. Herget G., “Stresses in Rock”, BALKEEMA, Brookfield, 1988.
27. Иванов В, В.Вутов „Геомеханична характеризация на скалите и вместващия масив в района на транспортния тунел на рудник Елаците“, сп.Минно дело и геология, 7-8, 2014.
28. Опарин В.Н., „Заключение о результатах испытаний геомеханических методов определения напряжений в бетоне плотинъ Саяно-Шушенской ГЭС, Новосибирск, 2010.

## НАСТАНАК И ТЕКТОНСКА СВОЈСТВА ДУРМИТОРСКОГ ФЛИШНОГ КОМПЛЕКСА И ЊИХОВ УТИЦАЈ НА СТАБИЛНОСТ КОСИНА

## FORMATION AND TECTONIC PROPERTIES OF THE DURMITOR FLYSCH COMPLEX AND THEIR IMPACT ON SLOPE STABILITY

DOI: 10.25075/BM.2018.03

Александар Голијанин

Aleksandar Golijanin

Агенција за надзор над тржиштем БиХ  
acogoljanin88@gmail.com

Market Surveillance Agency of BiH  
acogoljanin88@gmail.com

**Сажетак:** Дурмиторски флиши комплекс представља моћну геолошку формацију формирану у периоду сенонског ката горње креде ( $K_2^3$ ). Ова литолошка формација има тзв. Динарски правец пружања, СЗ-ЈИ, и почиње од северноалбанске табле и простире се у континуитету до крајњих дијелова северозападне Босне. Седименти дурмиторског флиша су још од најранијих испитивања подијељени у две фације: карбонатну ( ${}^1K_23$ ,  ${}^2K_2^3$ ,  ${}^3K_2^3$  и  ${}^5K_2^3$ ) и пјесковиту или силициокластичну ( ${}^4K_2^3$ ). Подручје листа Гацко ОГК СФРЈ подијељено је на три тектонске јединице и то: староцрногорску, кучку и дурмиторску тектонску јединицу.

**Кључне речи:** дурмиторски флиши, настанак флиша, тектонска својства, стабилност косина

**Summary:** The Durmitor flysch complex represents a powerful geological formation, formed in the period of the Upper Cretaceous Senonian Stage ( $K_2^3$ ). This lithological formation spreads in the so-called Dinaric direction (NW-SE). It starts in the North Albanian Plateau and spreads continuously to the far northwest of Bosnia. Since the earliest explorations, the Durmitor flysch sediments have been divided into two facies: carbonate ( ${}^1K_2^3$ ,  ${}^2K_2^3$ ,  ${}^3K_2^3$  and  ${}^5K_2^3$ ) and sandy or siliciclastic ( ${}^4K_2^3$ ). The area of the BGM SFRY, sheet Gacko is divided into three tectonic units: Old Montenegro, Kuči and Durmitor.

**Key words:** The Durmitor flysch, flysch formation, tectonic properties, slope stability

### УВОД

Појам “дурмиторски флиш“ први је, у нашу геолошку литературу, увео Зарија Бешић 1948. год. Под овим појмом Бешић подразумијева моћну геолошку формацију формирану у току сенонског ката горње креде ( $K_2^3$ ), по неким ауторима (на прелазу горње креде у палеоген), и која на југоистоку почиње од северноалбанске табле и Цукали зоне у Албанији, затим се простире преко средишњег дијела Црне Горе, сјевероисточне Херцеговине, преко средње Босне па све до ње-

### INTRODUCTION

The term “Durmitor flysch” was first introduced into local geological literature in 1948 by Zarija Bešić. Bešić uses this term to refer to a powerful geological formation, formed during the Upper Cretaceous Senonian Stage ( $K_2^3$ ) (according to some authors formed at the turn of the Upper Cretaceous to Palaeogene), which starts in the south-east with the North Albanian Plateau and the Cukali zone in Albania, spreads across the central part of Montenegro and the north-east Herzegovina, then across

ног сјеверозападног дијела. То је генерално динаридски правац басена С3- ЈИ. Име је добила према планини Дурмитор, чије су С3 падине изграђене од ових стена.

О генези флишних седимената, постоји низ саопштења, научних и стручних радова, и нека питања су рјешена на задовољавајући начин, док су нека питања остала отворена. Основни разлози су релативно мала насељеност, ретки путеви, али свакако, и чињеница да су истраживања у оквиру израде Основне геолошке карте (ОГК) 1 : 100 000, за листове: Шавник, Жабљак, Гацко и Невесиње, радиле различите екипе, различите организације и што није извршена синтетизација (усаглашавање) резултата.

У овом саопштењу се разматрају основна питања генезе и тектонских односа, прије свега у циљу њихове корелације са стабилношћу косина. Због расположивог простора, превасходно ће се разматрати флишни седименти са простора који захвата лист ОГК СФРЈ Гацко.

Прва истраживања овог простора датирају још од 1880. A. Bittner (1880). Потом је З. Бешић, дао веома значајан допринос проучавању ове флишне серије. Он је у периоду, од 1948. до 1959, проучавао тектонску структуру Црне Горе и Источне Херцеговине. Између осталог је констатовао да су на овом подручју као најзначајније тектонске појаве, заступљене навлаке. М. Мирковић и М. Калезић, заједно са својим истраживачким тимовима аутори ОГК СФРЈ лист К 34-26 Гацко, размјере 1:100 000. Према оцени аутора овог рада, они су синтезом резултате дотадашњих истраживања, дали најјаснију диференцијацију седимената Дурмиторског флишног комплекса. Свакако су значајна и схватања М. Димитријевића, са сарадницима, који је такође вршио синтезу резултата геолошких картирања на целом подручју седиментационог басена. Најновије анализе резултата старости седимената дурмиторског флиша одређене су на основу нанопланктона на 29 узорака, током 2015. узетих сјеверно од Гацка, показују поред горњокредне и на јурско-кредну (J,K), али и палеоценску (Pc) старост седимената (Јоловић Б., Ђорић С., 2016).

## НАСТАНАК ДУРМИТОРСКОГ ФЛИШНОГ КОМПЛЕКСА

Дурмиторски флишни комплекс, као што је већ наглашено, има динарски правац пружања: С3 – ЈИ. Почиње на југу од сјеверно албанске табле и тзв Цукали зоне и простире се средишњим

the central Bosnia all the way to the northwestern part of the country. Generally, this is the Dinaric direction of spreading (NW-SE). The formation was named after the Mount Durmitor, with its northwestern slopes composed of these rocks.

There are a series of reports, scientific and professional papers about the genesis of the flysch sediments and some issues have been resolved in a satisfactory manner, while other issues remain open. The main reasons for this are: relatively small population, sparse road network and certainly the fact that the research within the framework of creating the Basic geological map of SFRY (BGM) at a scale of 1:100 000 for the sheets: Šavnik, Žabljak, Gacko and Nevesinje was conducted by different teams and different organizations, and the synthesis (harmonization) of the results was not performed.

This paper examines the fundamental issues of genesis and tectonic relations, primarily in order to correlate them with the stability of slopes. Due to the available space, the paper will primarily examine the flysch sediments in the area covered by the BGM SFRY, sheet Gacko.

The first exploration of the area dates back to 1880. (Bittner, 1880). Later on, Bešić made a significant contribution to studying the flysch series. On several occasions from 1948 to 1959, Bešić researched the tectonic structure of Montenegro and Eastern Herzegovina. Among other conclusions, he ascertained that overthrusts are the most significant tectonic phenomena present in this area. Mirković and Kalezić, with members of their teams, created the BGM SFRY, sheet K 34-26 Gacko at a scale of 1:100 000. For the purpose of realization of this project, they synthesized the results of all the previous researches and, by the subjective opinion of the author of this paper, made the clearest differentiation of the Durmitor flysch complex sediments. The views of Dimitrijević and his associates are also important, since they also carried out the synthesis of the results of geological mapping in the entire area of the sedimentation basin. The results of the latest analysis of the age of the Durmitor flysch sediments have been determined on the basis of nannoplankton in 29 samples taken during 2015 in the area north of Gacko. Besides the Upper Cretaceous, the samples contained the sediments of the Jurassic-Cretaceous (J, K) as well as the Palaeocene (Pc) age (Jolović & Čorić, 2016).

## FORMATION OF THE DURMITOR FLYSCH COMPLEX

As previously stated, the Durmitor flysch complex spreads in the so-called Dinaric direction: NW-SE. It starts in the south with the North Albanian Plateau and the so-called Cukali zone and spreads across the

дијелом Црне Горе, даље преко сјевероисточне Херцеговине и средње Босне завршава се у врло уском појасу на крајњем сјеверозападу Босне. Ова формација има различиту ширину у цјелокупном свом рас прострањењу, али никадје не губи континuitет свог пружања. Тад просторни положај је ус洛вљен обликом дубоког горњокретаџеског рова у коме се флиш стварао. (З. Бешић, 1983). Највећу ширину ова формација има на подручју Чемерна у Источној Херцеговини, од око 15km, док најужи дио налази се на територији Црне Горе, у подручју Пивске планине (Тодоров до – Крстац), где је и мања од једног километра.

Дурмиторски флиш се састоји из моћног низа слојева, који се у основи ритмички смјењују. Највећа дебљина је у подручју листа ОГК - Гацко где је дебљина и преко 800m. Прецизнију дебљину формације тешко је утврдити, због убранисти која је посљедица изузетне постгенетске тектонске активности, услед које се констатује понављања слојева дуж вертикалне линије.

Негде у мастрихту у Сарајевској сигмоиди (М. Димитријевић), наступа кратак, али буран период тектонских покрета. Већина аутора назива ове покрете епирогеним, подаци показују да је у то вријеме спрано и преталожено више од 1000 метара наслага, тако да су се на површини терена појавили чак и тријаски седименти. Прије нове трансгресије творевине су и убрање, што се најбоље запажа на сјевероисточним падинама Јаворових врхова, источно од Гатачког поља (М. Димитријевић, 1995).

Настанак Дурмиторског флишног комплекса везује се за тзв. Аустријску орогену фазу.

Слојеви ове флишне серије смјештени су у једно изразитој депресији (тектонском рову), издуженој, а релативно узаној, која није настала дуж расједа, него је посљедица хоризонталних крећања маса, дакле, она је посљедица пликативне тектонике. На подручју листа Гацко ОГК СФРЈ, југозападна граница овог флиша, према титон-валендијским кречњацима, веома је кривудава, као што је приказано на слици 1, и несумњиво означава обалу мора, у коме се депоновао дурмиторски флиш. Та обалска линија веома је развијена, а развијеност је посљедица дуге и интензивне ерозије обалске линије (абразије) мора у коме се стварао флиш. Линија која је на терену јасно уочљива рељефом и флишним базалним конгломератима, (преталожени горњојурски (титонски) кречњаци), (З. Бешић, 1983).

У току мастрихта, врло бурно, уз нагло тоњење басена и депоновање базалне блоковске фашије преко разуђеног рељефа, долази до таложења.

central part of Montenegro, continuously spreading across the north-east Herzegovina and central Bosnia to end in a very narrow belt in the far northwest of Bosnia. This formation has a different width in its overall spreading, but it doesn't lose the continuity of spreading. Its spatial position is conditioned by the shape of a deep Upper Cretaceous graben in which the flysch was formed. (Bešić, 1983). The formation has a maximum width in the area of Čemerno in Eastern Herzegovina, where it is about 15 km wide, while the narrowest part is located on the territory of Montenegro, in the area of Mount Piva (Todorov Do - Krstac), where the width is less than 1 km.

The Durmitor flysch consists of a powerful series of layers, which rhythmically alternate in general. It reaches its maximum thickness of over 800 meters in the area covered by the BGM SFRY, sheet Gacko. It is difficult to determine the exact thickness of the formation due to folding, which is a consequence of extreme post-genetic tectonic activity. Due to this activity, the layers repeat along the vertical line.

At one time during the Maastrichtian, there was a short but turbulent period of tectonic movements in the Sarajevo Sigmoid (Dimitrijević, 1995). Most authors regarded these movements as epeirogenic and the data show that over 1000 meters of deposits were washed away and resedimented at that time, so even the Triassic sediments appeared on the surface of the terrain. Before the latter transgression, the formations were folded, which is best observed in the north-east slopes of the Mount Javor peaks, east of Gatačko Polje (Dimitrijević, 1995).

The formation of the Durmitor flysch complex is related to the so-called Austrian orogenic phase.

Layers of the flysch series are located in a distinct cavity (graben), which is long and relatively narrow. It did not form along the fault, but as a result of the horizontal mass movement. Therefore, the cavity is a consequence of plicative tectonics. In the area covered by the BGM SFRY, sheet Gacko, the southwestern border of the flysch towards the Tithonian–Valanginian limestones is very curved, shown on figure 1, and it undeniably marks the coastline of the sea in which the Durmitor flysch was deposited. The coastline is well developed and its development is a consequence of a long-lasting and strong erosion of the coastline (abrasion) of the sea in which the flysch was formed. The coastline is clearly visible in the terrain with its relief and basal flysch conglomerates - resedimented Upper Jurassic (Tithonian) limestones (Bešić, 1983).

During the Maastrichtian, a very turbulent sedimentation occurred due to sudden sinking of the basin and deposition of the basal block facies over

Да је ерозија нападала и разараја кречњаке за вријеме стварања флиша, који су били негде дуж обале, очити су докази многи остаци рудиста у слојевима флиша, који су често у саставу добро цементованих бреча, али се налазе и у глиновито-пјесковитим слојевима.

Према положају седимента, можемо закључути да су ове акумулације настале услед приноса материјала плаховитим рјечицама или потоцима чији су токови (бујични токови), били кратки. Спирани материјал, обзиром на кратак транспорт, није уобљен већ је таложен у виду дробине, односно дијагенезом су настале брече. Сасвим је јасно да су ти водотоци долазили са копна које је лежало југозападно од овог флишног морског басена, а то је данашњи простор кречњачко доломитског широког појаса планина. Такође треба нагласити да се овај тектонски ров - седиментациони басен, био смјештен у титонским кречњацима горње јуре ( $J_3$ ), на сјевероисточном ободу сенонских кречњака и доломита.

Седименте флишног комплекса, још од раних испитивања З. Бешић је подијелио у двије фације: карбонатне и пјесковите (силициклистичне).

Карбонатни флиш је предоминантан на  $J_3$  ободу басена и састоји се претежно од карбонатних турбидита. Силициклистична (пјесковита) фација гради претежно сјевероисточно подручје (лист Тацко ОГК СФРЈ). Секвенце су веома разнолике. Грауваке и алевролити су главни литетопови, скоро свугдје са присутним карбонатима, док су микроконгломерати и пјесковити лапорци подређени.

Каснијим истраживањима, а највише приликом израде ОГК СФРЈ, седименти дурмиторског флиша подијељени су у пет суперпозиционих пакета, конкорданто поређаних један преко другог, где првој карбонатној серији припадају прва три пакета ( $^1K_2^3$ ,  $^2K_2^3$ ,  $^3K^{23}$ ) док пјесковитој или силициклистичној фацији припада четврти ( $^4K_2^3$ ), док пети суперпозициони пакет припада такође карбонатној серији ( $^5K_2^3$ ). Има схаватања да су ови пакети послиједица седиментационих услова (М. Димитријевић 1995).

Палеотранспорт је у ове двије фације савим различит. У кречњачкој фацији палеотранспорт се одвијао углавном у правцу ка сјеверозападу док је у силициклистичној одвијао углавном према југоистоку.

the dissected relief. Obvious evidence of the erosion that hit and destroyed the limestones along the coastline during the formation of the flysch are numerous rudist remains in the flysch layers, which often compose cemented breccias, but can also be found in clayey-sandy layers.

By the position of the sediment, we can conclude with a fair degree of certainty that these accumulations formed due to deposition of materials by impetuous streams or creeks with short flows (torrential flows). Due to the short transport, the washed material is not rounded, but is deposited in the form of debris, i.e. diagenesis formed breccias. It is clear that these watercourses came from the land lying southwest of the flysch sea basin, which is presently an area with a wide limestone-dolomite mountain range. It should also be noted that this graben (sedimentation basin), was located in the Upper Jurassic Tithonian limestones ( $J_3$ ), on the northeastern ledge of the Senonian limestones and dolomites.

Since the earliest explorations, Bešić has divided the flysch complex sediments into two facies: carbonate and sandy (siliciclastic).

The carbonate flysch is predominant in the southwestern edge of the basin and mostly consists of carbonate turbidites. The siliciclastic (sandy) facies predominantly composes the northeastern region (the BGM SFRY, sheet Gacko). Sequences are very diverse. The main lithotypes are greywacke and siltstones with carbonates present almost everywhere, while microconglomerates and sandy marlstones are subordinate.

Through later researches and, most of all, during creation of the BGM of SFRY, the Durmitor flysch sediments were divided into five superposition packages, concordantly arranged one over the other, where the first carbonate series includes the first three packages ( $^1K_2^3$ ,  $^2K_2^3$ ,  $^3K^{23}$ ) while the sandy or siliciclastic facies covers the fourth package ( $^4K_2^3$ ) and the fifth superposition package also belongs to the carbonate series ( $^5K_2^3$ ). It has been suggested that these packages are the result of sedimentation conditions (Dimitrijević, 1995).

Palaeotransport is quite different in these two facies. In the limestone facies, palaeotransport was mainly directed towards the northwest, while it was mainly directed towards the southeast in the siliciclastic facies.

## ЛИТОСТРАТИГРАФСКИ САСТАВ ДУРМИТОРСКОГ ФЛИША И ТИПО- ВИ КОНСТРУКЦИЈА ТЕРЕНА

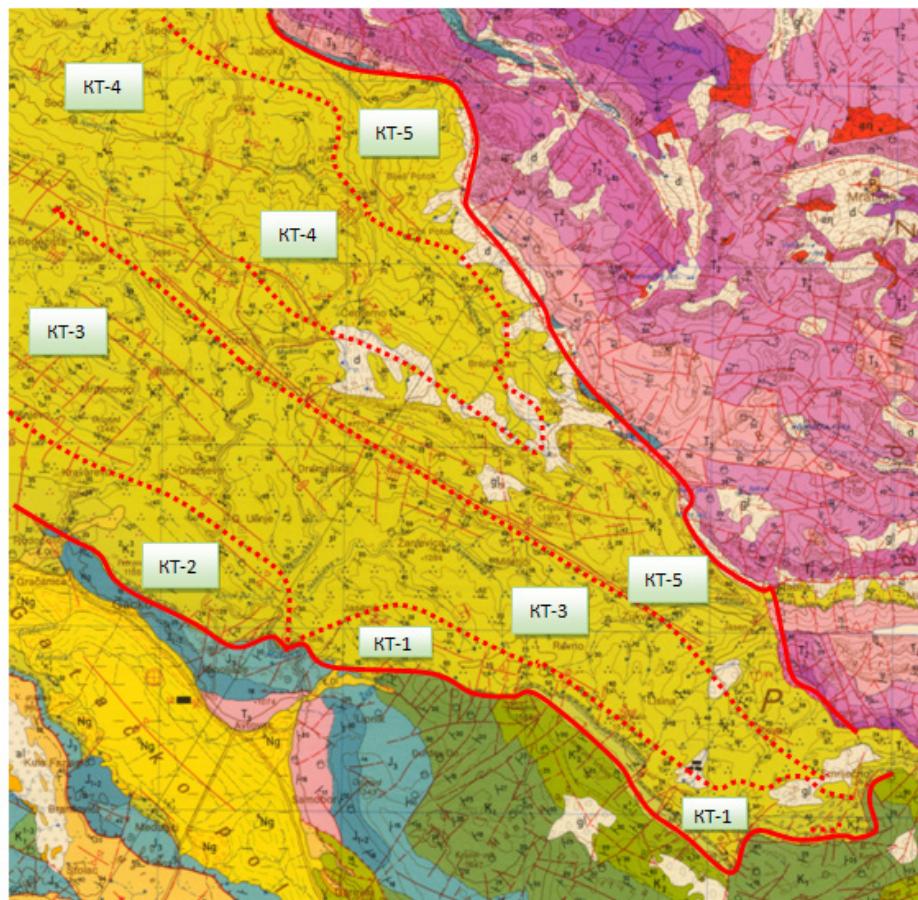
Флишна серија, као што је то већ наглашено, почела се стварати у току сенона, односно горњег мастихта. Ова формација има веома велику моћност (дебљина је и до 800m), а ширина је од мање од 1 km (граница између Црне Горе и Босне и Херцеговине), до око 15 km (Лист ОГК Гацко).

У дијеловима где је тектонска граница, што се види на слици 1, преко седимената дурмиторског флиша навучени су средњетријаски, горњотријаски или пак јурски седименти. Са аспекта овог рада најзначајнији је четврти суперпозициони пакет па ће му и бити посвећена највећа пажња.

## LITHOSTRATIGRAPHIC COMPOSITION OF THE DURMITOR FLYSCH AND TERRAIN CONSTRUCTION TYPES

As noted above, the formation of the flysch series started during the Senonian, i. e. the Upper Maastrichtian. This is a mighty formation. Its thickness varies up to 800 meters, while the width varies from slightly less than 1 kilometre (at the border between Montenegro and Bosnia and Herzegovina) up to 15 kilometres (BGM SFRY, sheet Gacko).

In the area of the tectonic boundary, shown on figure 1, the Middle Triassic, Upper Triassic or Jurassic sediments are thrust over the Durmitor flysch sediments. From the perspective of this paper, the fourth superposition package is the most important and it will be given the greatest attention.



Слика 1, Шематски приказ распоређења конструкција терена у подручју Гацког  
Figure 1, Schematic representation of the distribution of the terrain constructions in the area of Gacko

**Базалне кречњачке брече и конгломерати** ( ${}^1K_2$ <sup>3</sup>) представљају први суперпозициони пакет дурмиторског флиша и припадају карбонатној серији.

**Basal limestone breccias and conglomerates** ( ${}^1K_2$ <sup>3</sup>) represent the first superposition package of the Durmitor flysch and they belong to the carbonate series.

**Слојевите брче и кречњаци ( $^2\text{K}_2$ )** издвојени су као други суперпозициони пакет и изграђен је претежно од карбонатних седимената и припада карбонатној серији дурмиторског флиша.

**Брче, кречњаци и лапорци ( $^3\text{K}_2$ )** представљају трећи пакет седимената, који уједно заузимају и највеће рас прострањење у оквиру простора који изграђује дурмиторски флиш и припадају карбонатној серији.

**Пјесковито – лапоровита серија дурмиторског флиша ( $^4\text{K}_2$ )**, припада силициклистичној серији и развијена је у сјеверозападним дијеловима које заузима лист Гацко ОГК СФРЈ, у горњем току ријеке Сутјеске, између Волујака и Лебршника, у атарима села Чемерно, Трторија и Изгори. То су типични седименти флиша. Представљени су микроконгломератима, граувакама, алевролитима и лапорцима, затим нешто рјеђе се појављују кречњачке брче, пјесковити и лапоровити кречњаци.

**Брче, кречњаци и лапорци ( $^5\text{K}_2$ )**, припадају такође карбонатној серији, и представљају посљедњи, пети пакет дурмиторских флишних седимената.

## ТЕКТОНСКА СВОЈСТВА ДУРМИТОРСКОГ ФЛИШНОГ КОМПЛЕКСА

Са гледишта опште геотектонске подјеле подручје које изграђује дурмиторски флишни комплекс припада Динаридима, као посебној геотектонској јединици (М. Димитријевић, 1995). Флишни седименти на разматраном подручју (ОГК Гацко 1:100000), у оквиру ове геотектонске јединице припадају тзв Сарајевској сигмоиди. У овом подручју видљив утицај на облик и оријентацију Сарајевске сигмоиде, имала је которска трансферзала. На основу регионално-геолошких истраживања, проучавањем геолошког састава и структурних облика развијених на терену (ОГК Гацко), ово подручје је подјељено на три тектонске јединице, идући од југозапада ка сјевериоистоку и то: *Староцрногорска, Кучка и Дурмиторска тектонска јединица*. За овај рад посебан значај има Кучка тектонска јединица, јер су седименти дурмиторског флишиног комплекса управо смјештени у њој. Кучка тектонска јединица навучена, приказана на слици 2, је са сјевериоистока преко староцрногорске тектонске јединице, дуж доста марканте реверсне дислокације (1).

**Layered breccias and limestones ( $^2\text{K}_2$ )** are distinguished as the second superposition package, mainly composed of carbonate sediments. They belong to the carbonate series of the Durmitor flysch.

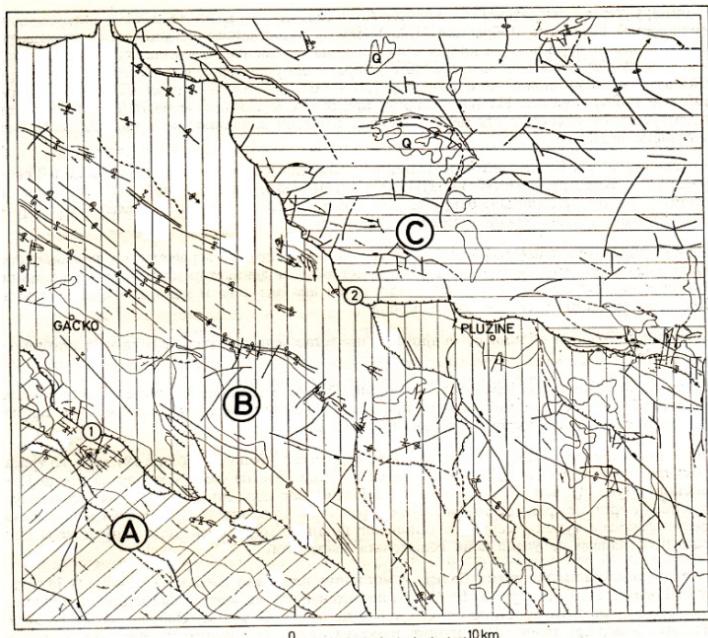
**Breccias, limestones and marlstones ( $^3\text{K}_2$ )** represent the third package of sediments. They take up most of the space within the area that constitutes the Durmitor flysch and belong to the carbonate series.

**Sandy-marly Durmitor flysch series ( $^4\text{K}_2$ )** belongs to the siliciclastic series. It formed in the northwest area covered by the BGM SFRY, sheet Gacko, in the upper stream of the Sutjeska River, between Volujak and Lebršnik, in the villages of Čemerno, Trtorija and Izgori. These are typical flysch sediments, composed of microconglomerates, greywacke, siltstones and marlstones, while limestone breccias and sandy or marly limestones rarely appear.

**Breccias, limestones and marlstones ( $^5\text{K}_2$ )** also belong to the carbonate series and they represent the last, fifth package of the Durmitor flysch sediments.

## TECTONIC PROPERTIES OF THE DURMITOR FLYSCH COMPLEX

From the perspective of the general geotectonic division, the area that constitutes the Durmitor flysch complex belongs to the Dinarides as a distinct geotectonic unit (Dimitrijević, 1995). The flysch sediments in the examined area (BGM SFRY, sheet Gacko, 1:100 000) within this geotectonic unit belong to the so-called Sarajevo Sigmoid. In this area, the Kotor transversal had a visible impact on the shape and orientation of the Sarajevo Sigmoid. Based on regional geological research, as a result of studying the geological composition and structural forms developed in the terrain (BGM SFRY, sheet Gacko), the area is divided into three tectonic units heading from the southwest to the northeast: *the Old Montenegro tectonic unit, the Kuči tectonic unit and the Durmitor tectonic unit*. The Kuči tectonic unit has an exceptional significance for this paper, since the sediments of the Durmitor flysch complex are located precisely in it. The Kuči tectonic unit was thrust, as shown on figure 2, from the northeast over the Old Montenegro tectonic unit, along the imposing reverse dislocation (1).



Слика 2, Тектонска скица истражног простора (М. Мирковић 1980)  
 Figure 2, Tectonic sketch map of the exploration area (Mirković, 1980)

**Тумач / Legend:** ознака тектонских јединица (т.ј.) / tectonic unit (t. u.) designations, А – староцрногорска / the Old Montenegro t. u., В – кучка / the Kuči t. u., С -дурмиторска тектонска јединица / the Durmitor t. u., 1 – чело навлаке кучке т.ј. навучене преко староцрногорске т.ј. / the overthrust front of the Kuči t. u. thrust over the Old Montenegro t. u., 2 – Чело навлаке дурмиторске т.ј. навучене преко кучке тектонске јединице / the overthrust front of the Durmitor t. u. thrust over the Kuči t. u.

Падни угао површине дуж које је извршено на- влачење, у сјеверозападном дијелу простирања ове реверсне дислокације је блажи него у југо- западном и износи од  $20^{\circ}$  до  $30^{\circ}$ . Терен Кучке тектонске јединице је тектонски веома сложен. Јасно се истичу подручја изграђена од карбонатних седимената и подручја изграђена од сенонских седимената дурмиторског флиша. У оквиру Кучке тектонске јединице, на подручју изграђеном од дурмиторског флиша издвојена су два битна мегаструктурна облика: *гатачки синклиниоријум* и *синклинала Тодоровог дола*. Гатачки синклиниоријум обухвата широк простор од Гацка и Автоваца на југозападу и Товарнице и Волујака на сјевероистоку. У југозападном дијелу преовладавају седименти карбонатне серије флиша, док силицикластични седименти (пјесковито-лапоровита серија) преовладавају у сјевериоисточном дијелу. Преко ових седимената навучени су седименти тријаса и јуре, Дурмиторске тектонске јединице. На подручју Вратара у долини ријеке Сутјеске, јасно је видљиво чело навлаке, односно контакт између средњетријаских масивних кречњака, и дурмиторског флишиног комплекса. Југозападно крило гатачког синклиниоријума изграђују седименти прва три суперпозициона пакета дурмиторског

Descent angle of the surface along which the thrust occurred ranges from  $20^{\circ}$  to  $30^{\circ}$  in the northwest- ern part of the reverse dislocation and it is milder than in the southwestern part. The Kuči tectonic unit terrain is tectonically rather complex. The areas composed of carbonate sediments and the areas composed of Senonian sediments of the Durmitor flysch stand out clearly. Within the Kuči tectonic unit, there are two distinguished mega- structures in the area composed of the Durmitor flysch: the Gacko Synclinorium and the Todorov Do Syncline. The Gacko Synclinorium cov- ers a wide area between Gacko and Avtovac in the southwest and Tovarnica and Volujak in the northeast. In the southwestern part, carbonate flysch series sediments prevail, while siliciclas- tic sediments (sandy-marly series) prevail in the northeastern part. The Triassic and Jurasic sedi- ments of the Durmitor tectonic unit are thrust over these sediments. In the area of Vratar in the Sutjeska river valley, the overthrust front i.e. the contact between massive Middle Triassic limestones and the Durmitor flysch complex is clearly visible. The southwestern wing of the Gacko Synclinorium is composed of sediments of the first three superposition packages of the Durmitor flysch (the carbonate series), while

флиша (карбонатна серија), док сјевероисточно крило изграђују седименти четвртог суперпозиционог пакета (силициокластична серија). У језгру леже седименти петог суперпозиционог пакета ( $^5K_2^3$ ).

Сјевероисточно крило Гатачког синклино-ријума изграђују седименти четвртог суперпозиционог пакета флишног комплекса ( $^4K_2^3$ ) представљени конгломератима граувакама, пјешчарима и лапорцима. У оквиру овог пакета развијени су многобројни наборни облици, где се распон крила код набора креће од 1m па до десетак метара. У језгру синклинојума су развијени седименти петог пакета флишног комплекса ( $^5K_2^3$ ). Преко седимената дурмиторског флишног комплекса који припадају тзв. Кучкој тектонској јединици, са сјевероисточне стране, навучени су тријаски и јурски кречњаци дурмиторске тектонске јединице, дуж трасе дурмиторске навлаке.

У југоисточном дијелу који захвата лист Гацко ОГК СФРЈ, седименти дурмиторског флиша граде синклиналу Тодоровог дола. Изграђују је седименти трећег пакета флишног комплекса. Синклинала Тодоровог дола спада у групу косих набора. Вергенца је југозападног смјера и креће се око  $18^\circ$ .

## СТАБИЛНОСТ КОСИНА У ДУРМИТОРСКОМ ФЛИШУ

Како што је већ наглашено, због расположивог простора разматраће се само седименти четвртог суперпозиционог пакета ( $^4K_2^3$ ). При томе за потребе разматрања услова израде, односно стабилизације косина, биће коришћена методологија дефинисања модела – конструкција терена коју су предложили Ј. Перић, Д. Божиновић и Ј. Шутић. Овај пакет слојева, у геотехничком погледу, је означем као КТ-4, сачињен је од: конгломерата, граувака, пјешчара и лапораца (геотехничких средина). На слици 3а приказана је фотографија падине, а на 3б шематски је приказан распоред средина у конструкцији терена, у време седиментације. Међутим због постгентских тектонских покрета, конструкције терена су издељене бројним наборним облицима, са распоном крила набора од 1m па до десетак метара. Због тога су, за потребе дефинисања стабилности косина, неопходна детаљна геотехничка истраживања, код којих се нарочита пажња посвећује картирању терена, односно поред састава средина, дужну пажњу треба обратити структурним елементима и нарочито њиховом просторном положају.

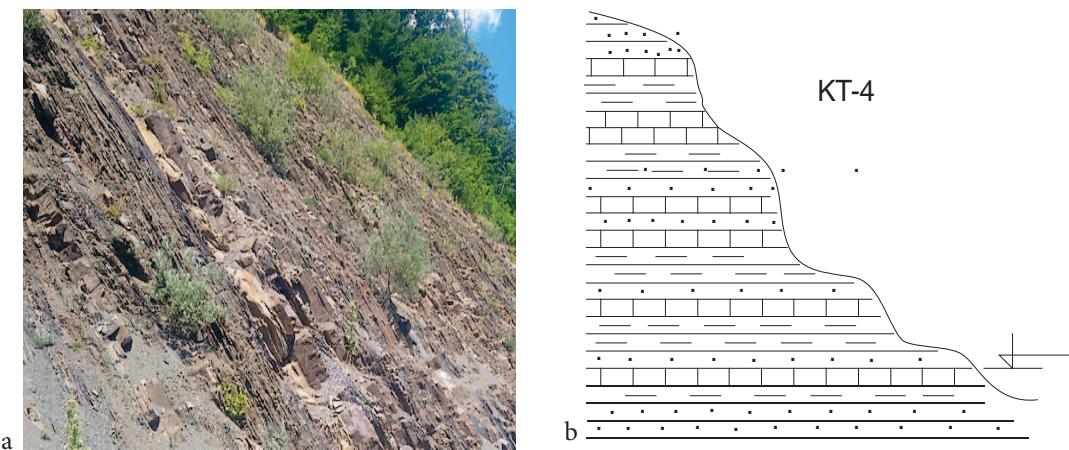
the northeastern wing is composed of sediments of the fourth superposition package (the siliciclastic series). Sediments of the fifth superposition package ( $^5K_2^3$ ) lie in the core.

The northeastern wing of the Gacko Synclinorium is composed of sediments of the fourth superposition package of the flysch complex ( $^4K_2^3$ ), comprised of conglomerates of greywacke, siltstones and marlstones. Numerous folds developed within this package, where the folds span ranges from 1 metre up to a dozen metres. In the Synclinorium core, sediments of the fifth superposition package ( $^5K_2^3$ ) of the Durmitor flysch developed. The Triassic and Jurrasic limestones of the Durmitor tectonic unit are thrust over the sediments of the Durmitor flysch complex belonging to the so-called Kuči tectonic unit from the northeastern side, along the Durmitor over-thrust line.

the eastern part covered by the BGM SFRY, sheet Gacko, sediments of the Durmitor flysch compose the Todorov Do Syncline. It is composed of sediments of the third superposition package of the flysch complex. The Todorov Do Syncline belongs to the group of inclined folds. The vergence direction is south-west and the vergence angle is around  $18^\circ$ .

## SLOPE STABILITY IN THE DURMITOR FLYSCH

As previously stated, due to the available space this paper will examine only the sediments of the fourth superposition package ( $^4K_2^3$ ). For the purpose of examination of the conditions for construction and stabilization of slopes, the methodology of defining the models - terrain constructions as proposed by Perić, Božinović and Šutić shall be used. In geotechnical terms, the package of layers designated as KT-4 is composed of: conglomerates, greywacke, siltstones and marlstones (geotechnical environments). Figure 3a shows the photograph of the slope, while figure 3b shows a schematic presentation of the environments layout in the terrain construction at the time of sedimentation. However, due to post-genetic tectonic movements, the terrain constructions are divided by numerous folds with a span ranging from 1 metre up to a dozen metres. Therefore, for the purpose of defining the slope stability, detailed geotechnical examinations are required, with particular attention given to the terrain mapping, i.e. besides the composition of the environments, due attention should be paid to the structural elements and particularly to their spatial position.



Слика3, / Figure 3

**Тумач / Legend:** а - Падина изграђена од стесних маса пјесковито-лапоровите серије ( ${}^4\text{K}_2$ <sup>3</sup>) – падина је у целини стабилна, што је последица просторног положаја средина, а активан је процес спирања / A slope composed of rock masses of the sandy-marly series ( ${}^4\text{K}_2$ <sup>3</sup>). The slope is generally stable, as a result of spatial position of the environments; the washing process is active, б - Схематски приказ конструкције терена КТ-4: ритмично смењивање пластичних, квазипластичних и кртих средина је значајно са становишта стабилности косина. Исто тако су значајни и геометријски елементи (висина и нагиб), као и просторни положај средина (условљен тектонским покретима) / A schematic presentation of the terrain construction KT-4: rhythmic alternation of plastic, quasiplastic and brittle environments is significant in terms of the slope stability. Geometric elements (height and inclination) are equally important, as well as spatial position of the environments (conditioned by tectonic movements).

Стабилност косина у теренима сачињеним од ове конструкције, пре свега зависи од геометријских карактеристика (висине и нагиба), просторног положаја средина које, због генетских и постгенетских утицаја битно утичу на карактеристике природног нагиба, дебљине делувијалног покривача и елувијалне зоне распадања, положаја структуре основне стијенске масе према косини, литолошког састава, хидролошких прилика, сеизмичке активности, утицаја техногених процеса итд. Када су у питању прва три пакета флишних седимената који припадају карбонатној фацији, може се констатовати да су косине углавном стабилне, те да није било значајнијих утицаја тектонских покрета на ове седименте и да они углавном егзистирају као хоризонтални, субхоризонтални или коси слојеви различитих карбонатних седимената у дебљим слојевима или банковима.

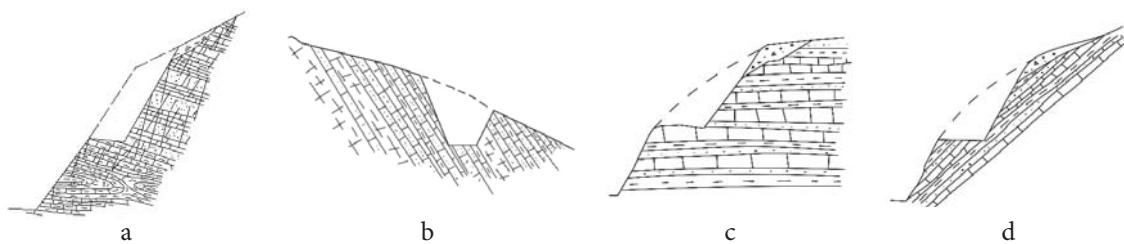
Главне појаве нестабилности се јављају у седиментима које гради четврти суперпозициони пакет, издвојен као КТ-4 модел конструкције терена, који је био током навлачења тријаских кречњака преко флишних седимената, изложен јаким тектонским процесима, и усљед њиховог дејства формирао се велики број набора различитог облика и димензија. Усљед ових процеса положај структуре основне стијенске масе је на кратким растојањима веома промјењлив у од-

The slope stability in terrains composed of this construction primarily depends on geometric characteristics (height and inclination), spatial position of the environments which, due to genetic and post-genetic impacts, significantly affect the characteristics of the natural inclination, thickness of the diluvial covering and the eluvial decomposition zone, the position of the basic rock mass structure in relation to the slope, lithological composition, hydrological conditions, seismic activity, the impact of technogenic processes, etc. As for the first three packages of the flysch sediments belonging to the carbonate facies, it can be concluded that slopes are generally stable; there was no significant impact of tectonic movements on these sediments and they mainly exist as horizontal, subhorizontal or inclined layers of diverse carbonate sediments in thicker layers or banks.

Major forms of instabilities occur in sediments composed of the fourth superposition package, designated as KT-4 model of the terrain construction, which was exposed to strong tectonic processes during the thrust of the Triassic limestones over the flysch sediments and, due to their impact, a large number of folds of different shapes and dimensions formed. Due to these processes, the position of the basic rock mass structure is highly variable at short distances in relation to the position of a slope itself, and thus significantly affects its stability. If the ba-

носу на положај саме косине, те на тај начин значајно утиче и на њену стабилност. У условима када структура основне стијенске масе пада низ падину, стабилност постојеће косине је значајно угрожена, на сликама 4б и 4г. Када структура пада ка унутрашњости можемо констатовати да је падина стабилна, приказано на слици 4а. Такође када је положај слојева хоризонталан, падина је стабилна, приказано на слици 4г.

sic rock mass structure descends down the slope, stability of the existing slope becomes significantly imperiled, shown on figure 4b and 4d. When the structure descends towards the interior, it can be concluded that the slope is stable, shown on figure 4a. Also, the slope is stable when the position of the layers is horizontal, shown on figure 4c.



Слика 4, Утицај начина појављивања и просторног положаја слојева на стабилност косина – а и с повољан, б и д) неповољан

Figure 4, Impact of the mode of occurrence and spatial position of the layers on the slope stability: a and c - favorable impact; b and d - adverse impact

## ЗАКЉУЧАК

Дурмиторски флишни комплекс има тзв. динарски правац пружања, односно ова формација у географском смислу има генерални правац пружања СЗ-ЈИ.

Ова литолошка формација има различиту ширину у цјелокупном свом распрострањењу, али никадје не губи континуитет свог пружања. Та његова ширина као и положај у простору, одговарају облику дубоког горњокретаџејског рова у коме се флиш стварао (З. Бешић, Геологија Црне Горе, геотектоника и палеогеографија, 1983).

Слојеви дурмиторског флишног комплекса смјештени су у једном изразитом удубљењу (тектонски ров), дугачком а релативно узаном, који није постао дуж расједа, него је последица хоризонталних кретања маса, дакле, удолина је последица пликативне тектонике.

Седименте флишног комплекса, још од раних испитивања З. Бешић је подијелио у двије фације: карбонатне и пјесковите (силициклиастичне).

Седименти дурмиторског флишног комплекса леже ерозионо-дискорданто преко разних литостратиграфских јединица, почев од горњег тријаса па закључно са доњим мастрихтом.

На основу регионално-геолошких истраживања, проучавањем геолошког састава и структурних облика развијених на терену које захвата лист Гацко ОГК СФРЈ, ово подручје је подељено на три тектонске јединице.

## CONCLUSION

The Durmitor flysch complex spreads in the so-called Dinaric direction, i.e. in terms of geography, general direction of spreading of the formation is NW-SE.

This lithological formation has a different width in its overall spreading, but it doesn't lose the continuity of spreading. Its width and its spatial position correspond to the shape of a deep Upper Cretaceous graben in which the flysch was formed. (Bešić, 1983: Geology of Montenegro, geotectonics and palaeogeography).

Layers of the Durmitor flysch complex are located in a distinct cavity (graben), which is long and relatively narrow. It did not form along the fault, but as a result of the horizontal mass movements. Therefore, the cavity is a consequence of plicative tectonics.

Since the earliest explorations, Bešić has divided the flysch complex sediments into two facies: carbonate and sandy (siliciclastic).

The Durmitor flysch complex sediments lie erosionally and discordantly over various lithostratigraphic units, starting from the Upper Triassic and concluding with the Lower Maastrichtian.

Based on regional geological research, as a result of studying the geological composition and structural forms developed in the terrain covered by the BGM SFRY, sheet Gacko, the area is divided into three tectonic units.

У условима када структура основне стијенске масе пада низ падину, стабилност падине је угрожена, док у условима када је пад основне стијенске масе супротан од пада падине и пада у брдо, стабилност падине није угрожена тј. падина је стабилна.

Када је положај основне стијенске масе примаран, односно када су слојеви хоризонтални, стабилност падине није угрожена.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бешић, З., Геотектонска структура сјеверне Црне Горе, Гласник природњачког музеја Српске земље, сер. А -1, Београд, 1948, стр. 9 -30.
2. Бешић, З., Геологија Црне Горе – стратиграфија и фацијални састав, Књига 1, Свеска 2, Титоград, 1980, стр. 148 – 160.
3. Бешић, З., Геологија Црне Горе – геотектоника и палеогеографија, Књига 3, Титоград, 1983, стр. 20 -25, 158 -168.
4. Димитријевић, М., Геологија Југославије, Геоинститут – Београд, Београд, 1995, стр. 36 -39.
5. Јевремовић, Д., Методе инжењерскогеолошких истраживања, Рударско – геолошки факултет Универзитета у Београду, Београд, 2015, стр. 164 – 192.
6. Jolović, B., Čorić, S., Toholj, N., Mitrović, D., The paleocene sediments in the Durmitor flysch (the Republic of Srpska, Bosnia and Herzegovina), Геолошки гласник 37, Зворник, 2016, стр. 1 -19.
7. Мирковић, М., Геолошки састав и тектоника планине Дурмитор, Пивске планине и Волујака, докторска дисертација, Титоград, 1983, стр. 69 -80.
8. Мирковић, М., Калезић, М., Пајовић, М., Вујисић, П., ОГК СФРЈ, лист Гацко, тумач, Савезни геолошки завод СФРЈ, Београд, 1980, стр. 33 -39, 46 -50.
9. Перећић, Ј., Божиновић, Д. Шутић, Ј., Конструкције терена као основа за проучавање стабилности терена, *Геолог и визионар*, Рударско – геолошки факултет Универзитета у Београду, Београд, 1995, стр. 478 – 491.
10. Сунарић, Д., Инжењерска геодинамика – теорија и пракса, Академија инжењерских наука Србије и Институт за водопривреду Јарослав Черни, Београд, 2017, стр. 164 -167, 211 -219.

If the basic rock mass structure descends down the slope, stability of the slope becomes imperilled, while in circumstances where descent of the basic rock mass is opposite to descent of the slope and descent into the hill, stability of the slope is not imperilled, i.e. the slope is stable.

When the position of the basic rock mass is primary, i.e. when the layers are horizontal, stability of the slope is not imperilled.

## REFERENCES

1. Bešić, Z., Geotectonic structure of Northern Montenegro. Belgrade: Bulletin of the Natural Science Museum of Serbian Land, Vol. A-1, 1948, pp. 9-3.
2. Bešić, Z., Geology of Montenegro - Stratigraphy and facial composition, Book 1, Vol. 2. Titograd, 1980, pp. 148-160.
3. Bešić, Z., Geology of Montenegro - Geotectonics and palaeogeography, Book 3. Titograd, 1983, pp. 20-25, 158-168
4. Dimitrijević, M., Geology of Yugoslavia. Belgrade: Geological Institute, 1995, pp. 36-39.
5. Jevremović, D., Methods of engineering geological research. Belgrade: University of Belgrade - Faculty of Mining and Geology, 2015, pp. 165-192.
6. Jolović, B., Čorić, S., Toholj, N. & Mitrović, D., The Paleocene sediments in the Durmitor flysch (Republic of Srpska, Bosnia and Herzegovina). Zvornik: Geological journal, Vol. 37, 2016, pp. 1-19.
7. Mirković, M., Geological composition and tectonics of the Mount Durmitor, Mount Piva and Mount Volujak, doctoral dissertation. Titograd, 1983, pp. 69-80.
8. Mirković, M., Kalezić, M., Pajović, M. & Vujisić, P., BGM SFRY, Explanatory booklet for the sheet Gacko, interpretation. Belgrade: Federal Geological Institute of SFRY, 1980, pp. 33-39, 46-50.
9. Perić, J., Božinović, D., Šutić, J., Terrain constructions as the basis for research on the terrain stability, Monograph "A geologist and a visionary". Belgrade: University of Belgrade - Faculty of Mining and Geology, Belgrade, 1995, pp. 478-491.
10. Sunarić, D., Engineering geodynamics, Theory and practice. Belgrade: Academy of Engineering Sciences of Serbia and the Water Management Institute "Jaroslav Černi", 2017, pp. 164-167, 211-219.

ПОРЕЂЕЊЕ КРИСТАЛОГРАФСКО-ХЕМИЈСКИХ КАРАКТЕРИСТИКА  
СФАЛЕРИТА ИЗ РУДНОГ ЛЕЖИШТА КИЖЕВАК СА НЕКИМ ДРУГИМ  
РУДНИМ ЛЕЖИШТИМА, ДЕО II: КОНСТРУИСАЊЕ ЧЕТВОРО-  
КОМПОНЕНТНОГ  $A_0$ -FES-P-T ДИЈАГРАМА (ОПЦИЈА I) И ОДРЕЂИВАЊЕ  
УСЛОВА ПОСТАНКА

COMPARISON OF THE CRYSTALLOGRAPHIC-CHEMICAL  
CHARACTERISTICS OF SPHALERITES FROM THE KIŽEVAK ORE  
DEPOSIT WITH SOME OTHER DEPOSITS, PART II: CONSTRUCTION OF  
THE FOUR-COMPONENT  $A_0$ -FES-P-T DIAGRAM (OPTION I)  
AND DETERMINATION OF THE FORMATION CONDITIONS

DOI: 10.25075/BM.2018.04

Павле Танчић

Pavle Tančić

Геолошки завод Србије  
pavletan@gmail.com

Geological Survey of Serbia  
pavletan@gmail.com

**Сажетак:** Исто као и у I делу ових проучавања (Танчић, 2018), кристалографско-хемијске карактеристике сфалерита из рудног лежишта Кижевак су коришћене за поређење са одговарајућим карактеристикама неких других рудних лежишта: Шупља Стијена-Брсково, Леце, Селанац, Трепча, Јањево, Пречица, Црвени Брег и Црнац. Ови подаци су коришћени за одређивање услова постанка и упоређивани су са резултатима добијеним помоћу других и различитих метода и минерала. Конструисана је I опција четворо-компонентног  $A_0$ -FeS-P-t дијаграма. За употребу оваквог дијаграма довољно је само израчунати димензију јединичне ћелије ( $a_0$ ) и одредити садржај FeS компоненте испитиваног сфалерита, а затим на основу тих вредности одредити температуру и притисак његовог постанка. Овај дијаграм би се могао привремено користити док се не сакупе прецизнији и комплетнији подаци који би унапредили његову функционалност и доказали или евентуално опровергли његову вредност. Међутим, прелиминарно добијени резултати температурних вредности у овом раду су позитивни и охрабрујући зато што велика већина узорака показује поклapanање са резултатима који су добијени помоћу других метода/минерала и много су бољи у односу на оне добијене помоћу Kullerud-ове (1953) криве. Добијени притисци за ниже температуре су највероватније нешто виши од реалних, што је такође добро познато из претходних литературних података, али су такође много бољи од оних добијених помоћу једначине и дијаграма који су приказали Lusk и Ford (1978). Очигледни су мање или више различити услови постанка за испитивање сфалерите из различитих рудних лежишта, као и за проучавања рудна лежишта такође, а који су у овом раду подељени у три групе: ниско, средње и високо температурни регион.

**Кључне речи:** Кижевак, сфалерити, кристалографско-хемијске карактеристике, геотермометрија, геобарометрија

**Summary:** Same as in the I part of these investigations (Tančić, 2018), crystallographic-chemical characteristics for sphalerites from the ore deposit Kiževak were used for the comparison with the corresponding characteristics of some other ore deposits: Šuplja Stijena-Brskovo, Lece, Selanac, Trepča, Janjevo, Prečica, Crveni Breg and Crnac. These data were used for the determination of the formation conditions and they were compared with the results

obtained by other and various methods and minerals. It was constructed I option of the four-component  $a_0$ -FeS-P-t diagram. For use of such diagram it is only enough to calculate the unit cell dimension ( $a_0$ ) and obtain the content of the FeS component of the studied sphalerite, and then at basis of that values to determine the temperature and pressure of its origin. This diagram could be temporary used until more precise and complete data will be collected to advance its functionality and to approve or eventually disapprove its validity. However, preliminary obtained results of the temperature values in this paper are positive and encouraging because the great majority of the samples show an agreement with the results which were obtained by other methods/minerals and they are much better than that obtained by Kullerud's (1953) curve. Obtained pressures for lower temperatures are most probably something higher than real, which is also well known from the previous literature, but also much better than that obtained by equation and diagram which were presented by Lusk and Ford (1978). There are obvious more or less different formation conditions for the studied sphalerites from the various ore deposits, and for the studied ore deposits, as well, which are in this paper separated into three groups: low, middle and high temperature region.

**Key words:** Kiževak, sphalerites, crystallographic-chemical characteristics, comparisons, geothermometry, geo-barometry

## УВОД

У I делу ових проучавања (Танчић, 2018), 27 узорака сфалерита са различитим димензијама јединичних ћелија и FeS садржајима је анализирано. Кристалографско-хемијске карактеристике сфалерита из рудног лежишта Кижевак (Танчић, 2004; Танчић и Судар, 2004 и 2005) су упоређиване са одговарајућим из неких других рудних лежишта: Шупља Стијена-Брсково (Јанковић и Јанковић-Милосављевић, 1955); Леце, Селанац, Трепча, Јањево, Пречица и Црвени Брег (Крстанић и Крстанић, 1962); и Црнац (Николић и др., 1978). Ови подаци су такође коришћени за прелиминарно разматрање у вези услова настанка и указују да би се различити проучавани сфалери-ти и рудна лежишта могли поделити у три групе: ниско, средње и високо температурни регион.

Надаље, сви добијени резултати су упоређивани са резултатима који су добијени другим и различитим методама и минералима. Услед запажених конфликтата и одступања, закључено је да се Kullerud-ова (1953) крива и једначина и дијаграм који су приказали Lusk и Ford (1978) могу сматрати углавном неприкладним и не-прихватљивим за одређивање генезе сфалерита. Kullerud-ова (1953) крива би могла бити делимично прихватљива за одређивање температуре само код природних узорака који су врло близу или пресецају линије 1 и/или 3 на Слици 2 (Танчић, 2018). Наиме, ове две методе се заснивају на одређивању P-t (P-притисак, t-температура) услова настанка сфалерита искључиво из садржаја присутне FeS компоненте.

Са друге стране, сфалерити из различитих рудних лежишта са сличним садржајима FeS компоненти се карактеришу различитим димензијама јединичних ћелија које би могле да, у

## INTRODUCTION

In the I part of these studies (Tančić, 2018), 27 sphalerite samples with various unit cell dimensions and FeS contents were analyzed. Crystallographic-chemical characteristics of sphalerites from the ore deposit Kiževak (Tančić, 2004; Tančić and Sudar, 2004 and 2005) were compared with the corresponding from some other ore deposits: Šuplja Stijena-Brskovo (Janković and Janković-Milosavljević, 1955); Lece, Selanac, Trepča, Janjevo, Prečica and Crveni Breg (Krstanović and Krstanović, 1962); and Crnac (Nikolić et al., 1978). These data were also used for the preliminary reconsideration about the formation conditions and indicate that various studied sphalerites and ore deposits could be separated into three groups: low, middle and high temperature region.

Furthermore, all of the obtained results were compared with the results which were obtained by other and various methods and minerals. Because of the observed conflicts and deviations, it was concluded that the Kullerud's (1953) curve and equation and diagram which were presented by Lusk and Ford (1978) could be consider as mostly inappropriate and unacceptable for determination of the sphalerite genesis. Kullerud's (1953) curve could be partially accepted for the temperature determination only for the natural specimens which are very near or intersect lines 1 and/or 3 at figure 2 (Tančić, 2018). Namely, these two methods are based at determination of the P-t (P-pressure, t-temperature) formation conditions of sphalerite exclusively from the content of the present FeS component.

On the other hand, sphalerites from the different ore deposits with similar contents of the FeS component are characterized with different unit

складу са тиме, укажу на различите Р и/или т услове настанка. Обзиром на ту чињеницу, у овом раду је проучавана нова могућност, т.ј. опција I четворо-компонентног  $a_0$ -FeS-P-t дијаграма за одређивање њиховог постанка, зато што је у I делу ових проучавања (Танчић, 2018) претпостављено да димензије јединичне ћелије сфалерита могу бити од користи за геотермометрију и геобарометрију. Овај дијаграм би се могао привремено користити док се не сакупе прецизнији и комплетнији подаци који би унапредили његову функционалност и доказали или евентуално оповргли његову вредност.

Затим, сви добијени резултати су упоређивани и, заједно са резултатима који су добијени другим методама и минералима (Kullerud, 1953; Bethke и Barton, 1971; Rye и Czamanske у Field и Moore, 1971; Lusk и Ford, 1978; Ohmoto и Rye, 1979; Wiggins и Craig, 1980; Танчић и др., 2001; Јанежић и др., 2003 и 2004), затим коришћени да би се достигли приближни услови постанка ових сфалерита и рудних лежишта.

Конечно, поново су разматрани закључци Танчић-а и Судар-а (2005) и Танчић-а (2018) о утицају  $\Sigma(Fe,Mn,Cd)S$  садржаја на одређивање температуре и притиска у поређењу са Fe и FeS садржајима.

## РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

### 1. Израда четворо-компонентног $a_0$ -FeS-P-t дијаграма (опција I)

Претходно изнети контрадикторни резултати (видети на пример: Toulmin и др., 1991; Vaughan, 2006; Танчић, 2018; и литература унутар) натерала нас је да размотримо неке нове могућности за одређивање услова настанка сфалерита, т.ј. на израду четворо-компонентног  $a_0$ -FeS-P-t дијаграма. Овакав дијаграм је конструисан комбиновањем резултата добијених вредности за  $a_0$  и FeS садржаја из табела 1-4 и промена из Barton-а и Toulmin-а (1966), које су представљене као линије 1 и 3 на Слици 2 (Танчић, 2018), са екстраполираним променама притиска и температуре у односу на FeS садржаје из Toulmin-а и др. (1991, слика 2, с. 1040) и Balabin-а и Sack-а (2000, слика 5, с. 937).

Примењена су два приступа за израду дијаграма:

1. Прва претпоставка је да су температурне промене праве линије које се секу под правим углом

cell dimensions which could, according to that, indicate to the different P and/or t formation conditions. Regard to that fact, in this paper it was studied a new possibility, i.e. option I of the four-component  $a_0$ -FeS-P-t diagram for the determination of their formation, because in the I part of these studies (Tančić, 2018) it was presumed that the sphalerite unit cell dimensions could be useful for the geothermometry and geobarometry. This diagram could be temporary used until more precise and complete data will be collected to advance its functionality and to prove or eventually disapprove its validity.

Then, all of the obtained results were compared and, together with the results which were obtained by other methods and minerals (Kullerud, 1953; Bethke and Barton, 1971; Rye and Czamanske at Field and Moore, 1971; Lusk and Ford, 1978; Ohmoto and Rye, 1979; Wiggins and Craig, 1980; Tančić et al., 2001; Janežić et al., 2003 and 2004), were then used to achieve the approximate formation conditions of these sphalerites and ore deposits.

Finally, it was again reconsidered the conclusions by Tančić and Sudar (2005) and Tančić (2018) of the influence of the  $\Sigma(Fe,Mn,Cd)S$  contents to the determination of temperature and pressure in comparison with the Fe and FeS contents.

## RESULTS AND DISCUSSION

### 1. Construction of the four-component $a_0$ -FeS-P-t diagram (option I)

Previously exposed contradictory results (see for examples: Toulmin et al., 1991; Vaughan, 2006; Tančić, 2018; and references within) forced us to considerate about some new possibilities for the determination of the sphalerite formation conditions, i.e. by construction of the four-component  $a_0$ -FeS-P-t diagram. Such diagram was constructed by combining the results of the obtained values for  $a_0$  and the FeS contents from tables 1-4 and variations from Barton and Toulmin (1966), presented as lines 1 and 3 at figure 2 (Tančić, 2018), with the extrapolated pressure and temperature variations by the FeS contents from Toulmin et al. (1991, Figure 2, p. 1040) and Balabin and Sack (2000, Figure 5, p. 937).

There were used two approaches for constructing the diagram:

1. First supposition is that the temperature variations are straight lines normal at the intersections to the lines 1 (marked as interrupted lines for temper-

у односу на линије 1 (означене као испрекидане линије за температурне вредности са нормалним словима у елипсама) и 3 (означене као тачкасте линије за температурне вредности са нормалним словима у правоугаоницима) са слике 2 (Танчић, 2018), која је приказана на слици 1; и

2. Друга претпоставка је да су те температурне промене криве линије које се секу под правим углом у односу на линију 1, али са искривљеним правцима и са неким средњим вредностима помереним ка одговарајућој линији 3 са слике 1, а која је приказана на Слици 2.

Екстраполисани притисци од 10, 8, 6, 4, 2 и 1 kbar из Toulmin-a et al. (1991) су приказани са нормалним словима у елипсама са испрекиданим линијама за линију 1; и са нормалним словима у правоугаоницима са тачкастим линијама за линију 3.

Екстраполисани притисци од 10, 7.5, 5 и 2.5 kbar-а и 1 bar из Balabin-a и Sack-a (2000) су приказани са итали克 словима у елипсама са испрекиданим линијама за линију 1; и са италик словима у правоугаоницима са тачкастим линијама за линију 3.

Слике 1 и 2 су такође допуњене сфалеритима са  $a_0$ -FeS-t карактеристикама који пресецају, или су врло близу, линије 3 (Tančić, 2018), и односе се на прецизније одређивање температуре.

Са слике 1 може се видети да је на вишим температурама утицај притиска мањи него на ниским температурама на којима је са значајним и растућим ефектом. Према томе, чини се да су притисци испод око 4 kbar-а одговарајући за сфалерите који су настали изнад око 400 °C. Са друге стране, испод око 300 °C и са порастом притиска изнад око 6.5-7 kbar-а јасно је да се разлика између природних узорака и лабораторијских експеримената повећава. Наиме, највеће неслагање између природних узорака, теорије и експеримената се налази у области ниских температура и високих притисака. Даље, ово су главни разлози са значајним утицајем на претходно наведену дебату (Toulmin и др., 1991; Vaughan, 2006; и Танчић, 2018).

Слика 2 више задовољава компромисе између природних и лабораторијских узорака и захватајући искривлености изотермних и изобарних линија растворова које су неопходне из термодинамичких прорачуна (Toulmin и др., 1991). Требало би такође напоменути да је прилично тешко конструисати такав дијаграм без комплетнијих података и без више сфалеритских узорака код којих су већ одређени  $a_0$ , FeS, P и t; и са таквим подацима који би даље потврдили његову вредност. Према томе, овај дијаграм би се привремено користио све док се не прикупе прецизнији и

атуре вредности са нормалним словима у елипсама) и 3 (означене као дотирани линије за температурне вредности са нормалним словима у елипсама) из слике 2 (Tančić, 2018), која је приказана на слици 1; и

2. Друга претпоставка је да те температурне промене криве линије које се секу под правим углом у односу на линију 1, али са искривљеним правцима и са неким средњим вредностима помереним ка одговарајућој линији 3 са слике 1, а која је приказана на Слици 2.

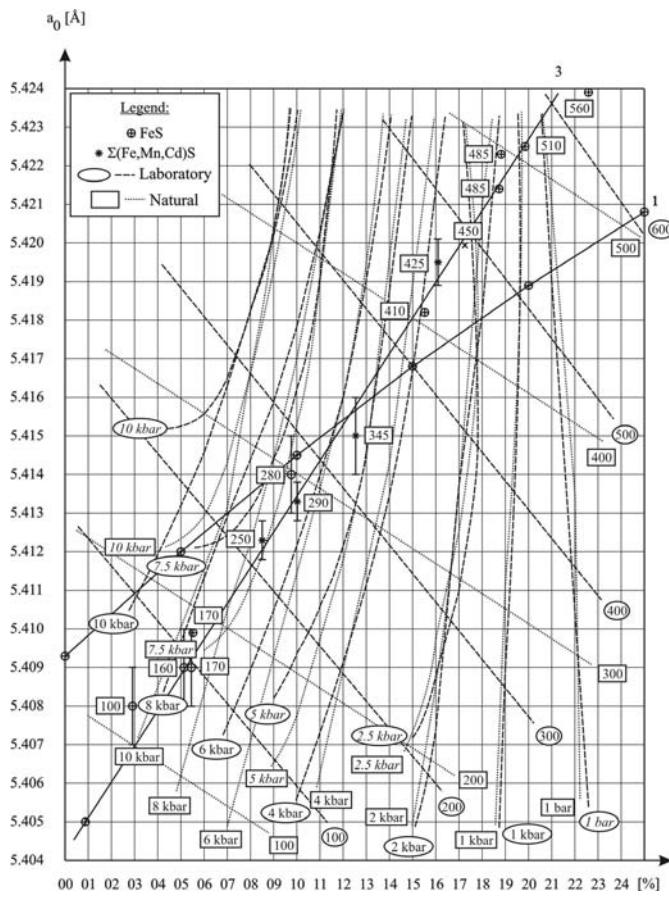
Екстраполисани притисци од 10, 8, 6, 4, 2 и 1 kbar из Toulmin et al. (1991) су приказани са нормалним словима у елипсама са испрекиданим линијама за линију 1; и са нормалним словима у правоугаоницима са тачкастим линијама за линију 3.

Екстраполисани притисци од 10, 7.5, 5 и 2.5 kbar-а и 1 bar из Balabin-a и Sack-a (2000) су приказани са италик словима у елипсама са испрекиданим линијама за линију 1; и са италик словима у правоугаоницима са тачкастим линијама за линију 3.

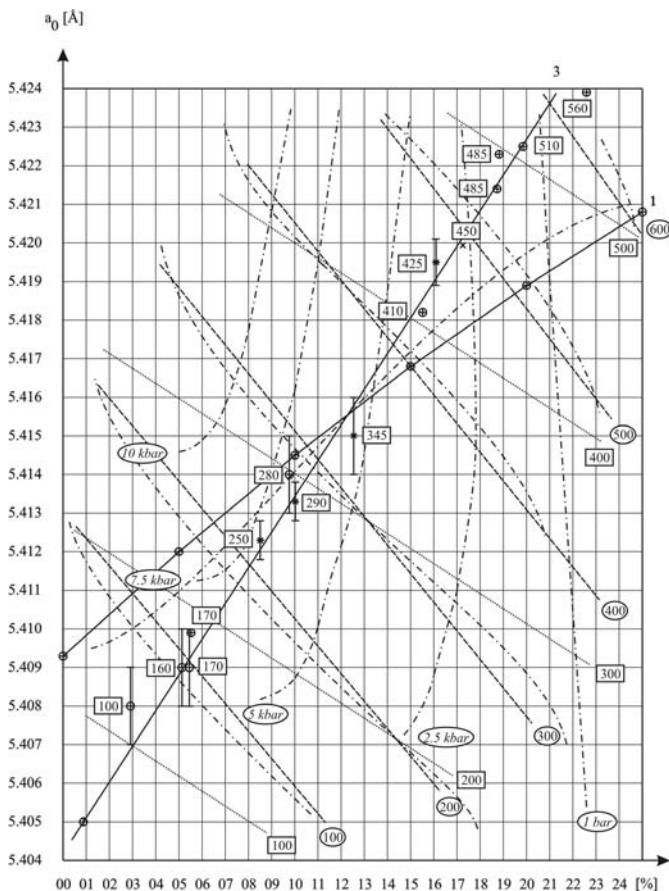
Слике 1 и 2 су такође допуњене сфалеритима са  $a_0$ -FeS-t карактеристикама који пресецају, или су врло близу, линије 3 (Tančić, 2018), и односе се на прецизније одређивање температуре.

Са слике 1 може се видети да је на вишим температурама утицај притиска мањи него на ниским температурама на којима је са значајним и растућим ефектом. Према томе, чини се да су притисци испод око 4 kbar-а одговарајући за сфалерите који су настали изнад око 400 °C. Са друге стране, испод око 300 °C и са порастом притиска изнад око 6.5-7 kbar-а јасно је да се разлика између природних узорака и лабораторијских експеримената повећава. Наиме, највеће неслагање између природних узорака, теорије и експеримената се налази у области ниских температура и високих притисака. Даље, ово су главни разлози са значајним утицајем на претходно наведену дебату (Toulmin и др., 1991; Vaughan, 2006; и Танчић, 2018).

Слика 2 више задовољава компромисе између природних и лабораторијских узорака и захватајући искривлености изотермних и изобарних линија растворова које су неопходне из термодинамичких прорачуна (Toulmin et al., 1991). И требало би да се сагласи да је прилично тешко конструисати такав дијаграм без комплетнијих података и без више сфалеритских узорака код којих су већ одређени  $a_0$ , FeS, P и t; и са таквим подацима који би даље потврдили његову вредност. Према томе, овај дијаграм би се привремено користио све док се не прикупе прецизнији и



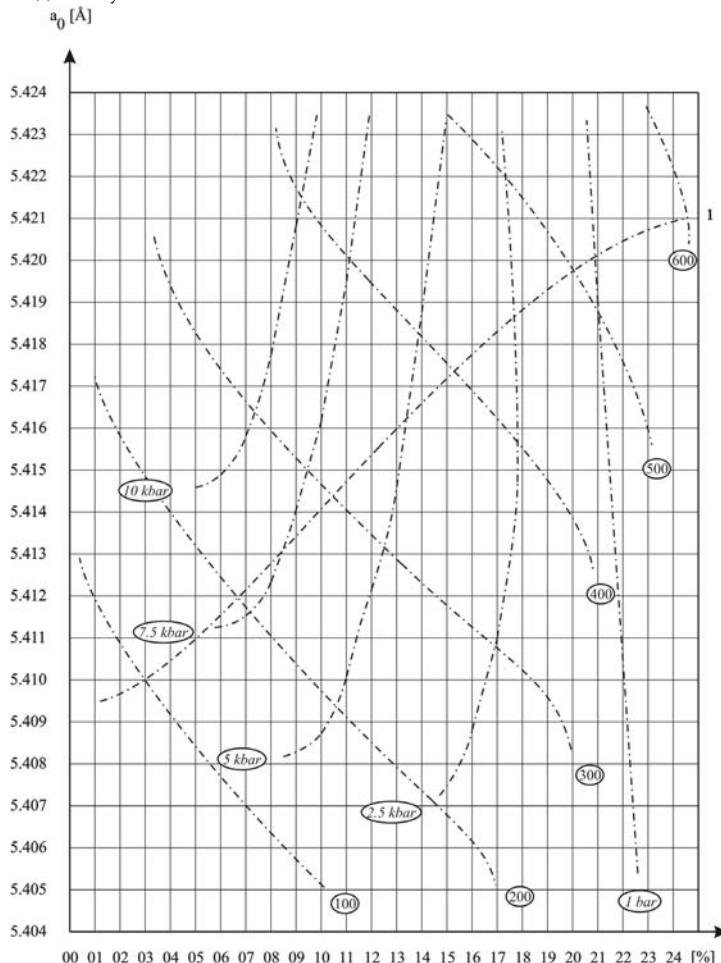
Слика / Figure 1, Екстраполација притиска са температурним променама из Toulmin-а и др. (1991) и Balabin-а и Sack-а (2000) са димензијом јединичне ћелије ( $a_0$ ) са FeS садржајима. Линије: 1. Barton и Toulmin (1966); и 3. Танчић (2018). Промене температуре су праволинијске / Extrapolated pressures by temperature variations from Toulmin et al. (1991) and Balabin and Sack (2000) with the unit cell dimension ( $a_0$ ) by the FeS contents. Lines: 1. Barton and Toulmin (1966); and 3. Tančić (2018). Variations of temperature are linear



Слика 2, Екстраполација притиска са температурним променама из Balabin-а и Sack-а (2000) са димензијом јединичне ћелије ( $a_0$ ) са FeS садржајима. Линије: 1. Barton и Toulmin (1966); и 3. Танчић (2018). Промене температуре су криволинијске / Figure 2, Extrapolated pressures by temperature variations from Balabin and Sack (2000) with the unit cell dimension ( $a_0$ ) by the FeS contents. Lines: 1. Barton and Toulmin (1966); and 3. Tančić (2018). Variations of temperatures are curved

комплетнији подаци који би унапредили његову функционалност и доказали или евентуално опровергли његову вредност.

Такође, температурне криве (изотерме) би могле бити нешто различитијег облика и положаја, што би дакле утицало и на облик изобара. У складу са тим, опција I четворо-компонентног  $a_0$ -FeS-P-t дијаграма настала из слике 2 (испрекидане линије са тачкама) је предложена и приказана на Слици 3, док ће о неким другим опцијама бити дискутовано у будућим проучавањима која су и даље у току, а која ће бити накнадно објављена.



and complete data will be collected to advance its functionality and to prove or eventually disapprove its validity.

Also, temperature curves (isotherms) could be of something different shape and positions, which would therefore affect to the shape of isobars. According to that, the Option I of the four-component  $a_0$ -FeS-P-t diagram derived from figure 2 (interrupted lines with dots) is proposed and presented at figure 3, while some other options will be discussed with further studies which are still in progress and published afterwards.

Слика 3, Опција I четворо-компонентног  $a_0$ -FeS-P-t дијаграма. Линија 1: Основна линија

Figure 3, Option I of the four-component  $a_0$ -FeS-P-t diagram. Line 1: Base line

## 2. Одређивања температура и притиска настанка, поређење са другим подацима и разматрање утицаја $\Sigma(Fe,Mn,Cd)S$ садржаја на добијене податке

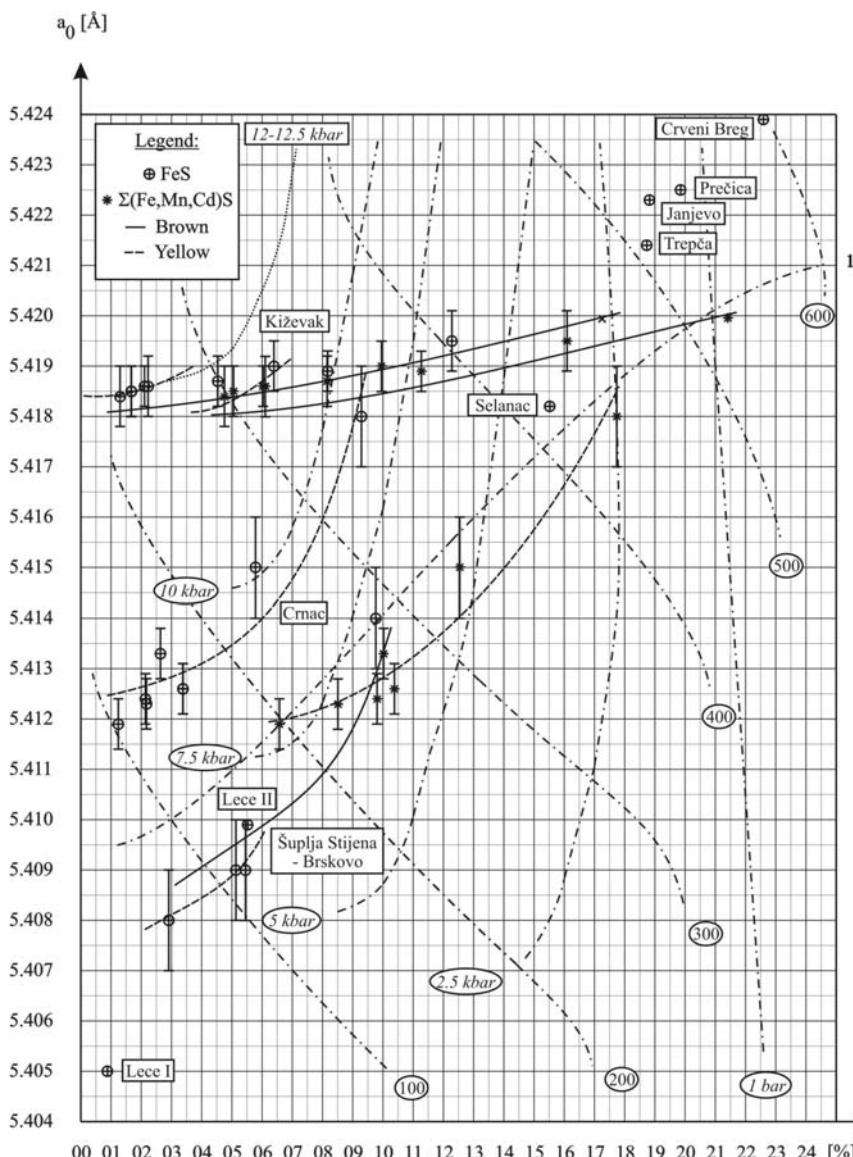
Овом приликом коришћена је слика 3 за процену температуре и притиска за узорке који имају податке за  $a_0$ , FeS и  $\Sigma(Fe,Mn,Cd)S$  (т.ј. Табеле 1-4 од Танчић-а, 2018) конструкцијом слике 4.

Са слике 4 могу се одредити температуре- $t_d$  (у  $^{\circ}C$ ) и притиска- $P_d$  (у kbars) настанка сваког

## 2. Determinations of the temperatures and pressures of formation, comparison with other data and reconsideration about influence of the $\Sigma(Fe,Mn,Cd)S$ contents to the obtained data

For this occasion it was used figure 3 for the temperature and pressure estimations for the specimens with the data of  $a_0$ , FeS and  $\Sigma(Fe,Mn,Cd)S$  (i. e. Tables 1-4 by Tančić, 2018) by construction of figure 4.

From figure 4 it could be determined temperature- $t_d$  (in  $^{\circ}C$ ) and pressure- $P_d$  (in kbars) of formation for



Слика 4, Опција Промене димензије јединичне ћелије ( $a_0$ ), FeS и  $\Sigma(Fe,Mn,Cd)S$  садржаја, температура и притиска за рудна лежишта Леце, Шупља Стијена-Брсково, Црнац, Селанац, Кижевак, Трепча, Јањево, Пречица и Црвени Брег. Линија 1: Основна линија

Figure 4, Variations of the unit cell dimension ( $a_0$ ), FeS and  $\Sigma(Fe,Mn,Cd)S$  contents, temperatures and pressures for the ore deposits Leće, Šuplja Stijena-Brskovo, Crnač, Selanac, Kiževak, Trepča, Janjevo, Prečica and Crveni Breg. Line: 1. Base line

узорка. Процењена стандардна девијација једнничне ћелије је коришћена за процену опсега температуре и притиска, т.ј. његову девијацију. Ови подаци су приказани у табелама 1 (са FeS садржајима) и 2 (са  $\Sigma(Fe,Mn,Cd)S$  садржајима) заједно са подацима који су добијени другим методама/минералима, т.ј.  $t_1-t_5$  и  $P_1-P_2$  (Танчић, 2018). На такав начин се може проверити ваљаност добијених података, чак иако ове температуре не морају обавезно бити исте као оне које су процењене из парагенеза силикатних минерала, модела изотопских фракција, или других независних видова термометрије заснованих на догађајима чији се однос на равнотежу сфалерита не може доказати (Toulmin и др., 1991).

every one specimen. The estimated standard deviation of the unit cell is used for the estimation of the temperature and pressure range, i.e. its deviation. These data are presented at tables 1 (with the FeS contents) and 2 (with the  $\Sigma(Fe,Mn,Cd)S$  contents) together with data which were obtained by other methods/minerals, i.e.  $t_1-t_5$  and  $P_1-P_2$  (Tančić, 2018). At such manner it could be checked the validity of the obtained data, even that these temperatures may not necessarily be the same as that estimated from the silicate mineral assemblages, isotopic fractionation patterns, or other independent means of thermometry based on events whose relation to sphalerite equilibration cannot be demonstrated (Toulmin et al., 1991).

Табела 1, Одређене температуре и притисци за рудна лежишта Леце, Шупља Стијена-Брсково, Црнац, Селанац, Кижевак, Трепча, Јањево, Пречица и Црвени Брег. Коришћени су FeS садржаји  
 Table 1, Determined temperatures and pressures for the ore deposits Lece, Šuplja Stijena-Brskovo, Crnac, Selanac, Kiževak, Trepča, Janjevo, Prečica and Crveni Breg. The FeS contents were used

Рудно лежиште Ore deposit	Узорак Sample	$a_o$	FeS	$t_1$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	$P_1$	$t_{d1}$	$P_{d1}$
Леце Lece II	I	5,4050(1)	0,88	29				24,53	25±3	2,5
		5,4099(1)	5,53	170			16,60	135±3	6	
Шупља Стијена- Брсково Šuplja Stijena -Brskovo жути yellow мрки brown тамни dark	зеленкасти greenish	5,408(1)	2,91	100				20,90	80±20	5,5±1,5
		5,409(1)	5,13	160			17,23	115±20	6±1,5	
		5,409(1)	5,43	170			16,76	120±20	6±1	
		5,414(1)	9,76	280			10,55	285±20	7±0,5	
Црнац Crnac жути yellow жути yellow жути yellow жути yellow жути yellow жути yellow жути yellow жути yellow	жути yellow	5,4119(5)	1,24	41	113			23,87	105±10	8±0,5
		5,4123(5)	2,17	71			22,20	130±10	8,5±0,5	
		5,4124(5)	2,14	71	108		22,25	130±10	8,5±0,5	
		5,4133(5)	2,63	85	106		21,39	160±10	9±0,5	
		5,4126(5)	3,38	110	103		20,10	160±10	8,5±0,5	
		5,415(1)	5,78	180	186		16,21	250±20	10±1	
		5,418(1)	9,27	270	186		11,19	350±15	10±1	
Селанац Selanac		5,4182(1)	15,52	410				4,09	415±3	4
Кижевак Kiževak	670m	15.611b-y	5,4186(6)	2,22	71	210		22,11	250±10	12±0,5
		15.611b-r	5,4195(6)	12,28	340	214	491/419*	583/465*	7,47	405±9
	690m	15.623y	5,4186(4)	2,12	68	176	468/259*	950/446*	22,28	245±8
		15.604b	5,4189(4)	8,17	240	374			12,70	350±7
		15.640b-b		17,25	450	432			2,55	465
	710m	15.635y	5,4184(6)	1,29	41	132	464/242*	871/368*	23,78	225±10
		15.633y	5,4185(5)	1,67	53	214	388/194*	457/145*	23,09	240±9
		15.634b	5,4187(5)	4,53	145	320	544/355*	512/248*	18,19	295±9
		15.629b	5,4190(5)	6,39	195	215	491/343*	937/595*	15,28	330±8
										11,5±0,5
Трепча Trepča		5,4214(1)	18,73	485				1,38	505±3	1,5
Јањево Janjevo		5,4223(1)	18,83	485				1,30	525±3	1,5
Пречица Prečica		5,4225(1)	19,85	510				0,58	545±3	0,5
Црвени Брег Crveni Breg		5,4239(1)	22,59	560				-1,04	600±3/550±3*	-1,5/0,5*

\* - кориговано за притисак/corrected for the pressure

Из табеле 1 може се видети да су очигледни више или мање различити услови настанка сфалерита из различитих проучаваних рудних лежишта. Они се могу поделити у три групе-региона:

1. Ниско температурни регион (<200 °C) за сфалерите из рудних лежишта Леце (t од 25±3 до 135±3 °C; P од 2,5 до 6 kbar-a); Шупља Стијена-Брсково (t од 80±20 до 120±20 °C; P од 5,5±1,5 до 6±1 kbar-a); и Црнац (t од 105±10 до 160±10 °C; P од 8±0,5 до 9±0,5 kbar-a);
2. Средње температурни регион (од 200 до 450 °C) за сфалерите из рудних лежишта Шупља Стијена-Брсково (t=285±20 °C; P=7±0,5 kbar-a); Црнац (t од 250±20 до 350±15 °C; P=10±1 kbar-a); Кижевак (t од 225±10 до 405±9 °C; P од 6,5 до 12±0,5 kbar-a); и Селанац (t=415±3 °C; P=4 kbar-a); и
3. Високо температурни регион (>450 °C) за сфалерите из рудних лежишта Кижевак (t=465 °C; P=2,5 kbar-a); Трепча (t=505±3 °C; P=1,5 kbar-a); Јањево (t=525±3 °C; P=1,5 kbar-a); Пречица (t=545±3 °C; P=0,5 kbar-a); и Црвени Брег (t=600±3 °C; P=-1,5 kbar-a). Овде би требало напоменути да би се притисак за сфалерит из рудног лежишта Црвени Брег морао кориговати за најмање 1,5-2 kbar-a у позитивну вредност, што снижава температуру за око 40-50 °C. Дакле, добијено је око 550 °C за P=0,5 kbar-a.

Поређењем температурних резултата ( $t_{d1}$ ) за рудна лежишта Леце, Шупља Стијена-Брсково, Селанац, Трепча, Јањево, Пречица и Црвени Брег са резултатима који су добијени преко Kullerud-ове криве ( $t_1$ ), добијено је 5 различитих и 6 сличних вредности.

Поређењем температурних резултата ( $t_{d1}$ ) за рудно лежиште Црнац са резултатима који су добијени преко Kullerud-ове криве ( $t_1$ ), добијене су све различите вредности са значајно великим неслагањима за FeS садржаје, као што је приказано у табели 1. Николић и др. (1978) су добили две доминантне фракције: прву са 64,5% садржаја и са температуром настанка од 220 °C, и другу са 16,5% садржаја и са температуром настанка од 330 °C. Добијене температуре  $t_{d1}$  од 105±10 и 160±10 °C су у много бољој сагласности са  $t_3$  температурама од 113 и 106 °C које су добијене из Cu садржаја (Wiggins and Craig, 1980), а самим тим и објективније него оне које су добили Николић и др. (1978). Са друге стране, поређењем температурних резултата ( $t_{d2}$ ) за рудно лежиште Црнац са резултатима који су добијени преко Kullerud-ове криве ( $t_2$ ), добијене су све сличне вредности за  $\Sigma(Fe,Mn,Cd)S$  садржаје, приказано у табели 2.

From table 1 it can be seen that there are obvious more or less different formation conditions for the sphalerites from various studied ore deposits. They could be separated into three groups-regions:

1. Low temperature region (<200 °C) for sphalerites from the ore deposits Lece (t from 25±3 to 135±3 °C; P from 2.5 to 6 kbar); Šuplja Stijena-Brskovo (t from 80±20 to 120±20 °C; P from 5.5±1.5 to 6±1 kbar); and Crnac (t from 105±10 to 160±10 °C; P from 8±0.5 to 9±0.5 kbar);
2. Middle temperature region (from 200 to 450 °C) for sphalerites from the ore deposits Šuplja Stijena-Brskovo (t=285±20 °C; P=7±0.5 kbar); Crnac (t from 250±20 to 350±15 °C; P=10±1 kbar); Kiževak (t from 225±10 to 405±9 °C; P from 6.5 to 12±0.5 kbar); and Selanac (t=415±3 °C; P=4 kbar); and
3. High temperature region (>450 °C) for sphalerites from the ore deposits Kiževak (t=465 °C; P=2.5 kbar); Trepča (t=505±3 °C; P=1.5 kbar); Janjevo (t=525±3 °C; P=1.5 kbar); Prečica (t=545±3 °C; P=0.5 kbar); and Crveni Breg (t=600±3 °C; P=-1.5 kbar). Here it should be mentioned that the pressure for sphalerite from the Crveni Breg ore deposit must be corrected for at least 1.5-2 kbar to the positive value, which decrease temperature for about 40-50 °C. Therefore, it is obtained about 550 °C for P=0.5 kbar.

By comparison of the temperature results ( $t_{d1}$ ) for the Lece, Šuplja Stijena-Brskovo, Selanac, Trepča, Janjevo, Prečica and Crveni Breg ore deposits with the results obtained by Kullerud's curve ( $t_1$ ), there were obtained 5 different and 6 similar values.

By comparison of the temperature results ( $t_{d1}$ ) for the Crnac ore deposit with the results obtained by Kullerud's curve ( $t_1$ ), there were obtained all different values with considerable large disagreement for the FeS contents, table 1. Nikolić et al. (1978) obtained two dominant fractions: one with 64.5% content and with formation temperature of 220 °C, and second with 16.5% content and with formation temperature of 330 °C. The obtained temperatures  $t_{d1}$  of 105±10 and 160±10 °C are in much better agreement with the  $t_3$  temperatures of 113 and 106 °C obtained from the Cu contents (Wiggins and Craig, 1980), and accordingly more objective than that obtained by Nikolić et al. (1978). On the other hand, by comparison of the temperature results ( $t_{d2}$ ) for the Crnac ore deposit with the results obtained by Kullerud's curve ( $t_2$ ), there were obtained all similar values for the  $\Sigma(Fe,Mn,Cd)S$  contents, shown in table 2.

Табела 2, Одређене температуре и притисци за рудна лежишта Црнац и Кижевак.

Коришћени су  $\Sigma(Fe,Mn,Cd)S$  садржаји

Table 2, Determined temperatures and pressures for the ore deposits Crnac and Kiževak.

The  $\Sigma(Fe,Mn,Cd)S$  contents were used

Рудно лежиште Ore deposit	Узорак Sample	$a_o$	$\Sigma(Fe,Mn,Cd)S$	$t_2$	$P_2$	$t_{d2}$	$P_{d2}$
Црнац Crnac	жути yellow	5,4119(5)	6,62	205	14,94	195±10	7,5±0,5
	жути yellow	5,4123(5)	8,49	250	12,25	230±10	7±0,5
	жути yellow	5,4124(5)	9,86	285	10,42	250±10	6±0,5
	жути yellow	5,4133(5)	10,04	290	10,19	275±10	6±0,5
	жути yellow	5,4126(5)	10,40	300	9,73	265±10	6±0,5
	жути yellow	5,415(1)	12,53	345	7,19	335±20	5,5
	жути yellow	5,418(1)	17,67	460	2,20	440±20	2,5
Кижевак Kiževak	670m	15.611b-y	5,4186(6)	6,10	190	15,72	340±8
		15.611b-r	5,4195(6)	16,05	425	3,60	445±9
	690m	15.623y	5,4186(4)	6,06	185	15,78	340±7
		15.604b	5,4189(4)	11,16	315	8,79	390±7
		15.640b-b	/	21,42	540	-0,42	525
	710m	15.635y	5,4184(6)	4,77	150	17,81	295±10
		15.633y	5,4185(5)	5,03	160	17,39	305±9
		15.634b	5,4187(5)	8,17	240	12,70	350±8
		15.629b	5,4190(5)	9,75	280	10,56	375±8
							8,5

Сфалерити из рудног лежишта Кижевак почињу са кристализацијом на око 465 °C и 2,5 kbar-а (узорак 15.640 мрко-црни). Ова температурна вредност се изванредно слаже са добијеном вредношћу од 475 °C за арсенопиритску геотермометрију из суседног рудног лежишта Саставци (Танчић и др., 2001; Јанежић и др., 2003 и 2004), а такође и са  $t_1$  (450 °C) и  $t_3$  (432 °C). Током даљег процеса кристализације температура опада, док притисак расте, али скоро сигурно не до вредности од 12±0,5 kbar-а, која је исувише висока. Разлози за сумњу код вредности које су више од 6,5-7 kbar-а за температуре испод око 300 °C су претходно објашњени, а што је такође од значаја за рудна лежишта Леце, Шупља Стијена-Брсково и Црнац.

Следећи узорци из рудног лежишта Кижевак имају такође врло добро слагање између:

- $t_{d1}$  и  $t_3$  (Wiggins и Craig, 1980): 15.633 жути ( $t_{d1}=240\pm9$  °C;  $t_3=214$  °C); 15.611 мрко- жути ( $t_{d1}=250\pm10$  °C;  $t_3=210$  °C); 15.634 мрки ( $t_{d1}=295\pm9$  °C;  $t_3=320$  °C); и 15.604 мрки ( $t_{d1}=350\pm7$  °C;  $t_3=374$  °C);

Sphalerites from the Kiževak ore deposit begin with crystallization at about 465 °C and 2.5 kbar (specimen 15.640 brownish-black). That temperature value is in excellent agreement with the obtained value of 475 °C for the arsenopyrite geothermometer from the neighboring ore deposit Sastavci (Tančić et al., 2001; Janežić et al., 2003 and 2004), and also with  $t_1$  (450 °C) and  $t_3$  (432 °C). During the further crystallization process temperature decreases, while the pressure increases, but almost certainly not to the value of 12±0.5 kbar, which is too high. Reasons for suspicion at the values higher than 6.5-7 kbar for the temperatures bellow about 300 °C are previously explained, and what is also considerable for the Lece, Šuplja Stijena-Brskovo and Crnac ore deposits.

Following specimens from the Kiževak ore deposit has also very good correlation between:

- $t_{d1}$  and  $t_3$  (Wiggins and Craig, 1980): 15.633 yellow ( $t_{d1}=240\pm9$  °C;  $t_3=214$  °C); 15.611 brownish-yellow ( $t_{d1}=250\pm10$  °C;  $t_3=210$  °C); 15.634 brown ( $t_{d1}=295\pm9$  °C;  $t_3=320$  °C); and 15.604 brown ( $t_{d1}=350\pm7$  °C;  $t_3=374$  °C);

$-t_{d_1}$  и  $t_4$  (Bethke и Barton, 1971): 15.635 жути ( $t_{d_1}=225\pm10$  °C;  $t_4=242$  °C); 15.623 жути ( $t_{d_1}=245\pm8$  °C;  $t_4=259$  °C); и 15.629 мрки ( $t_{d_1}=330\pm8$  °C;  $t_4=343$  °C); и

$-t_{d_1}$  и  $t_{4,5}$  (Bethke и Barton, 1971): 15.634 мрки ( $t_{d_1}=295\pm9$  °C;  $t_{4,5}=302\pm53$  °C); и 15.611 мрко-црвени ( $t_{d_1}=405\pm9$  °C;  $t_{4,5}=442\pm23$  °C).

Према томе, сви узорци сфалерита из рудног лежишта Кижевак имају веома добро слагање између  $t_{d_1}$  и температура које су добијене другим методама/минералима. Са друге стране, поређењем температурних резултата ( $t_{d_2}$ ) са резултатима који су добијени преко Kullerud-ове криве ( $t_2$ ), добијене су само две сличне вредности за  $\Sigma(\text{Fe},\text{Mn},\text{Cd})\text{S}$  садржаје (узорци 15.611 мрко-црвени и 15.640 мрко-црни у табели 2). Такође, поједини узорци показују значајне разлике између  $t_4$  и  $t_5$ , што може указивати или на лошу одредбу Mn садржаја, или на неравнотежу између сфалерита и галенита.

Добијене температурне вредности за рудна лежишта Трепча и Пречица-Црвени Брег (Авала) су у врло доброј сагласности са добијеним вредностима из геотермометрије арсенопирита (Танчић и др., 2001; Јанежић и др., 2003 и 2004) од око 485 °C за рудно лежиште Трепча и 510 °C за рудно лежиште Црвени Брг.

Очигледно је да су  $t_{d_1}$  и  $t_1$  (а такође и  $t_{d_2}$  и  $t_2$ ) скоро истоветни код узорака који пресецају или су врло близу основне линије, као што је приказано на слици 4, док се код осталих неслагања увећавају са удаљеношћу од основне линије.

Код већине добијених притисака ( $P_{d_1}$  and  $P_{d_2}$ ) постоје велика неслагања са онима који су добијени из једначина и дијаграма које су представили Lusk и Ford (1978)- $P_1$  и  $P_2$  (табеле 1 и 2). Добијене  $P_{d_1}$  вредности су много објективније него  $P_1$  код двадесет узорака.  $P_{d_1}$  и  $P_1$  вредности су скоро подједнаке за рудна лежишта Селанац, Трепча, Јањево, Пречица и Црвени Брг (пет узорака) и за два узорка из рудних лежишта Црнац и Кижевак (са највећим садржајима FeS), а што је највероватније услед њихове температуре постанка изнад 350 °C. Надаље,  $P_{d_2}$  вредности су много објективније од  $P_2$  за четрнаест узорака, а  $P_{d_2}$  и  $P_2$  су скоро подједнаки само за два узорка.

Сфалерит из рудног лежишта Црнац је један узорак који је фракционисан (Николић и др., 1978), и стога је притисак ( $P_{d_1}$ ) са малом варијацијом (т.ј. од  $8\pm0,5$  до  $10\pm1$  kbar-a).

Просечне одређене температуре ( $t_{d_1}$  и  $t_{d_2}$ ) и притисци ( $P_{d_1}$  и  $P_{d_2}$ ) из свих проучаваних узорака за рудна лежишта Леце, Шупља Стијена-Брсково,

$-t_{d_1}$  and  $t_4$  (Bethke and Barton, 1971): 15.635 yellow ( $t_{d_1}=225\pm10$  °C;  $t_4=242$  °C); 15.623 yellow ( $t_{d_1}=245\pm8$  °C;  $t_4=259$  °C); and 15.629 brown ( $t_{d_1}=330\pm8$  °C;  $t_4=343$  °C); and

$-t_{d_1}$  and  $t_{4,5}$  (Bethke and Barton, 1971): 15.634 brown ( $t_{d_1}=295\pm9$  °C;  $t_{4,5}=302\pm53$  °C); and 15.611 brownish-red ( $t_{d_1}=405\pm9$  °C;  $t_{4,5}=442\pm23$  °C).

Therefore, all of the sphalerite specimens from the Kiževak ore deposit have very good correlation between  $t_{d_1}$  and temperatures obtained with other methods/minerals. On the other hand, by comparison of the temperature results ( $t_{d_2}$ ) with the results obtained by Kullerud's curve ( $t_2$ ), there were obtained only two similar values for the  $\Sigma(\text{Fe},\text{Mn},\text{Cd})\text{S}$  contents (specimens 15.611 brownish-red and 15.640 brownish-black at table 2). Also, some specimens have the considerable difference between  $t_4$  and  $t_5$ , which could indicate either to a bad determination of the Mn contents, or either to disequilibrium between sphalerite and galena.

Obtained temperature values for the Trepča and Prečica-Crveni Breg (Avala) ore deposits are in very good agreement with the obtained values from the arsenopyrite geothermometry (Tančić et al., 2001; Janežić et al., 2003 and 2004) of about 485 °C for the Trepča ore deposit and 510 °C for the Crveni Breg ore deposit.

It is obvious that  $t_{d_1}$  and  $t_1$  (and also  $t_{d_2}$  and  $t_2$ ) are almost the same for the samples which intersects or are very near to the base line, shown on figure 4, while for the others disagreements are increasing towards the farness from the base line.

For the mostly obtained pressures ( $P_{d_1}$  and  $P_{d_2}$ ) there are large disagreements with that which was obtained from equations and diagrams presented by Lusk and Ford (1978)- $P_1$  and  $P_2$  (tables 1 and 2). The obtained  $P_{d_1}$  values are more objective than  $P_1$  for twenty samples. The  $P_{d_1}$  and  $P_1$  values are almost the same for the Selanac, Trepča, Janjevo, Prečica and Crveni Breg ore deposits (five samples) and for two samples from Crnac and Kiževak ore deposits (with highest FeS content), which is most probably due to their formation temperature over 350 °C. Furthermore,  $P_{d_2}$  values are more objective than  $P_2$  for fourteen samples, and  $P_{d_2}$  and  $P_2$  are almost the same only for two samples.

Sphalerite from the Crnac ore deposit is one sample which is fractioned (Nikolić et al., 1978), and consequently pressure ( $P_{d_1}$ ) is with little variation (i.e. from  $8\pm0,5$  to  $10\pm1$  kbar).

The average determined temperatures ( $t_{d_1}$  and  $t_{d_2}$ ) and pressures ( $P_{d_1}$  and  $P_{d_2}$ ) from all of the studied samples for the ore deposits Lece, Šuplja Stije-

Црнац и Кижевак су приказане у табели 3. Ради поређења, ови подаци добијени преко Kullerud-ове (1953) криве и једначине и дијаграма који су презентовали Lusk и Ford (1978) код Танчић-а (2018) су такође додати у табели 3 и означени са  $t_{d1}^*$ ,  $t_{d2}^*$ ,  $P_{d1}^*$  and  $P_{d2}^*$ .

на-Brskovo, Crnac and Kiževak are presented at table 3. For the comparison, these data obtained with Kullerud's (1953) curve and equation and diagram which were presented by Lusk and Ford (1978) at Tančić (2018) were also added at table 3 and marked with  $t_{d1}^*$ ,  $t_{d2}^*$ ,  $P_{d1}^*$  and  $P_{d2}^*$ .

Табела 3, Просечне одређене температуре ( $t_{d1}$  и  $t_{d2}$ ) и притисци ( $P_{d1}$  и  $P_{d2}$ ) за рудна лежишта Леце, Шупља Стијена-Брсково, Црнац и Кижевак

Table 3, Average determined temperatures ( $t_{d1}$  and  $t_{d2}$ ) and pressures ( $P_{d1}$  and  $P_{d2}$ ) for the ore deposits Lece, Šuplja Stijena-Brskovo, Crnac and Kiževak

Рудно лежиште Ore deposit	$t_{d1}$	$P_{d1}$	$t_{d2}$	$P_{d2}$	$t_{d1}^*$	$P_{d1}^*$	$t_{d2}^*$	$P_{d2}^*$
Леце Lece	80±3	4.0	/	/	100	>20	/	/
Шупља Стијена-Брсково Šuplja Stijena-Brskovo	150±20	6.0±1.1	/	/	178	>16	/	/
Црнац Crnac	184±12	8.9±0.6	284±13	5.8±0.4	118	>19	305	>9
Кижевак Kiževak	цело лежиште whole deposit	312±9	10.0±0.3	374±8	8.2±0.2	178	>16	276
	670m	328±10	9.2±0.2	392±8	7.2±0.2	206	>14	308
	690m	353±8	8.2±0.2	418±7	6.0±0.2	253	>12	317
	710m	272±9	11.9±0.5	331±9	10.4±0.2	108	>20	208
	жути yellow	237±9	12.0±0.5	313±9	11.3±0.5	54	>23	165
	мрки brown	349±9	9.1±0.3	404±8	6.7±0.1	240	>13	332

Сходно просечним одређеним температурама, приказаних у табели 3, као и другим појединачним вредностима, приказано у табели 1, проучавана рудна лежишта су подељена у три групе:

1. Ниско температурни регион (<200 °C) за рудна лежишта Леце, Шупља Стијена-Брсково и Црнац;
2. Средње температурни регион (од 200 до 450 °C) за рудна лежишта Кижевак и Селанац; и
3. Високо температурни регион (>450 °C) за рудна лежишта Трепча, Јањево, Пречица и Црвени Брег.

Дангић и др., 1998) су проучавали изотопски састав сумпора у сулфидима рудног лежишта Кижевак. Њиховим проучавањима утврђен је уски  $\delta^{34}\text{S}$  варијациони интервал код галенита (2,19 ‰), сфалерита (1,70 ‰) и пирита (1,36 ‰) који указује на стабилне услове у хидротермалном систему (узак температурни опсег), а што је у врло доброј сагласности са резултатима у овоме раду (т.ј. од 225 до 465, просечно 312 °C). Добијене просечне  $\delta^{34}\text{S}$  вредности из рада Дангић-а и др., 1998, табеле 1 и 2, су искоришћене за процену температуре овог рудног лежишта у овом раду (т.ј. углавном са хоризонта на 690m, због тога што је већина њихових проучаваних

According to table 3, the average determined temperatures, as well as to the other individual values, table 1, the studied ore deposits are separated into three groups:

1. Low temperature region (<200 °C) for the ore deposits Lece, Šuplja Stijena-Brskovo and Crnac;
2. Middle temperature region (from 200 to 450 °C) for the ore deposits Kiževak and Selanac; and
3. High temperature region (>450 °C) for the ore deposits Trepča, Janjevo, Prečica and Crveni Breg.

Dangić et al. (1998) studied isotopic sulfur composition of sulfides from the Kiževak ore deposit. With their studies it was determined narrow  $\delta^{34}\text{S}$  variation interval at galena (2.19 ‰), sphalerite (1.70 ‰) and pyrite (1.36 ‰) which indicate to the stable conditions in the hydrothermal system (narrow temperature range), and in a very good agreement with the results in this paper (i.e. from 225 to 465, average 312 °C). Obtained average  $\delta^{34}\text{S}$  values from paper by Dangić et al. (1998, Tables 1 and 2) were used for estimating the temperature of this ore deposit in this paper (i.e. mainly for the horizon at 690m, because the majority of their studied samples (6) is from that horizon, one

узорака (6) са тог хоризонта, један је са хоризонтом на 670m и два са хоризонтом на 710m, п. а.).

Прво, за процену температуре коришћена је калибрациона крива дата од стране Rye и Czamanske (1969) код Field и Moore (1971, Слика 6). Прерачунате су разлике између одговарајућих минералних парова: сфалерит-галенит ( $\Delta=4,910-2,975=1,935$ ), пирит-сфалерит ( $\Delta=6,700-4,910=1,790$ ) и пирит-галенит ( $\Delta=6,700-2,975=3,725$ ). Ови подаци су даље коришћени за добијање температуре постакна од око 350 °C, што је у изванредној сагласности са добијеном вредношћу за хоризонт на 690m од  $353\pm8$  °C, приказано у табели 3.

Друго, коришћен је регресиони израз дат од стране Ohmoto и Rye (1979) за одређивање температуре путем сфалерит-галенит разлике ( $\Delta=1,935$ ). На овакав начин, добијена је температура од 341 °C, што је такође у изванредној сагласности са претходним проучавањима за хоризонт на 690m.

Добијене разлике у температурама из рудног лежишта Кижевак од  $272\pm9$  до  $353\pm8$  °C нису много изражене, што је такође у сагласности са добијеним резултатима од стране Дангић и др. (1998) и Судар (2001 и 2003).

Као што се може видети, добијени резултати из предложеног четворо-компонентног дијаграма су позитивни и охрабрујући због тога што велика већина узорака показује много објективније податке од оних добијених помоћу Kullerud-ове (1953) криве и једначине и дијаграма који су представили Lusk и Ford (1978). Ово је проверено поређењем са резултатима који су добијени многим другим методама и минералима.

Са слике 4 и из табела 2 и 3 може се закључити да  $\Sigma(\text{Fe},\text{Mn},\text{Cd})\text{S}$  садржаји нису од користи за објективне закључке, због тога што показују значајно више добијене температуре ( $\Delta=100$  °C за Црнац и  $\Delta=55-76$  °C за Кижевак) и ниже притиске ( $\Delta=3,1$  kbar-а за Црнац и  $\Delta=0,7-2,4$  kbar-а за Кижевак), него они који су добијени из FeS садржаја, а што је у врло доброј сагласности са претходним проучавањима (Scott, 1973; Toulmin и др., 1991; Танчић и Судар, 2005; и Танчић, 2018).

## ЗАКЉУЧАК

Израђена је и предложена I опција четворо-компонентног  $a_0$ -FeS-P-t дијаграма. За коришћење оваквог дијаграма довољно је само да се израчуна димензија јединичне ћелије ( $a_0$ ) и да се добије садржај FeS компоненте проучава-

is from horizon at 670m and two from horizon at 710m, a. r.).

First, for the estimation of temperature it was used calibration curve by Rye and Czamanske (1969) at Field and Moore (1971, Figure 6). There were recalculated the differences between the corresponding mineral pairs: sphalerite-galena ( $\Delta=4.910-2.975=1.935$ ), pyrite-sphalerite ( $\Delta=6.700-4.910=1.790$ ) and pyrite-galena ( $\Delta=6.700-2.975=3.725$ ). These data were further used for obtaining formation temperature of about 350 °C, what is in excellent agreement with the obtained value for the 690m horizon of  $353\pm8$  °C (Table 3).

Second, it was used the regression expression by Ohmoto and Rye (1979) for the temperature determination by the sphalerite-galena difference ( $\Delta=1.935$ ). At such manner, it was obtained temperature of 341 °C, which is also in excellent agreement with previous studies for the 690m horizon.

Obtained differences of temperatures from the Kiževak ore deposit from  $272\pm9$  to  $353\pm8$  °C are not much pronounced, what is also in agreement with the obtained results by Dangić et al. (1998) and Sudar (2001 and 2003).

As it could be seen, the obtained results from proposed four-component diagram are positive and encouraging because the great majority of samples show more objective data than that obtained by Kullerud's (1953) curve and equation and diagram which were presented by Lusk and Ford (1978). This is checked with comparison with the results which were obtained by many other methods and minerals.

From figure 4 and tables 2 and 3 it can be concluded that the  $\Sigma(\text{Fe},\text{Mn},\text{Cd})\text{S}$  contents are not useful for the objective conclusions, because they show considerable higher obtained temperatures ( $\Delta=100$  °C for Crnac and  $\Delta=55-76$  °C for Kiževak) and lower pressures ( $\Delta=3.1$  kbar for Crnac and  $\Delta=0.7-2.4$  kbar for Kiževak), than that obtained from the FeS contents, and in very good agreement with the previous studies (Scott, 1973; Toulmin et al., 1991; Tančić and Sudar, 2005; and Tančić, 2018).

## CONCLUSION

It was constructed and proposed I option of the four-component  $a_0$ -FeS-P-t diagram. For use of such diagram it is only enough to calculate the unit cell dimension ( $a_0$ ) and obtain the content of the FeS component of the studied sphalerite, and then

ваног сфалерита, а да се затим на основу тих вредности одреди температура и притисак његовог настанка. Добијени резултати су позитивни и охрабрујући услед тога што је велика већина температурних вредности за рудна лежишта Леце, Шупља Стијена-Брсково, Црнац, Кижевак, Селанац, Трепча, Јањево, Пречица и Црвени Брег у сагласности са резултатима који су добијени другим методама/минералима, а такође су и бољи од оних који су добијени преко Kullerud-ове (1953) криве. Добијени притисци за ниže температуре су највероватније нешто виши него што је то у стварности, али такође много бољи него они који су добијени преко једначине и дијаграма које су представили Lusk и Ford (1978).

Очигледни су мање или више различити услови постанка за испитивање сфалерите и различита рудна лежишта, који су подељени у три групе: ниско, средње и високо температурни регион.

Потврђено је да  $\Sigma(\text{Fe},\text{Mn},\text{Cd})\text{S}$  садржаји нису од користи за објективне закључке због тога што показују значајно више добијене температуре и ниже притиске од оних који су добијени преко FeS садржаја.

Добијени подаци потврђују претпоставке дате од стране Танчић-а (2018), т.ј. да су димензије јединичне ћелије ( $a_0$ ) веома важне, а да сфалерит може бити од користи заједно и као геотермометар и као геобарометар.

## ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Balabin, A. I., Sack, R. O., Thermodynamics of (Zn,Fe)S sphalerite: a CVM approach with large basis clusters, *Min. Mag.*, 64, 2000, pp. 923-943.
2. Barton, P. B., Jr., Toulmin, P., Phase relations involving sphalerite in the Fe-Zn-S system, *Econ. Geol.*, 61, 1966, pp. 815-849.
3. Bethke, P. M., Barton, P. B., Jr., Distribution of Some Minor Elements between Coexisting Sulfide minerals, *Econ. Geol.*, 66, 1971, pp. 140-163.
4. Dangić, A., Sudar, S., Cei, B., Zhu, W., Isotopic composition of sulfur in sulfides in the Pb-Zn ore deposit Kiževak (central Serbia), 13<sup>th</sup> Congress of the Geologist of Yugoslavia, book III, Petrology, mineralogy, geochemistry, Herceg Novi, 1998, pp. 161-169, (in Serbian with English Summary).
5. Field, C. W., Moore, W. J., Sulfur Isotope Study of the "B" Limestone and Galena Fissure Ore Deposits of the U. S. Mine, Bingham Mining district, Utah, *Econ. Geol.*, 66, 1971, pp. 48-62.
6. Janežić, V., Tančić, P. and Dimitrijević, R., X-ray investigations of arsenopyrites from some ore deposits of Serbia, *Bulletin of Geoinstitute*, 38, 2003, pp. 119-127.
7. Janežić, V., Tančić, P., Dimitrijević, R., Arsenopyrite characteristics from the Crveni Breg, Rudnik and Sastavci ore deposits (Serbia), 32<sup>nd</sup> International Geological Congress, Scientific Sessions: abstracts 1-220, G15.03 Crystal structures of minerals: topology and classification, Florence, Italy, 2004, pp. 42-32.
8. Janković, S., Janković-Milosavljević, R., The iron content and formation temperature of sphalerites in some Yugoslavian ore deposits, *Transactions of the Geological and Mining Faculties*, 3, 1955, pp. 19-23. (in Serbian with German Abstract).

at basis of that values to determine the temperature and pressure of its origin. The obtained results are positive and encouraging because the great majority of temperature values of the samples from the Lece, Šuplja Stijena-Brskovo, Crnac, Kiževak, Selanac, Trepča, Janjevo, Prečica and Crveni Breg ore deposits show an agreement with the results which were obtained by other methods/minerals, and also they are better than that obtained by Kullerud's (1953) curve. Obtained pressures for lower temperatures are most probably something higher than real, but also much better than that obtained by equation and diagram which were presented by Lusk and Ford (1978).

There are obvious more or less different formation conditions for the studied sphalerites and various ore deposits, which are separated into three groups: low, middle and high temperature region.

It was confirmed that contents of the  $\Sigma(\text{Fe},\text{Mn},\text{Cd})\text{S}$  are not useful for the objective conclusions because they show considerable higher obtained temperatures and lower pressures than that obtained from the FeS contents.

The obtained data confirmed suppositions by Tančić (2018), i.e. that the unit cell dimensions ( $a_0$ ) are very important, and that sphalerite can be useful together as a geothermometer and as a geobarometer.

9. Krstanović, I., Krstanović, M., Change in unit cell dimensions of sphalerites with the Fe content, and the temperature of formation of some of ours sulphide ore deposits, V Consultations of the Geologists in SFRY, II, Belgrade, 1962, pp. 7-10, (in Serbian with English Abstract).
10. Kullerud, G., The FeS-ZnS system: A geological thermometer, Norsk Geologisk Tidsskrift, 32, 1953, pp. 61-147.
11. Lusk, J., Ford, C. E., Experimental extension of the sphalerite geobarometer to 10 kbar, Am. Min., 63, 1978, pp. 516-519.
12. Nikolić, D., Cvetković, Lj., Đurić, S., Sphalerite from the Crnac Pb-Zn ore deposit, IX Congress of the Yugoslavian Geologists, Sarajevo, 1978, pp. 409-415, Sarajevo. (in Serbian with English Summary).
13. Ohmoto, H., Rye, R. O., Isotopes of sulfur and carbon, In: Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits, Barnes, H. L. (ed.), J. Wiley and Sons, 1979, pp. 509-567.
14. Scott, S. D., Experimental calibration on the sphalerite geobarometer, Econ Geol., 68, 1973, pp. 466-474.
15. Sudar, S., Contents and distribution of the micro-elements at the ore minerals of the Pb - Zn ore deposit Kiževak, Magistrature theses, Faculty of Mining and Geology, Belgrade, 2001, (in Serbian)
16. Sudar, S., Geochemistry of micro and macro elements in sphalerites of the Pb - Zn ore deposit Kiževak (Raška, Serbia), Bulletin of Geoinstitute, vol. 38, Belgrade, 2003, pp. 87-100.
17. Tančić, P., Relation between the crystallographical parameters and the FeS and CuS contents at sphalerites from Kizevak, XII Conference of the Serbian Crystallographic Society, Proceedings, Kragujevac, 2004, 44 p.
18. Tančić, P., Comparison of the crystallographic-chemical characteristics of sphalerites from the Kiževak ore deposit with some other deposits, Part I: Preliminary reconsideration about their formation conditions, Bulletin of Mines, Belgrade, 2018, pp. 101-117.
19. Tančić, P., Sudar, S., Crystallographical-chemical characteristics of sphalerites from the polymetallic Pb-Zn ore deposit Kizevak (Raska, Serbia), Annual of University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", Vol. 47, Sofia, Bulgaria, 2004, pp. 159-163.
20. Tančić, P., Sudar, S., Crystallochemicaly investigations of the sphalerites from the polymetallic Pb-Zn ore deposit Kizevak, Bulletin of Geoinstitute, vol. 40, Belgrade, 2005, pp. 123-140.
21. Tančić, P., Dimitrijević, R., Janežić, V., Arsenopyrites from some ore deposits of Serbia, IX Conference of the Serbian Crystallographic Society, Proceedings, Belgrade, 2001, 35 p.
22. Toulmin, P., III, Barton, P. B., Jr., Wiggins, L. B., Commentary on the sphalerite geobarometer, Am. Min., 76, 1991, pp. 1038-1051.
23. Vaughan, D. J., (ed), Sulfide Mineralogy and Geochemistry, Reviews in Mineralogy and Geochemistry, The Mineralogical Society of America, Virginia, USA, 61, 2006, 714 p.
24. Wiggins, L. B., Craig, J. R., Reconnaissance of the Cu-Fe-Zn-S system: Sphalerite phase relationships, Econ. Geol., 75, 1980, pp. 742-751.

## ОСОБЕНОСТИ ХЕМИЈСКОГ САСТАВА РУДНИЧКИХ ВОДА РУДНИКА УГЉА У КАРПАТО-БАЛКАНИДИМА ИСТОЧНЕ СРБИЈЕ

## CHARACTERISTICS OF CHEMICAL COMPOSITION OF MINE WATERS FROM COAL MINES IN THE CARPATHO-BALKANIDES OF EASTERN SERBIA

DOI: 10.25075/BM.2018.05

Бранко Миладиновић

Branko Miladinović

Геолошки завод Србије

Geological Survey of Serbia

[branko.miladinovic@gzs.gov.rs](mailto:branko.miladinovic@gzs.gov.rs)

[branko.miladinovic@gzs.gov.rs](mailto:branko.miladinovic@gzs.gov.rs)

**Сажетак:** Хидрохемијска испитивања подземних вода која су приказана овим радом, изведена су у свим угљоносним басенима Карпата-балканида источне Србије, који су тренутно у експлоатацији. Ради се о рудницима мрког угља Јасеновац, рудницима Рембас-а, Соко, Боговина, Лубница и руднику антрацитита Вршка Чука. Испитиване су подземне воде у стенама повлате и подине угљоносне серије, као и у угљоносној серији и самом угљоносном хоризонту.

За стene подине и повлате угљоносне серије, карактеристичне су подземне воде хидрокарбонатно-калцијумског састава и мале минерализације. У угљоносној серији и угљоносном хоризонту, воде су хидрокарбонатно-натријумског састава, високе минерализације до 2560 mg/l и са повећаном концетрацијом метана.

Основни процес формирања оваквог хемијског састава подземних вода ( $\text{HCO}_3\text{-Na}$ ), поред јонске измене ( $\text{Ca-Na}$ ), јесте десулфатизација у присуству бактерија, за шта је неопходан извор органских материја (угаљ), сулфатних јона, али и постојање анаеробне средине на шта указује појава метана у гасном саставу воде.

У испитиваним водама постоји правилна измена хемијског састава. Са минерализацијом расте садржај натријумових јона (изразита корелација), као и коефицијент  $r\text{Na}/r\text{Ca}$ . Због сложеног хемијског састава, рудничке воде Сењског Рудника имају сулфатну агресивност на рударске конструкције у јами, а у руднику Лубница постоји амонијачна агресивност.

Постојање хидрохемијске зоналности подземних вода у карстном аквиферу палеорељефа угљоносне серије, указује на успорене процесе водозамене и осебености у формирању прилива рудничких вода.

**Кључне речи:** карпато-балканиди, , угаљ, рудничка вода

**Summary:** Hydro-chemical tests of groundwater presented in this paper have been performed in all coal basins of the Carpatho-Balkanides of eastern Serbia, which are currently in exploitation. These are the brown coal mines Jasenovac, Rembas, Soko, Bogovina, Lubnica and the anthracite mine Vrška Čuka. Groundwater was examined in the walls of the roof and the floor of the carbonaceous series, as well as in the carbonaceous series and carbonaceous horizon itself.

Groundwater of the hydrocarbonate-calcium composition and low mineralization is characteristic for the walls of the roof and floor of the carbonaceous series. In the carbonaceous series and the carbonaceous horizon, water

is of a hydrocarbonate-sodium composition, of high mineralization up to 2560 mg/l and with increased methane concentration.

The basic process for the formation of such a chemical composition of groundwater ( $\text{HCO}_3\text{-Na}$ ), in addition to ion exchange ( $\text{Ca-Na}$ ), is desulfurization in the presence of bacteria, for which a source of organic matter (sulphate) is necessary, as well as sulphate ions, and the presence of anaerobic which is indicated by the appearance of methane in the gas composition of water.

In the tested waters there is a correct change in the chemical composition. With mineralization, the content of sodium ions (extreme correlation) increases, as well as the  $r\text{Na}/r\text{Ca}$  coefficient. Due to the complex chemical composition, the mine waters of the Senjski Rudnik have sulphate aggressiveness on the mining structures in the pit, and in the Lubnica mine - there is ammonia aggression.

The existence of a hydro-chemical zoning of groundwater in the karst aquifer of the paleo surface of the carbon series indicates the slow process of water-exchange and the peculiarities in the formation of the inflow of mine waters.

**Key words:** carpatho-balkanides, coal, mine water

## УВОД

Експлоатација камених и мрких угљева у Карпато-балканидима источне Србије, обавља се тренутно у шест угљоносних басена. Дуж западног обода Карпато-балканита, откопава се угљ у лежишту Јасеновац и лежиштима Рембас-а, затим у централном делу Карпато-балканита у лежиштима Соко, Боговина и Лубница, и источном ободу Карпато-балканита у лежишту угља Вршка Чука приказано на слици 1. Лежиште угља Вршака Чука је најстарије, припада лијасу ( $J_1$ ), лежиште Боговина је олигоценске старости ( $O_1$ ), а сва остала лежишта угља су миоценске старости (M).

У оквиру наведених лежишта, активан је по један рудник угља, осим у басену Рембас-а где су у раду четири јаме: Стромостен, Јеловац, Равна Река, Сењски Рудник.

Експлоатационе резерве угља су највеће у лежишту Соко ( $38,3 \times 10^6$  t). Истовремено, јама рудника Соко је тренутно најоводњенија са приливима од  $Q_{\text{max}} = 33 \text{ l/s}$  [6]. Хидрохемијским испитивањима рудничких вода у свим активним рудницима на простору Карпато-балканита источне Србије, утврђено је да су у угљоносној серији и угљоносном хоризонту, формиране подземне воде сложеног хемијског састава.

## ГЕОЛОШКЕ И ХИДРОГЕОЛОШКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ ЛЕЖИШТА УГЉА

У басену Јасеновца, угљоносна серија је горње миоценске старости ( $M_3$ ). Посебно обележје овом простору даје Ридањско-крепољинско-сењска зона раседања приказано на слици 2, која је условила кретање навлаке мезозојских

## INTRODUCTION

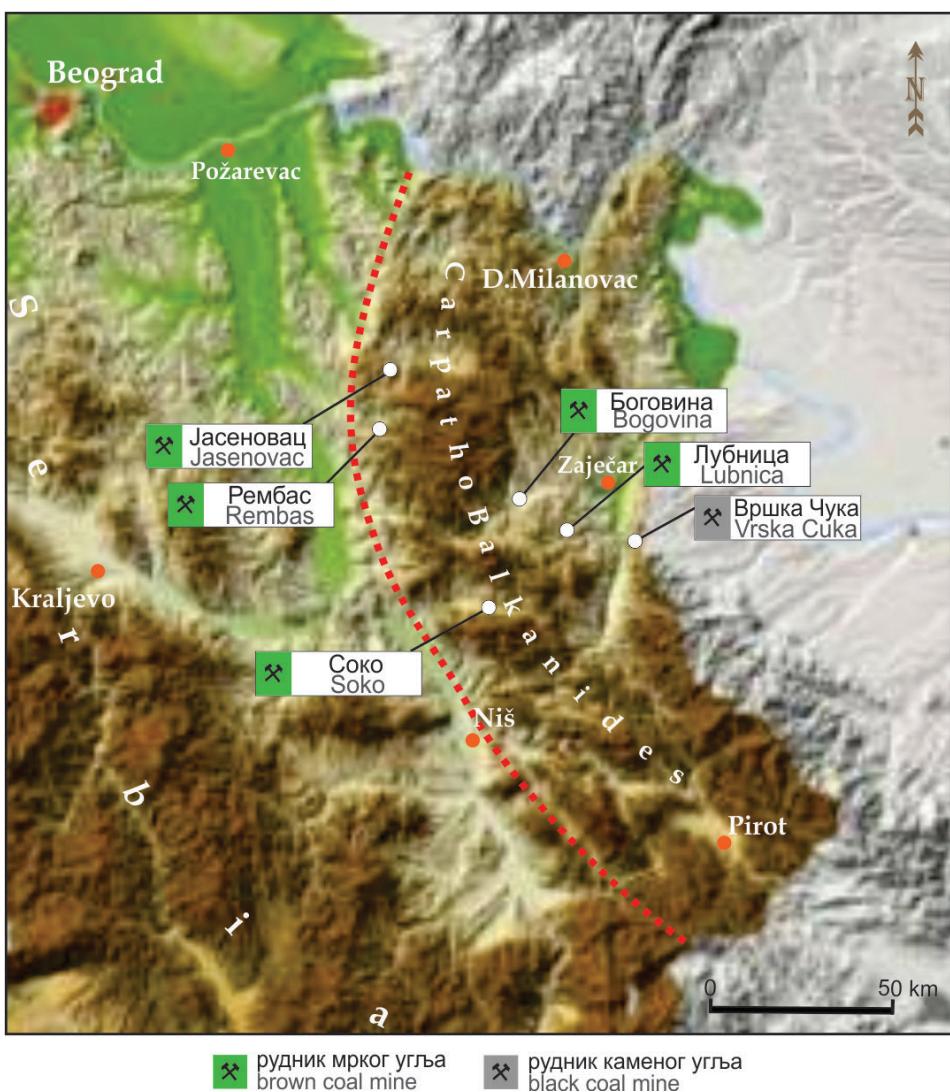
Exploitation of hard and brown coal in the Carpatho-Balkanides of eastern Serbia, is currently being carried out in six coal basins. Along the western rim of the Carpatho-Balkanides, coal is excavated in the Jasenovac deposit and the Rembas deposit, then in the central part of the Carpatho-Balkanides in the Soko, Bogovina and Lubnica deposits, and the eastern periphery of the Carpatho-Balkanides in the coal deposit Vrška Čuka shown in the figure 1. The coal deposit Vrška Čuka is the oldest, it belongs to Lias ( $J_1$ ), the Bogovina deposit is of the Oligocene age (Ol), and all other coal deposits are of the Miocene age (M).

Within the mentioned deposits, one coal mine is active, except in the Rembas basin where four pits are in operation: Strmosten, Jelovac, Ravna Reka, Senjski Rudnik.

Coal exploitation reserves are the largest in the Soko deposit ( $38,3 \times 10^6$  t). At the same time, the pit of the Soko mine is currently the most drained, with inflows from  $Q_{\text{max}}=33 \text{ l/s}$  [6]. By hydro-chemical tests of the mine waters in all active mines in the area of the Carpatho-Balkanides of eastern Serbia, it has been established that, in the carbonaceous series and the carbonaceous horizon, the groundwaters of the most complex chemical composition were formed.

## GENERAL GEOLOGICAL AND HYDROGEOLOGICAL CHARACTERISTICS OF COAL DEPOSITS

In the Jasenovac basin, the carbonaceous series is of the late Miocene age ( $M_3$ ). A special characteristic of this area originates from the Ridanj-Krepoljin-Senjski-Rudnik fault zone shown in the figure

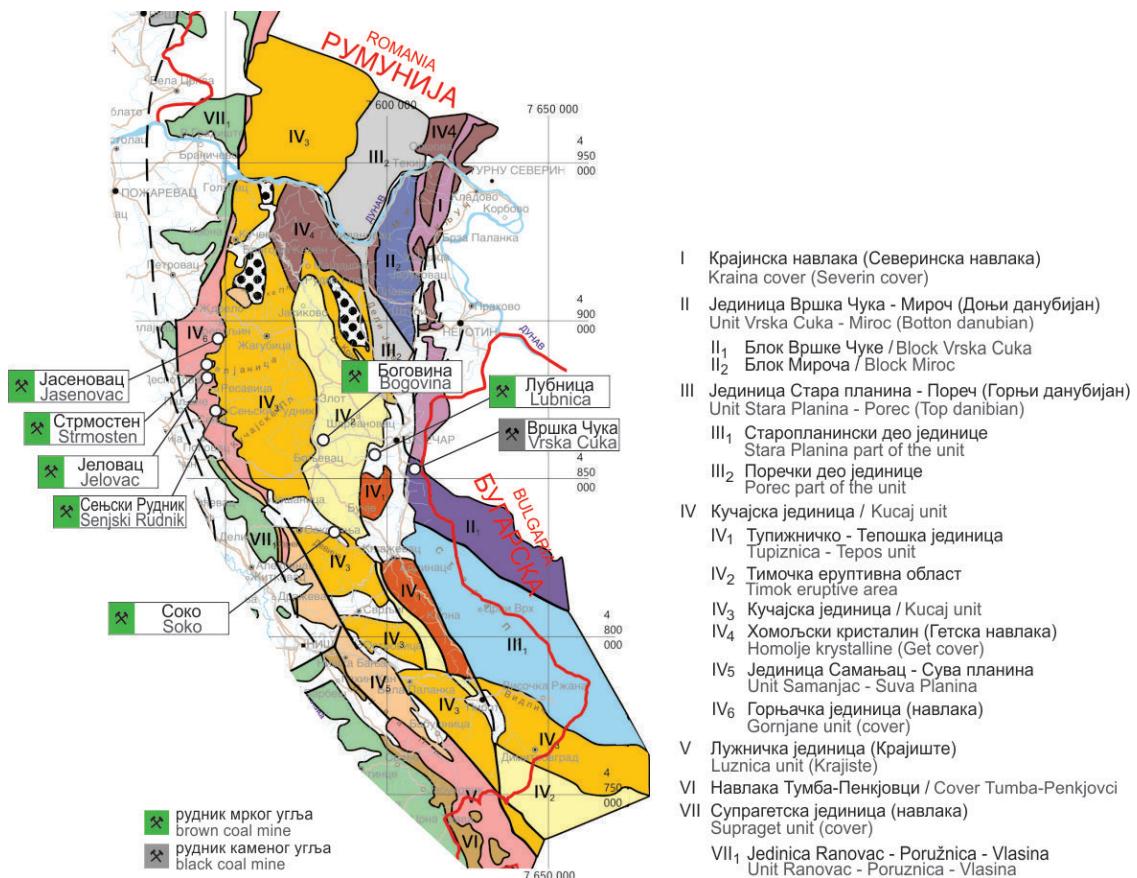


кречњака преко миоценске угљоносне серије [5]. Пелеорељеф угљоносној серији чине аутотони црвени пермски пешчари (P), карбонатне стене тријаса ( $_1T_1$ ,  $_2T_1$ ,  $T_2^1$ ) и јуре (J), као и андезити (α). Сам угљени слој је подељен слојем глине дебљине 2-7,8 m на два дела.

У хидрогеолошком погледу, најзначајније приливе рудничких вода у рударске радове, условљавају карстне подземне воде које се дренирају из алохтоних кречњака повлате угљоносне серије приказано на слици 3. На формирање прилива, значајан утицај имају и стари рударски радови који се не одводњавају. Укупни приливи рудничких вода у периоду 2007-2012. године, осцилирали су у границама 3-10,2 l/s [6].

2, which caused the movement of the Mesozoic limestone cover over the Miocene carbonaceous series [5]. Paleo surface of the carbonaceous series is made of autochthon red Permian sandstone (P), carbonate walls of Triassic ( $_1T_1$ ,  $_2T_1$ ,  $T_2^1$ ) and Jurassic (J), as well as andesite (α). The carbonic layer itself is divided by a clay layer of 2-7,8 m thickness in two parts.

In hydrogeological terms, the most important inflows of mine waters into mining works are conditioned by karst groundwaters that are drained from the allochthonous limestone shelves of the carbonaceous series shown in figure 3. Old mining works that are not drained also influence the formation of inflows. Total inflows of mine waters in the period 2007-2012 oscillated within the limits of 3-10,2 l/s [6].



Слика / Figure 2, Локације лежишта камених и мрког угља унутар издвојених структурних јединица Карпато-балканада источне Србије по Крстићу (2003) / Locations of deposits of hard and brown coal within the separated structural units of the Carpatho-Balkanides of eastern Serbia according to Krstić (2003)

У ресавско моравском басену (Рембас), ургонски кречњаци и дакитоандезити олигоцења, чине палеорељеф угљоносној серији. Сами угљоноснији слој припада по старости бурдигалу и хелвету ( $M_1^2$ ,  $M_2^1$ ). Угљени слој који се на појединим местима раслојава на два или три слоја, лежи преко базалне грубо кластичне серије. Повлату угљеног слоја изграђују лапорци и глинци.

Услед сложених тектонских процеса који су се одвијали са навлачењем пермских пешчара, повлатна серија угљеног слоја је често тектонски редукована, а у поједином деловима је дошло и до редукције и самог угљеног слоја. Зато се данас црвени пермски пешчари или јурски кречњаци срећу у самој повлати угљеног слоја [7].

У хидрогеолошком погледу, црвени пермске пешчаре карактерише слаба водообилност са  $T=2,29-6,53 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  [12].

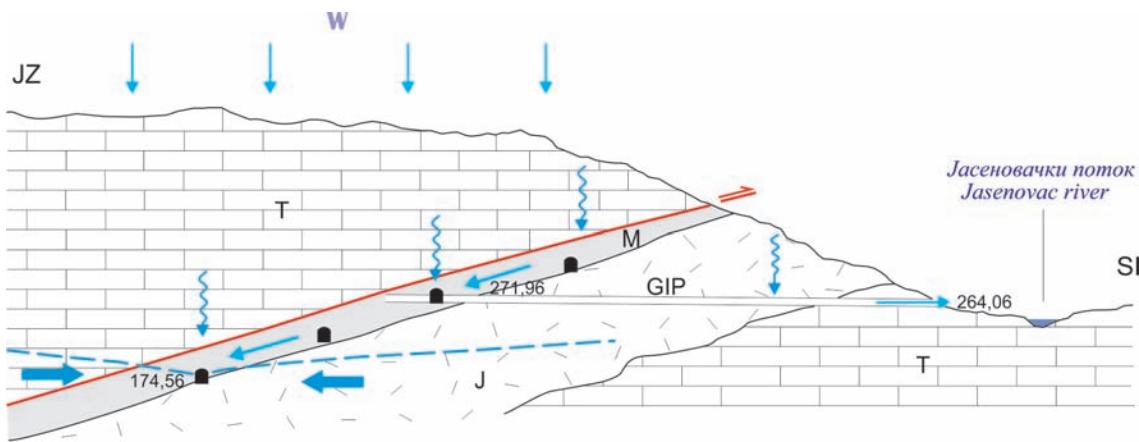
Најзначајнији утицај на приливе у рударске просторије јаме Стромостен и Јеловац, има карстна издан која је формирана у ургонским

In the Resava-Morava basin (Rembas), Urgonian limestone and dacitoandesites of the Oligocene, make the paleo surface of the carbonaceous series. The carbonaceous series itself belongs to the Burdigalian and Helvetic age ( $M_1^2$ ,  $M_2^1$ ). The carbonate layer, which is split into two or three layers in some places, lies across the basal roughly clastic sediments. The roof of the carbonate layer is made out of marl and claystone.

Due to the complex tectonic processes that took place with the pulling of Permian sandstones, the roof series of the carbon layer was often tectonically reduced, and there was also the reduction of the carbon layer itself in some parts. Therefore, today, red Permian sandstone or Jurassic limestone meet in the roof of the coal layer itself [7].

In the hydrogeological sense, the red Permian sandstones are characterized by poor water-redundancy  $T=2,29-6,53 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  [12].

The most significant influence on the inflow into the mining sites of the Strmosten and Jelovac pits, has a karst aquifer that was formed in the Urgonian limestone of the paleo surface of the carbona-



Слика 3, Шема формирања прилива рудничких вода у руднику мрког угља Јасеновац  $M$  – угљоносна миоценска серија;  $J$  – карбонатна серија јуре (аутохтон);  $T$  – тријаски кречњаци (алохтон); навлака

Figure 3, Scheme of formation of the inflow of mine waters in the brown coal mine Jasenovac  $M$ –carbonaceous Miocene series;  $J$ –carbonaceous Jurassic series (autochthon);  $T$ –Triassic limestones (allochthon); cover

кречњацима палеорељефа угљоносне серије. Рударским радовима испод локалног ерозионог базиса Водничког потока и реке Ресаве, ови кречњаци су захваћени на дужини од преко 2 km. Тиме је условљено дренирање карстне издане које је у периоду 1996-2012. год., износило у распону  $Q=1\text{-}30 \text{ l/s}$  [6]. Коефицијент трансмисибилности кречњака у зони рударског окна SIO-1 је  $T=1,25 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$  [8].

На оводњеност лежишта угља Сењски Рудник, највећи утицај има карстна издана формирана у подвојеним масама алохтоних кречњака титона које се јављају у повлати овог лежишта [9]. Кречњака маса Стенке код насеља Сењски Рудник је захваћена рударским просторијама јаме Сењски Рудник и тиме су условљени приливи који су у периода 1987-2012. године осцилирали од 3,7 до 13,6 l/s [6].

Угљоносна серија у басену Соко је средње миоценске старости ( $M_2$ ) и лежи трансверсивно преко мезозојских карбонатних творевина. Угљоносни хоризонт поред слоја мрког угља просечне дебљине 23 m, изграђују и лапоровито-песковите глине, лапорци и угљевите глине [1]. Повлатни хоризонт угљоносне серије је представљен песковитим глинама, лапорцима, угљевитим глинама и танким прослојцима пескова.

У хидрогеолошком погледу, угљоносна миоценска серија представља слабо водоносну средину са коефицијентом филтрације у границама  $k=1,1 \times 10^{-7}\text{-}1,1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$  и трасмисибилности од

$T=1,25 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$  [8].

ceous series. Due to the mining works under the local erosion base of the Vodnik creek and the Resava river, these limestones are affected at a length of over 2 km. This caused the drainage of the karst aquifer which in the period 1996-2012 was in the range of  $Q=1\text{-}30 \text{ l/s}$  [6]. The limestone transmissibility coefficient in the mining shaft zone SIO-1 is  $T=1,25 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$  [8].

The drainage of the coal deposit Senjski Rudnik is mostly influenced by the karst aquifer formed in the split masses of Tithonian allochthon limestones which occur in the shelves of this deposit [9]. The limestone mass of Stenka near Senjski Rudnik is encompassed by the mining sites of the Senjski Rudnik pit and that caused the inflows which in the period 1987-2012 went from 3,7 up to 13,6 l/s [6].

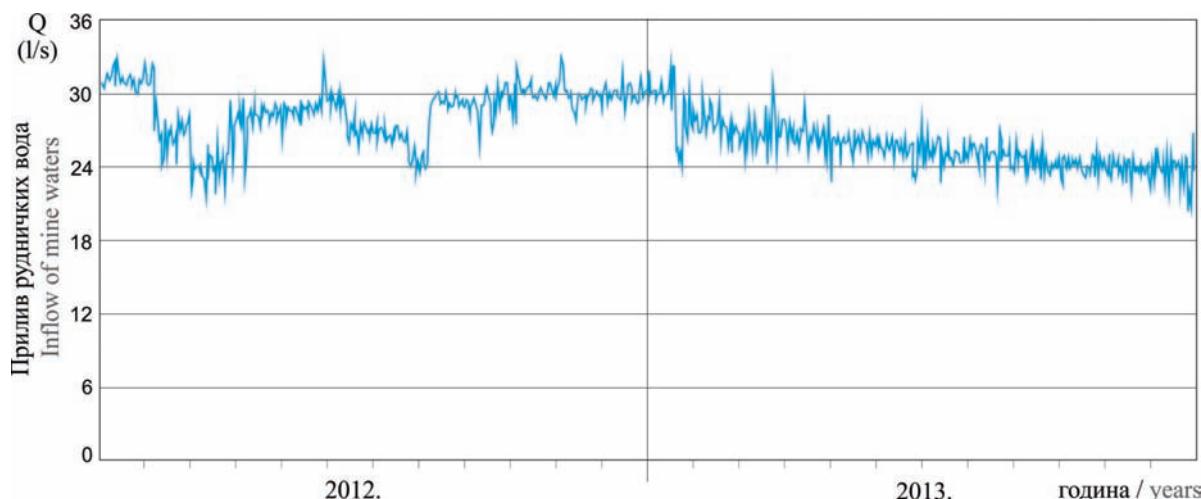
The carbonaceous series of the **Soko** basin is of the mean Miocene age ( $M_2$ ) and lies transversely through Mesozoic carbonate products. The carbonaceous horizon, in addition to the layer of brown coal with an average thickness of 23m, is built by marl-sandy clay, marl and coal clay [1]. The roof horizon of the carbonaceous series is represented by sandy clays, marls, coal clay and thin layers of sands.

In a hydrogeological sense, the carbonaceous Miocene series represents a poorly water-bearing environment with  $k=1,1 \times 10^{-7}\text{-}1,1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$  and  $T=6,2 \times 10^{-8}\text{-}4,9 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  [2]. Lesser phenomena of groundwater in mining works are related exclusively to the lens of sand and the fault zone.

$T=6,2 \times 10^{-8} - 4,9 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  [2]. Мање појаве подземних вода у рударским радовима су везане искључиво за сочива песка и раседне зоне.

Најзначајнији утицај на приливе рудничких вода у јаму рудника Соко има карстна издана. Она је формирана у ургонским кречњацима дуж јужног обода лежишта угља. Рударске просторије су на значајном простору изведене кроз ове кречњаке (TN-1z, VN-1z, ETN-12 и др.) и тиме су изазвани приливи из карстне издани како је приказано на слици 4. Ово је тренутно најоводњенији рудник угља са активном експлоатацијом у Карпато-балканидима источне Србије [6].

The most significant influence on the inflow of mine waters into the pit of the Soko mine has a karst aquifer. It is formed in the Urgonian limestone along the southern edge of the coal deposits. The mining sites are in a significant area derived through the following limestones (TN-1z, VN-1z, ETN-12 etc.) thus causing the inflows from the karst aquifer (figure 4). This is currently the most drained coal mine with active exploitation in the Carpatho-Balkanides of eastern Serbia [6].



Слика 4, Дијаграм прилива карстних подземних вода у рудник Соко, 2012-2013.  
Figure 4, Chart of inflows of karstic groundwaters into the Soko mine during 2012-2013

Лежиште угља Боговина је олигоценске старости ( $Ol_3$ ) и формирано је у два раздвојена поља: западно и источно поље. У западном пољу, експлоатација мрког угља је завршена 1995. године. У источном пољу, палеорељеф угљоносној серији чине вулканогене творевине горње креде ( $\Theta K_3$ ). У угљоносној серији се јављају два угљена слоја, при чему доњи (главни угљени слој) има континуално распострањење. Угљени слојеви су међусобно раздвојени серијом лапората [4].

Преко олигоценске угљоносне серије, трансгресивно леже млађи седименти који по старости одговарају горњем миоцену и плиоцену ( $M_3, Pl$ ).

Најзначајнији утицај у формирању прилива рудничких вода у руднику Боговина-источно поље, условљавају подземне воде које се дренирају из повлатних седимената угљоносне серије. Ради се о пукотинској издани која је формирана у конгломератима и збијеној издани у

The coal deposit Bogovina is of Oligocene age ( $Ol_3$ ) and it is formed into two separate fields: the western field and the eastern field. In the western field, the exploitation of brown coal was completed in 1995. In the eastern field, the paleo surface of the carbonaceous series consists of the volcanic creations of the Late Cretaceous period ( $\Theta K_3$ ). In the carbonaceous series there are two coal layers, with the lower (the main coal layer) having a continuous distribution. Coal layers are separated by a series of marls [4].

Through the Oligocene carbonaceous series, young sediments, which according to age correspond to the Late Miocene and Pliocene, lie transgressively ( $M_3, Pl$ ).

The most significant influence in the formation of the inflow of mineral waters in the Bogovina-eastern field is conditioned by groundwaters which are drained from the roof sediments of the carbonaceous series. These include a creviced aquifer that

песковима ( $M_3$ ,Pl). Приливи рудничких вода у периоду 2011-2012. год., варирали су од 4,9 до 8,7 l/s [6].

Лежиште угља Лубница припада по старости средњем миоцену ( $M_2^1$ ). Палеорељеф угљоносној серији чине стене горње креде и то вулканиклистити ( $\Theta K_2^3$ ) и андезитско-вулканогено-седиментне стене ( $K_2^{2-3}$ ).

Угљоносни хоризонт чине два слоја угља који су раздвојени лапорцима дебљине и до 60-70 m. Трансгресивно преко угљоносне серије, леже седименти средњег и горњег миоцена ( $M_{2,3}$ ).

У хидрогеолошком погледу, лежиште угља Лубница је са најмањом водообилношћу од свих анализираних лежишта угља Карпато-балканida источне Србије [6]. Пукотинска издан која је формирана у пешчарима и лапорцима угљоносне серије, условљава јако мале приливе рудничких вода у рударске радове и то испод 0,2 l/s (2012-2013. год.).

Лежиште каменог угља Вршка Чука (део Мала Чука), карактерише сложена генеза угљених слојева, а посебно обележје му даје интензивна пликативна и руптурна тектоника [4]. Угљоносна серија је лијаске старости дебљине која варира од 140 до 170 m. У основи је изграђују конгломерати, бречо-конгломерати и крупнозрни пешчари. Угљени хоризонт чине три слоја угља који се гранају и притом су јако променљиве дебљине. У повлати угљеног хоризонта се јављају алеврити развијени у „грестенској“ фази, затим глинци, пешчари, шкриљци и песковити кречњаци. Бројним уздужним и попречним раседима и дислокацијама у односу на антиклиналну структуру Вршке Чуке, угљоносна серија је испресецана, а мањи и већи скокови између раскомаданих тектонских блокова, довели су до денивелације угљених слојева [11].

У хидрогеолошком погледу, угљоносна серија представља хидрогеолоши комплекс водопропусних и водонепропусних стена. Подземне воде из водопропусних творевина (конгломерати, бречо-конгломерати, пешчари и песковити кречњаци), условљавају приливе у рударске радове у виду мањих процуривања и капања. Најзначајнији приливи од  $Q \leq 0,6$  l/s [6], јављају се у ускопу U-50 (к.215). Укључујући и дотицаје из стarih рударских радова (рударско окно „Аврамица“, орт к.121,6), укупни приливи рудничких вода у руднику Вршка Чука су релативно уједначени и износе око 1,3 l/s (2001-2012.).

was formed in conglomerates and a compact aquifer in sands ( $M_3$ ,Pl). Inflows of mine waters in the period 2011-2012 went from 4,9 up to 8,7 l/s [6].

The coal deposit Lubnica belongs to the mean Miocene, according to its age ( $M_2^1$ ). The paleo surface of the carbonaceous series consists of Late Cretaceous walls such as volcaniclastic ( $\Theta K_2^3$ ) and andesite-volcanogenic - sedimentary walls ( $K_2^{2-3}$ ).

Carbonaceous horizon consists of two coal layers which are separated by marls whose thickness goes up to 60-70 m. Sediments of Late and Mean Miocene ( $M_{2,3}$ ) lie transgressively along the carbonaceous series.

In hydrogeological sense, the coal deposit Lubnica has the least water-redundancy of all the analyzed coal deposits of Carpatho-Balkanides of eastern Serbia [6]. The creviced aquifer which is formed in sandstones and marls of the carbonaceous series, causes very few inflows of mine waters into the mining works and they are below 0,2 l/s (2012-2013.).

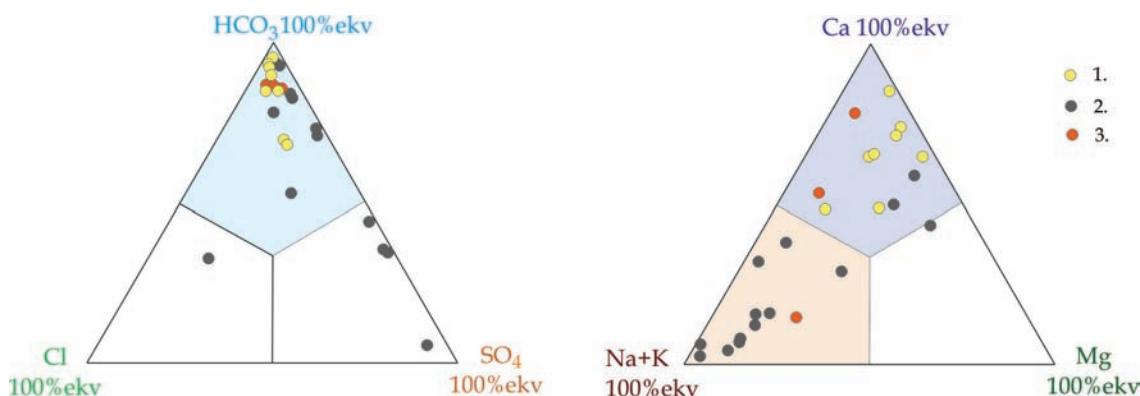
The hard coal deposit Vrška Čuka (a part of Mala Čuka), is characterized by a complex genesis of coal layers, and a special characteristic is provided by the intense plicated and ruptured tectonics [4]. The carbonaceous series is of Lias age and of thickness which goes from 140 to 170 m. In its foundation, it is made of conglomerates, breccia conglomerates and large-scale sandstones. The carbonaceous horizon consists of three layers of coal which spread out and are of very variable thicknesses. In the roof of the carbonaceous horizon there is fly ash developed in the „Gresten“ phase, as well as claystones, sandstones, shales and sandy limestones. Compared to the anticline structure of Vrška Čuka, the carbonaceous series is intersected by numerous longitudinal and transverse faults and dislocations, whereas bigger and smaller leaps between torn tectonic blocks, led to the denivelation of coal layers [11].

In hydrogeological sense, the carbonaceous series represent a hydrogeological complex of permeable and water-repellent walls. Groundwaters from the permeable creations (conglomerates, breccia conglomerates, sandstones and sandy limestones), cause inflows into the mining works in the form of minor leaking and dripping. The most significant inflows from  $Q \leq 0,6$  l/s [6], appear in raises U-50 (k.215). Including inflows from old mining works (mining shaft „Avramica“, ort k.121,6), total inflows of mine waters in the Vrška Čuka mine are relatively uniform and they are about 1,3 l/s (year 2001-2012).

## РЕЗУЛТАТИ ХИДРОХЕМИЈСКИХ ИСПИТИВАЊА РУДНИЧКИХ ВОДА

Хидрохемијским испитивањима у рудницима угља Карпато-балканита источне Србије, подједнаки третман су имале све рудничке воде, како оне које се јављају из стена угљоносне серије, тако и из околних стена. Резултати ових испитивања су указала да најсложенији хемијски састав имају подземне воде које су формиране у угљоносном хоризонту приказано на слици 5. Ове воде у катјонском саставу припадају натријумској групи, а у анјонском хидрокарбонатној или сулфатној групи.

По калсификацији Алекина, ради се углавном о водама које су:  $\text{HCO}_3\text{-Na}$ ,  $\text{SO}_4\text{-Na}$ ,  $\text{SO}_4\text{-Mg-Na}$ ,  $\text{SO}_4\text{-HCO}_3\text{-Mg-Na}$  или  $\text{Cl-Na}$  типа, са минерализацијом која обично прелази 1000 mg/l како је приказано у табели 1. Шема формирања оваквог хемијског састава рудничких вода у подручју анализираних лежишта угља, приказан је сликом 6.



Слика 5, Фереов дијаграм испитиваних рудничких вода у лежиштима угља Карпато-балканита источне Србије

Figure 5, Fere's diagram of tested mine waters in coal deposits of Carpatho-Balkanides of eastern Serbia

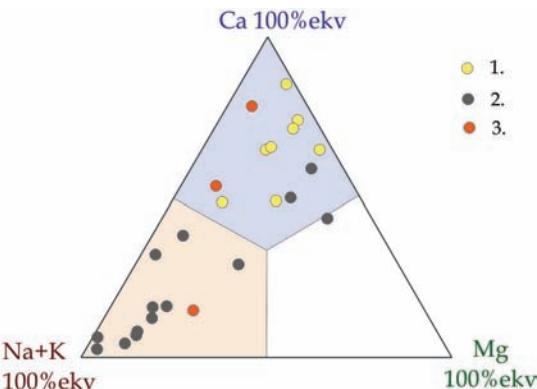
**Тумач / Legend:** 1.рудничке воде из повлатних стена угљоносног хоризонта / mine waters from the roof walls of the carbonaceous horizon, 2. воде из угљоносног хоризонта / waters from the carbonaceous horizon, 3. воде из стена по-дине / waters from the walls of floors

Формирање оваквог хемијског састава рудничких вода је првенствено везано за слабе филтрационе карактеристике угљоносне серије и спорих процеса водозамене који се одвијају у њима. Ово се посебно односи за делове лежишта угља који се налазе испод локалних ерозионих базиса површинских токова. Један од карактеристичнијих примера сложеног хемијског састава руд-

## RESULTS OF HYDRO-CHEMICAL TESTS OF MINE WATER

Hydro-chemical tests in the coal mines of the Carpatho-Balkanides of eastern Serbia, equally treated all mine waters, those that emerge from the walls of the carbonaceous series, as well as the ones from neighboring walls. The results of these tests pointed out that the most complex chemical composition is in the groundwaters which are formed in the carbonaceous horizon shown in the figure 5. These waters, in cationic composition, belong to the sodium group, and in anionic – to the hydrocarbonate or sulphate group.

According to the Alekin classification, these are mostly waters which are:  $\text{HCO}_3\text{-Na}$ ,  $\text{SO}_4\text{-Na}$ ,  $\text{SO}_4\text{-Mg-Na}$ ,  $\text{SO}_4\text{-HCO}_3\text{-Mg-Na}$  or  $\text{Cl-Na}$  type, with mineralization which usually exceeds 1000 mg/l shown in the table 1. Scheme of the formation of such a chemical composition of mine waters in the area of analyzed coal deposits, is shown in the figure 6.



The formation of such a chemical composition of mine waters is primarily related to the poor filtration characteristics of the carbonaceous series and the slow process of water-exchange that occur in them. This particularly relates to the parts of coal deposits that lie beneath the local erosion bases of surface flows. One of the more prominent examples of the complex chemical composition of

*Табела 1. Основни параметри хемијског састава испитиваних*

*рудничких вода у Карпато-балканидима источне Србије*

*Table 1 Basic parameters of the chemical composition of the tested  
mine waters in Carpatho-Balkanides of eastern Serbia*

Хемијски параметар Chemical parameters	pH	Минерал. Mineralis.	Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Тврдоћа Hardness
Рудник угља / Coal mines			mg/l							°dH
<b>Јасеновац / Jasenovac (кота/level m)</b>										
Повлата / Roof (400)	6,9	248,8	6,0	74,2	12,4	257,4	12,6	17,0	4,0	13,2
Угљ. хориз. / Coal bed (256)	6,6	647,2	23,8	145,8	48,6	531,3	160	7,7	7,0	31,6
Угљ. хориз. / Coal bed (180,6)	7,69	742,3	21,27	130,0	49,9	282,4	395,7	4,9	1,7	29,8
<b>Стрмостен / Strmosten</b>										
Повлата / Roof (287)	7,4	236,7	14,9	61,34	10,33	247,66	7,97	12,0	8,42	10,95
Угљ. хориз. / Coal bed (45)	6,8	1113	253,46	160,32	19,45	1037,0	145,03	21,27	3,51	26,88
Подина / Floor (45)	7,95	436,29	165,07	21,04	20,06	372,1	32,48	14,18	0,46	7,56
Подина / Floor (45)	7,76	408,18	65,98	84,88	9,12	423,35	14,05	22,68	3,27	13,94
<b>Јеловац / Jelovac</b>										
Повлата / Roof (287)	7,4	311,66	20,85	81,7	13,4	366	8,4	5,3	0,92	14,45
Угљ. хориз. / Coal bed (265)	7,6	1139,5	426,5	18,7	25,4	1220,0	47,5	18,3	0,5	8,43
Подина/Floor (190,7)	7,3	313,3	8,72	98,4	5,02	324,52	18,18	14,2	9,1	14,92
<b>Сењски Рудник/Senjski Rudnik</b>										
Повлата / Roof (439)	7,67	340,0	22,31	81,16	24,32	268,4	52,17	26,94	1,09	16,94
Угљ.хориз. / Coal bed (331)	7,87	1381,2	381,8	54,1	34,04	500,2	648,5	14,18	2,59	15,4
Подина / Floor (222)	8,30	1423,4	501,4	45,08	37,69	1579,9	24,0	26,94	11,34	14,98
<b>Соко/Soko</b>										
Повлата / Roof (380)	7,61	251	3,2	85,8	7,5	285,5	1,9	9,2	2,57	13,7
Угљ. хориз. / Coal bed (201)	7,90	1611	514,7	38,1	36,5	854,0	344,5	163,1	94,2	13,7
Угљ. хориз. / Coal bed (84)	7,96	2490	966,5	24,0	10,3	2037,4	271,93	127,6	87,8	5,7
<b>Боговина / Bogovina</b>										
Повлата / Roof (200)	7,5	383,61	64,63	74,14	12,03	427,0	1,30	17,72	2,8	15,13
Угљ. хориз. /Coal bed (4,9)	8,2	761,2	299,07	18,5	2,12	756,0	44,5	25,2	3,7	3,1
Угљ. хориз. /Coal bed (15,2)	7,5	1399	452,24	157	9,69	1236	140,7	31,5	4,5	24,2
<b>Лубница / Lubnica</b>										
Повлата / Roof (209)	7,6	198,8	6,1	54,0	9,7	158,6	35,0	16,0	-	9,8
Угљ. хориз. / Coal bed (68)	7,0	2560	716,5	169	90,5	2880	128,3	39,4	5,9	44,8
Угљ. хориз. / Coal bed (65)	7,6	2074	644,9	124	48	708	244,5	664,8	108,6	28,5
<b>Вршка Чука/Vrska Cuka</b>										
Повлата / Roof (290)	7,1	392,8	40,2	77,4	26,2	402,6	29,1	19,9	2,0	16,8
Угљ. хориз. / Coal bed (209)	6,7	1484,6	54,9	232,0	142,0	732,0	680,0	12,8	2,9	65,1
Угљ. хориз. / Coal bed (121,6)	7,1	2190,9	407,3	233,5	137,5	1811,9	500,0	17,7	3,76	64,3

ничких вода, утврђен је у руднику антрацита Вршка Чука приказано на слици 7.

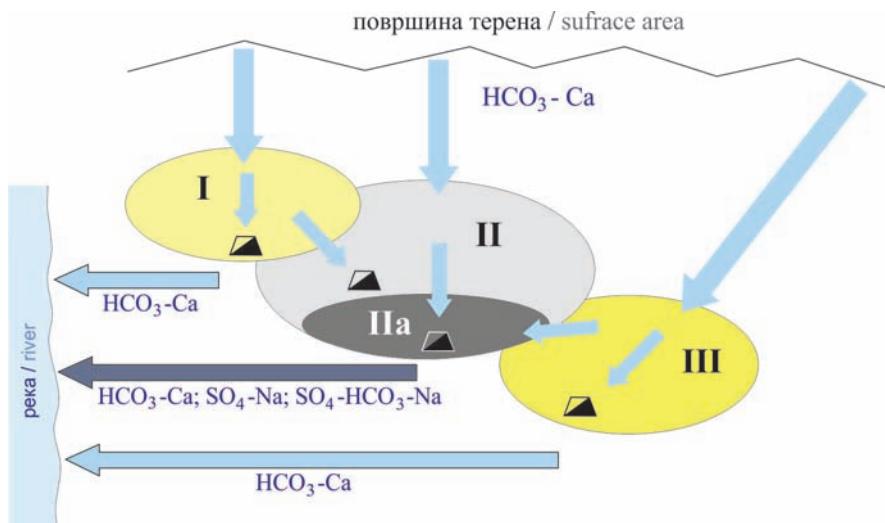
Рудничке воде са највишом минерализацијом и то од 2190 mg/l, констатоване су у старим рударским радовима који се налазе испод локалног ерозионог базиса Аврамичког потока (к.121). У том делу владају отежани процеси водозамене, а рудничке воде су хидрокарбонатне класе и са повећаним садржајем јона сулфата услед оксидације сумпора у угљу. У катјонском саставу преовлађују јони натријума, приказано у табели 1.

Карактеристични примери постоје и у лежишту угља Стрмостен, Јеловац и Соко, где се приливи

the mine waters was determined in the anthracite mine Vrška Čuka shown in the figure 7.

Mine waters with the highest mineralization of 2190 mg/l, were found in old mining works that are located below the local erosion base of the Avramica stream (k.121). In this part, difficult processes of water-exchange are dominant, and mine waters are of a hydrocarbonate class and with an increased content of ion sulfate due to oxidation of sulfur in coal. In cationic composition, ions of sodium prevail, shown in the table 1.

Characteristic examples could be found in the coal deposits Strmosten, Soko and Jelovac, where the in-

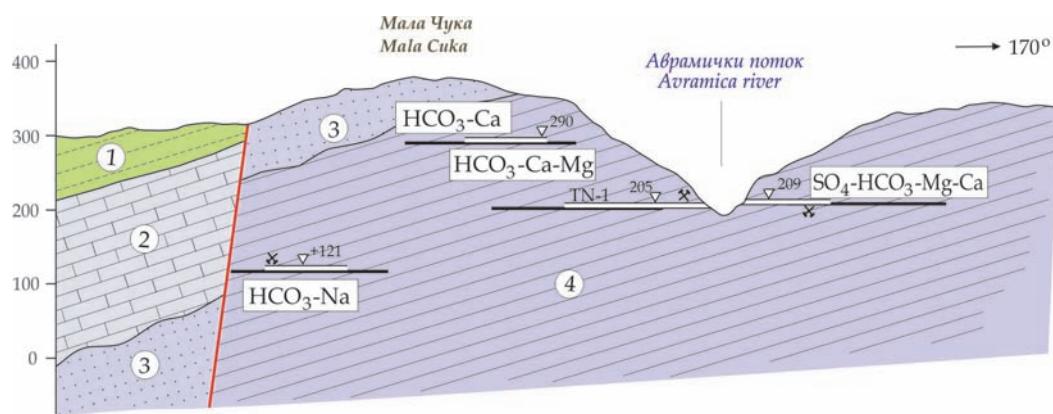


Слика 6, Шема појаве хидрохемијских типова рудничких вода у рудницима камених и мрког угља источне Србије  
 Figure 6, Scheme of the occurrence of hydro-chemical types of mine waters in the mines of hard and brown coals of eastern Serbia

**Тумач / Legend:** I – повлата угљоносне серије / roof of coal beds, II – угљоносна серија / coal beds, IIa – угљоносни слој / layer of coal, III – подина угљоносне серије / floor of coal beds

рудничких вода формирају на рачун дренирања карстног аквифера. За овај аквифер, карактеристичан је хидрокарбонатно-калцијумски типа вода мале минерализације. Међутим, ближе контакту са угљоносном серијом, утврђено је да подземне воде имају нешто другачији састав и да припадају хидрокарбонатно-натријумском типу.

flow of mineral waters is formed due to the drainage of the karst aquifer. For this aquifer, a hydrocarbonate-calcium type of water with a low mineralization is characteristic. However, by inspecting a carbonaceous series closely, it was determined that groundwaters had a little bit of a different composition and that they belonged to the hydrocarbonate-sodium type.



Слика 7, Шема хидрогеохемијског модела лежишта антрацита Вршка Чука  
 Figure 7, Scheme of the hydrogeochemical model of the anthracite deposit Vrška Čuka

**Тумач / Legend:** 1. творевине доње креде / creations of the Early Cretaceous, 2. кречњаци малма / limestones of Late Jurassic, 3. творевине додера / creations of Middle Jurassic, 4. угљоносна серија лијаса / the carbonaceous series of Lias

У погледу садржаја микроелемената у испитиваним рудничким водама, констатован је релативно мали број елемената са повећаним вред-

ностима. У погледу садржаја микроелемената у испитиваним рудничким водама, констатован је релативно мали број елемената са повећаним вредностима. Max-

ностима. Максимални садржаји гвожђа су констатовани у рудничким водама рудника Вршка Чука – поткоп „Св. Ђорђе“ ( $Fe=6,1 \text{ mg/l}$ ). Гвожђе у рудничким водама прати и манган, а највећи садржај је регистрован такође у руднику Вршка Чука ( $Mn=0,167 \text{ mg/l}$ ).

Без обзира на велику покретљивост арсена (As) у природи [10], у рудничким водама је констатован до  $0,247 \text{ mg/l}$  (рудник Боговина). Олово је максимално констатовано од  $Pb=0,024 \text{ mg/l}$  (рудник Јеловац), стронцијум  $Sr=5,01 \text{ mg/l}$  (рудник Лубница), литијум  $Li=0,762 \text{ mg/l}$  (рудник Лубница), алуминијум  $Al=4,45 \text{ mg/l}$  (рудник Боговина).

## ДИСКУСИЈА РЕЗУЛТАТА

На основу добијених резултата хидрохемијских испитивања рудничких вода, констатоване су одређене правилности у формирању хемијског састава, с тим да је за угљоносну серију карактеристичан натријумски и сулфатни тип вода и повишена минерализација.

За основни процес формирања хидрокарбонатно-натријумског типа вода ( $\text{HCO}_3\text{-Na}$ ), поред јонске измене (Ca-Na), важан је и процес десулфатизације у присуству бактерија за шта је неопходан извор органских материја (угаљ), сулфатних јона, али и постојање анаеробне средине на шта указује појава метана у гасном саставу воде. Гледајући у профилу од површине терена па према дубљим деловима угљоносне серије, испитиване воде подлежу промени хемијског састава у правцу (1):

На примеру испитиваних рудничких вода рудника Соко, постоји правилна измена хемијског састава [3]. Са минерализацијом, расте са дубином садржај натријумових јона (изразита корелација  $R=0,93$ ), као и коефицијент  $r\text{Na}/r\text{Ca}$  (нелинеарна корелација) приказано на слици 8.

Хидрохемијска правилност у формирању хидрокарбонатно-натријумских рудничких вода у лежишту угља Соко, приказан је сликом 9. Са дубином расте минерализација воде и повећава се садржај јона натријума као резултат јонске измене Ca-Na.

imum iron content was found in the mine waters of the Vrška Čuka mine – undermine „Sv.Djordje“ ( $Fe=6,1 \text{ mg/l}$ ). Iron in mine waters is followed by manganese, and the highest content was also found in the Vrška Čuka mine ( $Mn=0,167 \text{ mg/l}$ ).

Regardless of the high mobility of the arsenic (As) in nature [10], in mine waters, it was  $0,247 \text{ mg/l}$  (the Bogovina mine). Lead is maximally found from  $Pb=0,024 \text{ mg/l}$  (the Jelovac mine), strontium  $Sr=5,01 \text{ mg/l}$  (the Lubnica mine), lithium  $Li=0,762 \text{ mg/l}$  (the Lubnica mine), aluminum  $Al=4,45 \text{ mg/l}$  (the Bogovina mine).

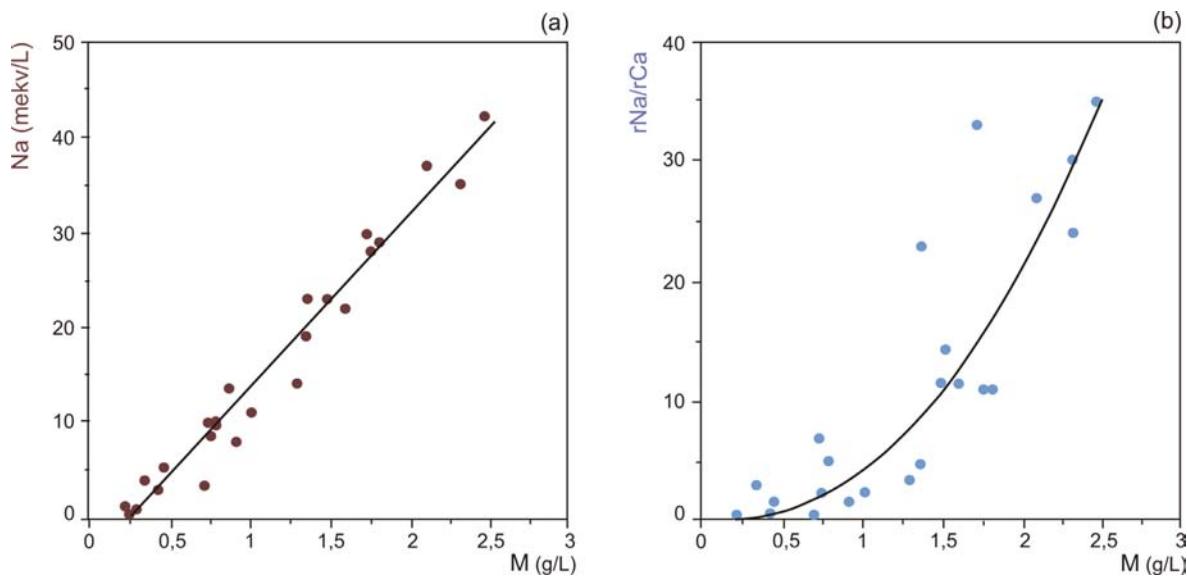
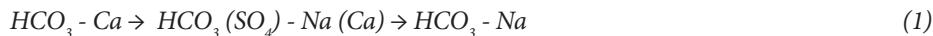
## DISCUSSION OF THE OBTAINED RESULTS

Based on the obtained results of hydro-chemical tests of the mineral waters, certain regularities in the formation of chemical composition have been established, with the sodium and sulphate types of water and increased mineralization being characteristic for the carbonaceous series.

For the basic process of formation of hydrocarbonate-sodium type of waters ( $\text{HCO}_3\text{-Na}$ ), besides the ionic exchange (Ca-Na), the process of desulfurization in the presence of bacteria is also important, for which a source of organic matter (carbon) is necessary, as well as sulphate ions, and an anaerobic environment as indicated by the occurrence of methane in the gas composition of water. Looking from the surface of the terrain and toward the deeper parts of the carbon series, the investigated waters are subject to metamorphism of the chemical composition in the direction (1):

On the example of tested mine waters of the Soko mine, there is a correct change in the chemical composition [3]. Along with mineralization, the content of sodium ions increases with depth (distinct correlation), as well as the coefficient  $r\text{Na}/r\text{Ca}$  shown in the figure 8.

Hydro-chemical regularity in the formation of hydrocarbonate-sodium mine waters in the coal deposit Soko, is shown in figure 9. With depth, the mineralization of water increases, and the content of sodium ions increases as a result of ionic excha



Слика 8, Корелациони дијаграм зависности минерализације и концетрације јона натријума (а) и минерализације и коеф.  $rNa/rCa$  (б) за испитивање воде свих типова издани у лежишту угља Соко

Figure 8, The correlation diagram of dependence of mineralization and concentration of sodium ions (a) mineralization and coefficient  $rNa/rCa$  (b) for tested waters of all types of aquifers in the coal deposit Soko [3]

Постојање хидрохемијске зоналности подземних вода у карстном аквиферу палеорељефа угљоносне серије, костатована је у лежиштима угља Стрмостен, Јеловац и Соко. Пример постојања ове зоналности у подручју лежиште угља Стрмостен, приказан је на слици 10.

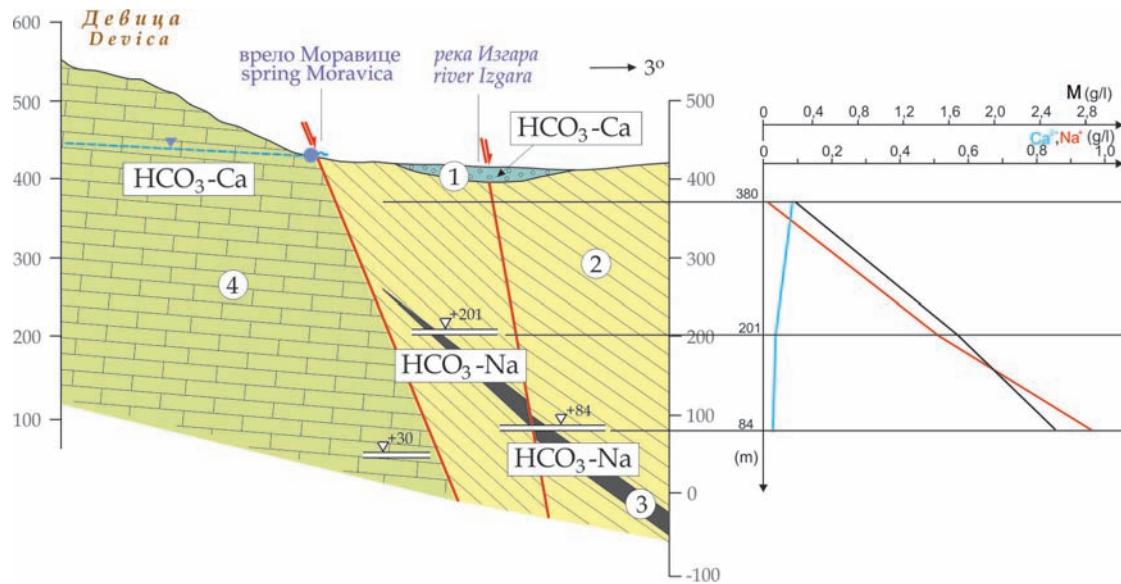
Непосредно уз угљоносну серију, у карстном аквиферу (у појасу оквирне ширине 60 m), постоје како успорени процеси водозамене због секундарног глиновитог материјала који испуњава карстификовани простор [6]. У том делу, јављају се релативно мали приливи рудничких вода из карстног аквифера. Поред метаморфизације хемијског састава подземних вода који се врши у овом појасу, постоји и утицај мешања са водама из угљоносне серије, па се тако јавља  $HCO_3-Na$  тип вода који иначе није карактеристичан за карстни аквифер.

Значај спроведених хидрохемијских испитивања се огледа и у уочавању агресивности рудничких вода. Њихово дејство на рударске конструкције у јами није пожељно. Тако је утврђено да рудничке воде које се јављају из угљоносног хоризонта у лежишту Сењски Рудник (ревир Липов Део, к.331), имају средњу сулфатну агресивност. Садржај јона сулфата у рудничкој води је  $SO_4^{2-}=648,50 \text{ mg/l}$  приказан је у табели 1. Гра-

The existence of the hydro-chemical zoning of groundwater in the karst aquifer of the paleo surface of the carbonaceous series was found in the coal deposits Strmosten, Jelovac and Soko. An example of the existence of this zoning in the area of the coal deposit Strmosten, is shown in figure 10.

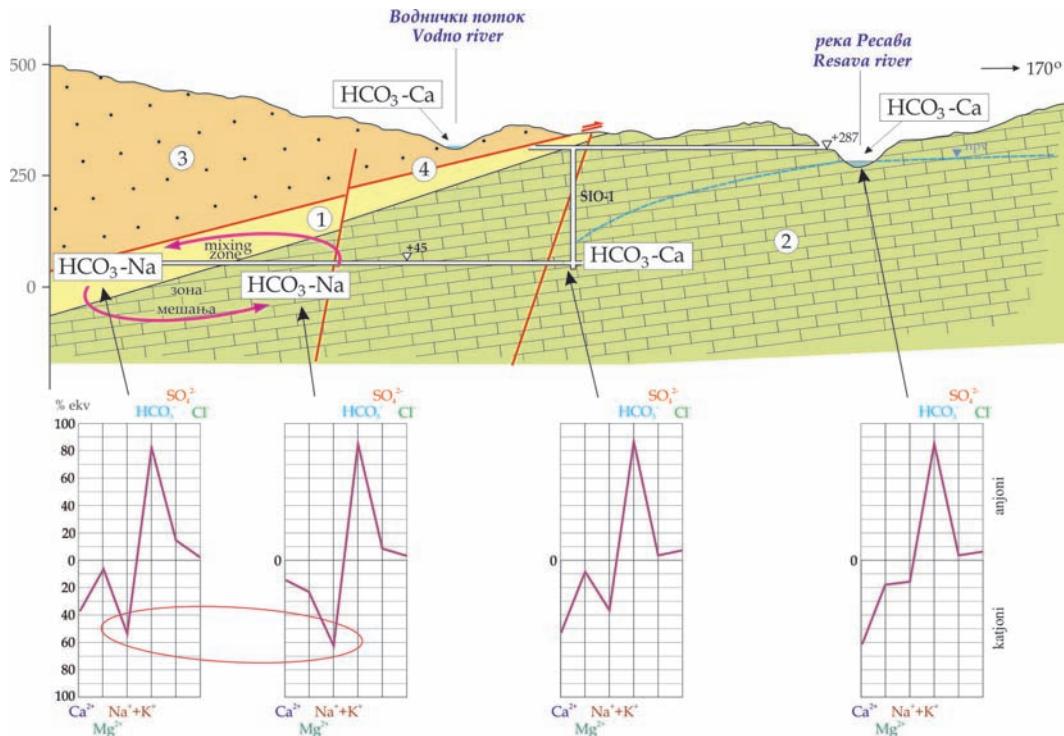
Directly with the carbonaceous series, in karst aquifer (in the band of an approximate width of 60 m), there are extremely slow water-exchange processes due to the secondary clay material that fills the karstic space [6]. In that area, there are relatively small inflows of mine waters from the karst aquifers. In addition to metamorphization of the chemical composition of groundwater in this band, there is also the influence of mixing with waters from the carbonaceous series, so there could be found the  $HCO_3-Na$  type of water which is not usually distinctive for the karst aquifers.

The significance of the conducted hydro-chemical tests is also reflected in the perception of the aggressiveness of the mine waters. Their effect on the mining structure in the pit is not desirable. It has thus been established that mine waters that emerge from the carbonaceous horizon in the Senjski Rudnik deposit (shaft Lipov Deo, k.331), have medium sulphate aggressiveness. The content of ion sulphate in the mine water is  $SO_4^{2-}=648,50 \text{ mg/l}$  shown in the table 1. Limit values of this isolated aggressiveness of mine wa-



Слика 9, Шема метаморфизације подземних вода у подручју лежишта угља Соко  
 Figure 9, Scheme of metamorphism of groundwaters nin the area of the coal deposit Soko

**Тумач / Legend:** 1. алувијон / alluvium, 2. угљоносна миоценска серија / carbonaceous Miocene series,  
 3. угљоносни хоризонт / carbonaceous horizon, 4. ургонски кречњаци / Urgonian limestones, — - пасед / fault



Слика 10, Шема хидрохемијске зоналности подземних вода у карстном  
 аквифери палеорељефа лежишта угља Стромостен

Figure 10, Scheme of hydro-chemical zoning of groundwaters in the karst aquifer  
 of the paleo surface of the coal deposit Strmosten

**Тумач / Legend:** 1. угљоносна миоценска серија / carbonaceous Miocene series,  
 2. ургонски кречњаци (палеорељеф угљоносне серије) / Urgonian limestones (paleo surface of the carbonaceous series),  
 3. пермски пешчари (алохтон) / Permian sandstones (allochthon), 4. Навлака / cover

ничне вредности ове издвојене агресивности рудничких вода је 600-3000 mg/l. Значајну улогу у формирању  $\text{SO}_4\text{-Na}$  типа подземних вода у овом лежишту, има поред оксидације угља и интензивна оксидација сулфида у андезитима који се налазе у једном делу палеорељефа угљоносне серије.

Амонијачну агресивност имају рудничке воде у јами Лубница. Ове воде се јављају у откопном ходнику OH-4 (к.65), а садржај амонијум јона се креће и до  $\text{NH}_3=108,6 \text{ mg/l}$  приказано у табели 1.

## ЗАКЉУЧАК

Хидрохемијским испитивањима рудничких вода које се јављају у јамама активних рудника угља у Карпато-балканидима источне Србије, утврђене су одређене правилности у појављивању. У односу на подину и повлату угљоносне серије, рудничке воде насложенијег хемијског састава ( $\text{HCO}_3\text{-Na}$ ,  $\text{SO}_4\text{-Na}$ ,  $\text{SO}_4\text{-Mg-Na}$ ,  $\text{SO}_4\text{-HCO}_3\text{-Mg-Na}$  или  $\text{Cl-Na}$  типа и минерализације најчешће преко 1000 mg/l), јављају се у угљоносном хоризонту из ког се врши непосредни откоп угља. Утврђено је да подземне воде у том делу, подлежу процесу метаморфизације. Са дубином, у испитиваним водама са минерализацијом расте садржај натријумових јона као и коефицијент  $r\text{Na}/r\text{Ca}$ .

Сложени хемијски састав ових вода се испољава у неким случајевима у води агресивног дејства на рударске конструкције у јами. У Сењском Руднику, рудничке воде имају сулфатну агресивност, а у руднику Лубница изражену амонијачну агре-

У кречњацима палеорељефа угљоносне серије, постоји хидрохемијска зоналност подземних вода. У слабо водопропусном појасу кречњака уз угљоносну серију (ширине око 60 m), јавља се  $\text{HCO}_3\text{-Na}$  тип вода, што недвосмислено потврђује да у њему постоји успорени процес водозамене. То је истовремено и добар индикатор да се у том делу рударских просторија, неће јавити значајнији приливи рудничких вода у односу на шири простор где је обично формиран јако издашан карстни аквифер.

ters are 600-3000 mg/l. Significant role in formation of the  $\text{SO}_4\text{-Na}$  type of groundwaters in this deposit, has, along to coal oxidation, the intense oxidation of sulfides in andesites which could be found in one part of the paleo surface of the carbonaceous series.

Ammonia aggression could be found in mine waters in the Lubnica pit. These waters appear in the excavation corridor OH-4 (k.65), and the content of ammonium ion goes up to  $\text{NH}_3=108,6 \text{ mg/l}$  shown in the table 1.

## CONCLUSION

Hydro-chemical tests of mine waters which appear in pits of active coal mines in the Carpatho-Balkanides of eastern Serbia, determined a certain accuracy in occurrence. With regard to the roof and floor of the carbonaceous series, mine waters of the most complex chemical composition ( $\text{HCO}_3\text{-Na}$ ,  $\text{SO}_4\text{-Na}$ ,  $\text{SO}_4\text{-Mg-Na}$ ,  $\text{SO}_4\text{-HCO}_3\text{-Mg-Na}$  or  $\text{Cl-Na}$  type and of mineralization usually over 1000 mg/l), can be found in the carbonaceous horizon from which the coal is directly excavated. It has been established that groundwaters in this area are subject to the metamorphic process. Along with depth, in the tested waters with mineralization, the content of sodium ion increases as well as the coefficient of  $r\text{Na}/r\text{Ca}$ .

The complex chemical composition of these waters is expressed in some cases in the water of aggressive effect on the mining structures in the pit. In Senjski Rudnik, mine waters have sulphate aggressiveness, and in the Lubnica mine – distinct ammonia aggression.

In limestones of the paleo surface of the carbonaceous series, there is a hydro-chemical zoning of groundwaters. In the poor permeable belt of limestones, in addition to the carbonaceous series (about 60 m wide), there is an  $\text{HCO}_3\text{-Na}$  type of waters, which unambiguously confirms that there is a slow process of water-exchange. At the same time, it is a good indicator that in this part of the mining sites there will be no significant inflow of mine waters in relation to the wider area, where usually a very rich karstic aquifer is formed.

## ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Бокчић, П., Неке значајне одлике угљених слојева у лежиштима угља на територији СР Србије, X Конгрес геолога Југославије, Будва, 1982.
2. Драгишић, В., Миладиновић, Б., Идејни пројекат заштите радова експлоатације у западном пољу јаме "Соко", књига 1., Елаборат о хидрогеолошким истраживањима западног поља јаме "Соко", Фонд стручне документације РГФ-а, Београд, 1993.
3. Драгишић, В., Папић, П., Миладиновић, Б., Хидрохемијске карактеристике лежишта мрког угља "Соко" Соко Бања. Зборник радова X-ог југословенског симпозијума о хидрогеологији и инжењерској геологији, књ.1, Кикинда, 1994, стр.51- 55.
4. Ђорђевић, Ж., Геологија угљева, Монографија, Завод за геолошка и геофизичка истраживања и Савезни геолошки завод, Београд, 1965, стр.1- 376.
5. Грубић, А., Ридањско-крепољинска зона у источкој Србији, Геолошки анализи Балканског полуострва, књ. XXXIII, Београд, 1967.
6. Миладиновић, Б., Хидрогеоеколошки услови експлоатације камених и мркних угљева Србије, Докторска дисертација, РГФ, Београд, 2015, стр.1- 418.
7. Максимовић, Б., Геолошки и тектонски односи угљеног терена сењско-ресавских рудника и његовог обода, Геолошки институт "Ј.Жујовић", књ.6, Београд, 1956.
8. Миладиновић, Б., Хидрогеологија РЕМ-БАС-а, Монографија, Издање задужбине Андрејевић, Београд 2000, стр.1-110.
9. Петковић, С., Опште геолошко-тектонске и хидрогеолошке карактеристике лежишта Липов Део - Сењски Рудник, Фонд стручне документације "Рембаса", Ресавица, 1980.
10. Yu, C., Qiantao, C., Zhong-Xian, G., Zhaoguang, Y., Soo, B.K., Inductively coupled plasma mass spectrometry study of the retention behavior of arsenic species on various solid phase extraction cartridges and its application in arsenic speciation, Spectrochimica Acta Part B 58, 2003, стр.1335-1349.
11. Соколовић, Ј., Стакић, Б., Перендић, С., Геолошки ресурси рудника антрацита "Вршка Чука" и њихов значај у пречишћавању вода, Зборник радова првог међународног симпозијума Рударство и геологија данас, Београд 2017, стр.267-274.
12. Томић, В., Миладиновић, Б., Резултати истраживања водонаосности ургонских кречњака у подручју навлаке црвених пермских пешчара у источкој Србији, Зборник радова Симпозијума 100 година хидрогеологије у Југославији, књ.2, Београд 1997, стр.299-306.

## ГЕОЛОШКА ИСТРАЖИВАЊА ПОДИНСКОГ ПРОДУКТИВНОГ СЛОЈА ЛЕЖИШТА ГЛИНЕ ГАРАЈЕВАЦ ИСТОК КОД НОВОГ БЕЧЕЈА GEOLOGICAL STUDY OF THE UNDERLYING PRODUCTIVE LAYER OF THE GARAJEVAC ISTOK DEPOSIT CLAY IN NOVI BEČEJ

DOI: 10.25075/BM.2018.06

Светлана Полавдер  
Сања Грујићић  
Бранка Јовановић

*Rudarski institut Beograd*  
*svetlana.polavder@ribeograd.ac.rs*

Svetlana Polavder  
Sanja Grujićić  
Branka Jovanović

*Mining Institute Belgrade*  
*svetlana.polavder@ribeograd.ac.rs*

**Сажетак:** У раду су приказана најновија геолошка истраживања лежишта опекарске глине „Гарајевац Исток“ код Новог Бечеја. Глине кривинског продуктивног слоја, овог лежишта експлоатишу се од 2008. године као сировина за производњу ирена Полета из Новог Бечеја. Ова истраживања усмерена су на подински продуктивни слој лежишта који до сада није експлоатационо захватан због водњености радне средине. Геолошким истражним радовима по дубини, детаљно је проучен други алевритско - глиновити комплекс који се планира за експлоатацију. Добијени резултати потврђују да квалитет минералне сировине одговара стандардима за производњу ирена. У раду је дат сажет приказ резултата истраживања.

**Кључне речи:** геолошка истраживања, глина, опекарска сировина, Гарајевец исток, Полет Нови Бечеј

**Summary:** In this paper, the latest geological study of the "Garajevac Istok" brick clay deposit near Novi Bečej is presented. The clay of the overlying productive layer of this deposit has been exploited by Polet from Novi Bečej since 2008 for raw material for the production of roof tiles. This study is focused on the underlying productive layer of soil, which has not yet been exploited due to the abundance of water in the working environment. Detailed studies by depth of the second alevrite-clay complex planned for exploitation were carried out. The obtained results confirm that the quality of the raw mineral materials meets the standards for tile production. This paper summarizes the results of the studies.

**Key words:** geological study, clay, raw clay brick material, Garajevac istok, Polet Novi Bečej

### УВОД

У лежишту опекарске глине „Гарајевац Исток“ недалеко од Новог Бечеја, површинске експлоатације радове изводи ИГК Полет од 2008. године, због снабдевања својих погона минералном сировином.

У геолошком погледу шире подручје лежишта представља део завршних чланова „Варошке“ терасе са једноставном геолошком грађом и представља седиментно, слојевито субхоризон-

### INTRODUCTION

Surface exploitation of the "Garajevac Istok" brick clay deposit near Novi Bečej has been performed by IGK Polet since 2008 for the purposes of supplying their production plants with raw mineral materials.

In geological terms, the broader area of the deposits is one of the final members of the "Varoška" terrace with a simple geological structure and represents a sedimentary, layered subhorizontal deposit. Surveys

тално лежиште. Истраживања лежишта вршена су систематски од 1984. до 2011. године. На основу тих истраживања Рударско-геолошки факултет, Универзитета у Београду, 2011. године, урадио је последњи Елаборат о резервама опекарских сировина у лежишту „Гарајевац Исток“ [1].

Експлоатација лежишта обавља се од 2008. године. С обзиром да су оверене резерве кровинске продуктивне серије опекарске сировине скоро исцрпљене постоји потреба за проширивањем резерви, односно за новим истраживањима. С комплексним задатком геолошких истраживања и пројектовања ангажован је Рударски институт из Београда. У другој половине 2018. године изведена су детаљна геолошка истраживања лежишта по дубини, испитани су хидрогеолошки и инжењерско-геолошки услови у радној средини, утврђен квалитет минералне сировине, прорачунате резерве другог алевритско - глиновитог комплекса. Резултати детаљних истраживања приказани су у Елаборату о ресурсима и резервама [2]. У раду је дат кратак приказ дела ових резултата који се односи на геолошке карактеристике лежишта и квалитет сировине.

## ГЕОЛОШКА ГРАЂА ЛЕЖИШТА

Геолошку грађу шире околине лежишта „Гарајевац Исток“ чине квартарне творевине које леже преко горњопалудинских (плиоценских) слојева Панонског басена. У оквиру квартарних седимената, по старости могу се издвојити плеистоценски и холоценски седименти. Плеистоценске седименте чине: полициклични речни седименти, речно-барски, речни седименти и речни седименти терасе (7 м - 12 м релативне висине). Седименти најмлађе холоценске епохе представљени су алувијалним седиментима и субречним барским творевинама [3,4].

Лежиште „Гарајевац Исток“, настало је у оквиру речних седимената терасе, која је развијена у фацији корита и фацији поводња, за време плеистоценске (вирмске) епохе. У геолошкој грађи самог лежишта од површине терена издвојени су следећи литолошки чланови: лесни комплекс, први алевритско - глиновити комплекс, глиновито алевритски пескови, други алевритско-глиновити комплекс и подински алевролити и пескови [5].

Лежиште захвате површину од 341.555 m<sup>2</sup> има облик неправилног полигона издуженог у правцу ССЗ-ЈЈИ, дужине 800 м, ширине 500 м.

Детаљна геолошка истраживања, са циљем дефинисања количине и квалитета опекарске сировине вршена су од 1984. до 2011. године. Из-

of the deposit have been carried out systematically from 1984 to 2011. Based on these studies, the Faculty of Mining and Geology of the University of Belgrade made the last Study on the reserves of raw clay brick materials in the deposit "Garajevac Istok" in 2011. [1].

Exploitation of the deposit has been carried out since 2008. Given that the certified reserves of the productive series of raw clay brick material are almost exhausted, a need for the expansion of the reserves has arisen, that is, for new studies to be conducted. In the second half of 2018, geological studies of the deposit by depth were carried out, the hydrogeological and engineering-geological conditions of the working environment were examined, the quality of the raw mineral material was determined and the reserves of the second alevrite-clay complex. The results of the detailed studies are shown in the Study of the resources and reserves [2]. The paper presents a brief review of a portion of these results regarding the geological characteristics of the deposit and the quality of the raw material.

## GEOLOGICAL SETTING OF THE DEPOSIT

The geological structure of the broader area of the "Garajevac Istok" deposit consists of quaternary formations which lie on top of the Pliocene strata of the Pannonian Basin. Within quaternary sediments, Pleistocene and Holocene sediments can be distinguished by their age. Pleistocene sediments include: polycyclic river sediments, river-swamp, river sediments and river sedimentation terraces (7m -12m relative height). The sediments of the youngest Holocene era are represented by alluvial sediments and sub-river swamp formations [3,4].

The deposit "Garajevac Istok", was created within the river sediments of the terrace, which was developed in the riverbed facies and flood facies, during the Pleistocene era. In the geological structure of the deposit itself, the following lithological members can be distinguished: the loess complex, the first alevrite-clay complex, the clayed alevrite sand, the second alevrite-clay complex, and the underlying stratum alevrites and sand [5].

The deposit has a surface area of 341.555 m<sup>2</sup> and the shape of an irregular polygon elongated in the direction of NNW-SSE, 800 m long, 500 m wide.

Detailed geological studies, with the aim of defining the quantity and quality of the raw clay brick materials, were carried out from 1984 to 2011. 27

бушено је 27 истражних бушотина, искартирано је укупно 476,80 m језгра, извршена су лабораторијска испитивања минералне сировине (појединачне и композитне пробе). Рударско геолошки факултет, Универзитета у Београду 2011. године, урадио је Елаборат о резервама опекарских сировина у лежишту „Гарајевац Исток“ при чиму је коришћена сва расположива документација. Овим Елаборатом оверене су билансне резерве В категорије у укупном износу од 3.959.956 t [1].

Досадашњом експлоатацијом, у већем делу лежишта откопан је лесни хоризонт и први алевритско-глиновити комплекс до слоја глиновито алевритских пескова. Испод овог слоја налази се други алевритско - глиновити комплекс који је у претходном Елаборату, због ниског степена истражености, третиран као ванбиласни део лежишта, слика 1.

Најновијим истраживањима Рударског института лежиште је истражено до 30,50 m дубине. Избушено је 13 истражних бушотина, геолошки је снимљено 250,40 m језгра, урађена су лабораторијска испитивања појединачних и композитних проба. Због хидрогеолошких опита и узимања узорака за полуиндустријска испитивања квалитета минералне сировине, урађен је раскоп.

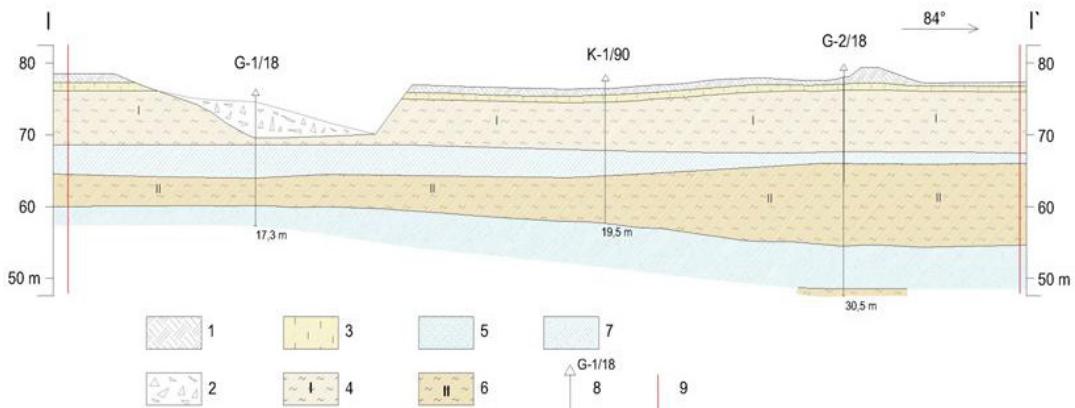
На основу добијених резултата и ранијих сазнања, дефинисан је други алевритско - глиновити слој, односно геолошки услови распострањења минералне сировине у лежишту, утврђене су билансне резерве и квалитет опекарске сировине, утврђен на основама потпунош поштовања стандарда у овој области.

exploratory wells were drilled, 476.80 m of cores was charted out, and laboratory testing of raw mineral materials (individual and composite tests) was performed. The Faculty of Mining and Geology, University of Belgrade, in 2011, made a Study on the reserves of raw clay brick materials in the deposit "Garajevac Istok" deposit in 2011, using all of the available documents. This Study certified the B class balance reserves in the total amount of 3,959,956 t [1].

The loess horizon and the first alevrite-clay complex have been dug up to the layer of clay alevrite sand in the majority of the deposit with the exploitation so far. Below this layer there is another alevrite-clay complex, which was treated as off-balance part of the deposit in the previous Study, due to the low level of research conducted on it, Figure 1.

The latest studies performed the Mining Institute examined the deposit down to the depth of 30,50 m. 13 exploratory wells were drilled, 250,40 m of cores were geologically scanned, individual and composite laboratory tests were performed. An exploratory cut was made for the purposes of hydro-geological experiments and sampling for semi-industrial tests of the quality of the raw mineral materials.

The second alevrite-clay layer was defined On the basis of the obtained results, that is, the geological conditions of the distribution of raw mineral material in the deposit, the balance reserves and the quality of the raw clay brick material were determined, based on the principles of full compliance with the standards in this field.



Слика 1, Карактеристични профил кроз лежиште

Figure 1, The characteristic profile throughout the deposit

**Тумач / Legend:** 1 – хумус / humus, 2 – насып (ломљени цреп) / embankment (broken roof tiles), 3 – лесни комплекс / loess complex, 4 – први алевритско-глиновити комплекс / first alevrite-clay complex, 5 – глиновито- алевритски пескови / clay-alevrite sand, 6 – други алевритско-глиновити комплекс / second alevrite-clay complex, 7 – подински алеврити и пескови / underlying stratum alevrites and sand, 8 – истражна бушотина / exploration well, 9 – граница експлоатационог поља / the limit of the exploitation field

## ГЕОЛОШКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ ПОДИНСКОГ ПРОДУКТИВНОГ СЛОЈА

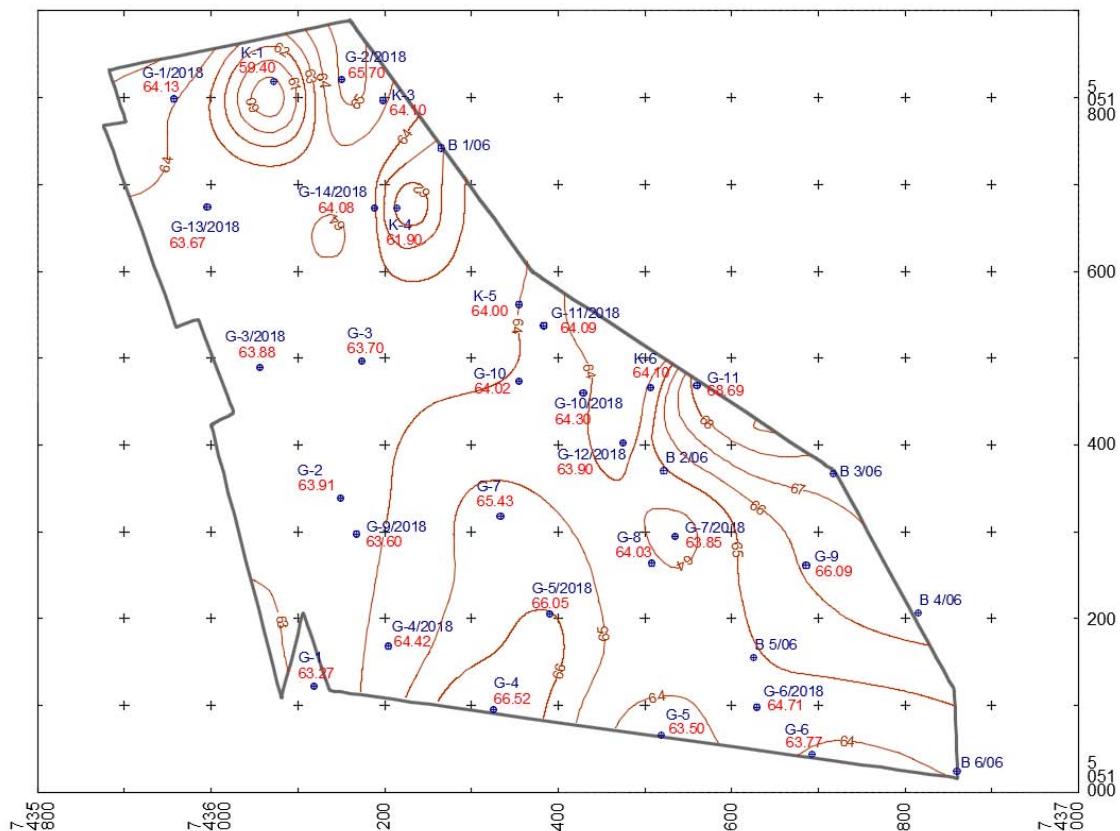
Подински продуктивни слој, односно други алевритско - глиновити комплекс, чине сиве глине са сивим заглињеним алевритима. Високе је до средње пластичности, са прослојцима и сочивима алеврита и заглињених пескова. Ове седиментне карактерише присуство карбонатних конкреција, оксида Fe и обиље остатака фосилне фауне.

Повлату алевритско - глиновитог слоја чини слој глиновито - алевритских пескова, средње дебљине 3,6 м који исклињава у источном делу лежишта. Утврђено је да подину глине чине алеврити и пескови сиве боје, дебљине 1,0 м до 14,5 м који су потврђени у свим истражним бу-шотинама.

## GEOLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE UNDERLYING PRODUCTIVE LAYER

The underlying productive stratum, or second alevrite-clay complex, consists of gray clay with gray clayed alevrites. It is of a medium to high plasticity, with intercalations and lenses of alevrite and clayed sand. These sediments are characterized by the presence of carbonate concretions, Fe oxide, and an abundance fossilized remains of fauna.

The overlying layer of the alevrite-clay layer consists of a layer of clay-alevrite sand, with the average thickness of 3.6 m which is wedged in the eastern part of the deposit. It was determined that the underlying layer of the clay consists of alevrites and gray sand, with a thickness ranging from 1.0 m to 14.5 m which has been confirmed in all exploration wells.



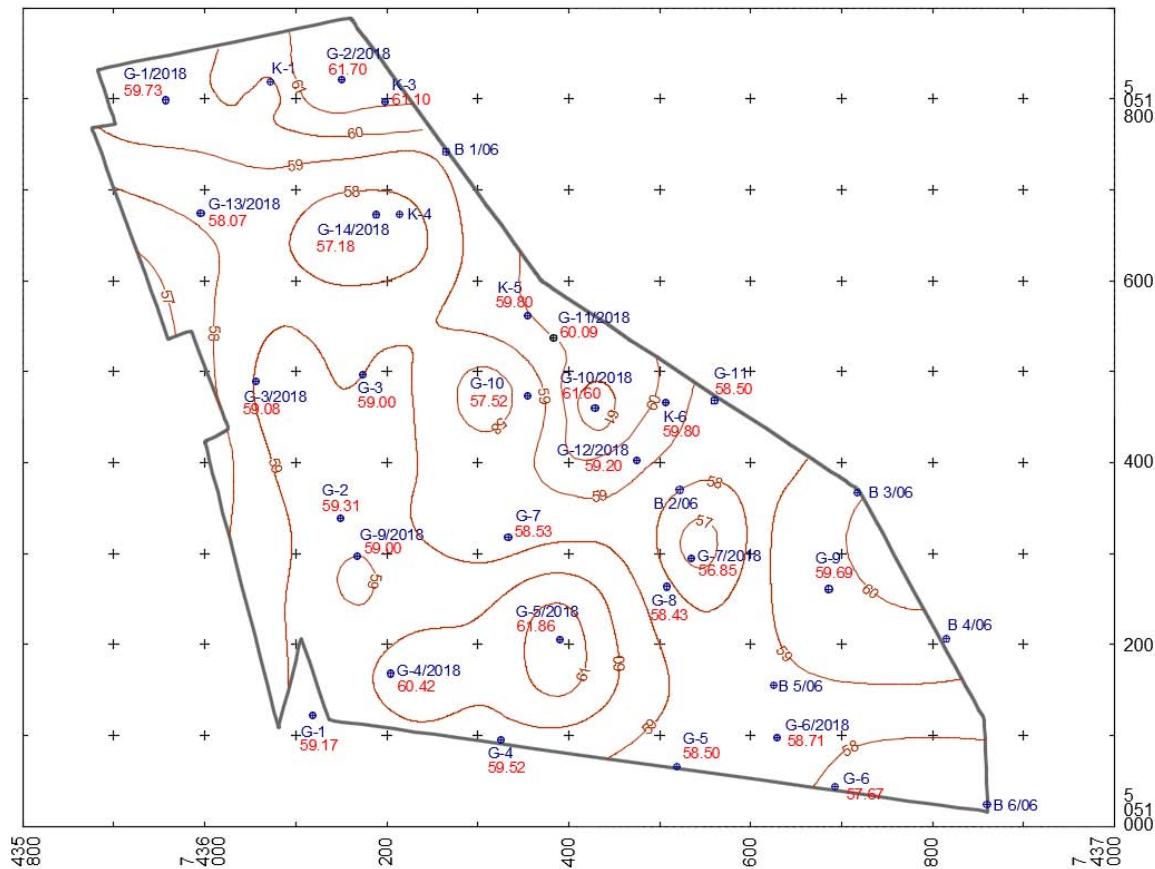
Слика 2, 2Д Модел кровине другог алевритско - глиновитог комплекса  
 Figure 2, 2D Model of the overlying layer of the second alevrite-clay complex

На слици 4 приказане су промене дебљине алевритско - глиновитог слоја у лежишту „Гарајевац Исток“. Као што се са слике 4 види дебљина продуктивног слоја је скоро уједначена. Минимална утврђена дебљина износи 2,7 м, а мак-

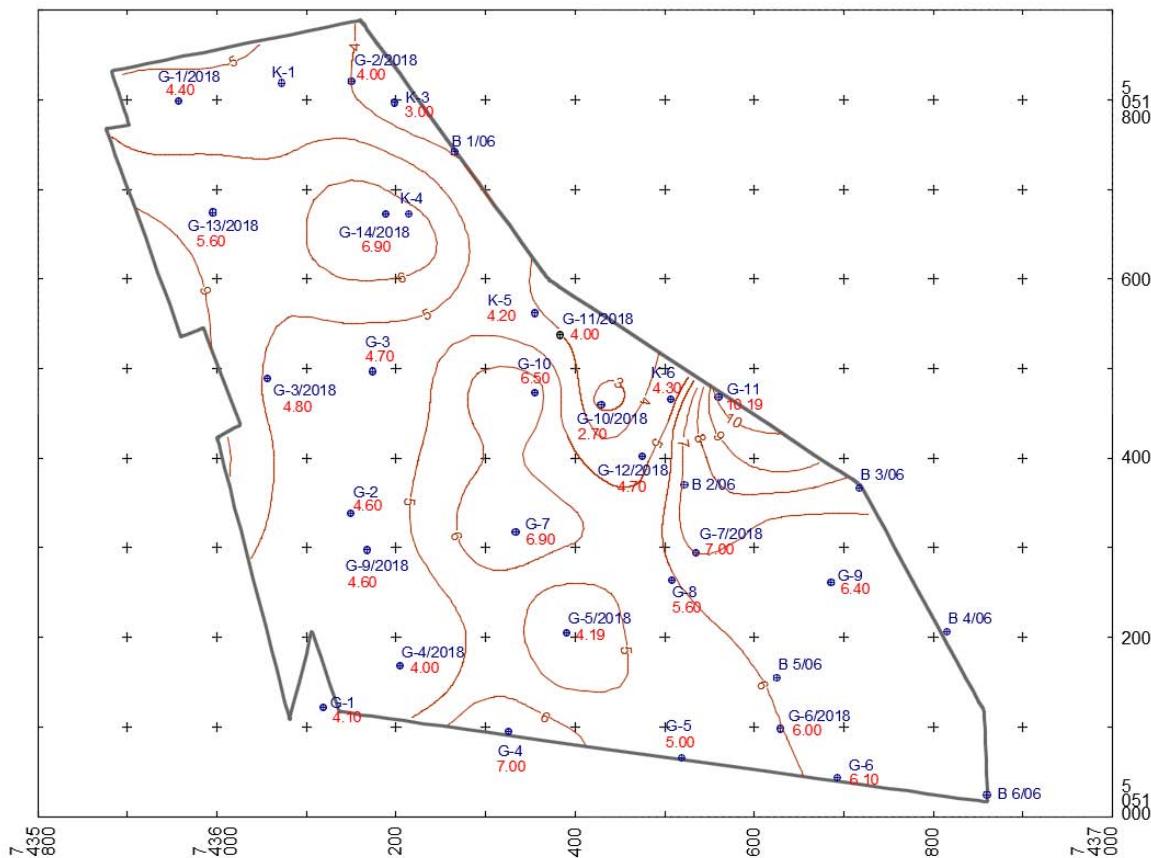
Figure 4 shows the thickness model, and Figures 2 and 3 show the models of the overlying and underlying layers of the alverite-clay layer in the “Garajevac Istok” deposit. As can be seen in the figure 4, the thickness of the productive layer

сimalna 8,6 m, док просечна дебљина у границама резерви минералне сировине износи 5,46 m. Издавање другог алевритско - глиновитог комплекса као опекарске сировине у лежишту извршено је на основу садржаја карбоната, песковите и глиновите компоненте. Применом стандардних метода за испитивање квалитета утврђено је да квалитет опекарске сировине задовољава прописане стандарде за њихову примену у индустрији црепа, а прорачунате резерве су довољне за наредних 12-15 година експлоатације.

is nearly uniform. The minimum determined thickness is 2.7 m, and the maximum is 8.6 m, while the average thickness of the raw mineral material reserves is 5.46 m. The separation of the second alevrite-clay complex as raw clay brick material in the deposit was based on the content of carbonates, sand and clay components. Through the use of standard methods for quality testing, it has been determined that the quality of the raw clay brick material meets the prescribed standards for its application in the roof tile industry, and the calculated reserves are sufficient for the next 12-15 years of exploitation.



Слика 3, 2Д Модел подине другог алевритско - глиновитог комплекса M  
 Figure 3, 2D Model of the underlying layer of the second alevrite-clay complex



Слика 4, 2D Модел дебљине другог алевритско - глиновитог комплекса  
 Figure 4, 2D Model of thickness of the second alevrite-clay complex

## ЗАКЉУЧАК

Лежиште опекарске глине „Гарајевац Исток“ детаљно је геолошки истражено у другој половини 2018. године. Позитивни исходни резултати истраживања другог алевритско - глиновитог слоја створили су основу за анализу рационалне експлоатације и пројектовање површинског копа у захвату по дубини. То отвара могућност експлоатације глине на овом локалитету наредних 12-15 година, посебно значајно због не-захватања и недеградирања нових површина, кратке транспортне трајекторије ровне сировине, мање емисије издувних гасова и сл.

## ЛИТЕРАТУРА

- Животић, Д., Вујић, С., и др., Елаборат о резервама опекарских сировина у лежишту „Гарајевац Исток“ код Новог Бечеја, Рударско – геолошки факултет, Београд, 2011, 87 стр.
- Грујићић, С., Милошевић, Д., Чановић, В., и др., Елаборат о ресурсима и резервама опекарске сировине у лежишту „Гарајевац

## CONCLUSION

The “Garajevac Istok” brick clay deposit was thoroughly geologically examined in the second half of 2018. The positive results of the second alverite-clay layer have created the basis for the analysis of its rational exploitation and the designing of the open cut mine with excavation by depth. This opens the possibility of the exploitation of clay for the next 12-15 years at this site, especially important due to the non-excavation and non-degrading of the new surfaces, the short transport routes for the raw material, less exhaust gas emissions, etc.

## REFERENCES

- Životić, D., Vujić, S., et al, Study design on reserves of brick raw materials in the deposit “Garajevac Istok” near Novi Bečej, Faculty of Mining and Geology, Belgrade, 2011, 87 p.
- Grujićić, S., Milošević, D., Čanović, V., et al, Study design on resources and reserves of brick raw materials in the deposit “Garajevac Istok”

- Исток“ код Новог Бечеја, Рударски институт, Београд, 2018, 164 стр.
3. Страјин, В., Хаџи-Вуковић, М. и Терзин, В., 1994, Тумач за ОГК, лист Зрењанин 100.000, Савезно министарство за привреду СРЈ, Београд, 1994, 58 стр.
  4. Терзин, В., Ракић, М., Хаџи-Вуковић, М., Страјин, В., 1995, Основна геолошка карта, лист Зрењанин 100.000, Савезно министарство за привреду СРЈ, Београд, 1995.
  5. Симић, В., Вујић, С., Животић, Д., Ратковић-Вујић, М., 2002, Елаборат о резервама опекарских сировина у лежишту „Гарајевац Исток“ код Новог Бечеја, Рударско – геолошки факултет, Београд, 2002, 121 стр.
  3. Strajin, V., Hadzhi-Vukovic, M. and Terzin, V., 1994, Bulletin for OGK, Zrenjanin 100.000 leaf, Federal Ministry of Economy of the FRY, Belgrade, 1994, 58 p.
  4. Terzin, V., Rakić, M., Hadži-Vuković, M., Strajin, V., 1995, Basic geological map, Zrenjanin 100.000 leaf, Federal Ministry of Economy of the FRY, Belgrade, 1995, 55 p.
  5. Simić, V., Vujić, S., Životić, D., Ratković-Vujić, M., 2002, Study design on reserves of brick raw materials in the deposit "Garajevac Istok" near Novi Bečeј, Faculty of Mining and Geology, Belgrade, 121 p.

## ФАЗИ ЛОГИЧКИ МОДЕЛ ОЦЕНЕ СИГУРНОСТИ ФУНКЦИОНИСАЊА МЕХАНИЗАЦИЈЕ НА ПОВРШИНСКИМ КОПОВИМА

## FUZZY LOGICAL MODEL OF ASSESSING FOR THE DEPENDABILITY OF MECHANISATION ON OPEN PITS MINES

DOI: 10.25075/BM.2018.07

Драгица Јагодић Крунић<sup>1</sup>

Милош Танасијевић<sup>2</sup>

Слободан Вујић<sup>3</sup>

Dragica Jagodić Krunic<sup>1</sup>

Miloš Tanasijević<sup>2</sup>

Slobodan Vujić<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Министарство рударства и енергетике Републике Србије

<sup>2</sup>Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет

<sup>3</sup>Рударски институт Београд

dragica.jagodickrunic@mre.gov.rs

<sup>1</sup>Ministry of Mining and Energy Republic of Serbia

<sup>2</sup>University of Belgrade, Faculty of Mining and Geology

<sup>3</sup> Mining Institute Beograd

dragica.jagodickrunic@mre.gov.rs

**Сажетак:** У раду је приказан фази логички модел процене сигурности функционисања механизације на површинским коповима лигнита. Модел синтетизује параметре поузданости, погодности и подршке одржавању са циљем сигурног функционисања. Као мера употребног квалитета, сигурност функционисања појмовно се односи на расположивост техничког система. Изра рада следи наставак на ову тему, рад Примена фази логичког моделовања код оцене сигурности функционисања механизације на површинским коповима, у коме су изложени примери практичне примене модела.

**Кључне речи:** фази логика, употребни квалитет рударске механизације, одржавање рударске механизације, поузданост рада.

**Summary:** This work attempted to show a logical model of evaluation for the dependability of mechanisation on open pits of lignite. The model includes synthetized parameters of reliability, maintainability and maintenance support in order to provide safe functioning. The dependability as concept relates with the availability of the technical system as a measure of the quality of service. This work continues in the paper Application of fuzzy logical modeling when assessing the dependability of mechanization on open pits mines, relating with this subject including described examples of the model application in practice.

**Key words:** fuzzy logic, quality of service of the mining mechanisation, maintenance of mining mechanisation, work reliability.

### УВОД

Животни циклус техничких система обухвата планирање, пројектовање, производњу (изградњу), коришћење, одржавање и расходовање. Након одређеног времена рада, без обзира на конструкцију и квалитет изградње, експлоатационо вођење и одржавање, технички системи губе оперативне потенцијале у процесу ка отпису. Филозофија са научим основама систем-

### INTRODUCTION

The life cycle of technical systems includes their planning, designing, manufacture (construction), use, maintenance, and wears out. Technical systems lose their operational potentials in the process of writing off after the working cycle, regardless construction and building quality, exploitation running or maintenance. After the Second World War with intensifying development of the reliabil-

ског приступа у управљању животним циклусом машина, рађа се током и након Другог светског рата, са интензивним развојем теорије поузданости и сродних научних дисциплина. Развијени су, или су у развоју и модели на другачијим основама, нпр. на динамичком програмирању и теорији замене, тј. трошковном принципу [1], на праћењу рада машина у реалном времену [2] итд.

Са развојем теорије поузданости научна истраживања на овом пољу теку у неколико праваца, нпр. један се бави односом поузданости и стратегије одржавања [3], други односом поузданости и животног циклуса машина [4], трећи односом смањењем трошка и побољшања ефикасности одржавања [5], четврти односом поузданости и **трошкова животног циклуса** [6], **пети** поузданошћу и појавом замора [7], **шести односом** поузданости и конструкције машине [8] итд.

Сигурност функционисања концепцијски је дефинисан ISO-IEC стандардом [9], као најпотпунијим описом расположивости техничког система, односно мере употребног квалитета. Обухвата поузданост, погодност одржавања и логистичку подршку одржавању.

Проблем имплементације синтезних феномена, као што је сигурност функционисања техничког система, је у непостојању јединствено дефинисаног алгоритма и математичког модела за практичне примене и решавања.

У раду је приказан модел за оцену сигурности функционисања рударских машина које се користе за помоћне радове у специфичним и тешким условима радне средине на површинским коповима лингнита. Реч је о машинама индустријске серијске производње, чија успешност рада зависи од правилног избора, односно од погодности машине за рад у условима конкретне радне средине. На фази логичким основама постављен је вишепараметарски математички модел који омогућава синтезу поузданости рада, погодности и подршке одржавању, са циљем сигурности функционисања.

## КОНЦЕПЦИЈА МОДЕЛА ОЦЕНЕ СИГУРНОСТИ ФУНКЦИОНИСАЊА

Парцијалне показатеље сигурности функционисања машина и њихове међувезености одликује непотпуна одређеност, вишезначност и релативност. Мерљивост показатеља је опциона, може бити метричка или вербална (експертске оцене). Два су основна подалгоритма у алгоритму математичког модела сигурности функционисања машина: подалгоритам фази пропозиција парцијалних показатеља (поузда-

ity theory and similar scientific disciplines, there has emerged the philosophy embedded in the science of systemic approach to the life cycle of machines. There have also been developed models based on different approaches such as dynamic programming and replacement theory ie. cost principle [1], on line monitoring of the machine work [2] etc.

Scientific explorations in this field run in several different directions regarding development of the reliability theory, and one, for example, deals with ratio between reliability and maintenance strategy [3], other with reliability and life cycle of machines [4], third with expenditures and maintenance efficiency improvement [5], fourth with reliability and the life cycle costs [6], fifth with reliability and exhaustion [7], sixth with reliability and machine design [8] etc.

Dependability is conceptualised in the ISO-IEC standard [9], as the most comprehensive description of the availability of a technical system, or measure of quality of service. It includes reliability, maintainability and maintenance support.

The problem of the synthetic phenomena implementation, such as dependability of technical system functioning, is in the lack of uniformly defined algorithm and mathematical model for application and solutions in practice.

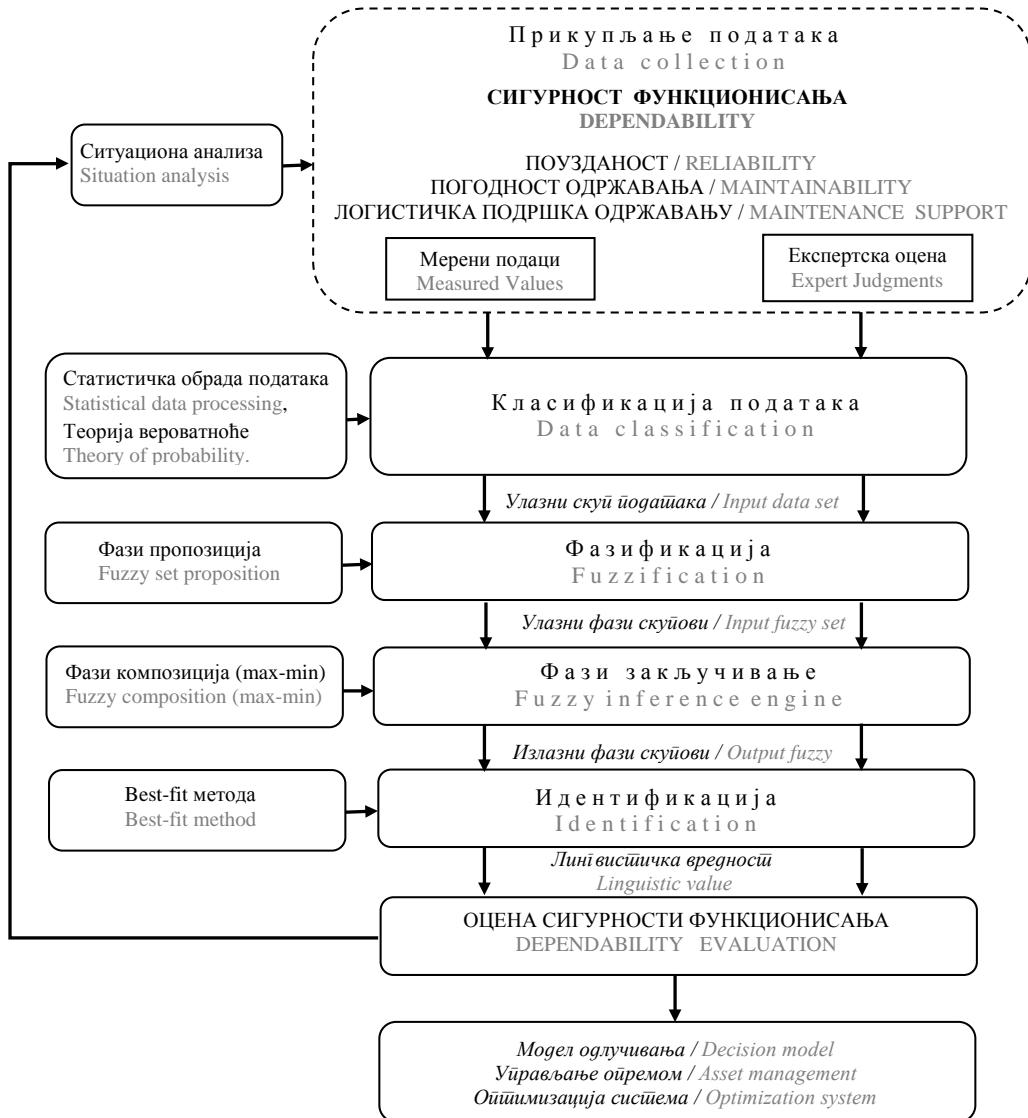
This paper illustrates one evaluation model for dependability of the mining machines that are used for assisting works in specific and severe conditions in the work environment on the open pits of lignite. These are machines of the industrial and serial manufacture the successful work of which depend on correct selection and suitability of such machine for work in the given work environment. There is established a multi-parameter mathematical model based on the fuzzy logic that synthetises reliability of work, maintainability and maintenance support in order to provide dependability.

## EVALUATION MODEL CONCEPTION OF DEPENDABILITY

Partial indicators of the dependability of the machines and their inter-connectedness are characterised with insufficient determination, ambiguity and relativity. The indicators measuring is optional. It can be metric or verbal (expert evaluations). There are two main sub-algorithms in the mathematical model algorithm of dependability of the machines: sub-algorithm of fuzzy propositions of partial indicators (reliability, maintainability and maintenance

ност, погодност одржавања, логистичка подршка одржавању) и подалгоритам фази композиције (синтезе) парцијалних показатеља, слика 1.

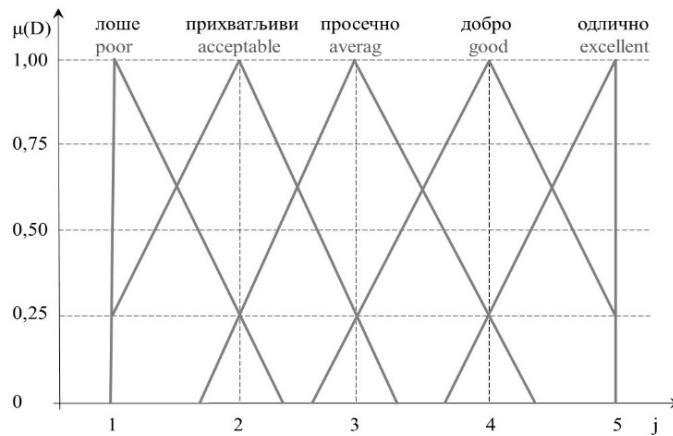
support) and sub-algorithm of fuzzy composition (synthesis) of the partial indicators, Figure 1.



Слика 1, Алгоритам фази модела за оцену сигурности функционисања машине  
 Figure 1, Algorithm of fuzzy model for evaluation of the model for dependability of the machines

**Пропозиција:** За креирање фази модела и сегмената за фази логичко закључивање код процене сигурности функционисања машина ( $D$ ), дефинишу се лингвистичке променљиве парцијалних показатеља поузданости ( $R$ ), параметра погодности одржавања ( $M$ ) и логистичке подршке одржавања ( $S$ ). У овом моделу, избор је на пет [10] троугаоних фази (лингвистичких) променљивих: «лоше», «прихватљиво», «прочесно», «добро» и «одлично», слика 2.

**Propositions:** In order to create the fuzzy model and segments for the fuzzy logical conclusion in estimation of dependability of the machines ( $D$ ), there are defined linguistic variables of the partial indicators of reliability ( $R$ ), maintainability parameters ( $M$ ), and maintenance support ( $S$ ). This model offers selection on the five [10] triangle fuzzy (linguistic) variables such as „poor”, „acceptable”, „average”, „good”, and „excellent”, Figure 2.



Слика 2, Приказ фази променљивих у моделу сигурности функционисања машина  
 Figure 2, Illustration of fuzzy variables in the model of dependability of the machines

У зависности од  $\mu$  фази број ( $FN$ ) може да се представи:

Depending on  $\mu$  the fuzzy number ( $FN$ ) can be presented as:

$$FN = (\mu_{j=1}, \dots, \mu_{j=5}). \quad (1)$$

У истој форми могу се представити и лингвистичке променљиве ( $H$ ). Пример: ако је  $H$  = „лоше“,  $\mu = 1$  за  $j = 1$ ,  $\mu = 0.25$  за  $j = 2$ ,  $\mu = 0$  за  $j = 3, 4, 5$ .

Фази променљиве са слике 2, могу се записати као:

In the same form can be presented the linguistic variables ( $H$ ). Example: If the  $H$  = „poor”,  $\mu = 1$ , for  $j = 1$ ,  $\mu = 0.25$ , for  $j = 2$ ,  $\mu = 0$ , for  $j = 3, 4, 5$ .

Fuzzy variables can be written:

$$\begin{aligned} \text{„лоше / poor“} &= (1/1, 0.25/2, 0/3, 0/4, 0/5); \\ \text{„прихватљиво / acceptable“} &= (0.25/1, 1/2, 0.25/3, 0/4, 0/5); \\ \text{„просечно / average“} &= (0/1, 0.25/2, 1/3, 0.25/4, 0/5); \\ \text{„добро / good“} &= (0/1, 0/2, 0.25/3, 1/4, 0.25/5); \\ \text{„одлично / excellent“} &= (0/1, 0/2, 0/3, 0.25/4, 1/5). \end{aligned} \quad (2)$$

**Фазификација:** Фазификација као трансформација улазних параметара у фази вредности, има своја правила. У нашем случају показатељи  $R$  и  $M$ , дефинисани на основу теорије поузданости, фазификацијом се трансформишу у фази функције поузданости  $R(t)$  и погодности одржавања  $M(\tau)$ . Улазни подаци у лингвистичкој форми, у нашем случају то су експертске оцене подршке одржавању ( $S$ ), преводе се у фази нумеричке вредности.

**Фазификовање кумулативне временски зависне функције:** Weibull-ова двопараметарска расподела је једна од најчешће коришћених расподела у инжењерству поузданости и одржавања, зато што захваљујући параметру облика ( $\beta$ ) и параметру размере ( $\eta$ ) покрива више феномена [11].

**Fuzzification:** Fuzzification as transformation of the input parameters in the fuzzy value has its own rules. In our case the indicators  $R$  and  $M$  are defined on the basis of the reliability theory and by fuzzification they are transformed into the phase of reliability function  $R(t)$  and maintainability  $M(\tau)$ . The input data in the linguistic form, in our case that are expert evaluations of the maintenance support ( $S$ ) and they are translated into the fuzzy numeric values.

**Fuzzifying of the cumulative time depending function:** Weibull two-parameter distribution is one of the most applied distributions in the engineering of reliability and maintenance because it covers several phenomena [11] thanks to shape parameter ( $\beta$ ) and scale parameter ( $\eta$ ).

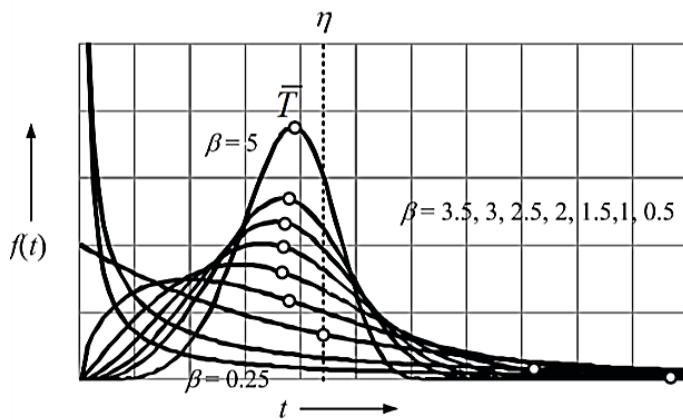
$$f_t = \frac{\beta}{\eta^\beta} \cdot t^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad f_\tau = \frac{\beta}{\eta^\beta} \cdot \tau^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{\tau}{\eta}\right)^\beta} \quad (3)$$

Улазни подаци у модел су измерени периоди машине у раду  $t = t_1, \dots, t_n$  и у отказу  $\tau = \tau_1, \dots, \tau_n$ . На основу ових података израчунава се функција густине отказа [12]:

Графици функције густине отказа  $f(t)$  за Weibull-ову расподелу, у зависности од вредности параметра  $\beta$  приказани су на слици 3.

Input data are measured in the machine working period  $t = t_1, \dots, t_n$  and in the period of failure  $\tau = \tau_1, \dots, \tau_n$ . Based on these data it is calculated the failure density function [12]:

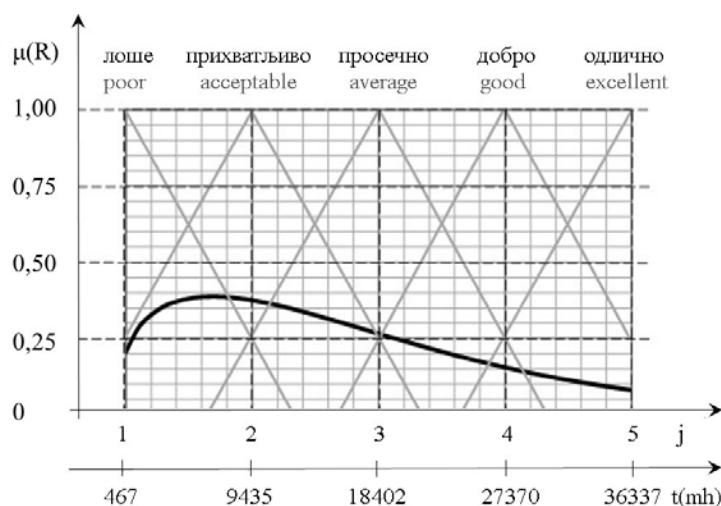
Graphs of the failure function  $f(t)$  for the Weibull distribution, depending on the parameter values of  $\beta$  are shown in Figure 3.



Слика 3, Графици функције густине отказа  $f(t)$  и средње време /  
 Figure 3, Graph of failure density function  $f(t)$  and mean time  $T$

Мапирањем функција  $f(t)$  и  $f(\tau)$  на  $\mu$ -ј, слика 2, добијају се  $R$  и  $M$  у фази облику (1). Односом ј и реалног времена  $t$ , односно  $\tau$ , селектују се фази бројеви према ј-вредностима као мере поузданости и погодности одржавања, слика 4. Евидентирани периоди машине у раду за  $R$  следе од прве  $j=1$  (најлошије) до пете  $j=5$  (најбоље) секвенце, а време отклањања отказа за  $M$ , обр-

Mapping the functions  $f(t)$  and  $f(\tau)$ , the Figure 2, results in  $R$  and  $M$  in the fuzzy form (1). Relation of  $j$  and real time  $t$ , or  $\tau$ , selects the fuzzy numbers according to  $j$  values as measure of reliability and maintainability, Figure 4. Recorded periods of the machine in work for  $R$  continue from the first  $j=1$  (the poorest) to fifth  $j=5$  (the best) sequence, while time for the failure remove for  $M$  is reverse from  $j=5$



Слика 4, Процес мапирања функције густине погодности одржавања на фази скупове  
 Figure 4, Mapping process of the maintainability density function on fuzzy sets

нуто од  $j=5$  (најдуже време) до  $j=1$  (најкраће), слика 4. Овакав приступ може створити проблем код малог броја мерења због непоузданости статистичког узорка.

**Фазификовање лингвистичких вредности - експертске процене:** Експертске оцене формирају се анкетним упитницима достављеним стручњацима одговорним за експлоатацију машина. Одговори, односно оцене, као лингвистичке, односно вербалне променљиве, показатељи су сигурности функционисања и логистичке подршке одржавању ( $S$ ) машина. У принципу, мада то може бити и другачије, оцене су од 0 до 1, али тако да је збир оцена 1. На основу парцијалних оцена аналитичара (препоручљив минимум је пет аналитичара) добија се коначна оцена  $S$  за посматрану машину:

$$S = (S_{\phi\pi} \text{ - одлично / excellent; } S_{\phi\pi} \text{ - добро / good; } S_{\phi\pi} \text{ - просечно / average; } \\ S_{\phi\pi} \text{ - прихватљиво / acceptable; } S_{\phi\pi} \text{ - лоше / poor}) \quad (4)$$

где је:  $S_{\phi\pi}$  функција припадности за лингвистичке променљиве и представља однос збира оцена („одлично”, …, „лоше”) у припадајућој мери и укупног броја аналитичара.

Коначна оцена показатеља логистичке подршке одржавања ( $S$ ) мапира се на фази скупове сигурности функционисања ( $D$ ), слика 2, како би била интегрисана у синтезну оцену (1).

**Модел фази закључивања, max-min модел композиције:** Следи формирање синтезног fuzzy max-min модела као композиције парцијалних параметара.

$$D_i = \max \{ \min (R_p, M_p, S_p) \} \quad (5)$$

(I) Дефинишу се фази бројеви  $R_p, M_p$  и  $S_p$  преко функције припадности  $\mu$  и класе  $j = 1$  до  $n$ :

$$R_i = (\mu_{R(1)}, \dots, \mu_{R(j)}, \dots, \mu_{R(n=5)}); M_i = (\mu_{M(1)}, \dots, \mu_{M(j)}, \dots, \mu_{M(n=5)}); S_i = (\mu_{S(1)}, \dots, \mu_{S(j)}, \dots, \mu_{S(n)=5}) \quad (6)$$

(II) Функције припадности могу имати међусобом  $C = n^3 = 5^3 = 125$  комбинација. Свака комбинација представља практично једну оцену  $D_i$  (5):

$$D_c = [\mu_{R(j=1, \dots, n=5)}, \mu_{M(j=1, \dots, n=5)}, \mu_{S(j=1, \dots, n=5)}], \text{ за свако / for each } c = 1 - C \quad (7)$$

(III) Ако се у обзир узму само вредности које задовољавају услов  $\mu_{R,M,S(j=1, \dots, n=5)} \neq 0$ , добијају се исходи  $o$  ( $o = 1$  до  $O$ , где је  $O \leq C$ ). Сваки исход има одговарајуће идентификацијоне вредности (IV) и (V) за прорачун.

(IV) За сваку комбинацију с рачуна се вредност  $J_c$  заокружена на целобројну вредност:

(the longest time) to  $j=1$  (the shortest time), Figure 2. Such approach can make a problem with small number of measurements due to unreliability of the statistical sample.

**Fuzzifying of the linguistic values – expert estimations:** Expert estimations are usually formed by the questionnaires submitted to experts responsible for the machine exploitation. Answers, or evaluations, as linguistic or verbal variables are indicators of the dependability and maintenance support ( $S$ ) of the machines. In principle, although it could be different, estimates are from 0 to 1, but the sum of the score is 1. Based on the partial evaluations of analysts (recommended minimum is five analysts) there is obtained the final evaluation  $S$  for the observed machine:

Whereas:  $S_{\phi\pi}$  is belonging function for the linguistic variables and it represents relation between summary of evaluations („excellent”, …, „poor”) in the corresponding measure and total number of analysts.

The final evaluation of indicators of maintenance support ( $S$ ) is mapped on the fuzzy sets of dependability ( $D$ ), Figure 2, in order to be integrated into the synthetic evaluation (1).

**Fuzzy conclusion model, max-min model of composition:** There follows the fuzzy max-min model as composition of the partial parameters.

(I) Defined are fuzzy numbers  $R_p, M_p$  and  $S_p$  through belonging function  $\mu$  and class  $j = 1$  to  $n$ :

(II) Belonging functions can have among them  $C = n^3 = 5^3 = 125$  combinations. Each combination represents one evaluation  $D_i$  (5):

(III) When take into account only values satisfying the condition  $\mu_{R,M,S(j=1, \dots, n=5)} \neq 0$  the outcomes are  $o$  ( $o = 1$  to  $O$  where  $O \leq C$ ). Each outcome has corresponding identification values (IV) and (V) for calculation.

(IV) For each combination  $c$  there is calculated value  $J_c$  rounded to whole number value:

$$J_c = [j_{(\mu R)_c} + j_{(\mu M)_c} + j_{(\mu S)_c}] / 3, \quad (8)$$

где је:  $j_c$  - класа којој припада одговарајући фази број (6) за посматрану функцију припадности и дату комбинацију  $c$ , при чему је  $j_c = 1, \dots, n = 5$ .

(V) За сваки исход тражи се минимална вредност  $\mu_{R,M,S}$  у вектору  $D_c$  (7), на следећи начин:

$$MIN_o = \min\{\mu_{R(j)o}, \mu_{M(j)o}, \mu_{S(j)o}\}, \text{ за свако } o = 1 \text{ до } O. \quad (9)$$

(VI) Исходи се групишу према ведности  $J_c$ . Број оваквих група може бити 0 до  $n=5$ .

(VII) У свакој групи исхода (VI) тражи се максимална вредност међу идентификованим минимумима (V):

$$MAX_j = \max\{MIN_1, \dots, MIN_o, \dots, MIN_O\}_{j_c}, \text{ за свако } j = o \quad (10)$$

Оцена сигурности функционисања посматране машине добија се у форми:

$$\mu_D = (MAX_{j=1}, \dots, MAX_{j=n=5}) = (\mu_{D(1)}, \dots, \mu_{D(j)}, \dots, \mu_{D(n=5)}) \quad (11)$$

**Идентификација:** Циљ поступка идентификације је пресликање израза  $D_i$  (11) према конфигурацији фази скупова, слика 2. „Best-fit” метод [10], користи се за трансформацију  $D_i$  у форму која је дефинисана степеном припадности: „лоше”, „прихватљиво”, „просечно”, „добро”, „одлично”. Метода користи растојање  $d_i$  између  $D_i$  добијено «max-min» композицијом (12) и сваког од  $D_i$  израза, слика 2.

whereas:  $j_c$  – class that certain fuzzy number belongs to (6) for observed belonging function and given combination  $c$ , while  $j_c = 1, \dots, n = 5$ .

(V) For each outcome there is observed the minimum value  $\mu_{R,M,S}$  in vector  $D_c$  (7), in the following way:

(VI) Outcomes are grouped in accordance with value  $J_c$ . Number of such groups can be from 0 to  $n=5$ .

(VII) In each group of outcomes (VI) is requested the maximum value among identified minimums (V):

Safe functioning evaluation for the observed machines is obtained in the form:

**Identification:** The aim of the identification procedure is to copy the expression  $D_i$  (11) in accordance with the configuration of the fuzzy sets, Figure 2. The „Best-Fit” Method [10] is applied for the transformation of  $D_i$  into the form defined by the belonging grades: „poor”, „acceptable”, „average”, „good”, and „excellent”. The method uses distance  $d_i$  between  $D_i$  and obtained „max-min” values by the composition (12) and each of  $D_i$  expressions, Figure 2.

$$d_i(D_i, H_i) = \sqrt{\sum_{j=1}^5 (\mu_{H_i}^j - \mu_{D_i}^j)^2}, j = 1, \dots, 5;$$

$$H_i = \{ \text{“одлично / excellent”, “добро / good”, “просечно / average”,} \\ \text{“прихватљиво / acceptable”, “лоше / poor”} \}, \quad (12)$$

где је:  $\mu_{H_i}^j$  - дефинисано у складу са изразом (2).

Што је  $\mu_D$  ближе  $i$ -тој лингвистичкој променљивој, мање је  $d_i$ . Релативно растојање у фази скупу  $\alpha_i$  у односу на најмање  $d_i$  износи:

whereas:  $\mu_{H_i}^j$  - is defined in accordance with expression (2).

As  $\mu_D$  is closer to  $i$  linguistic variable, the  $d_i$  is smaller. Relative distance in the fuzzy set  $\alpha_i$  in relation with the smallest  $d_i$  is:

$$\alpha_i = \frac{1}{d_i / d_{i \min}}, \quad i = 1, \dots, 5. \quad (13)$$

где је:  $d_{i \min}$  - најмање растојање међу  $d_i$ .

Whereas:  $d_{i \min}$  - is the shortest distance among  $d_i$ .

$$\beta_i = \frac{\alpha_i}{\sum_{i=1}^5 \alpha_i}, \quad i = 1, \dots, 5 \quad \sum_{i=1}^5 \beta_i = 1 \quad (14)$$

Релативна растојања се нормализују:

Сигурност функционисања машине дефинисана лингвистичким променљивим, слика 2, исказана је изразом:

$$D_i = \{(\beta_i = 1, "poor"), (\beta_i = 2, "acceptable"), (\beta_i = 3, "average"), (\beta_i = 4, "good"), (\beta_i = 5, "excellent")\} \quad (15)$$

## ЗАКЉУЧАК

Приказани модел оцене сигурности функционисања машина, формиран је на основама фази логике, што подразумева фазификацију: функција поузданости и погодности одржавања, експертских оцена логистичке подршке одржавању и фази логичко закључивање. У раду који следи, демонстрирана је примена и дата оцена применљивости овог моделског приступа. Тестови изведени на помоћним машинама површинских копова лигнита, омогућавају генерализацију закључака и оцена.

## ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Bengtssonab, M., Kurdvebc, M., Machining Equipment Life Cycle Costing Model with Dynamic Maintenance Cost, 23rd CIRP Conference on Life Cycle Engineering, Procedia CIRP 48, 2016, pp. 102 -107.
2. Kalmakov, V.A., Andreev, A.A., Martyanov, A.S., Remaining Vehicles Useful Lifetime Estimation Based on Operation Conditions Measurement, International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2017 Procedia Engineering 206, 2017, pp. 1716 - 1721.
3. Wang, Z., Huang, H.Z., Du, X., Reliability - based design incorporating several maintenance policies, Eksplatacja i Niegawodnosc – Maintenance and Reliability, 44(4), 2009, pp. 37- 44.
4. Dababnehab, A., Ozbolatabc, I.T., Predictive reliability and lifetime methodologies for circuit boards, Journal of Manufacturing Systems, Volume 37, Part 1, 2015, pp. 141- 148.
5. Bugarić, U., Tanasijević, M., Polovina, D., Ignjatović, D., Jovančić, P., Lost production costs of the overburden excavation system caused by rubber belt failure, Eksplatacja i Niegawodnosc – Maintenance and Reliability, 14(4), 2012, pp. 333 - 341.
6. Д.Я. Крунич, С. Вуйич, М. Танасијевић, Б. Димитријевић, Т. Шубаранович, С. Илич, С. Максимовић, Моделњне подходе к оценке животног цикла вспомогателних машин на примере угольног карьера в Сербии, Физико-
7. Технические проблемы разработки полезных ископаемых, номер 3, 2018, стр. 51 - 61.
7. Tanasijević, M., Bugarić, U., Jovančić, P., Ignjatović, D., Polovina, D., Relationship between the reliability and the length of conveyor rubber belt, Proceedings of the 29th Danubia-Adria Symposium on Advances in Experimental Mechanics, 26th-29th September, Beograd, 2012, pp. 274 - 277.
8. Abo-Alkheer, A.K., El-Hami, A., Kharmanda, M.G., Mouazen, A.M., Reliability-based design for soil tillage machines, Journal of Terramechanics, 48(1), 2011, pp. 57- 64.
9. International Electrotechnical Vocabulary, Dependability and Quality of service, IEC Standard 50(191), 1990.
10. Vujić, S., Miljanović, I., Fuzzy logic in mining, Academy of Engineering Sciences of Serbia and Mining Institute Belgrade, 2013, 98 p. (in Serbian)
11. Wang, J., Yang, J.B., Sen, P., (1995) Safety analyses and synthesis using fuzzy sets and evidential reasoning. Reliability Engineering and System Safety, 47(2), pp.103-118.
12. Chanseok Park, Weibullness test and parameter estimation of the three-parameter Weibull model using the sample correlation coefficient, Vol 24, No 4, 2017, pp. 376 - 391.
13. Dhillon, B.S., Mining Equipment Reliability, Maintainability and Safety, Springer, 2008, pp. 21 - 22.

Relative distances are normalised:

Dependability of the machines defined by the linguistic variables, Figure 2, is expressed by the quotation:

## CONCLUSION

The illustrated model of the dependability evaluation for the machines is created on the basis of the fuzzy logic, which implies fasification: functions of reliability and maintainability, expert evaluations maintenance support and fuzzy logic concluding. In the work there is demonstrated application and given evaluation of applicability of this model of approach. Performed tests on the examples of auxiliary machines of the surface mines of lignite allow generalization of conclusion and evaluations.

## ПРИМЕНА ФАЗИ ЛОГИЧКОГ МОДЕЛОВАЊА КОД ОЦЕНЕ СИГУРНОСТИ ФУНКЦИОНИСАЊА МЕХАНИЗАЦИЈЕ НА ПОВРШИНСКИМ КОПОВИМА

### APPLICATION OF FUZZY LOGICAL MODELING WHEN ASSESSING THE DEPENDABILITY OF MECHANIZATION ON OPEN PITS

DOI: 10.25075/BM.2018.08

Драгица Јагодић Крунић<sup>1</sup>  
Милош Танасијевић<sup>2</sup>  
Слободан Вујић<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Министарство рударства и енергетике Републике Србије  
<sup>2</sup>Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет

<sup>3</sup>Рударски институт Београд

dragica.jagodickrunic@mre.gov.rs

Dragica Jagodić Krunic<sup>1</sup>  
Miloš Tanasijević<sup>2</sup>  
Slobodan Vujić<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Ministry of Mining and Energy Republic of Serbia  
<sup>2</sup>University of Belgrade, Faculty of Mining and Geology

<sup>3</sup>Mining Institute Beograd

dragica.jagodickrunic@mre.gov.rs

**Сажетак:** На примерима дозера, као најчешће ангажованих машина на извођењу помоћних радова на површинским коповима угља Електропривреде Србије, у раду је показана примена фази логичког модела оцене сигурности функционисања механизације у рудницима.

**Кључне речи:** примена фази логике, фази логичко моделовање, сигурност функционисања механизације, дозер, помоћни радови.

**Summary:** On examples of dozers, as the most commonly engaged machines for the performance of auxiliary works on open pits of coal of Electric Power Industry of Serbia, this paper shows the application of the fuzzy logical model of assessment for the dependability of mechanisation in mines.

**Key words:** application of fuzzy logic, fuzzy logical modeling, dependability of mechanization, dozer, auxiliary works

#### УВОД

Ово је показни наставак рада *Фази логички модел оцене сигурности функционисања механизације на површинским коповима*. Дозери као најбројније и најоптерећеније помоћне машине на површинским коповима угља Електропривреде Србије, послужили су у раду за демонстрацију примене фази логичког моделовања код оцене сигурности функционисања машина. Разлог избора дозера је вишегодишње систематско праћење њиховог рада и одржавања, обим и поузданост прикупљених података.

#### INTRODUCTION

This is a representative continuation of the paper „Fuzzy logical model of assessing for the dependability of mechanisation on open pits”. Dozers as the most numerous and most loaded ancillary machines on the open pits of coal of Electric Power Industry of Serbia, have served in this paper for the demonstration of application of fuzzy logical modeling when assessing the dependability of machines. The reason for selecting dozers is systematic monitoring of their work and maintenance over the years, and the scope and reliability of the collected data.

Оцена сигурности функционисања машина базира се на анализи поузданости ( $R$ ) и погодности одржавања ( $M$ ) на основу временске слике стања машина, и логистичке подршке одржавању ( $S$ ) на основу експертских оцена у експлоатацији и одржавању машина.

Ради континуитета праћења и лакшег разумевања изложеног, корисно је, чак и неопходно због позивања на функције и изразе, успостави везу са радом „Фази логички модел оцене сигурности функционисања механизације на површинским коповима”.

## ИЗБОР ДОЗЕРА

На површинским коповима угља Електропривреде Србије користи се више типова дозера. Пажњу ћемо задржати на машинама ангажованим у Рударском басену „Колубара”, познатих произвођача Liebherr, Stalowa Wola и Caterpillar. Из пословних разлога, оригиналне ознаке модела дозера ових производа замењене су ознакама:

ПРОИЗВОЂАЧ ДОЗЕРА	МОДЕЛ ДОЗЕРА
A	A1, A2
B	B1, B2
C	C1, C2

Редослед ових ознака није еквивалентан редоследу наведених производа. На површинским коповима Рударског басена „Колубара” дозери производа А у експлоатацији су 11 година, а производа В и С осам година.

## УЛАЗНИ ПОДАЦИ – ВРЕМЕНСКА СЛИКА СТАЊА – ЕКСПЕРТСКА ОЦЕНА

Вишегодишњим праћењем рада дозера, прикупљени подаци, обрађени и систематизовани у табелама 1 и 2, послужили су за дефинисање Weibull-ове расподеле, функције поузданости, функције погодности одржавања, средњег времена до отказа и средњег време у отказу, приказани у табелама 3 и 4. У оцени логистичке подршке одржавању дозера учествовало је пет експерата, оцене су приказане у табели 5.

Assessment dependability of machines is based on the analysis of reliability ( $R$ ) and maintainability ( $M$ ) based on the temporal image of the condition of machines, and maintenance support ( $S$ ) is based on the expert assessment in exploitation and maintenance of machines.

In order to continue the monitoring and enable easier understanding of the stated matter, it is useful and even necessary for calling upon the functions and phrases, to establish a link with the paper „Fuzzy logical model of assessing for the dependability of mechanisation on open pits”.

## SELECTION OF DOZERS

Several types of dozers are used in open pits of coal of Electric Power Industry of Serbia. We will keep our attention on the machines engaged in the „Kolubara” Mining basin, by the famous manufacturers Liebherr, Stalowa Wola and Caterpillar. For business reasons, original marks of dozer models of these manufacturers are replaced by the marks:

DOZER MANUFACTURER	DOZER MODEL
A	A1, A2
B	B1, B2
C	C1, C2

Order of these marks is not equivalent to the order of the mentioned manufacturers. In the open pits of the „Kolubara” Mining basin, the dozers of the manufacturer A have been exploited for 11 years, and the dozers of manufacturers B and C for eight years.

## INPUT DATA - TEMPORAL IMAGE OF CONDITION – EXPERT ASSESSMENT

Over the years of monitoring the work of dozers, the collected data, which is processed and systematized in tables 1 and 2, served for defining Weibull's distribution, reliability function, maintainability function, mean time to failure and mean time in failure, shown in tables 3 and 4. Five experts took part in the assessment of dozer maintenance support, the assessments are shown in table 5.

Табела 1, Времена до отказа (спремности за рад) дозера (t)  
 Table 1, Time to failure (up time) of dozers (t)

Машина / Machine													
A1			A2			B1		B2		C1		C2	
	t (mh)	t (mh)		t (mh)	t (mh)		t (mh)		t (mh)		t (mh)		t (mh)
1	972	57	20940	1	782	57	19541	1	2257	1	2894	1	1904
2	1159	58	21300	2	1530	58	19788	2	2625	2	3196	2	4443
3	1457	59	21684	3	2384	59	20100	3	3072	3	4172	3	6374
4	1655	60	22107	4	3025	60	20375	4	4937	4	4633	4	8095
5	1755	61	22548	5	3280	61	20659	5	6361	5	6164	5	10733
6	2145	62	22945	6	3571	62	20954	6	7651	6	7236	6	11855
7	2697	63	23309	7	4106	63	21313	7	8547	7	8160	7	14011
8	2999	64	23503	8	4736	64	21630	8	9875	8	8658	8	15233
9	3190	65	23732	9	5997	65	21895	9	10171	9	9253	9	16586
10	3456	66	24017	10	6246	66	22197	10	10472	10	9565	10	17227
11	4366	67	24300	11	6483	67	23167	11	11196	11	10102	11	17951
12	4397	68	24599	12	6610	68	23518	12	12683	12	10627	12	18385
13	4730	69	24904	13	6678	69	23812	13	13123	13	11529	13	18784
14	5510	70	25261	14	6989	70	24582	14	13804	14	11896	14	19196
15	5946	71	25569	15	7668	71	24810	15	14212	15	12174	15	19528
16	6309	72	25972	16	8257	72	24889	16	14601	16	15434	16	19919
17	6601	73	26137	17	8532	73	24969	17	15011	17	16069	17	20712
18	6961	74	26523	18	8920	74	25273	18	15892	18	17011	18	21077
19	7356	75	26903	19	9290	75	25542	19	16044	19	17719	19	21462
20	7750	76	27653	20	9359	76	25644	20	16207	20	18274	20	21848
21	7771	77	27885	21	9611	77	26012	21	17561	21	19464	21	22090
22	7873	78	28154	22	9911	78	26109	22	17961	22	20538	22	23467
23	8244	79	28429	23	10281	79	26261	23	19105	23	21042	23	23892
24	8595	80	28824	24	10839	80	27334	24	19523	24	21197	24	24418
25	8951	81	29117	25	11118	81	27519	25	19870	25	21538		25
26	9132	82	29491	26	11419	82	27823	26	20342	26	22250		26
27	9529	83	29865	27	11814	83	27937	27	20820	27	22584		27
28	9807	84	30136	28	12027	84	28544	28	21230	28	22925		28
29	10005	85	30604	29	12239	85	28749	29	21784	29	23344		
30	11322			30	12374	86	28966	30	22304	30	23688		
31	11661			31	12622	87	29151	31	22544	31	24053		
32	12035			32	12971	88	29435	32	22959	32	24394		
33	12224			33	13518	89	29521	33	23282	33	25104		
34	12283			34	13822	90	29673	34	23621	34	25401		
35	12609			35	14073	91	29707	35	23880	35	25653		
36	13054			36	14312	92	29768			36	26074		
37	13458			37	14522	93	29978			37	26441		
38	13739			38	14625	94	30157			38	26890		
39	14689			39	14635	95	30232			39	27691		
40	14948			40	14768	96	30297			40	28098		
41	15198			41	15274	97	30567						
42	15627			42	15471	98	30793						
43	16052			43	15750	99	30959						
44	16419			44	16288	100	31065						
45	16807			45	16337	101	31310						
46	17126			46	16649	102	31589						
47	17473			47	16946	103	31919						
48	17797			48	17195	104	32371						
49	18381			49	17265	105	32805						
50	18702			50	17462	106	33897						
51	19077			51	17780	107	34965						
52	19348			52	18208	108	35189						
53	19608			53	18740	109	35552						
54	19666			54	18768	110	35742						
55	20086			55	18886	111	36260						
56	20210			56	19292	112	36337						

Тумач / Legend: mh - мото h / moto h

Табела 2, Времена отказа дозера ( $\tau$ )

Table 2, Down time of dozers ( $\tau$ )

Машина / Machine															
A1			A2			B1		B2		C1		C2			
	$\tau$ (h)	$\tau$ (h)		$\tau$ (h)	$\tau$ (h)		$\tau$ (h)		$\tau$ (h)		$\tau$ (h)				
1	4	57	3674	1	12	57	2830	1	4	1	8	1	56	1	16
2	8	58	3694	2	16	58	2838	2	12	2	48	2	120	2	20
3	32	59	3738	3	24	59	2846	3	20	3	56	3	132	3	92
4	64	60	3766	4	30	60	2862	4	28	4	64	4	188	4	100
5	80	61	3786	5	36	61	2878	5	220	5	192	5	196	5	288
6	100	62	3818	6	52	62	2894	6	226	6	196	6	316	6	296
7	104	63	3846	7	62	63	2926	7	238	7	204	7	324	7	400
8	106	64	3894	8	376	64	2962	8	246	8	236	8	364	8	416
9	114	65	4022	9	380	65	2972	9	270	9	252	9	372	9	424
10	146	66	4074	10	392	66	2982	10	382	10	268	10	516	10	448
11	158	67	4118	11	418	67	2994	11	550	11	412	11	540	11	458
12	286	68	4206	12	704	68	3006	12	554	12	424	12	550	12	546
13	294	69	4366	13	712	69	3054	13	570	13	464	13	566	13	554
14	310	70	4374	14	716	70	3174	14	626	14	476	14	576	14	562
15	330	71	4434	15	726	71	3214	15	634	15	676	15	672	15	778
16	366	72	4450	16	742	72	3246	16	666	16	684	16	682	16	786
17	446	73	4538	17	750	73	3478	17	694	17	728	17	702	17	796
18	470	74	4554	18	758	74	3486	18	706	18	800	18	744	18	810
19	486	75	4578	19	906	75	3498	19	718	19	808	19	756	19	820
20	590	76	4614	20	1006	76	3510	20	854	20	816	20	940	20	830
21	694	77	4650	21	1014	77	3522	21	862	21	824	21	948	21	844
22	846	78	4714	22	1022	78	3638	22	882	22	834	22	964	22	854
23	850	79	4738	23	1038	79	3646	23	894	23	844	23	972	23	860
24	856	80	4750	24	1054	80	3846	24	914	24	940	24	1022	24	870
25	864	81	4831	25	1062	81	3854	25	946	25	990			25	974
26	932	82	4855	26	1070	82	3866	26	962	26	1000			26	990
27	948	83	4871	27	1110	83	4102	27	990	27	1112			27	1070
28	996	84	4903	28	1142	84	4112	28	998	28	1122				
29	1164	85	4973	29	1176	85	4120	29	1150	29	1172				
30	1188			30	1198	86	4320	30	1158	30	1190				
31	1192			31	1214	87	4330	31	1214	31	1200				
32	1196			32	1438	88	4350	32	1230	32	1220				
33	1324			33	1456	89	4388	33	1246	33	1276				
34	1660			34	1472	90	4586	34	1254	34	1314				
35	1668			35	1484	91	4602	35	1266	35	1442				
36	1684			36	1496	92	4614			36	1450				
37	1700			37	1536	93	4710			37	1514				
38	1804			38	1560	94	4722			38	1690				
39	1848			39	1580	95	4734			39	1706				
40	1880			40	1600	96	4738			40	1762				
41	1920			41	1800	97	4742								
42	2144			42	1812	98	4750								
43	2148			43	1832	99	4776								
44	2158			44	1878	100	4780								
45	2178			45	1888	101	4784								
46	2238			46	2344	102	4794								
47	2266			47	2352	103	4986								
48	2346			48	2396	104	5018								
49	2406			49	2408	105	5194								
50	2414			50	2416	106	5234								
51	2446			51	2424	107	5284								
52	2558			52	2540	108	5516								
53	2582			53	2680	109	5536								
54	3322			54	2746	110	5558								
55	3342			55	2766	111	5590								
56	3638			56	2806	112	5590								

Табела 3, Параметри поузданости Дозера  
 Table 3, Dozer reliability parameters

Машина / Machine	$\beta$	$\eta$	$\bar{T}$ [mh]
A1	1.33	18917.94	17387.48
A2	1.74	23028.31	20506.71
B1	1.44	19448.95	17671.31
B2	1.72	20501.51	18275.05
C1	1.81	19861.54	17654.92
C2	1.34	16904.30	15497.86

Табела 4, Параметри погодности одржавања дозера  
 Table 4, Dozer maintainability parameters

Машина / Machine	$\beta$	$\eta$	$\bar{T}$ [h]
A1	0.90	2791.33	3009.05
A2	1.43	3081.93	2800.24
B1	1.44	840.10	761.80
B2	1.15	934.11	889.09
C1	1.52	637.88	575.18
C2	1.00	738.09	738.09

Табела 5, Експертске оцене (S) логистичке подршке одржавању дозера  
 Table 5, Expert assessments (S) of dozers maintenance support

Машина / Machine Оцена / Rating	Експерт / Expert					$\frac{\sum s}{5}$
	1	2	3	4	5	
A1	S	a	0.5	0.4	0.4	0.26
		b	0,8	0,3	0,5	0,8
		c	0.1	0.2	0.1	0.12
		d	0.1			0.02
		e				
A2	S	a	0.6	0.6	0.5	0.34
		b	0.8	0.3	0.2	0.9
		c	0.2	0.1	0.2	0.1
		d				
		e				
B1	S	a	1	1	1	0.98
		b			0.1	0.02
		c				
		d				
		e				
B2	S	a	0.9	0.9	0.9	0.90
		b	0.1	0.1	0.1	0.10
		c				
		d				
		e				
C1	S	a	1	1	0.9	0.96
		b			0.1	0.04
		c				
		d				
		e				
C2	S	a	0.8	0.9	0.8	0.88
		b	0.2	0.1	0.2	0.12
		c				
		d				
		e				

Тумач / Legend: a - одлично / excellent, b - добро / good ,  
 c - просечно / average, d - прихватљиво / acceptable, e - лоше / poor.

Резултате приказане у табели 5 појаснићемо коришћењем оцена првог експерта, који је машину A1 оценио са *добро* у висини 80%, *просечно* у висини 10% и *прихватљиво* у висини 10%; машину A2 са *добро* у висини 80% и *просечно* у висини 20%; машину B1 са оценом *одлично* у висини 100%; машину B2 са *одлично* у висини 90% и *добро* у висини 10%; машину C1 са оценом *одлично* у висини 100%; машину C2 са оценом *одлично* у висини 80% и *добро* у висини 20%. На основу оцена свих експерата формира се коначна оцена  $S$ , илустрације ради узмимо за пример машину A1:

$$\begin{aligned} (S_{A1})_a &= ((1 \times 0.5) + (1 \times 0.4) + (1 \times 0.4)) / 5 = 0.26 \\ (S_{A1})_b &= ((1 \times 0.8) + (1 \times 0.3) + (1 \times 0.5) + (1 \times 0.6) + (1 \times 0.8)) / 5 = 0.60 \\ (S_{A1})_c &= ((1 \times 0.1) + (1 \times 0.2) + (1 \times 0.1) + (1 \times 0.2)) / 5 = 0.12 \\ (S_{A1})_d &= ((1 \times 0.1)) / 5 = 0.02 \\ (S_{A1})_e &= \text{није регистровано} / \text{not registered} \end{aligned}$$

где је: а - одлично, б - добро, с - просечно, д - прихватљиво, е - лоше

Овим поступком формиране су коначне оцене  $S$  и осталих машина.

## ФАЗИФИКАЦИЈА

У табели 1 уочљиво је да је  $t_{min} = 467$  h за  $j = 1$ , а  $t_{max} = 36337$  h за  $j = 5$ , односно да најкраћи интервал рада 467 h има машина C2, а најдужи 36337 h машина A2. Између ове две екстремне вредности, међу вредностима за  $t$  израчунавају се линеарном интерполяцијом:  $j = 2, t = 9435$  h;  $j = 3, t = 18402$  h;  $j = 4, t = 27370$  h.

Вредности  $\beta$  и  $\eta$ , табела 3, дефинишу функцију  $f(t)$  фази графичког приказа као на слици 1 за машину A1. Површина припадности функције  $f(t)$  на овој слици, подељена на фази подскупове (*лоше, прихватљиво, ... ,одлично*), показује покривеност фази подскупова: *лоше* са 98%, *прихватљиво* са 90%, *просечно* са 78%, *добро* са 47% и *одлично* са 37%. Ови параметри су основа за израчунавање показатеља поузданости, за машину A1 износе:

$$\begin{aligned} \mu(R_{A1})_a &= 0.37/(0.37+0.47+0.78+0.90+0.98) = 0.11 \\ \mu(R_{A1})_b &= 0.47/(0.37+0.47+0.78+0.90+0.98) = 0.14 \\ \mu(R_{A1})_c &= 0.78/(0.37+0.47+0.78+0.90+0.98) = 0.22 \\ \mu(R_{A1})_d &= 0.90/(0.37+0.47+0.78+0.90+0.98) = 0.26 \\ \mu(R_{A1})_e &= 0.98/(0.37+0.47+0.78+0.90+0.98) = 0.28 \\ \mu(R_{A1})_a + \mu(R_{A1})_b + \mu(R_{A1})_c + \mu(R_{A1})_d + \mu(R_{A1})_e &= 1 \end{aligned}$$

We will clarify the results shown in table 5 by using the assessments of the first expert, who graded machine A1 with *good* to the extent of 80%, *average* to the extent of 10% and *acceptable* to the extent of 10%; machine A2 with *good* the extent of 80% and *average* to the extent of 20%; machine B1 with grade *excellent* to the extent of 100%; machine B2 with *excellent* to the extent of 90% and *good* to the extent of 10%; machine C1 with grade *excellent* to the extent of 100%, and machine C2 with grade *excellent* to the extent of 80% and *good* to the extent of 20%. Based on the assessments of all experts, the final grade  $S$  is obtained, for the purposes of illustration, we are taking machine A as an example:

where is : a - excellent, b - good, c - average, d - acceptable, e - poor.

Through this procedure, the final assessments  $S$  of the other machines are also formed.

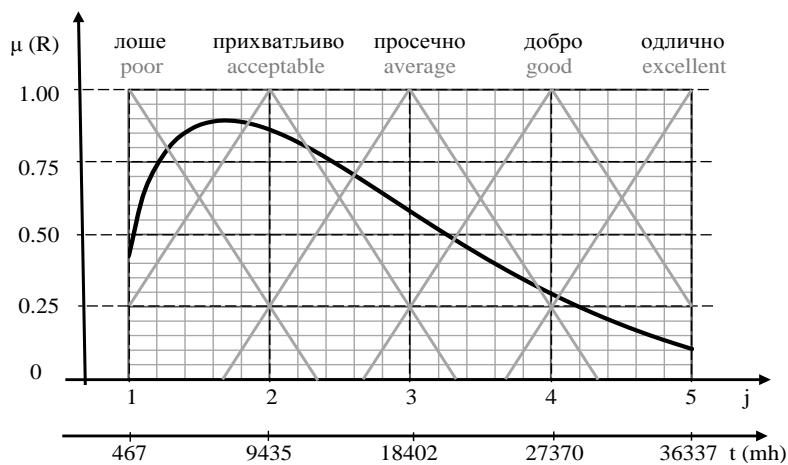
## FUZZYIFICATION

Table 1 clearly shows that  $t_{min} = 467$  h for  $j = 1$ , and  $t_{max} = 36337$  h for  $j = 5$ , i.e. that the machine C2 has the shortest interval of operation 467 h, and that the machine A2 has the longest interval of operation 36337 h. Between these two extreme values, inter-values for  $t$  are calculated by linear interpolation:  $j = 2, t = 9435$  h;  $j = 3, t = 18402$  h;  $j = 4, t = 27370$  h.

Values  $\beta$  and  $\eta$ , table 3, define the function  $f(t)$  of graph phases, like on figure 1 for machine A1. The surface of function  $f(t)$  in this figure, divided into fuzzy subgroups (*poor, acceptable, ... , excellent*), shows the coverage of fuzzy subgroups: *poor* with 98%, *acceptable* with 90%, *average* with 78%, *good* with 47% and *excellent* with 37%. These parameters are the basis for calculating the indicators of reliability, and for machine A1, those are:

где је: а - одлично, б - добро , с - просечно, д - прихватљиво , е - лоше

where is : a - excellent, b - good, c - average, d - acceptable, e - poor.



Слика 1 / Figure 1, Приказ фази скупова функције густине поузданости за машину А1 / Display of fuzzy sets of the reliability density function for machine A1

Структура фази подскупа одлично за машину А1:

Structure of fuzzy subgroup excellent for machine A1:

$$R_{A1,a} = [1 \rightarrow 0; 2 \rightarrow 0; 3 \rightarrow 0; 4 \rightarrow 0,25; 5 \rightarrow 1]$$

а његова специфична вредност је:

And its specific value:

$$R_{A1,a,0,11} = [(0x0.11); (0x0.11); (0x0.11); (0.25x0.11); (1x0.11)].$$

Специфичне вредности свих фази подскупова поузданости машине А1 приказане су у табели 6.

Specific values of all fuzzy subgroups of reliability of machine A1 are shown in table 6.

$$\mu(R_{A1}) = [0.35, 0.39, 0.32, 0.22, 0.15].$$

Табела 6, Специфичне вредности фази подскупова поузданости машине А1  
 Table 6, Specific value of fuzzy subsets of reliability for machine A1

$\mu(R)$	Оцена Rating	$j$				
		1	2	3	4	5
0.11	a	0.00x0.11	0.00x0.11	0.00x0.11	0.25x0.11	1.00x0.11
0.14	b	0.00x0.14	0.00x0.14	0.25x0.14	1.00x0.14	0.25x0.14
0.22	c	0.00x0.22	0.25x0.22	1.00x0.22	0.25x0.22	0.00x0.22
0.26	d	0.25x0.26	1.00x0.26	0.25x0.26	0.00x0.26	0.00x0.26
0.28	e	1.00x0.28	0.25x0.28	0.00x0.28	0.00x0.28	0.00x0.28
$\Sigma R$		0.35	0.39	0.32	0.22	0.15

Истим поступком израчунате су специфичне вредности фази подскупова поузданости за остале машине:

The same procedure is used to calculate the specific values of fuzzy subgroups of reliability for other machines:

$$\begin{aligned}\mu(R_{A_2}) &= [0.25, 0.33, 0.35, 0.28, 0.20] \\ \mu(R_{B_1}) &= [0.32, 0.38, 0.33, 0.23, 0.15] \\ \mu(R_{B_2}) &= [0.28, 0.36, 0.35, 0.26, 0.17] \\ \mu(R_{C_1}) &= [0.21, 0.29, 0.29, 0.26, 0.33] \\ \mu(R_{C_2}) &= [0.36, 0.41, 0.31, 0.20, 0.12].\end{aligned}$$

Према подацима из табеле 2, у анализи погодности одржавања на основу потребног времена за отклањање отказа:  $\tau_{max} = 5590$  h за  $j = 1$ , а  $\tau_{min} = 4$  h за  $j = 5$ . Вредности између екстрема:  $j = 2, \tau = 4194$  h;  $j = 3, \tau = 2797$  h;  $j = 4, \tau = 1401$  h.

Фазификоване вредности подскупова параметра погодности одржавања машина:

$$\begin{aligned}\mu(M_{A_1}) &= [0.11, 0.16, 0.26, 0.40, 0.45] \\ \mu(M_{A_2}) &= [0.14, 0.22, 0.33, 0.38, 0.33] \\ \mu(M_{B_1}) &= [0.00, 0.02, 0.13, 0.46, 0.72] \\ \mu(M_{B_2}) &= [0.00, 0.00, 0.09, 0.48, 0.76] \\ \mu(M_{C_1}) &= [0.00, 0.01, 0.09, 0.43, 0.79] \\ \mu(M_{C_2}) &= [0.00, 0.03, 0.14, 0.44, 0.72].\end{aligned}$$

Оцене логистичке подршке одржавању машина приказане су у табели 5. За машину A1 за оцену одлично, показатељ припадности је 0,26, фази подскуп:

$$S_{A1,a} = [1 \rightarrow 0; 2 \rightarrow 0; 3 \rightarrow 0; 4 \rightarrow 0,25; 5 \rightarrow 1],$$

а специфична вредност фази подскупа одлично:

$$S_{A1,a,0.26} = [(0x0.26); (0x0.26); (0x0.26); (0.25x0.26); (1x0.26)].$$

У табели 7 приказане су структуре и специфичне вредности фази подскупова логистичке подршке одржавању машине A1.

$$\mu(S_{A1}) = [0.01, 0.05, 0.28, 0.70, 0.41].$$

Табела 7, Структура и специфичне вредности фази подскупова логистичке подршке одржавању машине A1

Table 7, Structures and specific values of fuzzy subsets of maintenance support for machine A1

$\mu(S)$	Оцена Rating	$j$				
		1	2	3	4	5
0.26	a	0.00x0.26	0.00x0.26	0.00x0.26	0.25x0.26	1.00x0.26
0.60	b	0.00x0.60	0.00x0.60	0.25x0.60	1.00x0.60	0.25x0.60
0.12	c	0.00x0.12	0.25x0.12	1.00x0.12	0.25x0.12	0.00x0.12
0.02	d	0.25x0.02	1.00x0.02	0.25x0.02	0.00x0.02	0.00x0.02
0.00	e	1.00x0.00	0.25x0.00	0.00x0.00	0.00x0.00	0.00x0.00
$\Sigma S$		0.01	0.05	0.28	0.70	0.41

According to the data from table 2, in the analysis of maintainability and based on the necessary time for removal of failure:  $\tau_{max} = 5590$  h for  $j = 1$ , and  $\tau_{min} = 4$  h for  $j = 5$ . Values between extremes:  $j = 2, \tau = 4194$  h;  $j = 3, \tau = 2797$  h;  $j = 4, \tau = 1401$  h.

Fuzzification values of subgroups of parameters of machine maintainability:

Assessments of maintenance support machine are shown in table 5. For assessment *excellent* for machine A1, the indicator of belonging is 0.26, fuzzy subgroup:

and specific value of the phases of subgroup *excellent*:

Table 7 shows the structures and specific values of the fuzzy subgroups of maintenance support for machine A1.

Специфичне вредности фази подскупова параметра  $S$  за остале машине:

$$\begin{aligned}\mu(S_{A_2}) &= [0.00, 0.04, 0.27, 0.64, 0.47] \\ \mu(S_{B_1}) &= [0.00, 0.00, 0.10, 0.27, 0.99] \\ \mu(S_{B_2}) &= [0.00, 0.00, 0.03, 0.33, 0.93] \\ \mu(S_{C_1}) &= [0.00, 0.00, 0.01, 0.28, 0.97] \\ \mu(S_{C_2}) &= [0.00, 0.00, 0.03, 0.34, 0.91].\end{aligned}$$

Specific values of fuzzy subgroups of  $S$  parameter for other machines:

**Фази закључак – модел max-min композиције:**  
 Машина A1 послужиће за објашњење. Фазификовани параметри подскупова  $\mu(R_{A_1})$ ,  $\mu(M_{A_1})$  и  $\mu(S_{A_1})$  основа су синтезне процене сигурности функционисања машине ( $D$ ). У овом случају, у поступку max-min моделске обраде, могући број комбинација ( $C$ ) са истим бројем исхода ( $D$ ) је 125 ( $C=5^3=125$ ). Први исход за комбинацију 1-1-1 је  $D_{1-1-1}=[0.35; 0.11; 0.01]$ ,  $J_{1-1-1}=(1+1+1)/3=1$ , а најмања вредност исхода  $min_{1-1-1}=0.01$ . Могуће комбинације и исходни резултати дати су у табели 8, минималне вредности означене су дебљим словима, а максималне су осенчено. Исходи су груписани према величини  $J$  (1, 2, 3, 4, 5). Према параметрима из табеле 8, на основу критеријума max-min фази подскуп функције сигурности функционисања машине A1 има облик:

$$\mu(D_{A_1}) = [0.05, 0.26, 0.39, 0.39, 0.22].$$

**Phase conclusion - model max-min composition:**  
 Machine A1 will serve for the purposes of explanation. Fuzzification parameters of subgroups  $\mu(R_{A_1})$ ,  $\mu(M_{A_1})$  and  $\mu(S_{A_1})$  are synthetic assessments of dependability of machine ( $D$ ). In this case, in the process of max-min model processing, the possible number of combinations ( $C$ ) with the same number of results ( $D$ ) is 125 ( $C=5^3=125$ ). The first result for the combination 1-1-1 is  $D_{1-1-1}=[0.35; 0.11; 0.01]$ ,  $J_{1-1-1}=(1+1+1)/3=1$ , and the smallest value of the result is  $min_{1-1-1}=0.01$ . Possible combinations and results are shown in table 8, minimal values are marked with bold letters and maximal values are highlighted. Results are grouped according to value  $J$  (1, 2, 3, 4, 5). According to the parameters from table 8 and based on the criterion max-min, the fuzzy subgroup of function dependability of machine A1 has the following shape:

Табела 8, Машина A1, могуће комбинације и исходни резултати max-min анализе  
 Table 8, Machine A1, possible combinations and results of max-min analysis

$J$	Комбинација Combination			$\mu$			$J$	Комбинација Combination			$\mu$		
1	1	1	1	0.35	0.11	<b>0.01</b>	3	3	3	3	0.32	<b>0.26</b>	0.28
	1	1	2	0.35	0.11	<b>0.05</b>		3	3	4	0.32	<b>0.26</b>	0.70
	1	2	1	0.35	0.16	<b>0.01</b>		3	4	1	0.32	0.40	<b>0.01</b>
	2	1	1	0.39	0.11	<b>0.01</b>		3	4	2	0.32	0.40	<b>0.05</b>
2	1	1	3	0.35	<b>0.11</b>	0.28		3	4	3	0.32	0.40	<b>0.28</b>
	1	1	4	0.35	<b>0.11</b>	0.70		3	5	1	0.32	0.45	<b>0.01</b>
	1	1	5	0.35	<b>0.11</b>	0.41		3	5	2	0.32	0.45	<b>0.05</b>
	1	2	2	0.35	0.16	<b>0.05</b>		4	1	3	0.22	<b>0.11</b>	0.28
	1	2	3	0.35	<b>0.16</b>	0.28		4	1	4	0.22	<b>0.11</b>	0.70
	1	2	4	0.35	<b>0.16</b>	0.70		4	1	5	0.22	<b>0.11</b>	0.41
	1	3	1	0.35	0.26	<b>0.01</b>		4	2	2	0.22	0.16	<b>0.05</b>
	1	3	2	0.35	0.26	<b>0.05</b>		4	2	3	0.22	<b>0.16</b>	0.28
	1	3	3	0.35	<b>0.26</b>	0.28		4	2	4	0.22	<b>0.16</b>	0.70
	1	4	1	0.35	0.40	<b>0.01</b>		4	3	1	0.22	0.26	<b>0.01</b>
	1	4	2	0.35	0.40	<b>0.05</b>		4	3	2	0.22	0.26	<b>0.05</b>
	1	5	1	0.35	0.45	<b>0.01</b>		4	3	3	<b>0.22</b>	0.26	0.28
	2	1	2	0.39	0.11	<b>0.05</b>		4	4	1	0.22	0.40	<b>0.01</b>
	2	1	3	0.39	<b>0.11</b>	0.28		4	4	2	0.22	0.40	<b>0.05</b>
	2	1	4	0.39	<b>0.11</b>	0.70		4	5	1	0.22	0.45	<b>0.01</b>
	2	2	1	0.39	0.16	<b>0.01</b>		5	1	2	0.15	0.11	<b>0.05</b>

2	2	2	2	0.39	0.16	<b>0.05</b>	4	5	1	3	0.15	<b>0.11</b>	0.28
	2	2	3	0.39	<b>0.16</b>	0.28		5	1	4	0.15	<b>0.11</b>	0.70
	2	3	1	0.39	0.26	<b>0.01</b>		5	2	1	0.15	0.16	<b>0.01</b>
	2	3	2	0.39	0.26	<b>0.05</b>		5	2	2	0.15	0.16	<b>0.05</b>
	2	4	1	0.39	0.40	<b>0.01</b>		5	2	3	<b>0.15</b>	0.16	0.28
	3	1	1	0.32	0.11	<b>0.01</b>		5	3	1	0.41	0.26	<b>0.01</b>
	3	1	2	0.32	0.11	<b>0.05</b>		5	3	2	0.15	0.26	<b>0.05</b>
	3	1	3	0.32	<b>0.11</b>	0.28		5	4	1	0.41	0.40	<b>0.01</b>
	3	2	1	0.32	0.16	<b>0.01</b>		1	5	5	<b>0.35</b>	0.45	0.41
	3	2	2	0.32	0.16	<b>0.05</b>		2	4	5	<b>0.39</b>	0.40	0.41
	3	3	1	0.32	0.26	<b>0.01</b>		2	5	4	<b>0.39</b>	0.45	0.70
	4	1	1	0.22	0.11	<b>0.01</b>		2	5	5	<b>0.39</b>	0.45	0.41
	4	1	2	0.22	0.11	<b>0.05</b>		3	3	5	<b>0.32</b>	0.26	0.41
	4	2	1	0.22	0.16	<b>0.01</b>		3	4	4	<b>0.32</b>	0.40	0.70
	5	1	1	0.15	0.11	<b>0.01</b>		3	4	5	<b>0.32</b>	0.40	0.41
3	1	2	5	0.35	<b>0.16</b>	0.41		3	5	3	<b>0.32</b>	0.45	<b>0.28</b>
	1	3	4	0.35	<b>0.26</b>	0.70		3	5	4	<b>0.32</b>	0.45	0.70
	1	3	5	0.35	<b>0.26</b>	0.41		3	5	5	<b>0.32</b>	0.45	0.41
	1	4	3	0.35	0.40	<b>0.28</b>		4	2	5	0.22	<b>0.16</b>	0.41
	1	4	4	<b>0.35</b>	0.40	0.70		4	3	4	<b>0.22</b>	0.26	0.70
	1	4	5	<b>0.35</b>	0.40	0.41		4	3	5	<b>0.22</b>	0.26	0.41
	1	5	2	0.35	0.45	<b>0.05</b>		4	4	3	<b>0.22</b>	0.40	0.28
	1	5	3	0.35	0.45	<b>0.28</b>		4	4	4	<b>0.22</b>	0.40	0.70
	1	5	4	<b>0.35</b>	0.45	0.70		4	4	5	<b>0.22</b>	0.40	0.41
	2	1	5	0.39	<b>0.11</b>	0.41		4	5	2	0.22	0.45	<b>0.05</b>
	2	2	4	0.39	<b>0.16</b>	0.70		4	5	3	<b>0.22</b>	0.45	0.28
	2	2	5	0.39	<b>0.16</b>	0.41		4	5	4	<b>0.22</b>	0.45	0.70
	2	3	3	0.39	<b>0.26</b>	0.28		5	1	5	0.15	<b>0.11</b>	0.41
	2	3	4	0.39	<b>0.26</b>	0.70		5	2	4	<b>0.15</b>	0.16	0.70
	2	3	5	0.39	<b>0.26</b>	0.41		5	2	5	<b>0.15</b>	0.16	0.41
	2	4	2	0.39	0.40	<b>0.05</b>		5	3	3	<b>0.15</b>	0.26	0.28
	2	4	3	0.39	0.40	<b>0.28</b>		5	3	4	<b>0.15</b>	0.26	0.70
	2	4	4	<b>0.39</b>	0.40	0.70		5	3	5	<b>0.15</b>	0.26	0.41
	2	5	1	0.39	0.45	<b>0.05</b>		5	4	2	0.15	0.40	<b>0.05</b>
	2	5	2	0.39	0.45	<b>0.05</b>		5	4	3	<b>0.15</b>	0.40	0.28
	2	5	3	0.39	0.45	<b>0.28</b>		5	4	4	<b>0.15</b>	0.40	0.70
	3	1	4	0.32	<b>0.11</b>	0.70		5	5	1	0.15	0.45	<b>0.01</b>
	3	1	5	0.32	<b>0.11</b>	0.41		5	5	2	0.15	0.45	<b>0.05</b>
	3	2	3	0.32	<b>0.16</b>	0.28		5	5	3	<b>0.15</b>	0.45	0.28
	3	2	4	0.32	<b>0.16</b>	0.70		4	5	5	<b>0.22</b>	0.45	0.41
	3	2	5	0.32	<b>0.16</b>	0.41		5	4	5	<b>0.15</b>	0.40	0.41
	3	3	2	0.32	0.26	<b>0.05</b>		5	5	4	<b>0.15</b>	0.45	0.70
	3	3	3	0.32	0.26	<b>0.05</b>		5	5	5	<b>0.15</b>	0.45	0.41

Истим поступком дефинисани су фази подскупови сигурности функционисања осталих машина:

$$\begin{aligned}\mu(D_{A2}) &= [0.04, 0.25, 0.33, 0.35, 0.28] \\ \mu(D_{B1}) &= [0.00, 0.10, 0.32, 0.38, 0.23] \\ \mu(D_{B2}) &= [0.00, 0.03, 0.33, 0.36, 0.26] \\ \mu(D_{C1}) &= [0.00, 0.01, 0.28, 0.29, 0.33] \\ \mu(D_{C2}) &= [0.00, 0.03, 0.36, 0.41, 0.20].\end{aligned}$$

**Дефазификација:** Пођимо од машине A1, коначна процена сигурности функционисања машине  $d_i(D_{A1,a})$ , гради се на елементима подскупа D:

The same procedure is used to define the fuzzy subgroups of dependability of the other machines:

**Defuzzification:** Starting from machine A1, the final assessment of the dependability of machine  $d_i(D_{A1,a})$ , is built on the elements of subgroup D:

$$d_1(D_{A1,a}) = \sqrt{\sum_{j=1}^5 (\mu(D_{A1}) - \mu_{ja})^2} = \\ = \sqrt{(0.05 - 0)^2 + (0.26 - 0)^2 + (0.39 - 0)^2 + (0.39 - 0.25)^2 + (0.22 - 1)^2} = 0.922$$

Ово је процена за оцену а (одлично), за остале оцене б, с, д и е (добро, просечно, прихватљиво, лоше) коначне процене сигурности функционисања машине А1 крећу се:

$$d_2(D_{A1,b}) = 0.680; d_3(D_{A1,c}) = 0.665; d_4(D_{A1,d}) = 0.899; d_5(D_{A1,e}) = 1.120$$

За  $d_{min} = d_3$ ,  $\alpha$  и  $\beta$  износе:

This is the assessment for the grade a (excellent), for other grades b, c, d and e (good, average, acceptable, poor) the final assessments of dependability for machine A1 are:

For  $d_{min} = d_3$ ,  $\alpha$  and  $\beta$  amount to:

$$\beta_1 = \frac{\alpha_1}{\sum_{i=1}^5 \alpha_i} = \frac{0.722}{0.722 + 0.978 + 1 + 0.740 + 0.594} = 0.179$$

$$\alpha_1 = \frac{1}{d_1/d_3} = \frac{1}{0.922/0.665} = 0.722$$

$$\alpha_2 = 0.978; \alpha_3 = 1; \alpha_4 = 0.740; \alpha_5 = 0.594.$$

$$\beta_2 = 0.242; \beta_3 = 0.248; \beta_4 = 0.184; \beta_5 = 0.147.$$

Процена сигурности функционисања машине А1:

Assessment of dependability of machine A1:

$$D_{A1} = [(0.179 \rightarrow a), (0.242 \rightarrow b), (0.248 \rightarrow c), (0.184 \rightarrow d), (0.147 \rightarrow e)]$$

Табела 9, Процене сигурности функционисања дозера  
 Table 9, Assessment of dependability of dozers

Машина Machine	Оцена / Rating				
	a	b	c	d	e
A1	0.179	0.242	0.248	0.184	0.147
A2	0.199	0.238	0.227	0.185	0.150
B1	0.198	0.266	0.226	0.163	0.147
B2	0.209	0.264	0.225	0.155	0.147
C1	0.239	0.243	0.210	0.156	0.151
C2	0.189	0.280	0.234	0.153	0.144

Истим поступком дефинисане су процене сигурности функционисања свих машина, табела 9.

The same procedure is used to define the assessments of dependability of all machines, table 9.

$$Z_{A1} = \frac{\sum_{i=1}^5 \beta_i \cdot C_i}{\sum_{i=1}^5 \beta_i} = \frac{0.179 \cdot 5 + 0.242 \cdot 4 + 0.248 \cdot 3 + 0.184 \cdot 2 + 0.147 \cdot 1}{0.179 + 0.242 + 0.248 + 0.184 + 0.147} = 3.12$$

Пондерисањем оцена из табеле 9, нпр. за машину А1:

By weighting the grades from table 9, e.g. for machine A1:

добијају се процене погодније за сагледавање тенденције и анализу сигурности функционисања машина, слика 2.

Резултати оцене (табела 9 и слика 2) указују на постојање исте тенденције и близост оцена сигурности функционисања машина типа В и С. Ове машине имају више оцене од машине типа А.

Оцене сигурности функционисања анализираних машина преферирају ка „добро“ до „просечно“ и „одлично“.

Највиши ниво сигурности функционисања има машина С1, са концентрацијом оцена око „доброто“ до „одлично“. Машина је најпоузданјија и најквалиитетније одржавана.

Друго рангирана по нивоу сигурности функционисања је машина В2, са концентрацијом оцена око „доброто“ до „просечно“.

На најнижем нивоу сигурности функционисања је машина А1, са концентрацијом оцена око „доброто“ до „просечно“. Слабости код ове машине су погодност одржавања и логистичка подршка одржавању.

the grades more suitable for displaying the tendencies and analysis of dependability of machines are obtained, figure 2.

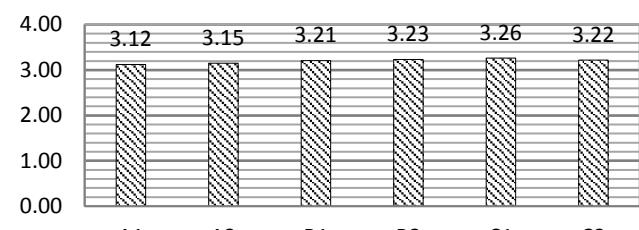
Results of assessments (table 9 and figure 2) imply that there is the same tendency and similarity of grades of dependability of machines type B and C. These machines have higher grades from the machine type A.

Assessments of dependability of the analyzed machines range preferably towards „good“ to „average“ and „excellent“.

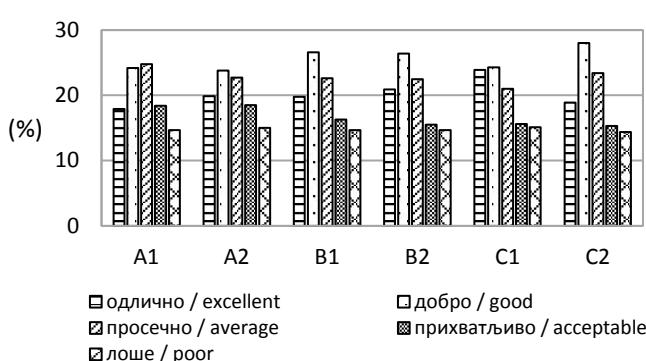
The highest level of dependability belongs to machine С1, with the concentration of grades around „good“ and „excellent“. The machine is the most reliable and the maintained with the most quality.

The second machine according to the level of dependability is machine В2, with the concentration of grades around „good“ and „average“.

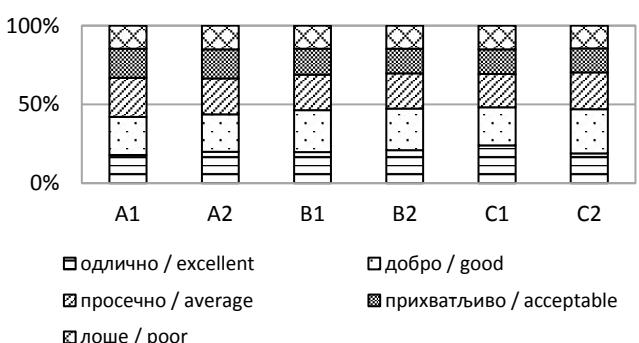
The lowest level of dependability belongs to machine А1, with the concentration of grades around „good“ and „average“. The weakness of this machine is maintainability and maintenance support.



a)



b)



c)

Слика 2, Упоредна анализа исходних резултата  
 а) ћондеришем, б) на бази њојединачних оцена, с) на бази коначних оцена сигурности функционисања машина

Figure 2, Comparative analysis of results: a) by weighting, b) based on individual grades, c) based on the final grades of dependability of machines

## АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА И ЗАКЉУЧАК

Анализа сигурности функционисања и показатеља рада машина упућује на корекцију управљања механизацијом, у принципу то се односи на политику одржавања, идентификацију и дијагностику недостатака, критичних отказа итд. Модел је демонстриран на примеру помоћних рударских машина – дозера, са аспекта применљивости ограничења нема, може се подједнако успешно применити у сличним анализама било ког техничког система у рударству и индустрији. Предуслов успешности примене је довољност, тачност и поузданост улазних података. Предност фази логичког моделовања је хибридна, манипулативна и интегративна флексибилност према подацима, без обзира на природу података.

## ANALYSIS OF RESULTS AND CONCLUSION

Analysis of results of the dependability and indicators of work of machines points to the correction of mechanization management, in principle, this refers to the policies of maintenance, identification and diagnostics of shortcomings, critical failures, etc. The model is demonstrated on the example of ancillary mining machines - dozers, from the aspect of application there are no limitations, they can be used equally sufficiently in the similar analyses of any other technical system in mining and industry. The prerequisite of successful application is sufficiency, accuracy and reliability of input data. Advantage of the fuzzy logical modeling is hybrid, manipulative and integrative flexibility according to data, regardless of the nature of the data.

## ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Bengtssonab, M., Kurdvebc, M., Machining Equipment Life Cycle Costing Model with Dynamic Maintenance Cost, 23rd CIRP Conference on Life Cycle Engineering, Procedia CIRP 48, 2016, pp. 102 -107.
2. Kalmakov, V.A., Andreev, A.A., Martyanov, A.S., Remaining Vehicles Useful Lifetime Estimation Based on Operation Conditions Measurement, International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2017 Procedia Engineering 206, 2017, pp. 1716 - 1721.
3. Wang, Z., Huang, H.Z., Du, X., Reliability - based design incorporating several maintenance policies, Eksplotacija i Niezawodnosc - Maintenance and Reliability, 44(4), 2009, pp. 37- 44.
4. Dababnehab, A., Ozbolatabc, I.T., Predictive reliability and lifetime methodologies for circuit boards, Journal of Manufacturing Systems, Volume 37, Part 1, 2015, pp. 141-148.
5. Bugarić, U., Tanasijević, M., Polovina, D., Ignjatović, D., Jovančić, P., Lost production costs of the overburden excavation system caused by rubber belt failure, Eksplotacija i Niezawodnosc - Maintenance and Reliability, 14(4), 2012, pp. 333 - 341.
6. Д.Я. Крунич, С. Вујич, М. Танасијевић, Б. Димитријевић, Т. Шубаранович, С. Илич, С. Максимовић, Модельные подходы к оценке жизненного цикла вспомогательных машин на примере угольного карьера в Сербии, Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, номер 3, 2018, стр. 51 - 61.
7. Tanasijević, M., Bugarić, U., Jovančić, P., Ignjatovic, D., Polovina, D., Relationship between the reliability and the length of conveyor rubber belt, Proceedings of the 29th Danubia-Adria Symposium on Advances in Experimental Mechanics, 26th-29th September, Beograd, 2012, pp. 274 - 277.
8. Abo-Alkheer, A.K., El-Hami, A., Kharmanda, M.G., Mouazen, A.M., Reliability-based design for soil tillage machines, Journal of Terramechanics, 48(1), 2011, pp. 57- 64.
9. International Electrotechnical Vocabulary, Dependability and Quality of service, IEC Standard 50(191), 1990.
10. Vujić, S., Miljanović, I., Fuzzy logic in mining, Academy of Engineering Sciences of Serbia and Mining Institute Belgrade, 2013, 98 p. (in Serbian)
11. Wang, J., Yang, J.B., Sen, P., (1995) Safety analyses and synthesis using fuzzy sets and evidential reasoning. Reliability Engineering and System Safety, 47(2), pp.103-118.
12. Chanseok Park, Weibullness test and parameter estimation of the three-parameter Weibull model using the sample correlation coefficient, Vol 24, No 4, 2017, pp. 376 - 391.
13. Dhillon, B.S., Mining Equipment Reliability, Maintainability and Safety, Springer, 2008, pp. 21 - 22.

МОДЕЛ РЕКУЛТИВАЦИЈЕ НА РУДНИКУ ЗА ПОДВОДНУ  
ЕКСПЛОАТАЦИЈУ УГЉА КОВИН

THE RECULTIVATION MODEL OF THE UNDERWATER  
COAL MINE KOVIN

DOI: 10.25075/BM.2018.09

Жељко Праштало<sup>1</sup>

Драган Милошевић<sup>1</sup>

Ненад Макар<sup>1</sup>

Иван Филипов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Рударски инситут Београд

<sup>2</sup>Привредно друштво за подводну  
експлоатацију угља Ковин АД

zeljko.prastalo@ribeograd.ac.rs

Željko Praštalov

Dragan Milošević<sup>1</sup>

Nenad Makar<sup>1</sup>

Ivan Filipov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mining institute Belgrade

<sup>2</sup>Company for underwater  
coal exploitation Kovin AD

zeljko.prastalo@ribeograd.ac.rs

**Сажетак:** Рудник за подводну експлоатацију угља Ковин је рударски објекат у којем целокупна површина као и сви објекти константно се користе у функцији производње угља и осталих седимената. Дакле нема делова копа који су достигли ниво развоја да је могуће вршити рекултивацију без бојазни да ће се рударским радовима нарушити рекултивисана површина. Откопни фронт је стално у фази промене своје контуре што је у директној динамичкој вези са планираном динамиком откопавања. У централној зони рудника врши се припрема угља и није могуће вршити рекултивационе радове због манипулације рудничком, али и механизацијом трећих лица. Таложнице, мала на северу и велика на истоку, није могуће рекултивисати због сталног прилива хидромешавине различитог састава као и изузимања материјала из истих. Сврха ободног насипа око велике таложнице и транспортног пута на југу је транспорт материјала и одржавања постојећих објеката на такође, није могуће вршити рекултивационе радове. Због свега овога планирање рекултивације, а нарочито њене динамике је изразито сложен процес у којем је потребно пратити динамику развоја копа. Планско уклапање динамике рекултивације у динамику развоја копа, потребно је започети поделом на функционалне зоне које ће се рекултивисати по завршетку њихове функције.

**Кључне речи:** Рудник Ковин, рекултивација, фазна рекултивација

**Summary:** The Kovin underwater coal mine is a mining site the entire surface of which, along with all of its facilities, is constantly used for the production of coal and other sediments. No part of the pit has reached a level of development which enables recultivation without fear of the mining works disturbing the recultivated surface. The front of the mining site is constantly in the process of changing its contour, which correlates directly and dynamically with the planned excavation schedule. Coal preparation is done in the central zone of the mine and recultivation works cannot be performed due to the manipulation of the mine's and third party machinery. Two settling basins, a small in the north and large in the east, cannot be recultivated due to the constant inflow of hydromixtures of varying composition and the extraction of materials from them. The purpose of the peripheral embankment around the large settling basin and the transport route in the south is the transport of materials and the maintenance of the existing facilities, and as such it is also does not allow for recultivation work. Due to all of this, the planning of the recultivation, and especially of its schedule, is a very complex process in which

needs to follow the schedule of the development of the pit. The planned integration of the recultivation schedule into the schedule of the development of the pit should start with a division into functional zones to be recultivated upon the completion of their functions.

**Key words:** The Kovin mine, recultivation, phase recultivation

## УВОД

Рекултивисање рударских копова је са аспекта заштите животне средине изузетно битан сегмент одрживог развоја средина где је претежна привредна делатност експлоатација минералних сировина. Када би се чекао завршетак откопавања целокупних количина минералних ресурса, чије откопавање понекад може да траје десетици година, да би се започело са рекултивацијом, девастирање изворног терена могло би имати несагледиве последице по животну средину у блиској околини рударских објеката. Зато је од изузетног значаја у самим рударским пројектима предвидети синхронизовање рекултивационих радова и динамике откопавања минералних ресурса, како би се са рекултивацијом дела деградираних површина могло започети у што ранијој фази експлоатације. Уколико је за функционисање производног процеса потребна целокупна површина једног рударског објекта, утолико је и уклапање рекултивације у динамику развоја копа сложенији процес који треба разматрати са више аспекта. У овом раду ће се на примеру рудника за подводну експлоатацију угља Ковин, приказати могућност дефинисања рекултивационих зона, које ће бити повезане са функционалним зонама на руднику. Након престанка рада функционалне зоне на руднику уследила би њена рекултивација на основу карактеристика самог терена и карактера претходних радова који су рађени у тој зони.

## ЗОНЕ РЕКУЛТИВАЦИЈЕ

Постојеће стање на копу је склоп изворног стања терена и изменjenih услова насталих експлоатацијом минералних сировина. Пре рударских радова у приобалној зони Дунава биле су развијене биљне заједнице шума меких лишћара (врбе и тополе) и шуме тврдих лишћара (храст лужњака), пре крчења у циљу развоја рударских радова. Сада на копу имамо стање да се унутар копа рударским радовима спречава развој постојећих биљних заједница из приобала Дунава. У зонама на којима нема интензивних радова, у централној зони велике таложнице, зони 4 на слици 1, евидентан је раст природне заједнице трске. Насипи копа су издигнути до

## INTRODUCTION

From the standpoint of environmental protection, the recultivation of mining sites is an extremely important segment of the sustainable development of environments in which the main industrial activity is the exploitation of mineral deposits. If recultivation was to be started only after the excavation of the entirety of the mineral deposits was completed, the mining of which can sometime take decades, the devastation of the original terrain could have immeasurable consequences on the environment around the mining facilities. This is why it is exceptionally important to plan out the synchronization of recultivation works and the schedule of mineral deposit exploitation in mining projects, so that the recultivation of the degraded surfaces could begin in the earliest stage of exploitation possible. If the production process requires the entire surface of the mining pit in order to function, the integration of recultivation into the schedule of the development of the pit is that much more of a complex procedure which requires consideration from multiple angles. This paper showcases the potential for defining reclamation zones which correspond to the functional zones of a mine on the example of the Kovin underwater coal mine. After work the operation of a functional zone of the mine has ceased, its recultivation would be based on the characteristics of the terrain itself and the type of works previously carried out in the particular zone.

## RECULTIVATION ZONES

The existing condition of the mining pit is the result of the original state of the terrain and the altered conditions created by the exploitation of mineral deposits. Prior to the mining works in the coastal zone of the Danube, plant communities in the form of deciduous softwood (willow and poplar trees) and hardwood (European oak) forests developed there before they were deforested in order to develop mining operations. Now the mining work at the pit prevents the development of the existing plant communities from the Danube coast. In the zones with no intensive work, in the central zone of the large settling basin, zone 4 in Figure 1, the growth of a natural

нивоа изнад максималних историјских нивелета Дунава, па у досадашњем трајању експлоатације није било плављења унутар копа. Зона око насипа је у сталном контакту са водом нижег или вишег нивоа.

По завршетку експлоатације угља на овом копу, на месту подводног копа остаће потопљена површина (језеро) са косином обале од  $20^{\circ}$  до  $22^{\circ}$ [1]. Ова површина је приближно правоугаоног облика. Водена површина ће обухватити простор од око 140 ha. Просечна дубина језера ће бити од 6 m на северу, до 33 m на крају експлоатационог поља. Након откопавања угља, свих залиха шљунка одложених на јужној страни копа и наталоженог угља у одводном каналу и таложници коп ће добити коначну контуру. Техничка рекултивација ће бити извршена планирањем завршних откопних радова на одлажалишту шљунка и у таложници и неће бити потребно вршити техничку рекултивацију у пуном обиму, већ само нивелисање терена до коначних кота.

Како је процес откопавања на овом руднику веома сложен, у смислу да након откопавања минералних ресурса, шљунка и угља, следи процес раздвајања угља на фракције у постројењу за припрему, па таложења ситнијих фракција, што у зависности од временских услова може да траје дужи временски период, поступак дефинисања динамике и почетка рекултивације је стога вишеструко сложен задатак. Услови средине, стање локације после обуставе рударских радова и тиме створена ограничења, су најважнији усмеравајући чиниоци при избору зона рекултивације.

Уклапање рекултивације у постојеће радове је изузетно сложен процес у којем је потребно сагледати и анализирати више критеријума како би се добио квалитетан предлог као оквир за ревитализацију овог простора након експлоатације угља. Најважнији разматрани критеријум је динамика експлоатације лежишта, затим временско трајање експлоатације појединачних функционалних зона, смернице дате у постојећим планским и урбанистичким документима, као и климатске карактеристике.

Узимајући у обзир основне смернице планираног развоја општине Ковин [3], а водећи рачуна да су на потезу Ковин – М. Баваниште – Дубовац, у претходном периоду откривене велике резерве квалитетног лигнита у износу од 270.000.000 t на предметном подручју се, изузев објекта за регионално водоснабдевање Баната, у наредном дугорочном периоду не могу планирати други објекти.

community of reed is evident. The embankments of the mining pit have been raised up to a level above the maximum historical water levels of the Danube, and as such, there has been no flooding of the pit in exploitation work performed so far. The zone around the embankment is in constant contact with water of a lower or higher level.

Upon the completion of the exploitation of coal in this mine, the submerged surface (lake) with coastal slope ranging between  $20^{\circ}$  to  $22^{\circ}$  [1] will remain at the site of the underwater mine. This surface has an approximately rectangular shape. The aquatic surface will cover an area of around 140 ha. The average depth of the lake will be 6 m in the north, up to 33 m at the end of the exploitation field. After the excavation of the coal, all the gravel reserves deposited on the south side of the pit and the coal settled in the drainage channel and the settling basin, the mining pit will assume its final contour. Technical recultivation will be carried out by planning the final excavation work at the gravel disposal site. The settling basin will not require full technical recultivation, only leveling the ground to the final level.

Seeing as the excavation process in this mine is very complex, in the sense that the excavation of mineral deposits, gravel and coal is followed by the process of the separation of coal into fragments in the preparation plant and the sedimentation of the smaller fragments, which, depending on the weather conditions, can take a longer period of time, the process of defining the schedule start of recultivation is an all the more complex task. The environmental conditions, the location of the site after the mining works have been finished and the limitations created by it are the most important deciding factors in the selection of the recultivation zones.

Synchronizing recultivation with the existing works is an extremely complex process which requires the examination and analysis of many criteria in order to arrive at a quality proposal of a plan for the revitalization of this area after the coal exploitation is finished. The most important criterion considered is the site exploitation schedule, the time duration of the exploitation of the individual functional zones, the guidelines given in the existing planning and urban planning documents, and the climatic characteristics.

Taking into account the basic guidelines of the development plans of the Kovin municipality (3), and the fact that large reserves of high quality lignite in the amount of 270,000,000 t have been found in the Kovin – M. Bavanište – Dubovac area, other than the facilities for the regional water supply of Banat, no other facilities may be planned in the subject

Врло је важно напоменути да је предвиђени простор део ширег подручја предвиђеног као потенцијално макрорегионално извориште воде.

Основне смернице које се могу препознati у доступним плановима [3], [4] развоja општине Ковин која се тичу простора рудника су следеће:

- Формирање заштитних зелених појасева дуж саобраћајница, канала, око комуналних објеката и др., посебно на правцу дувања доминантних ветрова;
- Заштити шума и шумских земљишта, као и стабилности шумских екосистема, треба дати приоритет и посебан значај због опште угрожености од многих биотичких и абиотичких чинилаца, али и због значаја опште корисних функција шума и њене глобалне и основне намене;
- У општини нису довољно искоришћене могућности за развој пчеларства, те је неопходно у свим стратешким опредељењима истаћи да постоје добри услови за развој овог вида производње;
- Концепција развоја шума и шумског земљишта у оквиру Просторног плана подразумева повећање површина под шумама, унапређење постојећих шума и њихово коришћење у складу са еколошким принципима и условима заштите природе, уз остваривање заштитних, културно-социјалних и производних функција;
- Марине представљају, са становишта међународне и домаће научичке туристичке тражње, неопходан садржај научичког туризма, а такође захваљујући својој функцији и опремљености омогућавају и ширу туристичку промоцију подручја на којима се налазе;
- Развој ловног туризма и фаворизовање фотосафарија и посматрања птица;
- Пољопривредном земљишту које је коришћено за експлоатацију минералних сировина пројектима рекултивације дати најмену близку прећашњем стању;
- Под риболовним туризмом подразумева се више облика организованог спортског и туристичког риболова на отвореним (Дунав, канали), затвореним водама (рибњаци, језера), било на слободним локалитетима или организованим риболовним ревирима. Овај вид туристичке понуде постаје све актуелнији као основна понуда за све већи број специјализованих туристичких аген-

area for the foreseeable longterm future.

It is very important to note that the planned space is a part of a wider area envisaged as a potentially macro-regional water source.

The basic guidelines that can be identified in the available plans [3], [4] for the development of Kovin's regarding the area of the mines include:

- The formation of protective windbreaks along roads, canals, communal facilities, etc., especially in the direction of the dominant winds;
- The protection of forests, forest lands, and the stability of forest ecosystems should be given priority and special significance due to the threat posed to them by many biotic and abiotic factors, and because of the importance of the functions of forests and their global and basic purposes;
- The municipality has not properly utilized the potential for the development of beekeeping, and it is necessary to emphasize in all strategic decisions that there exist good conditions here for the development of this type of production;
- The concept of the development of forests and forest lands within the Spatial plan includes increasing the area covered by forests, improving existing forests and their use in accordance with the environmental principles and terms of nature protection, with the realization of protective, cultural, social and productive functions;
- From the point of view of the demands of international and domestic nautical tourism, marinas represent the necessary nautical tourism content and, thanks to their function and equipment, they allow for greater touristic promotion of the areas where they are located;
- The development of hunting tourism, favoring photo safaris and bird watching;
- Restoring the original purpose of the agricultural land used for the exploitation of mineral deposits with recultivation;
- Fishing tourism includes several forms of organized sport and tourist fishing on open (Danube, canals) and closed waters (fishponds, lakes), either at open locations or organized fishing areas. This form of tourism offer is becoming more and more popular as a basic offer provided by an increasing number of specialized travel agencies, but it can also

- ција, али може бити и додатни садржај боравка;
- Спортско-рекреативни туризам;
  - Важна је изградња, реконструкција и осавремењавање општинских (локалних) путева, чиме ће се створити предуслови за бржи развој мањих насеља у општини.

Плански документи упућују да се земљиште у будућности користи у пољопривредне сврхе, што на овом простору неће бити могуће због тога што као зона водоснабдевања не може бити третирана пестицидима и осталим заштитним средствима. У приобаљу Дунава на локацији планираној за марину, могуће је израдити објекте у функцији туризма, спорта и рекреације, што је најприхватљивија могућност ревитализације овог подручја у будућности. Међутим, због очувања природних екосистема, није могуће градити објекте за групу професионалних спортских дешавања као што су стадиони, дворане, сале, комплекси базена, већ спортски комплекси у којима доминира зеленило, као што су веће јавне парковске и шумске површине, површине излештишта, које не изискују посебно изграђене или опремљене површине и објекте, а употребљене су трим стазама, стазама за шетњу и вожњу бицикл-ла, дечијим игралиштима, површинама за одмор, камповање, терене за спортску оријентацију и евентуално игралиштем за мале спортиве. То су спортске површине за самоиницијативне активности корисника, у смислу спонтане рекреације појединача и група, који захтевају веће или врло велике комплексе земљишта.

Имајући у виду позитивне ефekte које шума има, а и према Просторном плану општине Ковин [3], један од приоритетних задатака је повећање степена шумовитости подручја. Повећање степена шумовитости мора бити акција ширег значаја, спровођена у сарадњи са другим субјектима, уз максимално коришћење техничких, кадровских и економских потенцијала. Зато је и потребно предвидети у циљу рекултивације овог простора садњу дрвећа и шибља.

Рударски објекат који постоји и који ће постојати по завршетку откопавања угља није могуће третирати као затворен, пошто постоје велике количине угља које је могуће откопати, па се не може са сигурношћу тврдити које ће површине бити планиране за накнадно откопавање и није логично вршити рекултивацију изградњом објекта у које би била уложена значајна новчана средства. Такође, врло је битно и ко ће бити законски власник овог подручја, па није могуће планирати инвестициону улагања у пројекте. На

serve as additional content of a stay;

- Sports and outdoor recreational tourism;
- The construction, reconstruction and modernization of municipal (local) roads is important, it creates the preconditions for the faster development of smaller settlements within the municipality.

The planning documents indicate that the land is to be used for agricultural purposes in the future, which will not be actually possible in this area seeing as it is a water supply zone and as such, may not be treated with pesticides and other protective agents. Tourism, sports and outdoor recreational facilities can be built on the Danube coast, at the location planned for the marina, these being the most acceptable potential options for the revitalization of this area of the future. However, due to the preservation of natural ecosystems, facilities for a number of professional sports events such as stadiums, halls and pool complexes may not be built. Instead, sports complexes dominated by greenery, such as larger public parks and forested areas, picnic grounds which do not require specially built or equipped spaces and facilities, complete with fitness trails, walking and cycling paths, children's playgrounds, resting, camping and sports areas and potential pitches for smaller sports may be constructed. These are sports areas for the self-initiated activities of its users, meaning the spontaneous outdoors recreation activities of individuals and groups which require large to very large complexes of land.

Bearing in mind the positive effects provided by forests, and according to the Spatial plan of the Kovin municipality [3], one of the highest priority tasks is to increase the amount of forested areas. The increase in the degree of forestation must be carried out in cooperation with other entities, with the maximum use of the technical, staff and economic resources. The planting of trees and shrubs for the purposes of recultivating this area must be planned.

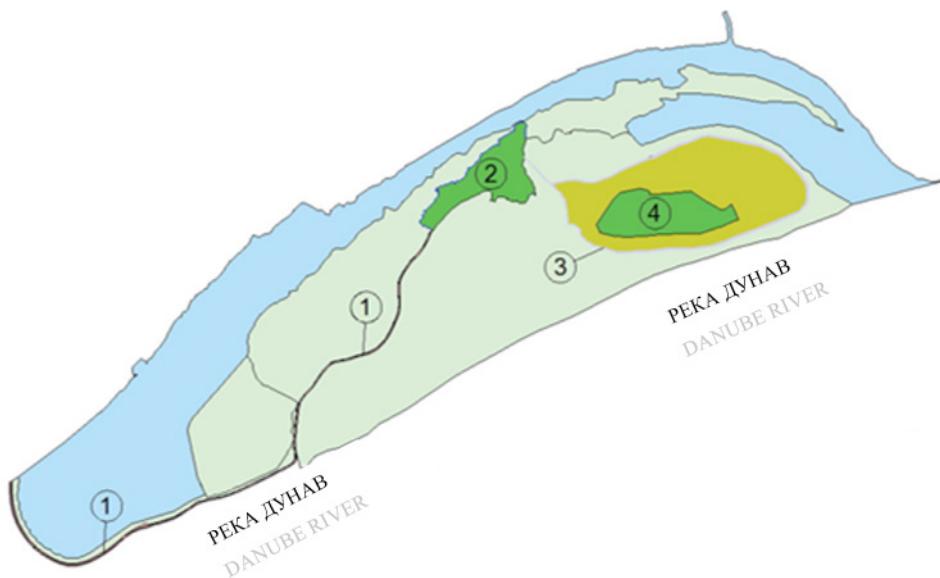
The mining site which currently exists and will continue to exist after the completion of the coal excavation cannot be treated as closed, as there are large quantities of coal that to be dug up, so it is not possible to state with certainty which areas will be planned for additional excavation and as such, recultivation by way of the construction of facilities into which significant amounts of money would be invested into is illogical. In addition, who will be the legal owner of this area is also very important,

основу свега наведеног потребно је дефинисати функционалне зоне унутар простора рудника како би се могло планирати њихово рекултивирање. То је приказано на слици 1 и у табели 1 [1].

Табела 1, Деградиране повшине и будућа намена  
 Table 1, The degraded areas and their future purposes

and as such, it is not possible to plan project investments yet. Based on all of the above, it is necessary to first define the functional zones of the mining site in order to plan their recultivation. This is shown in Figure 1 and in Table 1 [1].

Простор Area	Површина Surface (ha)	Начин рекултивације Method of recultivation
Плато радионице депоније угља и позиција EXC постројења / The coal depot workshop's platform and the position of the EHS plant	9,70	Рекултивација - Плато за спортске садржаје / Recultivation - Sports content platform
Зона велике таложнице / The large settling basin zone	32,00	Ауторекултивација трска / Autorecultivation reed
Централни део велике таложнице / The central part of the large settling basin	10,70	Рекултивација медоносним врстама / Recultivation with melliferous plant species
Депоније песка и шљунка, приобални део уз Дунав, део уз експлоатационо поље / Sand and gravel depots, coastal part along the Danube, part along the exploitation pit	190,00	Ауторекултивација и повећање шумских заједница / Autorecultivation and increasing forestation
Експлоатационо поље и рукавац према дунаву / Exploitation pit and the inlet to the Danube	140,00	Језеро / Lake
У К У П Н О / Т О Т А Л	382,40	



Слика 1, Зоне рекултивације на руднику Ковин  
 Figure 1, Recycling Zone at the Kovin mine

**Тумач / Legend:** 1-Прилазна саобраћајница / Access road, 2-Зона на којој су сада смештене радионице, постројења за прераду и депоније / Zone where the workshop, processing plants and depots are now located, 3-Круна ободног насипа око таложнице / Crown of the peripheral embankment around the settling basin, 4-Централни део велике таложнице / Central part of the large settling basin

Главна обавеза рударског објекта је примена законске обавезе рудника да се деградирани простор врати у стање да га је могуће користити на еколошки прихватљив начин, али и да се рекултивација изведе на начин како би простор био потпуно безбедан за кориснике истог у будућности. Ово ће бити изведену техничком рекултивацијом у циљу нивелисања подручја како би се избегле велике нагле промене висинске разлике на самом терену, а биолошком рекултивацијом да се допринесе изградњи биљне заједнице која ће омогућити функционисање овог простора у изменjenim условима након откопавања минералних сировина. Садњом неинвазивних биљних култура, допринеће се делимично култивисању простора где су се обављали рударски радови како би се могао развити простор за интензивнијим бављењем пчеларством и безбедним бављењем рекреативним активностима.

За рекреацију би превасходно могла да се користи постојећа саобраћајница која је издигнута на висину +74 м, па је могућност плављења те стазе сведена на најмању могућу меру. Како је израђена од чврстог материјала, врло је лако могуће урадити стазу за трчање и бициклистичку стазу, услед чега би било могуће да се развије излетнички простор, који би поред грађана Ковина могли користити и посетиоци из Београда, Панчева, Вршца, Беле Цркве итд. Пут до ове излетничке целине би требало поправити, што је у складу са генералним предлогом у Просторном плану општине Ковин. Садњом шумских култура са учешћем врста са јестивим плодовима доприноси би повећању диверзитета орнитофауне и фауне дивљачи што би се могло искористити у стварању могућности за организовање фотосафарија, једнодневних екскурзија и часова у природи.

## ПРИНЦИП РЕКУЛТИВАЦИЈЕ

Принцип рекултивације своди се на поделу копа на функционалне целине и рекултивацију поједињих зона након престанка рада поједињих сегмената копа. Језеро које настаје неће бити предмет обраде у овом раду.

Функционалне зоне на копу као што је приказано на слици 1, су следеће:

1. Прилазна саобраћајница;
2. Зона на којој су сада смештене радионице, постројења за прераду и депоније;
3. Круна ободног насипа око таложнице;
4. Централни део велике таложнице.

The main obligation of the mining facility is the adherence to the legal obligation to restore the degraded area to a state which can be used in an environmentally sound manner and but to ensure that the recultivation is carried out in such a way that the area is completely safe for its future users. This will be done via technical recultivation, leveling the area in order to avoid major changes in the height difference of the terrain itself, and by way of biological recultivation which will contribute to the creation of a plant community, enabling the functioning of this area under the conditions altered by the mining of mineral deposits. The planting of non-invasive plant species will contribute to the partial cultivation of the area where the mining operations were being carried out, so that an area intended for intensified beekeeping activities and safe outdoor recreational activities may be developed.

The existing road that was elevated to the height of +74m could be used for outdoor recreation, as the potential of the flooding of this route was reduced to the lowest possible extent. As it is made of solid material, it would be very easy to convert into a running or cycling path, which would also make the development of a picnic area a possibility, one that could be used by visitors from Belgrade, Pančevo, Vršac, Bela Crkva, etc. The road to this picnic area should be improved, which lines up with the general proposals in the Spatial plan of the Kovin municipality. The planting of forest plant species along with species with edible fruits would contribute to the increase in the diversity of the bird and wild game population, which could be used to create opportunities for organizing photo safaris, field trips and classes in nature.

## THE PRINCIPLE OF RECULTIVATION

The principle of recultivation comes down to the division of the mining pit into functional units and the recultivation of the individual zones after the operation of the individual segments of the mining pit have ceased. The lake which will be created will not be subject to of the recultivation in this paper.

The functional zone zones as shown in Figure 1 are as follows:

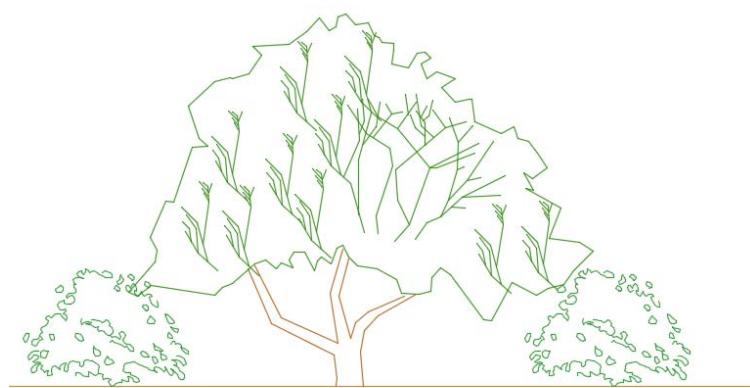
1. Access road;
2. The zone in which the workshop, processing plants and depots are currently located;
3. The crown of the peripheral embankment around the settling basin;
4. The central part of the large settling basin.

## ПРИЛАЗНА САОБРАЋАЈНИЦА

Једина сувоземна веза са рудником којом се обавља целокупни саобраћај па је врло битно ову саобраћајницу очувати и за будуће намене овог простора. Са безбедносног аспекта дели се на две деонице. Прва почетна дужине 1.260 м је уствари насып између две велике водене површине, са једне стране река Дунав, а са друге језеро које остаје након експлоатације дубине око 33 м и врло озбиљна са безбедносног аспекта. На овом делу саобраћајнице неопходно је пратити промене на насыпу најмање три године након обуставе радова, како не би дошло до његовог оштећења хидроерозијом, пошто ће се користити за саобраћај моторних возила. Рекултивација ће се обухватити садњом дрвећа и шибља са обе стране пута како би се подигла визуелна и физичка баријера, из безбедносних разлога, према воденим површинама као што је приказано на слици 2 [5]. Овај део пута је ширине 12 м па је могуће урадити заштитни појас оваквог типа са обе стране пута. Остатак приступног пута до зоне на којој ће бити изграђени садржаји за рекреацију, биће одвојен од околног простора који је намењен за ауторекултивацију, дворедом ниског дрвећа без садње шибља из разлога што је овај део пута нешто ужи око 8 м. Улаз на коп би требао да буде ограничен рампом која би спречила неовлашћен улазак, и она би постојала док цело подручје не би профункционисало као безбедна целина.

## THE ACCESS ROAD

The only land connection with the mine which facilitates all of the traffic to and from it. This road is very important to preserve for the future purpose of this area. From the safety point of view, it is divided into two sections. The first initial section with a length of 1.260 m is actually an embankment between two large bodies of water, the river Danube on one side and on the other the lake which will remain after the exploitation is completed, with a depth of about 33 m. It poses a very serious issue from the safety point of view. In this part of the road, the changes on the embankment will need to be monitored for at least three years after the mining operations have ceased, so that it is not damaged by hydraulic erosion, as it will be used for motor vehicle traffic. The recultivation will include planting trees and shrubs on both sides of the road in order to raise a visual and physical barrier towards the water surfaces for safety reasons as shown in Figure 2 [5]. This section of the road is 12m wide and as such, it would be possible to create this sort of protective vegetation belt on both sides of the road. The rest of the access road to the zone where the outdoor recreational facilities will be built will be separated from the surrounding area intended for autorecultivation by a row of low trees without the planting of any shrubs, due to the fact that this part of the road is slightly narrower, about 8m. Entry to the mining pit should be restricted by a ramp which would prevent unauthorized entry and which would exist until the entire area was fully operational as a safe zone.



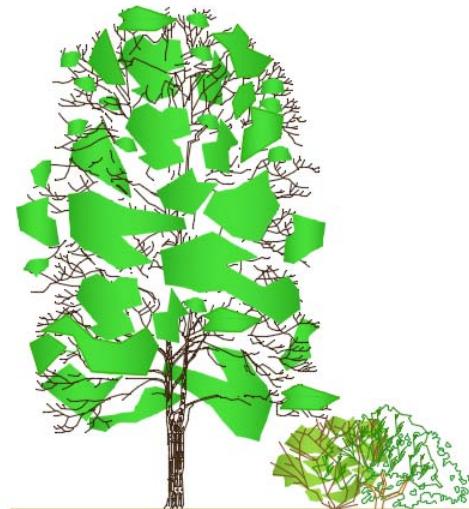
Слика 2, Попречни пресек заштитног појаса вегетације  
Figure 2, Cross-section of the protective vegetation belt

## ЗОНА НА КОЈОЈ СУ САДА СМЕШТЕНА РАДИОНИЦА, ПОСТРОЈЕЊА ЗА ПРЕРАДУ И ДЕПОНИЈЕ

Ова зона која је површине 9,7 ха биће ревитализована изградњом објекта за рекреацију који се потпуно уклапају у овакву природну заједницу. Ту ће бити спроведе за вежбање, земљани терени за спортске активности који би били опремљени неопходним споравама (фудбал, тренажне спрave итд.). Најважније је пре вршења пренамене овај простор, очистити од свих објеката који више неће бити у функцији, као и од отпадног материјала који остаће након производње. Ова позиција је одабрана за израду спортских садржаја из разлога што је постојеће место утовара сировине у барже могуће препројектовати у пристаниште чамаца и малих бродова којима би корисници могли да дођу до овог простора, поред већ постојеће саобраћајнице. Овај простор ће бити рекултивисан на начин да се по ободу ове зоне посади високо дрвеће лишћара као врста границе која ће одвајати будућу култивисану зону, од зоне ауторекултивације. Дужина ободне линије овог појаса неправилног облика, на којем ће се садити дрвеће, износи 1.960 м. Дрвеће ће бити посађено у форми дрвореда. Ова зона ће бити затрављена сетвом трава и одржавана косидбом што би требало да буде надлежност најближег комуналног предузећа које би вршило одржавање тих површина. Предвиђено је местимично подсећивање групација листопадног шиља као што је приказано на слици 3.

## THE ZONE IN WHICH THE WORKSHOP, PROCESSING PLANTS AND DEPOTS ARE CURRENTLY LOCATED

This area with a surface of 9,7 ha will be revitalized by the construction of outdoor recreational facilities which fit perfectly within this natural community. These will include exercises machines and natural soil pitches for sports activities that will have all of the necessary equipment (for football, exercise machines, etc.). The most important tasks to compete before the repurposing of this area are the removal all of the facilities which will no longer function and the elimination of the waste material which has remained from the production plant. This position has been selected for the development of sports facilities because the current site used for loading raw material onto barges can be repurposed into a port for boats and small ships which would serve to allow users to reach the area, in addition to the already existing road. As part of the recultivation of this area, tall deciduous trees will be planted along its perimeter to serve as a kind of border separating the future cultivated zone from the autorecultivation zone. The length of the circumferential line of this irregularly shaped border along which the trees will be planted is 1.960 m. The trees will be planted in rows. This zone will be grassed by sowing grass and maintained by mowing it, for which the closest utility company would be responsible. The planting of groups of deciduous shrubs as shown in Figure 3 is also planned.



Слика 3, Начин садње по ободу садашње зоне са објектима  
Figure 3, Planting method around the perimeter of the current zone with the facilities

### Круна ободног насипа око таложнице

Круна ободног насипа око таложнице биће претворена у стазу за вожњу бицикла (без повезивања са међународном бициклистичком стазом која тангира ово подручје) и трим стазу. Овај пут није предвиђен за саобраћај моторних возила, осим за возила која служе за одржавање простора и возила хитних служби. Ова култивисана целина биће одвојена од околног простора који је намењен за ауторекултивацију, дрворедом средње високог дрвећа. Овај тренажни део (трим стаза) био би формиран као кружна стаза дужине централне линије 2.840 м. Путем од 195 м, ова стаза је повезана са зоном са спортом садржајима.

У ову сврху предвиђена је садња дрвореда дрвећа лишћара средње висине. Функција појаса је везивање земљишта и учвршћивање косина.

### Централни део велике таложнице

Ова зона која је предвиђена за садњу медоносних врста биљака има површину од 10,7 ha. Ово би требало да буде зона у којој би се направио простор за подизање нивоа пчеларске производње пошто би у ту зону када се развије у пуном смислу било могуће довозити кошнице на пчелиње испаше, које би са друге стране помогле опрашивашњу у развоју пуне вегетације. Такође, пошто се на овој површини развија велика количина плодова велики број птица и животиња би пронашло оазу исхране у овако рекултивисаној зони. Кошнице би се довозиле ободним насипом најавом транспорта како би се обезбедили безбедни услови за све кориснике простора.

### Динамика садње

Прво је могуће рекултивисати ободни насип око таложнице, то је источни део копа где је обим саобраћаја и радова током експлоатације најмањи па ће и приликом обуставе радова интензитет догађања бити најнижи. Након тога очекује се и престанак рада на изузимању материјала из велике таложнице, па је могуће извршити рекултивацију те зоне. По престанку рада постројења за прераду угља и њиховој демонтажи могуће је рекултивисати и део централне зоне где се сада налазе радионица и постројења за прераду. Рекултивација приступне саобраћајнице ће се радити на крају када се изврше демонтаже и транспорт опреме, извоз свих количина депонованог шљунка.

### The crown of the peripheral embankment around the settling basin

The crown of the peripheral embankment around the settling basin will be turned into a cycling path (without connecting to the international cycling path which passes through this area) and a fitness trail. This path is not intended for motor vehicle traffic, except for vehicles used for the maintenance of the area and emergency vehicles. This cultivated unit will be separated from the surrounding area intended for autoreculturation by a row of medium height trees. This fitness section (the fitness trail) would be built as a circular track with a central line the length of 2.840 m. This trail would be connected to the sports area via a 195 m long path.

A row of medium height trees is planned to be planted for this purpose. The function of this row is to bind the soil and slopes.

### The central part of the large settling basin

This zone, which is intended for the planting of melliferous plants, has a surface area of 10,7 ha. This should be the zone in which the area for the increase of the level of beekeeping activities will be made. When fully developed, the area would allow for beehives to be brought there for bees to forage, which would in turn help in the development of the vegetation by pollinating. In addition, as a large amount of fruit would develop in this area, a large number of birds and animals would also find themselves a great feeding spot in this recultivated zone. The hives would be brought via the peripheral embankment along with an announcement in order to ensure the safety of all of the users of the area.

### Planting schedule

The peripheral embankment around the settling basing could be recultivated first, this is the eastern part of the mining pit where the volume of traffic and mining operations is the smallest and as such, this is where the intensity of activity will be at its lowest when the operations cease. Following that, the work on the removal of material from the large settling basin is expected to be completed next, allowing for the recultivation of this zone. After the cessation of the coal processing plants' operation ceases and their demolition, part of the central zone where the workshop and processing plants are currently located could also be recultivated. The recultivation of the access road would be done last, after of the dismantling and transport of all equipment and all of the deposited gravel.

## ЗАКЉУЧАК

У циљу усклађивања динамике производње угља и осталих седимената на руднику Ковин и рекултивације појединачних зона на руднику што је законска обавеза сваког рударског објекта, урађена је подела на функционалне зоне. Ове зоне иако динамички зависе једна од друге имају јасне границе и временско трајање до завршетка експлоатације па је на основу тих карактеристика могуће планирати њихово рекултивисање, како завршне контуре и посађене врсте дрвећа и шибља не би били оштећени непредвиђеним активностима унутар појединачних зона.

## CONCLUSION

In order to synchronize the schedule of the production of coal and other sediments at the Kovin mine and the recultivation of the individual zones on the mine, the legal obligation of every mining facility, the mine has been divided into functional zones. These zones, although dynamically dependent on one another, have clear boundaries and set time periods until the end of their exploitation. Based on these characteristics it is possible to plan out their recultivation in such a way that the final contours and already planted trees and shrubs are not be damaged by unforeseen activities within the individual zones.

## ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Dugoročni program razvoja rudnika Kovin u nebranjenom delu polja A / Long-term program for the development of the Kovin mine in the part of the field A where exploitation is allowed, RI, Beograd, 2004.
2. Klimatske karakteristike Srbije, Republički hidrometeorološki zavod Srbije / Climate characteristics of Serbia, Republic Hydrometeorological Institute of Serbia, oktobar 2016. godine.
3. Просторни план Општине Ковин 2012 / The spatial plan of Kovin of 2012
4. Strategija održivog razvoja opštine Kovin 2014 – 2020 / The sustainable development strategy of Kovin 2014 - 2020
5. Glavni rudarski projekat eksploatacije ležišta gline Srednja strana, Novi Bečeј – Knjiga 3. Projekat rekultivacije PK Srednja strana, Rudarski institut 2018 / Main mining project for the exploitation of clay deposits Srednja strana, Novi Bečeј - Volume 3. Recultivation project of the mining site Srednja strana, Mining Institute 2018

## КАРАКТЕРИЗАЦИЈА ПЕПЕЛА, ШЉАКЕ И ГИПСА ЗА ПОТРЕБЕ РАЗВОЈА ТЕХНОЛОГИЈЕ ЊИХОВОГ ОДЛАГАЊА

## CHARACTERIZATION OF ASH, BOTTOM ASH AND GYPSUM FOR THE DEVELOPMENT OF THE TECHNOLOGY OF THEIR DISPOSAL

DOI: 10.25075/BM.2018.10

Јасмина Нешковић<sup>1</sup>

Павле Стјепановић<sup>1</sup>

Клара Конц Јанковић<sup>1</sup>

Дејан Лазић<sup>1</sup>

Ивана Јовановић<sup>2</sup>

Jasmina Nešković<sup>1</sup>

Pavle Stjepanović<sup>1</sup>

Klara Konc Janković<sup>1</sup>

Dejan Lazić<sup>1</sup>

Ivana Jovanović<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Рударски институт Београд

<sup>2</sup>Институт за рударство и металургију, Бор

jasmina.neskovic@ribeograd.ac.rs

<sup>1</sup>Mining Institute Belgrade

<sup>2</sup> Mining and Metallurgy Institute Bor

jasmina.neskovic@ribeograd.ac.rs

**Сажетак:** Заједничко одлагање пепела, шљаке и гипса има знатне предности у односу на досадашњу технологију њиховог одвојеног одлагања. Позитивни ефекти се огледају у знатно стабилизацијом акумулационом простору, јефтинијем улагању и знатно смањеном негативном утицају на животну средину. Како би се технологија заједничког одлагања успешио развила, неопходно је пресвих истраживања, урадити карактеризацију материјала. Садашњим испитивањима, применом стандардних метода, аплицирани су узорци пепела шљаке и гипса узети из Термоелектране Костолац Б (ТЕКО Б). Резултати тих испитивања приказани су у овом раду.

**Кључне речи:** пепео, шљака, гипс, узорковање, заједничко одлагање, ТЕКО Б

**Summary:** The joint disposal of ash, bottom ash and gypsum has significant advantages over the previous technology of their separate disposal. Positive effects are reflected in a much more stable accumulation area, cheaper investment and significantly reduced negative impact on the environment. In order for the joint disposal technology to evolve successfully, it is necessary to do characterization of the material prior to all the research. Current tests, by applying standard methods, current test are performed by applying standard methods on fly ash, bottom ash and gypsum samples from Thermal Power Plant Kostolac B (TEKO B). The results of these tests are presented in this paper.

**Key words:** ash, bottom ash, gypsum, sampling, joint disposal, TEKO B

### УВОД

Тренутно се у нашим термоелектранама генерише 5-7 милиона тона пепела и шљаке, од чега се преко 90% одлаже на већ формиране депоније. Увођењем одсумпоравања димних гасова (ОДГ), годишње ће се продуктовати још милион тона гипса што представља додатан проблем уколико се за њега не нађе сигуран пласман на тржишту. Међународана БРЕФ документа за

### INTRODUCTION

Currently, our thermal power plants generate 5-7 million tons of ash and bottom ash, of which over 90% is deposited on the already formed landfills. By introducing flue gas desulphurization (FGD), another million tons of gypsum will be produced annually, which is an additional problem if it does not find safe placement on the market. The international BREF documents for large combustion

велика ложишта (Reference Document on Best Available Techniques for Large Combustion Plants, European Commission, 2006.) препоручују заједничко одлагање пепела, шљаке и гипса који не мају даљу примену, у односу на технологију њиховог одвојеног одлагања. У овом истраживању заједничко одлагање пепела, шљаке и гипса утицало би повољније на стабилност депоније, значајно би смањило почетна улагања у системе транспорта и одлагања, али би довело и до по-позитивних еколошких ефеката.

Рударски институт из Београда, за потребе инновационог пројекта Министарства науке, просвете и технолошког развоја, извршио је најновија истраживања која се односе на развој технологије заједничког одлагања пепела, шљаке и гипса у термоелектранама. У овом раду приказана је карактеризација узорака пепела, шљаке и гипса, узетих из ТЕКО Б, односно утврђене су физичко-хемијске особине применом стандардних метода испитивања. [1]

#### КРАТКИ ОПИС ТЕХНОЛОШКОГ ПОСТУПКА ПРИКУПЉАЊА ПЕПЕЛА, ШЉАКЕ И ГИПСА

Технолошком процесу прикупљања пепела претходи процес сагоревања угља у ложишту котла, као и процес издвајања пепела помоћу електрофилтера (отпепељивање). Пепео се издваја из канала димних гасова, из оба ротациона загрејача ваздуха (ЛУВ) и пневматски транспортује до силоса за пепео.

Шљака је још један производ који је резултат сагоревања угља у котловима. У сваком од два котла, веће честице из остатака сагоревања, које нису ухваћене као пепео у електрофилтерима, падају као шљака на две симетрично уређене ободне решетке у доњем делу котла. На крају сваке решетке, шљака пада у један од два симетрично уређена расхладна танка испод котла (краџера), који служе за издвајање шљаке. Из краџера се системом транспортних трака шљака транспортује или на утовар у камионе или у дробилицу која уситњава шљаку на крупноћу испод 10 mm. [2]

Испуштање димног гаса из процеса сагоревања у атмосферу врши се кроз димњак. Пре испуштања кроз димњак, дими гас се пречишћава у електрофилтерском постројењу за контролу честичног загађења, и затим у постројењу за одсумпоравање димних гасова (ОДГ), које омогућава контролу емисије  $SO_2$ . Овај поступак одсумпоравања димних гасова је влажни кречњак-гипс поступак, са кречња-

plants (Reference Document on Best Available Techniques for Large Combustion Plants, European Commission, 2006.) recommends the common disposal of ash, bottom ash and gypsum, which have no further use, in relation to the technology of their separate disposal. In this study, the joint disposal of ash, bottom ash and gypsum would have a more favourable impact on the landfill stability, it would significantly reduce the initial investment in transport and disposal systems but would also lead to positive environmental effects.

The Mining Institute in Belgrade, for the needs of the innovation project of the Ministry of Education, Science and Technological Development, has carried out the latest research related to the development of technology of joint disposal of ash, bottom ash and gypsum in thermal power plants. In this paper, the characterization of samples of ash, bottom ash and gypsum, taken from TEKO B, is presented, i.e. physical-chemical properties were determined using standard test methods. [1]

#### A BRIEF DESCRIPTION OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF COLLECTING ASH, BOTTOM ASH AND GYPSUM

The technological ash collection process is preceded by the coal combustion process in the boiler furnace, as well as the process of ash separation using electrostatic precipitators. The ash is separated from the flue gas duct, from the both rotary air pre-heaters (LUV) and is transported pneumatically to the ash silo.

Bottom ash is another product that is the result of combustion of coal in boilers. In each of the two boilers, larger particles from the combustion residues, which are not caught as ashes in electrostatic precipitators, fall off like a bottom ash on two symmetrically arranged perimeter grids in the lower part of the boiler. At the end of each grid, the bottom ash falls into one of two symmetrically arranged cooling tanks beneath the boiler (scrapers), which are used to extract bottom ash. Bottom ash is transported from the scrapers by the conveyor belt system either to loading into trucks or to a crusher which chops the bottom ash up to the size below 10 mm. [2]

The discharge of flue gas from the combustion process into the atmosphere is carried out through a chimney. Before the discharge through the chimney, the flue gas is purified in high voltage discharge facility for the control of particulate pollution, and then in the flue gas desulphurization (FGD) plant, which enables the control of the emissions of  $SO_2$ . This flue gas desulphurisation process is a wet limestone-gypsum process, with

ком као сорбентом и гипсом као крајњим нуспродуктом.

Путујућа филтерска маса гипса из зоне испирања улази у зону исушивања и коначно се пресипа на траку за транспорт осушеног гипса према складишту. Осушенни гипс (са око 19% влаге) се транспортује према складишту гипса, одакле се отпрема спољним корисницима или на депонију. [3]

#### УЗОРЦИ ЗА ИСПИТИВАЊА

Узорковање је један од најбитнијих корака у процесу карактеризације минералних сировина, због тога је правилно узорковање од суштинског значаја за добијање комплетних података о неком материјалу.

Поступак узорковања пепела шљаке и гипса, у ТЕКО Б је прилагођен условима на терену као и сировини која се узоркује. Метода узорковања је изабрана на основу технолошког процеса у погону термоелектране.

Узимање узорака пепела и шљаке вршено је ручно, током једне смене, у периоду од 8 часова у једнаким временским интервалима, док је за потребе узорковања гипса био монтиран монтажно-демонтажни узоркивач помоћу којег је узорак такође узиман у једнаким временским интервалима у току једне смене.

После одређеног времена потребног за хлађење материјала, на лицу места је вршена хомогенизација сваког узетог узорка, скраћивање узорака и паковање у количини прописаној за ту врсту материјала.

Узорковање електрофилтерског пепела је вршено на ревизионим отворима изнад хидрауличких ејектора, на осам мерних места а узорци котловског пепела узети су са два мерна места, на ревизионом отвору непосредно пре тзв. „чаянки“, (Слика 1а) и б).



limestone as sorbent and gypsum as the final by-product.

Traveling filter mass of gypsum goes from the rinsing zone into the drying zone and it is finally poured onto the belt for the transport of dried gypsum to the warehouse. Dried gypsum (with about 19% moisture) is transported to a warehouse of gypsum, from where it is dispatched to external users or to a landfill. [3]

#### TEST SAMPLES

Sampling is one of the most important steps in the process of characterizing mineral resources and therefore proper sampling is essential for obtaining complete data on some material.

The process of sampling ash, bottom ash and gypsum in TEKO B is adapted to the field conditions as well as to the raw material which is sampled. The sampling method was selected based on the technological process in the power plant.

Ash and bottom ash sampling were carried out manually, during one shift, in the period of 8 hours at equal time intervals, while the assembly and disassembly sampler, by which the sample was also being taken at equal time intervals during a single shift, was installed for the needs of sampling gypsum.

After a certain amount of time needed for cooling the material, homogenization of each sample taken, shortening of the samples and packaging in the quantity prescribed for this type of material were performed on the spot.

Sampling of fly ash was carried out at the inspection panels above the hydraulic ejectors at eight measuring points and the samples of boiler ash were taken from two measuring points, at the inspection panels right before the so-called “teapot”, (Figures 1a) and b)).



*Слика 1, Места на којима су узимани узорци пепела  
Figure 1, The sites where ash samples were taken*

**Тумач / Legend:** а) електрофилтерског пепела / fly ash, б) котловског пепела / boiler ash

Узорковање шљаке је вршено са траке пре процеса уситњавања, односно пре решетке и дробилице ( слика 2 ).

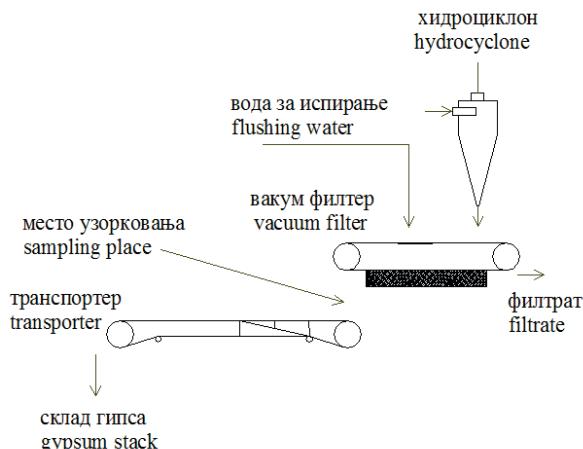
Sampling of bottom ash was carried out on the belt before the grinding process, that is, before the grid and crusher (figure 2 ).



Слика 2, Место на ком је узет узорак шљаке  
Figure 2, The place where a bottom ash sample was taken

Погодно место за узимање узорака гипса је трака која транспортује осушени гипс до склада на коју је за ту сврху постављен монтажно демонтаџни узоркивач ( слика 3 ).

A suitable place for sampling gypsum is a conveyor belt that transports dried gypsum to a storage facility where an assembly and disassembly sampler is installed for this purpose (figure 3 ).



Слика 3, Шематски приказ места узорковања гипса  
Figure 3, Schematic representation of a gypsum sampling site

## МЕТОДЕ ИСПИТИВАЊА

Карактеризација узорака подразумевала је одређивање основних физичко-хемијских особина пепела, шљаке и гипса и то: укупне влаге, гранулометријског састава узорка, насыпне и запреминске масе, специфичне масе, специфичне површине и хемијског састава стандардним методама. Припрема узорака и све анализе су урађене у лабораторијама Рударског института.

## TEST METHODS

Characterization of samples implied determination of basic physical and chemical properties of ash, bottom ash and gypsum: total moisture, granulometric composition, tapped and bulk density, specific mass, specific surface area and chemical composition by standard methods. The preparation of samples and all analysis were done in the laboratories of the Mining Institute.

**Садржај влаге** испитан је на полазним узорцима пре њихове карактеризације, сушењем у сушници на 105°C до константне масе. [4]

Одређивање **гранулометријског састава** је вршено просејавањем на стандардним лабораторијским ситима. Просејавање је обављено ручно, на ситима серије типа Laboratory Test Sieve Endecotts LTD London England и DIN. [11]

Из гранулометријског састава могуће је одредити **кофицијент унiformности** ( $C_u$ ). Кофицијент унiformности показује нумеричку вредност једноличности зрна у узорку и добија се рачунским путем, при чему:

$$C_u = d_{60}/d_{10} \quad (1)$$

$d_{10}$  - ефективна крупноћа зрна, од којег је 10% материјала у узорку мање од ове крупноће;

$d_{60}$  - доминантна крупноћа зрна, од којег је 60% материјала у узорку мање од ове крупноће

( $C_u < 5$  – једноличан састав,  $5 < C_u < 15$  – умерено једноличан састав,  $C_u > 15$  – неједноличан састав). [5]

Одређивање **насипне масе** узорака је вршено мерењем маса узорака у посуди зпремине 1l пре и после збијања. Поступак је описан у стандарду. [11] Резултати су приказани графички.

**Специфичне масе** узорака су одређене помоћу стакленог пикнометра. Поступак је описан у стандарду. [11] Вредности специфичних маса узорака су приказане графички.

**Специфична површина** материјала (површина јединице масе) је важна, јер се њеним мерењем прате процеси хидратације и очвршћавања а могуће је контролисати многе технолошке процесе. [6,7] Специфична површина је мерена на уређају за одређивање специфичне површине тзв. Блејновом пермеабилиметру. [11]

**Хемијски састав** узорака одређен је стандардним анализама за ову врсту сировина у Лабораторији за чврста горива Рударског института. [12]

## РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

Одређивањем **садржаја влаге** у полазним узорцима, утврђено је да средња вредност укупне влаге у узорцима шљаке износи 44,1%, у узорцима гипса 19,4%. Електро-филтерски пепео је практично сув, без влаге у опсегу тачности мерења масе.

The **moisture content** was tested on the starting samples prior to their characterization, by drying in a dryer at 105°C to the constant weight. [4]

The determination of the **granulometric composition** was performed by sieving on standard laboratory sieves. The sieving was done manually, on the series of sieves such as Laboratory Test Sieve Endecotts LTD London England and DIN. [11]

The **uniformity coefficient** ( $C_u$ ) may be determined from the granulometric composition. The uniformity coefficient shows the numerical value of the grain uniformity in the sample and is obtained by the following calculation, whereby:

$d_{10}$  - the effective grain size, of which 10% of the material in the sample is smaller than this size;

$d_{60}$  - the effective grain size, of which 60% of the material in the sample is smaller than this size

( $C_u < 5$  – uniform composition,  $5 < C_u < 15$  – moderately uniform composition,  $C_u > 15$  – non-uniform composition). [5]

Determination of the **bulk mass** of the samples was done by measuring the mass of the samples in a 1l container before and after the compaction. The procedure is described in the standard. [11] The results are shown graphically.

**Specific masses** of samples were determined using a glass pycnometer. The procedure is described in the standard. [11] The values of the specific masses of the samples are shown graphically.

The **specific surface area** of the material (the surface area of the mass unit) is important because its measurement keeps track of the processes of hydration and hardening, and it is possible to control many technological processes. [6,7] The specific surface area was measured on the device for determining the specific surface area, on the so-called Blaine Air Permeability Apparatus. [11]

The **chemical composition** of the samples was determined by standard analysis for this type of raw materials in the Laboratory of Solid Fuels of the Mining Institute. [12]

## RESULTS AND DISCUSSION

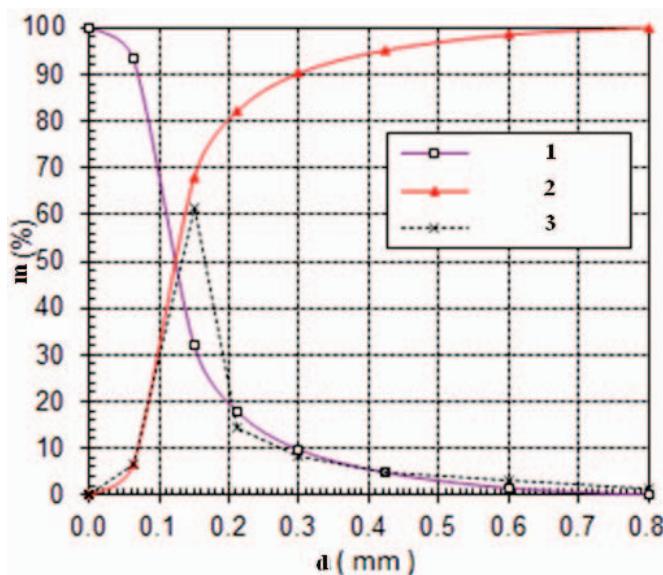
By determining the **moisture content** in the initial samples, it was determined that the mean moisture content in the bottom ash samples was 44,1%, and in the gypsum samples 19,4%. Ash is practically dry, without moisture within the range of the accuracy of the mass measurement.

**Гранулометријски састав** узорака приказан је преко масеног учешћа класа крупноће у табелама 1, 2 и 3. Кумулативне криве одсева и просева узорака пепела, шљаке и гипса су приказани на сликама 4, 5 и 6.

The **granulometric composition** of the samples is shown by the mass fraction of the bulk classes in Tables 1, 2 and 3. Cumulative curves of oversize and undersize of the samples of ash, bottom ash and gypsum are shown in Figures 4, 5 and 6.

Табела 1, Гранулометријски састав узорка пепела  
 Table 1, Grain size distribution of an ash sample

Класе крупноће / size class, d (mm)	m (%)	$\Sigma m \downarrow$ (%)	$\Sigma m \uparrow$ (%)
- 0,80 + 0,60	1,48	1,48	100,00
- 0,60 + 0,43	3,32	4,80	98,52
- 0,43 + 0,30	4,92	9,72	95,20
- 0,30 + 0,21	8,16	17,88	90,28
- 0,21 + 0,15	14,20	32,08	82,12
- 0,15 + 0,06	61,34	93,42	67,92
- 0,06 + 0,00	6,58	100,00	6,58
Сума	100,00	-	-



Слика 4, Кумулативна крива одсева и просева узорка пепела  
 Figure 4, Cumulative curve of oversize and undersize of an ash sample

**Тумач / Legend:** 1) крива одсева / oversize curve,  
 2) крива просева / undersize curve, 3) директна крива / direct curve

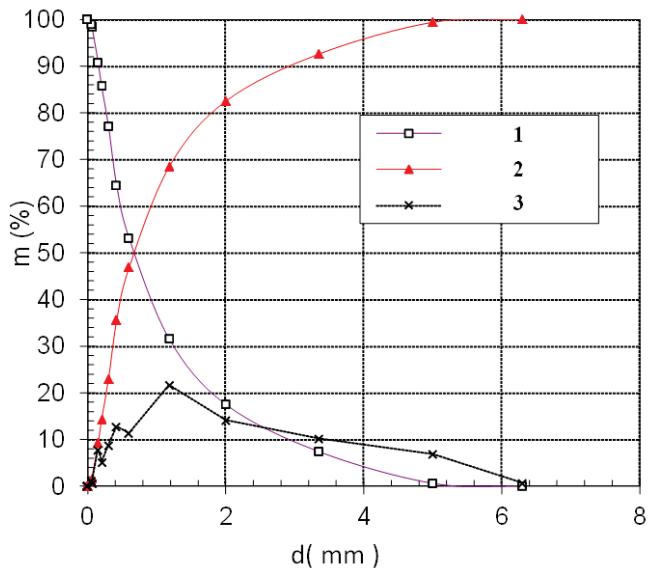
Како што се са слике 4 може видети средњи пречник зрна пепела (dsr) износи 0,13 mm а горња гранична крупноћа (ggk) 0,43 mm. Присуство ситних класа крупноће -0,150+0 mm у узорку електрофилтерког пепела износи 67,92%.

As can be seen from Figure 4, the mean diameter of the ash grain (dsr) is 0,13 mm and the upper limit bulk (ggk) is 0,43 mm. The presence of small bulk classes -0,150+0 mm in the sample of a fly ash is 67,92%.

Са кумулутавне криве просева која је приказана је на слици 5 може сеочитати средњи пречник зрна ( $d_{sr}$ ) и горња гранична крупноћа (ggk) који за узорак шљаке износе:  $d_{sr}=0,65$  mm, ggk=3,8 mm. Одређивањем гранулометријског састава узорка шљаке утврђено је присуство ситних класа -0,150+0 mm од свега 9,22%.

Табела 2, Гранулометријски састав узорка шљаке  
 Table 2, Grain size distribution of a bottom ash sample

Класе крупноће / size class, d (mm)	m (%)	$\Sigma m \downarrow$ (%)	$\Sigma m \uparrow$ (%)
- 6,30 + 5,00	0,59	0,59	100,00
- 5,00 + 3,35	6,80	7,39	99,41
- 3,35 + 2,00	10,11	17,50	92,61
- 2,00 + 1,18	14,05	31,55	82,50
- 1,18 + 0,60	21,58	53,12	68,45
- 0,60 + 0,42	11,26	64,38	46,88
- 0,42 + 0,30	12,69	77,07	35,62
- 0,30 + 0,20	8,69	85,76	22,93
- 0,20 + 0,15	5,02	90,78	14,24
- 0,15 + 0,06	7,68	98,46	9,22
- 0,06 + 0,05	0,52	98,98	1,54
- 0,05 + 0,00	1,02	100,00	1,02
Сума	100,00	-	-



Слика 5, Кумулативна крива одсева и просева узорка шљаке  
 Figure 5, Cumulative curve of oversize and undersize of a bottom ash sample

Тумач / Legend: 1) крива одсева / oversize curve,  
 2) крива просева / undersize curve, 3) директна крива / direct curve

Средњи пречник зрна ( $d_{sr}$ ) и горња гранична крупноћа (ggk) за узорак гипса износе:  $d_{sr}=0,26$  mm, ggk=0,56 mm (слика 6). Према приказаним

From the cumulative curve of the undersize shown in Figure 5, the mean diameter of the grain ( $d_{sr}$ ) and the upper limit bulk (ggk) can be read out, which for the sample of a bottom ash are:  $d_{sr}=0,65$  mm, ggk=3,8 mm. Determination of the granulometric composition of a bottom ash sample revealed the presence of small classes -0,150+0 mm of only 9,22%.

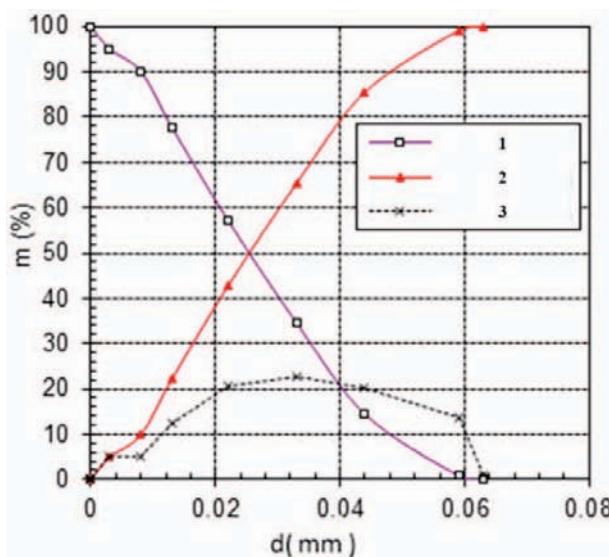
The mean grain diameter ( $d_{sr}$ ) and the upper limit bulk (ggk) for the gypsum sample are:  $d_{sr}=0,26$  mm, ggk=0,56 mm (figure 6). According to the results shown, it can

результатима може се уочити да је цео узорак гипса масеног учешћа класе крупноће -0,063+0 mm.

be noticed that the entire sample of gypsum is a mass fraction of the bulk class -0,063+0 mm.

*Табела 3, Гранулометријски састав гипса*  
*Table 3, Grain size distribution of a gypsum*

Klase krupnoće / size class, d (mm)	m (%)	$\Sigma m \downarrow$ (%)	$\Sigma m \uparrow$ (%)
- 0,06 + 0,06	0,85	0,85	100,00
- 0,06 + 0,04	13,58	14,43	99,15
- 0,04 + 0,03	20,16	34,58	85,57
- 0,03 + 0,02	22,63	57,21	65,42
- 0,02 + 0,01	20,58	77,78	42,79
- 0,01 + 0,01	12,34	90,12	22,22
- 0,01 + 0,00	4,94	95,06	9,88
- 0,00 + 0,00	4,94	100,00	4,94
Suma	100,00	-	-



*Слика 6, Кумулативна крива одсева и просева узорка гипса*  
*Figure 6, Cumulative curve of oversize and undersize of a gypsum sample*

**Тумач / Legend:** 1) крива одсева / oversize curve,  
 2) крива просева / undersize curve, 3) директна крива / direct curve

На основу добијених резултата из гранулометријског састава одређен је кофицијент униформности ( $C_u$ ). Као што смо истакли кофицијент униформности показује нумеричку вредност једноличности зрна у узорку и добија се рачунским путем:

Израчунато је да узорак пепела има кофицијент униформности 2, шљака 0,5 и гипс 3,75. С обзиром да су добијене вредности испод 5, може се закључити да се ради о једноличном саставу код свих испитиваних узорака.

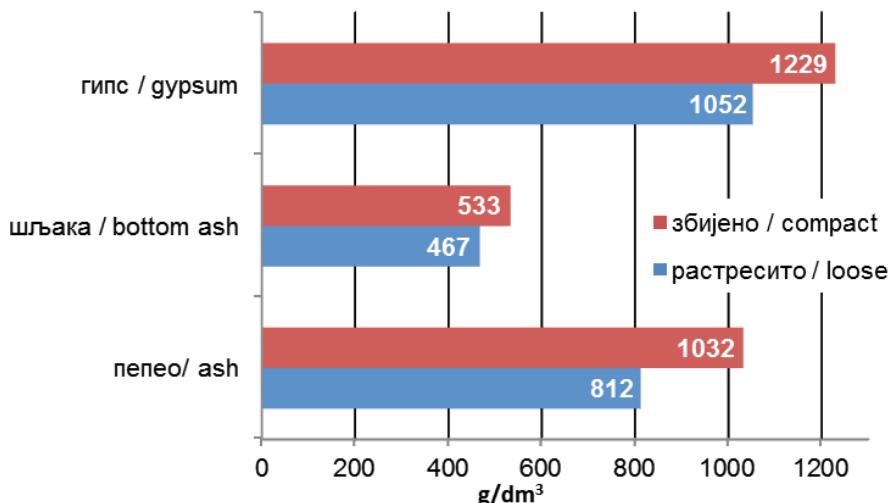
On the basis of the obtained results, the uniformity coefficient ( $C_u$ ) was determined from the granulometric composition. As we have pointed out, the uniformity coefficient shows the numerical value of the grain uniformity in the sample and is obtained by the following calculation:  $C_u = d_{60}/d_{10}$

It was calculated that the ash sample had uniformity coefficient 2, bottom ash 0,5, and gypsum 3,75. Since the values obtained are below 5, it can be concluded that this is a uniform composition in all the tested samples.

$$C_u = d_{60}/d_{10}$$

Насипне масе узорака добијене мерењем маса узорака у посуди запремине 1л приказане су на слици 7. Очигледно је да узорак гипса има највећу насипну масу како у растреситом тако и у збијеном стању, нешто ниже вредности су код узорка пепела док насипна маса узорка шљаке

The bulk density of the samples obtained by measuring the mass of the samples in a 1 liter container is shown in Figure 7. It is obvious that the gypsum sample has the largest bulk density in both the loose and compact state, somewhat lower values are in the ash sample, while the bulk density of the



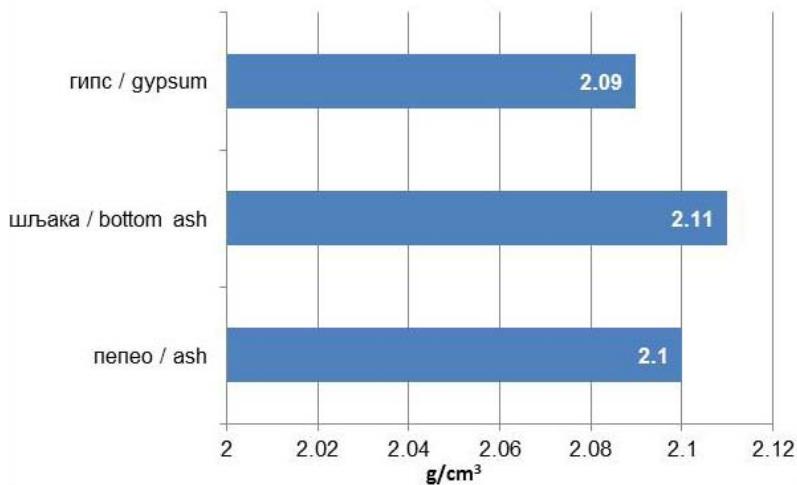
Слика 7, Насипне масе узорака у збијеном и растреситом стању  
 Figure 7, Bulk density of samples in a compact and loose state

има најнижу вредност. Добијене вредности су у сагласности са резултатима гранулометријске анализе.

Вредности специфичних маса узорака су приказане на слици 8. Највећу специфичну масу има узорак шљаке и износи  $2,11 \text{ g/cm}^3$ , затим пепео са  $2,1 \text{ g/cm}^3$ , док најмању вредност има узорак гипса  $2,09 \text{ g/cm}^3$ .

bottom ash sample has the lowest value. The values obtained are in accordance with the results of the granulometric analysis.

The values of the specific mass of the samples are shown in Figure 8. The largest specific mass has a sample of bottom ash and it is  $2,11 \text{ g/cm}^3$ , then comes ash with  $2,1 \text{ g/cm}^3$ , while the smallest value has a gypsum sample  $2,09 \text{ g/cm}^3$ .



Слика 8, Вредности специфичне масе узорака  
 Figure 8, Values of the specific mass of samples

Специфична површина је мерена на узорку пепела и гипса Измерена вредност специфичне површине за пепео износи  $2350 \text{ cm}^2/\text{g}$  а за гипс  $3550 \text{ cm}^2/\text{g}$  што потврђује податак да са повећањем финоће расте и вредност специфичне површине.

За потребе хемијских испитивања узорак формиран је композитни узорак пепела који се састојао од 94% електрофилтерског и 6% котловског пепела, сувим мешањем у лабораторијској мешалици у трајању од пет минута.

Реакција: кисела / Reaction : acidic

Активни CaO (%) = 0,20 / Active CaO (%) = 0,20

Реакција: jako кисела / Reaction : very acidic

Активни CaO (%) < 0,20 / Active CaO (%) < 0,20

Табела 4, Хемијски састав узорка пепела

Table 4, Chemical composition of an ash sample

$\text{SiO}_2$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	CaO	MgO	$\text{SO}_3$	$\text{P}_2\text{O}_5$	$\text{TiO}_2$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	Губитак жарењем* / loss of ignition
52,38	11,37	19,59	8,41	2,15	1,72	0,06	0,76	0,31	1,02	2,45

Реакција: jako базна / Reaction : very basic

The specific surface area was measured on a sample of ash and gypsum. The measured value of the specific ash surface area is  $2350 \text{ cm}^2/\text{g}$  and of the gypsum is  $3550 \text{ cm}^2/\text{g}$  which is confirmed by the fact that the increase in the fineness increases the value of the specific surface area.

For the chemical analysis of samples, a composite ash sample consisting of 94% fly ash and 6% of boiler ash was formed by dry mixing in a laboratory mixer for five minutes.

Reaction : acidic

Active CaO (%) = 0,20

Reaction : very acidic

Active CaO (%) < 0,20

Reaction : very basic

Табела 5, Хемијски састав узорка ишљаке

Table 5, Chemical composition of a bottom ash sample

$\text{SiO}_2$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	CaO	MgO	$\text{SO}_3$	$\text{P}_2\text{O}_5$	$\text{TiO}_2$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	Губитак жарењем* / loss of ignition
37,10	7,29	16,01	5,54	1,66	1,86	0,04	0,51	0,07	0,63	29,17

Табела 6, Хемијски састав узорка гипса

Table 4, Chemical composition of a gypsum sample

$\text{SiO}_2$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	CaO	MgO	$\text{SO}_3$	$\text{P}_2\text{O}_5$	$\text{TiO}_2$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	Губитак жарењем* / loss of ignition
0,96	0,10	3,06	25,29	0,04	41,78	0,01	0,06	0,89	0,28	27,06

Према Интернационалном систему класификације, подела електрофилтерског пепела, врши се на принципу садржаја  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Према тој класификацији електрофилтерски пепео може да се сврста у четири основне групе: алумосиликатни (тип I), силикатно-алуминатни (тип II), сулфатно-алкални (тип III) и калцитски (тип IV).

Тип I је алумосиликатни и код кога је масени однос садржаја оксида  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 > 2$ , садржај CaO мањи од 15%, док се садржај  $\text{SO}_3$  није дефинисан. Силикатно-алуминатни (тип II), при чему је од-

According to the International Classification System, the division of fly ash is carried out based on  $\text{SiO}_2$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . According to this classification, fly ash can be classified into four basic groups: aluminosilicate (type I), silicate-aluminate (type II), sulfate-alkaline (type III) and calcite (type IV).

Type I is an aluminosilicate with a mass ratio of oxide content  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 > 2$ , CaO content less than 15%, while the  $\text{SO}_3$  content is not defined.

Silicate-aluminate (type II), with the ration  $\text{SiO}_2/$

нос  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 < 2$ , садржај CaO мањи од 15%, а садржај  $\text{SO}_3$  мањи од 3%.

Сулфатно-алкални (тип III), који садржи више од 15% CaO и више од 3%  $\text{SO}_3$ , док масени однос  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  није дефинисан.

Калцитски (тип IV) са високим садржајем CaO (>15%) и ниским садржајем сулфата (<3%), при чему се однос  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  такође не дефинише. [8]

На основу садашњих резултата хемијског састава испитиваних узорака, јасно се види да пепео ТЕ „Костолац Б“ припада Типу I, где је:  $\text{SiO}_2$  са 52,38%, садржај оксида  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 > 2$ , а садржај CaO је 8,41%.

Шљака је углавном инертан материјал. На њену хемијску активност директно утиче величина зрна и садржај  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  који је знатно мањи него у пепелу. Велики губитак жарењем, а самим тим и садржај угљеника (C) у шљаци, може имати негативан утицај на механичке особине мешавине пре свега на притисну чврстоћу.

Садржај  $\text{SiO}_2$  у гипсу износи испод 1%, док су вредности  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ниже у односу на шљаку. CaO је присутан са 25,29%. Слободан CaO у току хидратације доводи до пораста запремине и при прорачуну састава мешавине веома је важно то предвидети. Ситније честице CaO брже хидрирају и тада хидратација слободног CaO нема већег негативног дејства у мешавини. [9]

## ЗАКЉУЧАК

На репрезентативним полазним узорцима нус продуката сагревања термоенергетског постројења ТЕКО Б извршена су адекватна лабораторијска испитивања физичко-хемијских карактеристика узорака. Циљ ових испитивања је да се дефинише и побољша технологија заједничког одлагања пепела, шљаке и гипса који као такви немају пласман на тржиште.

Комплетна карактеризација полазних узорака је била полазна основа за даља испитивања која су спроведена у оквиру Иновационог пројекта „Развој технологије заједничког одлагања пепела, шљаке и гипса из термоелектрана у циљ побољшања еколошких и економских перформанси“ Министарства просвете, науке и технолошког развоја, број 391-00-16/2017-16/25, 2017.

Резултати тих истраживања потврђују чињеницу да поступак заједничког одлагања пепе-

$\text{Al}_2\text{O}_3 < 2$ , CaO content less than 15%, and  $\text{SO}_3$  content is less than 3%.

Sulfate-alkaline (type III), which has more than 15% CaO and more than 3%  $\text{SO}_3$ , while the mass ratio of  $\text{SiO}_2$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  is not defined.

Calcite (type IV) with high CaO content (>15%) and low sulfate content (<3%), whereby the  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ratio is also not defined. [8]

Based on the current results of the chemical composition of the samples tested, it can be clearly seen that the ash TPP "Kostolac B" belongs to Type I, where:  $\text{SiO}_2$  with 52,38%, the content of oxide  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 > 2$ , and the content of CaO is 8,41%.

Bottom ash is mostly inert material. Its chemical activity is directly affected by the grain size and the content of  $\text{SiO}_2$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , which is considerably smaller than in ash. The large loss by loss of ignition, and therefore the content of carbon (C) in the clay, may have a negative effect on the mechanical properties of the mixture, primarily on the compressive strength.

The content of  $\text{SiO}_2$  in gypsum is below 1%, while the values of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  are lower compared to bottom ash. CaO is present with 25,29%. Free CaO during hydration leads to an increase in volume and it is very important to predict that when calculating the composition of the mixture. Smaller particles of CaO hydrate more quickly and then the hydration of free CaO has no greater negative effect in the mixture. [9]

## CONCLUSION

On the representative initial samples of by-products of the combustion of the thermal power plant TEKO B, adequate laboratory tests of the physical and chemical characteristics of the samples were carried out. The aim of these tests is to define and improve the technology of joint disposal of ash, bottom ash and gypsum, which as such have no placement on the market.

The complete characterization of the initial samples was the starting point for further testing carried out within the Innovation Project "Development of the technology of joint disposal of ash, bottom ash and gypsum from thermal power plants in order to improve the ecological and economic performance" of the Ministry of Education, Science and Technological Development, number 391-00-16/2017-16/25, 2017.

The results of these studies confirm the fact that the process of joint disposal of ash, bottom ash and

ла, шљаке и гипса знатно доприноси смањењу утицаја на животну средину што је приказано у најновијем раду. [10]

gypsum significantly contributes to the reduction of the environmental impact which is shown in the latest work. [10]

## ЛИТЕРАТУРА

1. Костовић Н.-руководилац пројекта и др., Развој технологије заједничког одлагања пепела, шљаке и гипса из термоелектрана у циљу побољшања еколошких и економских перформанси, број 391-00-16/2017-16/25 Иновациони пројекат Министарства просвете, науке и технолошког развоја, Београд, 2017, 15 стр.
2. Стјепановић П.-руководилац и др., Извештај о узорковању и контролним мерењима на систему за припрему и транспорт пепела и шљаке ТЕКО Б и депонији пепела на ПК „Ћириковач“, Рударски институт, Београд, 2011, 28 стр.
3. Миловановић Ђ.-руководилац пројекта; Постројење за одсумпоравање димних гасова, Енергопројект Ентел а.д., Београд, 2015, 169 стр.
4. Томанец Р., Методе испитивања минералних сировина у припреми минералних сировина, Рударско-геолошки факултет, Београд, 2000, 315 стр.
5. Ђалић Н., Теоријски основи припреме минералних сировина, Рударско-геолошки факултет, Београд, 1990, 496 стр.
6. Матушиновић Т., Врбос Н., Инжењерство минералних везива, Факултет кемијског инжењерства и технологије, 2011, 96 стр.
7. Трифуновић П., Зековић М., Ђукановић Н., Рударски материјали, РГФ, Београд, 1999, 404 стр.
8. Јовановић И., Бугарин М., Магдалиновић С., Преглед савремених светских истраживања о карактеристикама летећег пепела као секундарне минералне сировине; део 1, DOI:10.5937/MMEB1302147J, Mining & Metallurgy Engineering Bor, Број 2, str. 157-166, 2013.
9. Илић И., магистарски рад „Могућност примене микронизираног и класираног електрофильтрског пепела као адитива за производњу грађевинских материјала“, 2009, 124 стр.

## REFERENCES

1. Innovation project of the Ministry of Education, Science and Technological Development, number 391-00-16/2017-16/25 "Development of the technology of joint disposal of ash, bottom ash and gypsum from thermal power plants in order to improve the ecological and economic performance", Mining Institute Belgrade, 2017, manager Kostović N, pp 15.
2. Report on sampling and control measurements on the system for the preparation and transport of ash and bottom ash from TEKO B and ash dumps to SM "Ćirikovac", Mining Institute Belgrade, 2011, manager Stjepanović P, pp 28.
3. Flue gas desulphurization plant, Energoprojekt entel a.d. Belgrade, 2015, manager Milovanović Đ, pp 169.
4. Tomanec, R., Methods of testing mineral resources in the preparation of mineral resources, Faculty of Mining and Geology, Belgrade, 2000, 315 p
5. Čalić, N., Theoretical basis of preparation of mineral resources, Faculty of Mining and Geology, Belgrade, 1990, 496 p
6. Matušinović, T., Vrbo, s N., Engineering of mineral binders, Faculty of Chemical Engineering and Technology 2011, 96 p
7. Trifunović, P., Zeković, M., Đukanović, N., Mining materials, Faculty of Mining and Geology, Belgrade, 1999, 404 p
8. Jovanović, I., Bugarin, M., Magdalinović, S., An overview of contemporary world research on the characteristics of fly ash as a secondary mineral resource; part 1, doi:10.5937/MMEB1302147J, Mining & Metallurgy Engineering Bor, Number 2, 2013, pp. 157-166.
9. Ilić, I., master's thesis, "The possibility of using micronized and graded fly ash as additives for the production of construction materials, 2009, 124 p

10. Павловић М., Гигов М., Петковић С., Нешковић Ј., Стјепановић П., Утицај ваздушног струјања на везивна својства пепела, шљаке и адитива, Рударски гласник, 2018, у штампи
11. Стандарди: SRPS B.B1.018/2005, SRPS B.B8.030/1986, SRPS EN ISO 17892-3:2016, SRPS B.C8.026/1966
12. Стандардне методе (EPA 3052:1996 и EPA Method 6010C:2007)
10. Pavlović, M., Gigov, M., Petković, S., Nešković, J., Stjepanović, P., The influence of air flow on the binding properties of ash, bottom ash and additives, Bulletin of Mines, 2018, in press.
11. Standard: SRPS B.B1.018/2005, SRPS B.B8.030/1986, SRPS EN ISO 17892-3:2016, SRPS B.C8.026/1966
12. Standard methods (EPA 3052:1996 and EPA Method 6010C:2007)

УТИЦАЈ ВАЗДУШНОГ СТРУЈАЊА НА ВЕЗИВНА СВОЈСТВА  
ПЕПЕЛА, ШЉАКЕ И АДИТИВА

THE INFLUENCE OF AIR FLOW ON THE BINDING PROPERTIES  
OF ASH, SLAG AND ADDITIVES

DOI: 10.25075/BM.2018.11

Марко Павловић  
Михајло Гигов  
Сандра Петковић  
Јасмина Нешковић  
Павле Стјепановић

Рударски институт Београд  
*marko.pavlovic@ribeograd.ac.rs*

Marko Pavlović  
Mihajlo Gigov  
Sandra Petković  
Jasmina Nešković  
Pavle Stjepanović

Mining Institute Belgrade  
*marko.pavlovic@ribeograd.ac.rs*

**Сажетак:** Економски и еколошки прихватљивији третман нус-продуката сагоревања угља из термоелектрана у односу на засебно одлагање огледа се у њиховом заједничком одлагању што је у складу са релевантним директивама ЕУ и домаћом регулативом. За заједнички начин одлагања неопходно је утврдити међусобни утицај пепела, шљаке и адитива на побољшање везивних својстава мешавине, како би било могуће дефинисати основне параметре неопходне за евалуацију могућих технологија одлагања и усвајања оптималне технологије за специфичне услове, пре свега у нашим термоелектранама. У раду су приказани резултати испитивања утицаја ваздушног струјања на одложену мешавину пепела, шљаке и адитива симулацијом реалних услова у ваздушном тунелу, наменски конструисаном за предметна испитивања у Рударском институту, у Лабораторији за заштиту животне и радне средине. Испитани су узорци са различитим саставом летећег пепела, котловског пепела, шљаке и адитива ( $\text{CaO}$  и  $\text{Ca(OH)}_2$ ) ради утврђивања оптималног садржаја адитива и воде у мешавини пепела и шљаке, као и одређивања утицаја ваздушног струје на развејавање одложеног материјала. Извршена су мерења масених концентрација  $\text{PM}_{10}$  суспендованих честица и дата је упоредна анализа утицаја компресије летећег пепела, адитива и садржаја воде на степен емисије  $\text{PM}_{10}$ .

**Кључне речи:** пепео, шљака, адитиви, ваздушни тунел,  $\text{PM}_{10}$  одлагање

**Summary:** Economically and ecologically acceptable treatment of by-products of combustion coal from thermal power plants, compared to separate disposal, is reflected in their joint disposal which is in accordance with the relevant EU directives and domestic regulations. For the joint way of disposal, it is necessary to determine the mutual impact of ash, slag and additives to improve the binding properties of the mixture, in order to be able to define the basic parameters necessary for evaluating possible disposal technologies and adopting the optimal technology for specific conditions, primarily in our thermal power plants. The paper presents the results of testing the effects of air flow on the deposited mixture of ash, slag and additives by simulating real conditions in the wind tunnel, specially designed for the subject tests in the Mining Institute, in the Laboratory for environmental protection and occupation safety. Samples with different composition of fly ash, boiler ash, slag and additives ( $\text{CaO}$  and  $\text{Ca(OH)}_2$ ) were tested to determine the optimal content of additives and water in the mixture of ash and slag, as well to identify the influence of wind velocity on the dispersion of the deposited material. Mass concentrations

of  $PM_{10}$  suspended particles were measured and a comparative analysis of the impact of the compression of fly ash, additives and water content on the  $PM_{10}$  emission level was made.

**Keywords:** ash, slag, additives, wind tunnel,  $PM_{10}$ , disposal

## УВОД

Постојећи систем одлагања продуката сагоревања на свим депонијама термоелектрана у Србији је хидраулички транспорт мешавине пепела, шљаке и воде са односом чврсте и течне фазе Ч:T-1:10 (ретка хидромешавина) и Ч:T-1:1 (густа хидромешавина). Додавање адитива овој мешавини захтева смањење количине воде која се користи за транспорт, а то значајно утиче на смањење загађивања ваздуха, водотокова, околног земљишта и екосистема и повећава стабилност депоније.

За утврђивање међусобног односа и утицаја пепела, шљаке и адитива на побољшање везивних својстава мешавине, дефинисани су основни параметри неопходни за усвајање оптималне технологије одлагања за специфичне услове на депонијама наших термоелектрана.

Ради одређивања оптималног масеног учешћа пепела, шљаке, адитива и воде у мешавини, било је неопходно створити такве лабораторијске услове који ће што приближније симулацији услове на депонији. Специјално за ту намену конструисан је и калибрисан ваздушни тунел који симулира брзине струјања ваздуха од 1 m/s од 5 m/s, са уређајима који омогућавају мерења концентрације суспендованих честица  $PM_{10}$  (честица прашине пречника мањег од 10  $\mu\text{m}$ ) и укупних суспендованих честица (TSP – „total suspended particles“), као и мерења релативне влажности и температуре.

Загађивачи присутни у амбијентном ваздуху, пре свега респирабилне честице (particulate matter – PM) имају негативно дејство на људско здравље. Од 2010. године српска регулатива [1] прописује мониторинг две фракције честица присутних у ваздуху, мањих од 2.5  $\mu\text{m}$  (финих честица,  $PM_{2.5}$ ) и мањих од 10  $\mu\text{m}$  аеродинамичког пречника,  $PM_{10}$ , у чији састав поред финих честица улазе и грубе честице које су из описа од 2.5-10  $\mu\text{m}$  [2].

## МЕТОДЕ ИСПИТИВАЊА

### Мерење укупних суспендованих честица (TSP)

За индикаторска мерења концентрација суспендованих честица (TSP) у реалном времену ( $\text{mg}/\text{m}^3$ )

## INTRODUCTION

The existing system of disposing combustion products at all landfills of thermal power plants in Serbia is hydraulic transport of ash, slag and water mixtures with solid to liquid phase ratio S: L - 1: 10 (low-density hydromixture) and S: L - 1: 1 (high-density hydromixture). Adding additives to this mixture requires a reduction in the amount of water used for transport, and this significantly influences the reduction of pollution of air, watercourses, surrounding land and ecosystem and increases landfill stability.

To determine the mutual relationship and the effect of ash, slag and additives on the improvement of binding properties of the mixture, the basic parameters necessary for adopting the optimal disposal technology for specific conditions at our thermal power plant landfills have been defined.

In order to determine the optimal mass fraction of ash, slag, additives and water in the mixture, it was necessary to create such laboratory conditions that would simulate the conditions at the landfill as close as possible. A wind tunnel simulating air flow rates of 1 m/s to 5 m/s, with devices allowing measurement of the concentration of suspended particles  $PM_{10}$  (particles of dust of diameter smaller than 10  $\mu\text{m}$ ) and total suspended particles (TSP), as well as measurement of relative humidity and temperature, was designed and calibrated particularly for this purpose.

Pollutants found in ambient air, primarily respirable particles (particulate matter - PM) have a negative effect on human health. Since 2010, the Serbian regulation [1] has prescribed monitoring of two fractions of particles present in the air, smaller than 2.5  $\mu\text{m}$  (fine particles,  $PM_{2.5}$ ) and smaller than 10  $\mu\text{m}$  of aerodynamic diameter,  $PM_{10}$ , the composition of which includes, in addition to fine particles, coarse particles ranging from 2.5-10  $\mu\text{m}$  [2].

## METHODS

### TSP measurements

For indicator measurements of the concentration of suspended particles (TSP) in real time ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ), a MicroDust device (Casella Cel-712 PRO, UK) was

$\text{m}^3$ ), коришћен је уређај MicroDust (Casella Cel-712 PRO, UK) који као мерни принцип користи методу расипања светlosti (lightscattering). Пре почетка мерења вршена су подешавања нулте и "span" вредности. Интервал мерења био је 1 s, а период усредњавања 1 час. Уређај је био позициониран 130 cm низ струју ваздуха од секције за узорке на висини од 25 cm.

#### Мерење концентрације честица $\text{PM}_{10}$

Узорковање  $\text{PM}_{10}$  честица вршено је секвенцијалним узоркивачем (Sven Leckel KAR8 + MVS6, Немачка), који ради при номиналном протоку од  $2,3 \text{ m}^3/\text{h}$ . Резултати мерења се изражавају у  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  где је запремина ваздуха дата при амбијенталним условима. Маса честица је одређена вагањем филтера у строго контролисаним условима, пре и после узорковања. Чисти филтери од кварцних влакана (класа T293; 47 mm; Sartorius, Немачка) су кондиционирани у просторији за ваге при температури ( $20 \pm 1$ ) °C и релативној влажности (45-50) % пре и након узорковања у периоду од 48h. Филтери су затим вагани на аналитичкој ваги (Sartorius CPA 225 D-0CE, Немачка) два пута у интервалу од 12h [3], при чему разлика у маси при узастопном вагању филтера није смела бити већа од 40  $\mu\text{g}$ . Филтери су затим убачени у лежиште главе за узорковање, и узорковање је спроведено при константном протоку од  $2,3 \text{ m}^3/\text{h}$  у токи једног сата. Филтер са узорком је кондициониран минимум 48h, а затим ваган на аналитичкој ваги у интервалима од 24h до 72h, при чему разлика у маси филтера није смела прећи 60  $\mu\text{g}$ . Концентрација суспендованих честица  $\text{PM}_{10}$  је израчуната као разлика у маси између празног и филтера са узорком подељеног са узоркованом запремином која представља производ задатог протока и времена узорковања:

used which applies the light scattering method as a measuring principle. Before the start of the measurement, zero and span values were set up. The measurement interval was 1 s and the averaging period was 1 hour. The device was positioned 130 cm downstream of the air current from the sample section at a height of 25 cm.

#### $\text{PM}_{10}$ measurements

Sampling of  $\text{PM}_{10}$  particles was carried out by a sequential sampler (Sven Leckel KAR8 +MVS6, Germany), operating at a nominal flow of  $2.3 \text{ m}^3/\text{h}$ . The measurement results are expressed in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  where the air volume is given at ambient conditions. The weight of particles is determined by weighing the filter under strictly controlled conditions, before and after sampling. Clean quartz fiber filters (class T293; 47 mm; Sartorius, Germany) were conditioned in the weighing room at a temperature ( $20 \pm 1$ ) °C and relative humidity (45-50)% before and after sampling for a period of 48h. The filters were then weighed on the analytical balance (Sartorius CPA 225 D-0CE, Germany) twice at an interval of 12h [3], provided the difference in weight in successive filter weighing should not exceed 40  $\mu\text{g}$ . The filters were then inserted into the sampling head, and sampling was carried out at a constant flow of  $2.3 \text{ m}^3/\text{h}$  for one hour. The sample filter was conditioned for a minimum of 48 hours and then weighed on the analytical balance at 24 to 72h intervals, provided the difference in filter weight was not to exceed 60  $\mu\text{g}$ . The concentration of suspended particles  $\text{PM}_{10}$  is calculated as the difference in weight between the blank and the sampled filter divided by the sampled volume determined as the flow rate multiplied by the sampling time:

$$c = \frac{m_l - m_u}{\varphi_a \cdot t} \quad (1)$$

где је:

$c$  – концентрација,  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

$m_l$  – маса филтера са узорком,  $\mu\text{g}$

$m_u$  – маса чистог филтера,  $\mu\text{g}$

$\varphi_a$  – проток ваздуха при амбијенталним условима,  $\text{m}^3/\text{h}$

$t$  – време узорковања, h

#### Израчунавање степена емисије суспендованих честица

Степен емисије  $\text{PM}_{10}$  одређује се на основу улазног ( $m_{in}$ ) и излазног ( $m_{out}$ ) масеног флуksа кроз одређену запремину ( $\dot{V} \times D \times H$ ). Површина изво-

wherein:

$c$  - concentration,  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

$m_l$  - mass of the sampled filter,  $\mu\text{g}$

$m_u$  - mass of the blank filter,  $\mu\text{g}$

$\varphi_a$  - air flow at ambient conditions,  $\text{m}^3/\text{h}$

$t$  - sampling time, h

#### Calculation of dust emission rate

The  $\text{PM}_{10}$  emission level is determined based on the input ( $m_{in}$ ) and the output ( $m_{out}$ ) mass flux through a certain volume ( $W \times D \times H$ ). The emission source area (A) is determined as a product

ра емисије (A) одређује се као производ дужине (D) и ширине ( $\dot{S}$ ), док V представља висину ваздушног тунела. Масени биланс за контролну запремину даје степен емисије (E).

$$E = \frac{1}{A} (m_{out} - m_{in}) \quad (2)$$

Масени флукс се одређује на основу вертикалног профиле концентрације честица (C) и брзине (u) као:

$$m_{out} = \int_0^H C_{out} u_{out} V dz \quad (3)$$

$$m_{in} = \int_0^H C_{in} u_{in} V dz \quad (4)$$

што даје:

which gives:

$$E = \frac{1}{L} \int_0^H (C_{out} u_{out} - C_{in} u_{in}) dz \quad (5)$$

Ако се претпостави да је  $u_{out} = u_{in}$ , лако се добија једначина за степен емисије честиса (E,  $\mu\text{g}/\text{m}^2\text{s}$ ) на основу испитне површине (A):

$$E = C_{PM10} \times u \times (V \cdot \frac{b}{A}) \quad (6)$$

где је b висина на којој се мери (0,17 м за  $PM_{10}$ ), а брзина струјања ваздуха.

If we assume that  $u_{out} = u_{in}$ , it is easy to obtain the equation for dust emission rate (E,  $\mu\text{g}/\text{m}^2\text{s}$ ) based on the test area (A):

where b is the height at which measurement is done (0.17 m for  $PM_{10}$ ) and u is air flow velocity.

## ВАЗДУШНИ ТУНЕЛ

Симулација реалних услова реализована је у праволинијском потисном ваздушном тунелу, приказаног на слици 1, који је осмишљен и конструисан у Рударском институту. Ваздушни тунел се састоји од следећих компоненти:

- аксијални вентилатор са фреквентним регулатором;
- секција за кондиционирање протока ваздуха;
- секција за усмеравање протока ваздуха;
- секција са узорцима;
- секција за мерење и узорковање.

Дужина тунела износи 5,5 м са попречним пресеком од  $0,25 \text{ m}^2$ . Однос дужине и висине износи око 11 што значајно прелази минимал-

## WIND TUNNEL

The simulation of real conditions is realized in a straight-line blow-down type wind tunnel, shown in Figure 1, which was designed and constructed in the Mining Institute. The wind tunnel consists of the following components:

- axial fan with frequency inverter;
- airflow conditioning section;
- airflow straightening section;
- sample tray section;
- section for measurement and sampling.

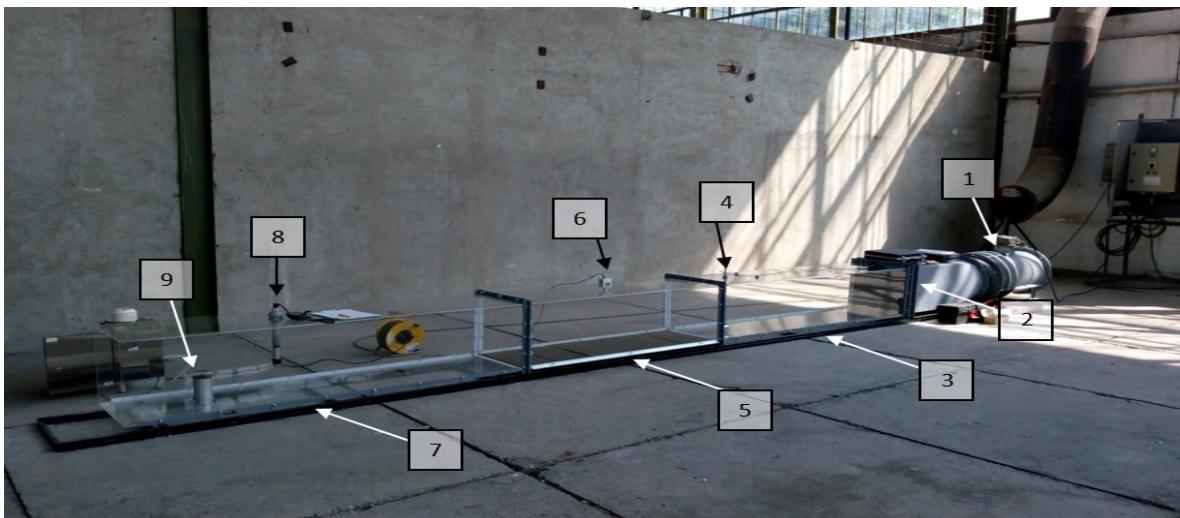
The tunnel length is 5.5 m with a cross-section of  $0.25 \text{ m}^2$ . The length to height ratio is about 11 which significantly exceeds the minimum value for development the boundary layer [4]. The measure-

ну вредност за формирање граничног слоја [4]. Мерење брзине вршено је анемометром DA4000 (Далмација, Хрватска) са мерним опсегом од 0,3 m/s до 35 m/s ( $\pm 1\%$ ). Анемометар је постављен у централној оси на висини од 0,25 м и 175 см низ струју ваздуха од кондиционера протока, као што се види на слици 1.

За одређивање профила брзина у попречном пресеку тунела извршено је мрежно мерење брзине струјања са Пито-Прантловом сондом у три осе по пет мерних тачака (укупно 15 тачака) [5].

ment of velocity was carried out with an anemometer DA4000 (Dalmatia, Croatia) with a measuring range from 0.3 m/s to 35 m/s ( $\pm 1\%$ ). The anemometer is positioned in the central axis at a height of 0.25 m and 175 cm downstream from the airflow conditioning section, as seen in figure 1.

A grid measurement of flow velocity with the Pitot-Prandtl probe in three axes with five measuring points each (a total of 15 points) was performed to determine the velocity profile in the cross section of the tunnel [5].



Слика 1, Изглед ваздушног тунела  
Figure 1, Design of the wind tunnel,

**Тумач / Legend:** 1 – аксијални вентилатор / axial fan, 2 – кондиционер протока / flow conditioning section, 3 – секција за усмеравање протока / flow straightening section, 4 – мерење брзине струјања / wind velocity measurement, 5 – секција са узорцима / sample tray section, 6 – мерење влаге и температуре / temperature and humidity measurement, 7 – секција за мерење и узорковање / sampling/measurement section, 8 – мерење TSP / TSP measurement, 9 – мерење PM<sub>10</sub> / PM<sub>10</sub> measurement

## УЗОРЦИ ЗА ИСПИТИВАЊА

Пепео и шљака који чине основу узорка који је испитиван у ваздушном тунелу су узорковани из погона термоенергетског постројења Термоелектране Костолас Б1. Поред пепела и шљаке коришћен је и адитив, а у Лабораторији за припрему минералних сировина Рударског института је извршена карактеризација свих узорака [6].

## ПРИПРЕМА УЗОРАКА ЗА ИСПИТИВАЊЕ ВЕЗИВНИХ СВОЈСТАВА

Узорци летећег пепела, котловског пепела, шљаке и адитива (CaO или Ca(OH)<sub>2</sub>) претходно дефинисаних количина, у сувом стању, мешани су у лабораторијској мешалици у трајању од 5 минута. Сувим компонентама додата је одређена количина воде и мешање је настављено за још 5

## TESTING SAMPLES

The ashes and slag that form the basis of the sample tested in the wind tunnel are sampled from Kostolac B1 Thermal Power Plant. Additive was used in addition to ash and slag, and all the samples were characterized in the Laboratory for preparation of mineral raw materials of the Mining Institute [6].

## PREPARATION OF SAMPLES FOR TESTING BINDING PROPERTIES

Samples of fly ash, boiler ash, slag and additives (CaO or Ca(OH)<sub>2</sub>) in previously defined quantities, in a dry state, were mixed in a laboratory mixer for 5 minutes. Dry components were added a certain amount of water and mixing was continued for another 5 minutes after which the sample was left

минута након чега је узорак остављен 30 минута. Након тога узорак је пребачен у суд за компресију припремљеног узорка (калуп димензија 50x25x2cm), а потом је сабијен притиском од 120 kN/m<sup>2</sup>. Калупи са узорцима су позиционирани у секцији (дужине 1,5 m) као што је приказано на слици 2. У истој секцији вршено је мерење температуре и релативне влажности термо-хигрометром (Comet T3510).

for 30 minutes. After that, the sample was transferred to the metal trays (50x25x2cm), and then it was compressed using a pressure of 120 kN/m<sup>2</sup>. The metal trays were positioned in the section (1.5 m long) as shown in Figure 2. In the same section, temperature and relative humidity were measured usinga thermo-hygrometer (Comet T3510).



Слика 2, Секција са узорцима  
Figure2, Sample tray section

Да би се истражио утицај компресије на стабилизацију одложене мешавине пепела и шљаке припремљено је 10 узорака. Састав испитиваних узорака приказан је у табели 1.

Ten samples were prepared to investigate the effect of compression on the stabilization of the deposited mixture of ash and slag. The composition of the tested samples is shown in Table 1.

Табела 1, Састав испитиваних узорака  
Table 1, The composition of the investigated samples

Узорак бр. Sample No.	Летећи пепео Fly ash content (%)	Вода Water content (%)	CaO (%)	Ca(OH) <sub>2</sub> (%)	Котоловски пепео Boiler ash content (%)	Шљака Bottom ash content (%)
U1	73	15	-	-	6	6
U2	70	15	-	3	6	6
U3	70	15	3	-	6	6
U4	73	15	-	-	6	6
U5	78	10	-	-	6	6
U6	76	10	-	2	6	6
U7	75	10	-	3	6	6
U8	65	20	-	3	6	6

## ПРИКАЗ И ДИСКУСИЈА РЕЗУЛТАТА ИСПИТИВАЊА-

Према важећој Уредби [1] дневна масена концентрација  $PM_{10}$  суспендованих честиса не сме прећи граничну вредност од  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  више од 35 пута у једној календарској години. За календарску годину гранична вредност и толерантна вредност износе  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

У недостатку граничне вредности емисије, добар показатељ био је упоређивање добијених вредности са нултим вредностима концентрација честиса  $PM_{10}$  (узорак U0) које су измерене у ваздушном тунелу без узорака.

Степен емисије  $PM_{10}$  честица израчунат је као разлика  $PM_{10}$  измерених концентрација и нултих  $PM_{10}$  вредности. Максимална вредност односа  $E_{PM10}/E_0$  коришћена је за просену величине прекорачених вредности емисија. Резултати су приказани у табели 2.

Табела 2, Вредности емисије  $PM_{10}$  и максималне вредности  $E_{PM10}/E_0$  односа  
Table 2, The values of the PM10 emission rates and maximum values of the  $E_{PM10}/E_0$  ratio

Узорак бр. Sample No.	Брзина струјања Wind velocity (m/s)	$E_{PM10}$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^2\text{s}$ )	$E_{PM10}/E_0$ (max)
U0	1	0,6	--
	3	3,3	
	5	13,8	
U1	1	2,7	4,8
	3	9,9	
	5	13,9	
U2	1	1,1	1,9
	3	3,3	
	5	8,0	
U3	1	1,1	1,9
	3	3,3	
	5	8,4	
U4	1	0,6	20,8
	3	9,9	
	5	286,6	
U5	1	3,4	5,9
	3	13,2	
	5	29,9	
U6	1	2,7	4,8
	3	10,1	
	5	22,0	
U7	1	2,1	3,8
	3	9,9	
	5	18,6	
U8	1	1,6	2,8
	3	8,1	
	5	16,4	

## RESULTS AND DISCUSSION

According to the current Regulation [1], the daily mass concentration of  $PM_{10}$  suspended particles must not exceed the limit value of  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  more than 35 times in one calendar year. For one calendar year, the limit value and the tolerant value are  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

In the absence of a site-specific dust emission rate limit, a useful gauge of the significance of the emission rate across the boundary can be made by comparing this to the background dust emission rate (sample U0).

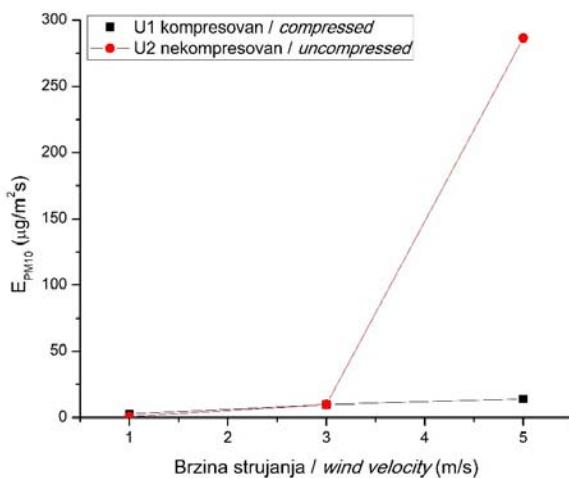
The dust emission rates were calculated for  $PM10$  from the  $PM10$  measured concentrations after subtraction of the background concentrations. The maximum value of the  $EPM10/E0$  ratio was used to estimate the magnitude of the cross-boundary emissions. The results are shown in Table 2.

Како што се види из резултата приказаних у табели 2, вредности емисије  $PM_{10}$  повећавају се са повећањем брзине струјања. Максимална вредност  $E_{PM10}/E_0$  односа је за узорак U4 (без адитива и компресије), а најнижа вредност је за узорке U2 и U3 (15%  $H_2O$  и 3% адитива  $Ca(OH)_2$  и  $CaO$ ).

### УТИЦАЈ КОМПРЕСИЈЕ ЛЕТЕЋЕГ ПЕПЕЛА НА ЕМИСИЈУ $PM_{10}$

As can be seen from the results shown in Table 2,  $PM_{10}$  emission rate increases with increasing wind velocity. The maximum value of the  $E_{PM10}/E_0$  ratio is for the U4 sample (no additives and compression), and the lowest value is for samples U2 and U3 (15%  $H_2O$  and 3% additives  $Ca(OH)_2$  and  $CaO$ ).

### THE INFLUENCE OF COMPRESSING OF THE FLY ASH ON PM<sub>10</sub> EMISSION RATE



Слика 3, Емисија  $PM_{10}$  у односу на брзину струјања ветра за компресоване и некомпресоване узорке

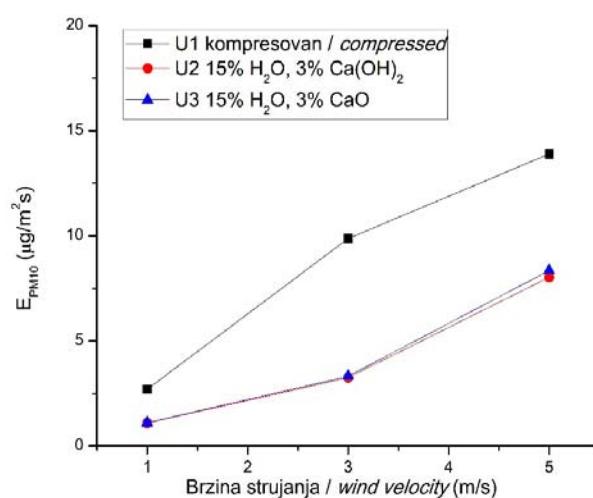
Figure 3,  $PM_{10}$  emission rate vs. wind velocity for compressed and uncompressed samples

Може се видети да компресовање летећег пепела има значајан утицај на емисију  $PM_{10}$  код брзине ветра веће од 3 m/s.

### УТИЦАЈ АДИТИВА НА ЕМИСИЈУ $PM_{10}$

It can be seen that fly ash compression has a significant impact on  $PM_{10}$  emission rate at wind velocities greater than 3 m/s.

### INFLUENCE OF ADDITIVES ON PM<sub>10</sub> EMISSION RATE

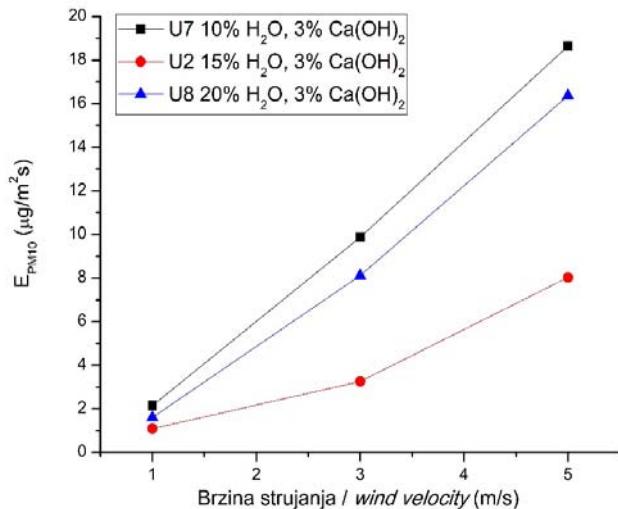


Слика 4, Емисија  $PM_{10}$  у односу на различите типове адитива

Figure 4,  $PM_{10}$  emission rate vs. wind velocity for different type of binder

Може се констатовати да додатак адитива летећем пепелу значајно смањује емисију  $PM_{10}$ , а степен емисије  $PM_{10}$  се не мења при коришћењу  $CaO$  као адитива у односу на коришћење  $Ca(OH)_2$  као адитива.

#### УТИЦАЈ САДРЖАЈА ВОДЕ НА ЕМИСИЈУ $PM_{10}$



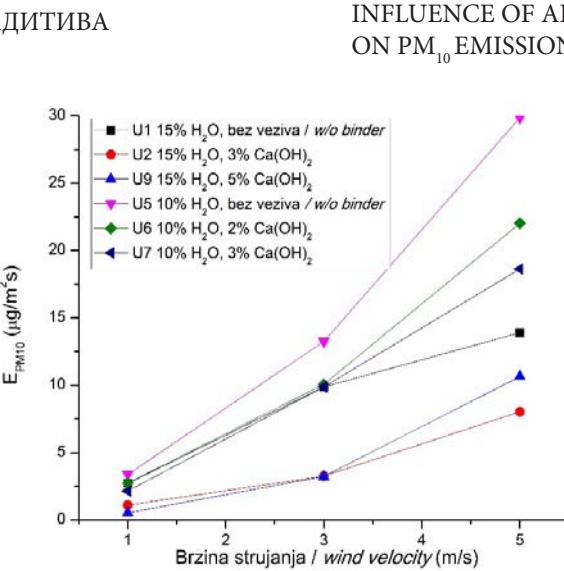
Слика 5, Емисија  $PM_{10}$  у односу на брзину струјања ветра за различите садржаје воде  
 Figure 5,  $PM_{10}$  emission rate vs. wind velocity for different water content

Из резултата приказаних на слици 5, може се констатовати да су најниже емисије  $PM_{10}$  добијене са садржајем адитива од 3%.

#### УТИЦАЈ КОЛИЧИНЕ АДИТИВА НА ЕМИСИЈУ $PM_{10}$

It can be noted that adding additives to fly ash significantly reduces  $PM_{10}$  emission rate, and the level of  $PM_{10}$  emissions does not change when using  $CaO$  as an additive relative to using  $Ca(OH)_2$  as a binder.

#### INFLUENCE OF WATER CONTENT ON $PM_{10}$ EMISSION RATE



Слика 6, Емисија  $PM_{10}$  у односу на брзину струјања за количине адитива  
 Figure 6,  $PM_{10}$  emission rate vs. wind velocity for different binder content

From the results shown in Figure 5, it can be concluded that the lowest  $PM_{10}$  emission rates were obtained with a binder content of 3%.

#### INFLUENCE OF ADDITIVES ON $PM_{10}$ EMISSION RATE

Како што се може видети на слици 6, најнижи степен емисије  $PM_{10}$  добија се када се користи оптимални садржај воде од 15% и адитива 3%, Повећање садржаја адитива нема значајан утицај на степен емисије  $PM_{10}$  при брзини струјања ветра мањом од 3 m/s.

## ЗАКЉУЧАК

Основни циљ овог испитивања је био да се утврди утицај евентуалног развејавања честица одложеног материјала на ваздух и земљиште. Извршено је испитивање степена емисије честица на 8 различитих узорака при различитим брзинама струјања ветра (1, 3 и 5 m/s). Степен емисије при коришћењу CaO као адитива готово је идентичан као при коришћењу  $Ca(OH)_2$ , док повећање садржаја воде са 15% на 20% (адитив 3%) нема утицај на степен емисије  $PM_{10}$ . Такође, повећање количине адитива (при константном садржају воде) нема значајан утицај на степен емисије  $PM_{10}$  при брзини струјања ветра мањом од 3 m/s.

Имајући у виду горе поменуто, може се закључити да је оптимални садржај адитива 3%, а оптимални садржај воде 15%. Узорци са оптималним садржајем адитива и воде не повећавају нутре вредности емисије  $PM_{10}$  више од 1,9 пута, што се са аспекта заштите животне средине може сматрати као задовољавајући резултат.

Овај рад је проистекао из активности везаних за иновациони пројекат Министарства просвете, науке и технолошког развоја, број 391-00-16/2017-16/25 под називом „Развој технологије заједничког одлагања пепела, шљаке и гипса из термоелектрана у циљу побољшања еколошких и економских перформанси”.

As can be seen in Figure 6, the lowest level of  $PM_{10}$  emission rates is obtained when the optimal water content (15%) and additive content (3%) is used. Increasing additive content has no significant impact on  $PM_{10}$  emission rates at wind velocities lower than 3 m/s.

## CONCLUSION

The main objective of this study was to determine the impact of possible dispersion of particles of deposited material on the air and land. The dust emission rates were investigated on 8 different samples at different wind velocities (1, 3 and 5 m/s). The emission rates when using CaO as an additive is almost identical to that of using  $Ca(OH)_2$  while increasing the water content from 15% to 20% (additive 3%) have no influence on the  $PM_{10}$  emission rates. Also, increasing the quantity of additives (at constant water content) has no significant impact on  $PM_{10}$  emission rates at wind velocities less than 3 m/s.

Bearing in mind the above, it can be concluded that the optimal additive content is 3%, and the optimal water content is 15%. Samples with optimal content of additives and water do not increase the background  $PM_{10}$  emission rates more than 1.9 times, which can be considered a satisfactory result from the aspect of environmental protection.

This paper arose from the activities related to the innovation project of Ministry of Education, Science and Technological Development, number 391-00-16/2017-16/25 titled: *Development of technologies of joint disposal of ash, slag and plaster from thermal power plants aimed at improving ecological and economic performances*.

## ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Уредба о условима за мониторинг и захтевима квалитета ваздуха, Службени гласник Републике Србије, бр. 11/10, 75/10 и 63/13. / Regulation for air quality monitoring and air quality requirements ("Off. Gazette RS" No. 11/10, 75/10 and 63/13),  
<https://www.chem.bg.ac.rs/~grzetic/predavanja/Osnovi%20hemije%20atmosfere%20i%20zagadjivaci%20vazduha/SUSPENDOVANE%20I%20RESPIRABILNE%20CESTICE%20U%20URBANIM%20SREDINAMA.pdf>

SRPS EN 12341:2015, Ваздух амбијента - Стандардна гравиметријска метода мерења за одређивање  $PM_{10}$  или  $PM_{2,5}$  масене концентрације суспендованих честица, Институт за стандардизацију Србије, 2015. / Ambient air - Standard gravimetric measurement method for the determination of the  $PM_{10}$  or  $PM_{2,5}$  mass concentration of suspended particulate matter

2. Scott Van Pelt, R., Zobeck, M. T., Chapter 3 Portable Wind Tunnels for Field Testing of Soils and Natural Surfaces, Wind Tunnel Designs and Their Diverse Engineering Applications, IntechOpen, 2013.
3. SRPS EN ISO 16911-1:2013, Емисије из стационарних извора - Ручно и аутоматско одређивање брзине и запреминског протока у цевоводима - Део 1: Ручна референтна метода, Институт за стандардизацију Србије, 2013. / Stationary source emissions - Manual and automatic determination of velocity and volume flow rate in ducts - Part 1: Manual reference method
4. Нешковић, Ј., Стјепановић, П., Лазић, Д., Конц Јанковић, К., Јовановић, И., Карактеризација пепела, шљаке и гипса за потребе развоја технологије њиховог одлагања / Characterization of ash, bottom ash and gypsum for the development of the technology of their disposal, Рударски гласник, 2018., у штампи.

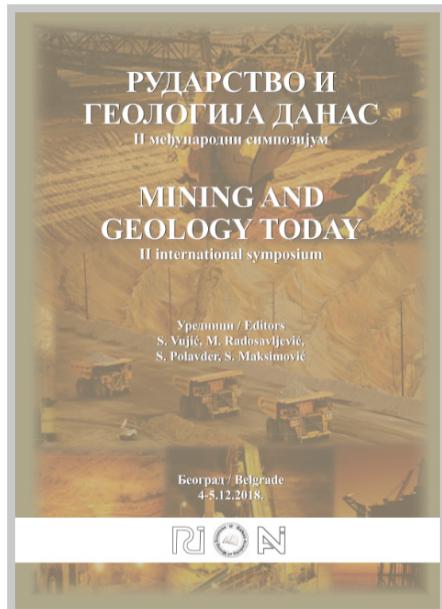
## КЊИГЕ / BOOKS

**ЗБОРНИК РАДОВА МЕЂУНАРОДНОГ СИМПОЗИЈУМА РУДАРСТВО И ГЕОЛОГИЈА ДАНАС**, Организатори и издавачи Рударски институт Београд, Балканска академија рударских наука и Академија инжењерских наука Србије. Извршни организатор и издавач Рударски институт Београд, ISBN 978-86-82673-14-9 (РИ) CIP 55(082), 622(082), COBISS.SR-ID 270601228, DOI префикс 10.25075/SI.2018, 294 стране.

Штампање књиге омогућили су Рударски институт Београд, Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије, Huesker Synthetic GMBH, Germany, Ђердап услуге АД Кладово, Флипинг ФРП ДОО Београд, Електролукс 012 ДОО Пожаревац и Енерготехника – Јужна Бачка ДОО Нови Сад. Уредници: Академик проф. др Слободан Вујић, др Милинко Радосављевић, др Светлана Полавдер и др Светомир Максимовић.

Симпозијум је одржан 4. децембра 2018. године у Београду. Теме скупа: подземна, површинска, подводна, комбинована експлоатација минералних сировина, експлоатација нафте и гаса, припрема минералних сировина, логистички руднички процеси, геологија (рудничка, инжењерска и хидрогеологија, геомеханика, геофизика и др.), заштита животне и радне средине, рекултивација, ревитализација и уређење деградираних површина, економика минерално-сировинског комплекса, математичко-моделски приступи и рачунарски интегрисане технологије, стандарди, законска и нормативна регулатива, ризици и управљање ризицима, образовање рударских и геолошких стручњака, рударство и археологија.

**Приредио:** Владан Чановић



**PROCEEDINGS OF THE II INTERNATIONAL SYMPOSIUM MINING AND GEOLOGY TODAY**, Organizers and publishers Mining Institute Belgrade, Balkan Academy of Mining Sciences and Academy of Engineering Sciences of Serbia. Executive organizer and publisher Mining Institute Belgrade, ISBN 978-86-82673-14-9 (РИ), CIP 55(082), 622(082), COBISS. SR-ID 270601228, DOI prefix 10.25075/SI.2018, 294 pages. The printing of the book was provided for by the Mining Institute of Belgrade, the Ministry of Education, Science and Technological Development of the Republic of Serbia, Huesker Synthetic GMBH, Germany, Ђerdap services AD Kladovo, Flipping FRP LLC Belgrade, Elektroluks 012 LLC Požarevac and Energetehnika – Južna Bačka LLC Novi Sad.

Editors: Academician Prof. Dr. Slobodan Vujić, Dr. Milinko Radosavljević, Dr. Svetlana Polavder and Dr. Svetomir Maksimović.

The symposium was held on December 4, 2018 in Belgrade. The themes of the meeting were related to the: underground mining, surface mining, underwater mining, combined mining, then the exploitation of oil and gas, preparation of mineral resources, logistical mining processes, geology (mining geology, engineering and hydrogeology, geomechanics, geophysics, etc.), protection of the living and working environment, reclamation, revitalization and regulation of degraded areas, the economics of the mineral material complex, mathematical-model approaches and computer integrated technologies, standards, legal and normative regulations, risks and risk management, education of mining and geological experts, as well as mining and archeology.

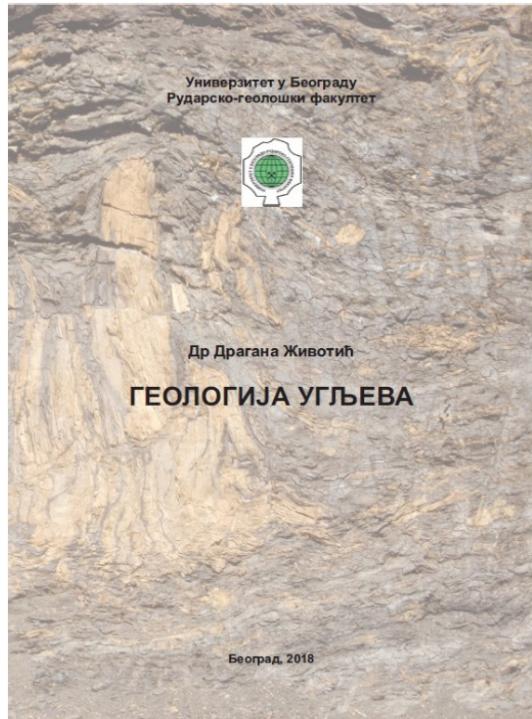
**Prepared by:** Vladan Čanović

**Драгана Животић, ГЕОЛОГИЈА УГЉЕВА,** Универзитет у Београду Рударско – геолошки факултет, електронско издање, ISBN 978-86-7352-333-0, 2018, 229 стр.

Књига Геологија угљева намењена је као уџбеник студентима студијског програма Геологија и Геофизика Рударско – геолошког факултета Универзитета у Београду, могу је користи као приручник и стручњаци других профилла.

Књига обухвата поглавља која обрађују дефиницију и поделу угљева према по-реклу органске супстанце и рангу, поделу и састав макроскопских (литотипови) и микроскопских (мацерали) компонената угљева. У посебним поглављима приказани су услови настанка угљева, еволуција живог света која је од значаја за стварање угљева кроз геолошке епохе, типови мочвара и литотипови угља који се у њима стварају. Даље су обрађени процеси карбонификације од тресетне фазе, преко стварања мрких и камених угљева, до антрацита и графита. У даљем тексту приказана је проблематика угљених слојева, серија, формација и басена, као и класификација угљеноносних басена. Проблематика физичких и хемијских својстава угљева која су директна последица њихове генезе, као и технолошких особина обрађена је у посебним поглављима, у којима су приказани најважнији параметри квалитета угља са експерименталним процедурама за њихово одређивање и формуле за њихово израчунавање. Преглед и основне карактеристике басена мрких и камених угљева Србије приказани су у последњем поглављу.

**Приредила:** Светлана Полавдер



**Dragana Životić, GEOL-OGY OF COAL,** University of Belgrade, Faculty of Mining and Geology, electronic edition, ISBN 978-86-7352-333-0, 2018, 229 pp.

The book Geology of coal is intended for students attending the Geology and Geophysics study program at the Faculty of Mining and Geology of the University of Belgrade and can also be used as a manual for experts of other profiles.

The book covers chapters dealing with the definition and classification of coal according to the origin of the organic substance and the ranking, distribution

and composition of macroscopic (lithotypes) and microscopic (macerals) components of coal. The individual chapters deal with the conditions for the formation of coal, the evolution of the living world, important for the formation of coal through the geological epochs, the types of wetlands and the coal lithotypes formed in them. Also discussed are the carbonification processes from the peat phase, over the formation of brown and hard coal, to anthracite and graphite. The following text shows the problems of coal layers, series, formations and basins, as well as the classification of carbon basins. The problems of the physical and chemical properties of the coal, which are the direct consequence of their origination, as well as of their technological characteristics, are discussed in individual chapters, showing the most important parameters of the quality of coal with the experimental procedures for their determination and the formulas for their calculation. The overview and basic characteristics of the basins of brown and hard coal of Serbia are presented in the final chapter.

**Prepared by:** Svetlana Polavder

## ЗНАЧАЈНИЛИ ДОГАЂАЈИ У 2018. SIGNIFICANT EVENTS IN 2018

XXIX МЕЂУНАРОДНИ КОНГРЕС О ПРИПРЕМИ МИНЕРАЛНИХ СИРОВИНА Москва, 17 - 21. септембра 2018, 1061 учесник из 45 земаља, 80 сесија, 31 уводно излагање, 338 реферата, 102 постера. Изложба: „IMPC 2018–EXPO, Рударство и припрема минералних сировина“, 16 – 18. септембра 2018.



XXIX INTERNATIONAL MINERAL PROCESSING CONGRESS Moscow, September 17-20, 2018, 1061 participants from 45 countries, 80 sessions, 31 keynote lectures, 338 reports, 102 posters. Exhibition: «IMPC 2018-EXPO, Mining and Mineral processing », September 16 – 18, 2018.

РУДАРСТВО И ГЕОЛОГИЈА ДАНАС, II међународни симпозијум, одржан у Београду 4. децембра 2018., организатори Рударски институт Београд, Балканска академија рударских наука и Академија инжењерских наука Србије. У Зборнику радова на 294 стране публикована 32 рада, 92 аутора из 9 земаља.



MINIG AND GEOLOGY TODAY, II International Symposium, held in Belgrade December 4, 2018, organizers Mining Institute Belgrade, Balkan Academy of Mining Sciences and Academy of Engineering Sciences of Serbia. In the Proceedings of the 294 pages published 32 papers, 92 authors from 9 countries

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ ФАКУЛТЕТ ЗА ФИЗИЧКУ ХЕМИЈУ, 27. 09. 2018, Mr Михајло Гигов, дипл. физ. хем., сарадник Рударског института Београд, одбранио докторску дисертацију са темом „Утицај термичког, ултразвучног и микроталасног поља на изотермну кинетику формирања фуллерола”, ментор др Боривој Аднађевић, редовни професор Факултета за физичку хемију.



UNIVERSITY OF BELGRADE FACULTY OF PHYSICAL CHEMISTRY, 09/27/2018, Mr Mihajlo Gigov, graduated phys. chem., research associate of the Mining Institute of Belgrade, defended a doctoral dissertation with a topic “Effect of thermal, ultrasound and microwave field on isothermal fullerol formation”, mentor Dr Borivoj Adnađević, full professor at the Faculty of Physical Chemistry.

НАУЧНИ И СТРУЧНИ СКУПОВИ  
SCIENTIFIC AND PROFESSIONAL MEETINGS  
Најава / Announce



**VIII BALKAN MINING CONGRESS**  
**VIII БАЛКАНСКИ РУДАРСКИ КОНГРЕС**

HELD IN THE YEAR OF MARKING 60 YEARS OF THE WORK OF MINING INSTITUTE BELGRADE  
ОДРЖАВА СЕ У ГОДИНИ ОБЕЛЕЖАВАЊА 60 ГОДИНА РАДА РУДАРСКОГ ИНСТИТУТА БЕОГРАД

**Belgrade, Serbia / Београд, Србија**  
**24-26 VI 2020**

**ORGANIZER / ОРГАНИЗАТОР**

MINING INSTITUTE BELGRADE  
РУДАРСКИ ИНСТИТУТ БЕОГРАД

**Co-organizers / супорганизатори**

Department of Mining, Geological and Systems Sciences  
of the Academy of Engineering Sciences of Serbia  
Одељење рударских, геолошких и системских наука  
Академије инжењерских наука Србије

Balkan Academy of Mining Sciences  
Балканска академија рударских наука

**DETAILED INFORMATION**

ДЕТАЉНЕ ИНФОРМАЦИЈЕ

[www.ribeograd.ac.rs](http://www.ribeograd.ac.rs)

## СЕЋАЊЕ / IN MEMORIAM



**Николај Николаевич Мельников** (Москва, 25. 07. 1938. – 2. 06. 2018), дипл. рударски инжењер, др техничких наука, универзитетски професор, научник светског гласа, члан Руске академије наука, 1997, инострани члан Академије инжењерских наука Србије (АИНС), 2009, почасни члан Балканске академије рударских наука, 2017.

Рођен је у породици водећег рударског стручњака и научника Николаја Всилјевића Мельникова, члана Академије наука СССР-а, то је вероватно опредељујуће утицало на избор професије сина. После завршених студија 1960. на Московскому рударском институту, млади Мельников не користи привилегије које му пружа углед и ауторитет оца, одриче се комфорта велеградског живота и одлази да ради у Соколовско-Сарбайскиј рударски комбинат у Казахстану. Будући научник враћа се у Москву 1962. и запошљава у институт Гипроцветмет, где стиче драгоцену инжењерска искуства на пројектима рудника: Нориљски комбинат, Балхаши, Зирјановск, Уст-Каменогорс, Ерденет и др.

Од 1965. до краја живота, сву своју креативу и стваралачку енергију посветио је рударству радећи у Апатитима на северу Русије (Мурманска област, Кала полуострво). Формирао је и подигао данас високо угледну

**Nikolai Nikolayevich Melnikov** (Moscow, 25/ 07/1938. – 2/06/2018), graduated mining engineer, Dr. of technical sciences, university professor, a world-class scientist, a member of the Russian Academy of Sciences, 1997, a foreign member of the Academy of Engineering Sciences of Serbia (AESS), 2009, an honorary member of the Balkan Academy of Mining Sciences, 2017.

He was born in the family of the leading mining expert and scientist Nikolai Vasilevich Melnikov, a member of the Academy of Sciences of the USSR, which was probably what influenced the choice of his son's profession. After graduating at the Moscow Mining Institute in 1960, young Melnikov does not use the privileges of his father's reputation and authority, he renounces the comforts of metropolitan life and goes to work in the Sokolovsko-Sarbajsk mining complex in Kazakhstan. The future scientist returns to Moscow in 1962. and employs himself in the Giprocvetmet Institute, where he gains valuable engineering experience on mining projects: Norilsk Combine, Balhash, Zirjanovsk, Ust-Kamenogor, Erdenet and others.

From 1965. until the end of his life, he devoted all his creativity and creative energy to mining in the Apatity in the north of Russia (Murmansk region, Kola Peninsula). He founded and raised what is today a highly respected scientific establish-

научну кућу Рударски институт Колског научног центра Руске академије наука.

Основни правци научне и научно-организационе делатности академика Н. Н. Мельникова су теоријска и примењена истраживања интегрисаног развоја минерално – сировинског комплекса и стратешког коришћења подземних простора. Његови најзначајнији научни доприноси односе се на теорију пројектовања и планирања у рударству, унапређење и развој нових ресурсно штедљивих и еколошки безбедних технологија за извођење радова у тешким условима. Основач је научне школе комплексног еколошки избалансираног освајања лежишта минералних сировина у сложеним рударско-геолошким условима, и јединствене школе подземене изградње објеката и коришћења подземних простора за нукларну енергетику и одлагање радиоактивног отпада.

Стваралачко наслеђе академика Мельникова укључује преко 300 научних радова, укључујући 21 монографију. Лауреат је бројних државних одликовања, награда и признања.

Био је пријатељ Србије, високо је поштовао српски народ, својим ауторитетом утицао је и значајно допринео успостављању и развоју научне и стручне сарадње између Русије и Србије. Као гости Одељења рударских, геолошких и системских наука АИНС, академик Мельников и његова супруга Светлана, одржали су 2009. запажена, изузетно посвећена предавања у Ректорату Универзитета у Београду. За научно дело и допринос научној сарадњи Србије и Русије, академику Николају Николаевичу Мельникову додељена је 2016. Повеља Академик Љубомир

ment - the Mining Institute of the Kolsky Scientific Center of the Russian Academy of Sciences.

The basic directions of the scientific and scientific-organizational activity of academician N. N. Melnikov are theoretical and applied research of the integrated development of the mineral-raw materials complex and the strategic use of underground space. His most important scientific contributions relate to the theory of design and planning in mining, the advancement and development of new resource-saving and environmentally safe technologies for performing works in harsh conditions. He is the founder of a science school for a complex ecologically balanced acquisition of mineral deposits in complex mining-geological conditions, and a unique school of underground construction of facilities and the use of underground spaces for nuclear energetics and the disposal of radioactive waste.

Creative heritage of academician Melnikov includes over 300 scientific papers, including 21 monographs. He is a laureate of numerous state decorations, awards and recognitions.

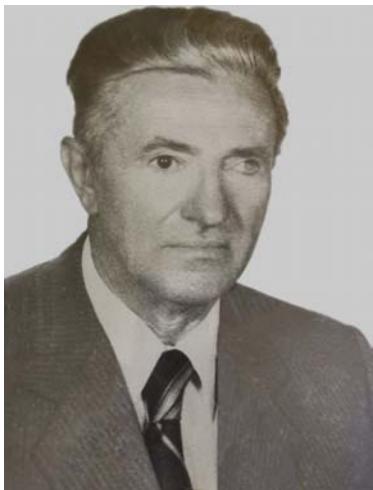
He was a friend of Serbia, had high respect for the Serbian people, with his authority he influenced and significantly contributed to the establishment and development of scientific and professional cooperation between Russia and Serbia. As guests of the department of mining, geological and systematic sciences AEIS, academician Melnikov and his wife Svetlana, held notable and extremely visited lectures at the Rectorate of the University of Belgrade in 2009. For the scientific work and the contribution to scientific cooperation between Serbia and Russia, academician Nikolai Nikolayevich Melnikov

Клерић. Тим поводом, прикладан текст посвећен њему објављен је у Рударском гласнику, No. 1-2, Vol. CXIII, 2016, str. 107-108.

was awarded the Academician Ljubomir Klerić Charter in 2016. On this occasion, a suitable text about him was published in the Bulletin of Mines, No. 1-2, Vol. CXIII, 2016, pp. 107-108.

**Приредио:**  
Слободан Вујић

**Prepared by:**  
Slobodan Vujić



**Момчило Симоновић**, (Аранђеловац, 1923 – Београд, 1999), дипл. инж. рударства, др техничких наука, редовни професор Универзитета у Београду, истакнути стручњак и привредник. Учесник Народноослободилачке борбе. Школовао се у Аранђеловцу и Београду. Студије рударства завршио 1951. на Рударском факултету Техничке велике школе у Београду. Докторску дисертацију *Капацитет површинског откопа лигнита као функција трошкова примарне топлоте за сагоревање и прераду*, одбранио на матичном факултету 1968. пред комисијом професора: Велимир Милутиновић, Бранко Глушчевић, Д. Величковић.

Студијски или на усавршавањима боравио је у Немачкој, СССР-у, Чехословачкој, САД, Канади, Грчкој, Турској, Пољској, Аустралији, Индији итд.

По дипломирању изабран је за асистента на Катедри за експлоатацију нафте и природног гаса на матичном факултету. Премештен је 1952. за главног инжењера Предузећа за истражне радове и дубинско бушење у Сарајеву, а затим за директора за експлоатацију и припрему производње у Нафтагасу у Новом Саду. У Рударско енергетско индустријски комбинат Колубара прелази да ради 1957, као управник површинских копова, главни инжењер техничке припреме, технички директор, и генерални директор Комибната. На Рударско-геолошком факултету Универзитета у Београду, за ванредног професора изабран је 1964. а за редовног 1970. Један је од утемељитеља научне и образов-

**Momčilo Simonović**, (Arandželovac, 1923 - Belgrade, 1999), BSc in Mining, PhD in Technical Sciences, a full professor at University of Belgrade, a prominent expert and businessman. He was a participant of the People's Liberation War. He was schooled in Arandželovac and Belgrade. He graduated from mining studies in 1951 at Faculty of Mining of Higher Technical School in Belgrade. He defended his doctoral dissertation. *The capacity of surface excavation of lignite as a function of costs of primary heat for combustion and processing* at his home faculty in 1968 before the committee of professors Velimir Milutinović, Branko Gluščević, D. Veličković.

He went to study and development visits in Germany, the USSR, Czechoslovakia, USA, Canada, Greece, Turkey, Poland, Australia, India, etc. After graduation, he was elected a teaching assistant at the Department for Exploitation of Oil and Natural Gas at his home faculty. He was transferred in 1952 to be the chief engineer of the Enterprise for exploration works and deep drilling in Sarajevo, and then the director for exploitation and production preparation in Naftagas, Novi Sad. He moved to Kolubara Mining Energy Industrial Plant in 1957 as the manager of open-pit mining, chief technical preparation engineer, technical director, and general manager of the Plant.

At Mining and Geological Faculty of University of Belgrade, he was elected as an associate professor in 1964 and a full professor in 1970. He is one of the founders of the scientific and educational field at his home faculty,

не области на матичном факултету, Смера за електротехнику и машинство у рударству, чијим је развојем успешно руководио до одласка у пензију 1989.

Као руководилац на високо одговорним местима у привреди, као креатор, планер, консултант, као оперативни руководилац рударско-енергетских објеката, дао је значајне доприносе изградњи и развоју електро – енергетског система Србије. Руководио је инвестиционом изградњом и развојем Здруженог електро-привредног предузећа Србије, 1965-1975. Ауторитетом, угледом, стручношћу опредељујуће је утицао и учествовао у изради Стратегије енергетског развоја Србије, Просторног плана Србије, Студије потенцијала енергетских минералних сировина Косова и Метохије, итд.

Осим у енергетици значајније научне доприносе дао је у теорији багеровања, детерминацији рудничких машинских структура, у истраживањима експлоатационог века капиталних и помоћних рударских машина итд.

Аутор и коаутор је 215 научних и стручних радова представљених и објављених у земљи и иностранству, 6 стручних књига, учествовао је у истраживањима више научних пројекта и изради бројних привредних пројекта и студија.

Књиге *Багери, одлагачи и транспортни мостови на површинским коповима*, 1967, *Булдозери, скрепери и постројења за дубинско бушење на површинским коповима*, 1967, *Трачни транспортери на површинским откопима*, 1968, издања Рударског инситута Београд, *Средства железничког и аутомобилског транспорта на површинским откопима*, 1972 и *Машине за копање и транспорт откопаног материјала и постројења за дубинско бушење на површинским откопима*, 1982, *Багери*, 1987, издања Рударско-геолошког факултета Београд, прве књиге из ових области код нас, деценијама су служе у образовању студената и инжењера рударства.

Значајан допринос српској рударској инжењерској школи и

of the Department of Electrical Engineering and Mechanical Engineering in Mining, the development of which he successfully led until retirement in 1989.

As a manager at highly responsible positions in the economy, as a creator, planner, consultant, as the operational manager of the mining and energy facilities, he made significant contributions to the construction and development of Serbia's electro-energy system. He headed the investment construction and development of the United Serbian Electric Power Industry, 1965-1975. With his authority, reputation, expertise, he had a decisive influence on the development of the Energy Sector Development Strategy of Serbia, the Spatial Plan of Serbia, the Study of the Potential of Energy Mineral Raw Materials of Kosovo and Metohija and so on.

In addition to the energy sector, he made significant scientific contributions in the theory of excavation, determination of mining machine structures, research of the exploitation life of capital and auxiliary mining machines, etc.

He is the author and co-author of 215 scientific and professional papers presented and published in the country and abroad, 6 professional books; he participated in research of several scientific projects and numerous economic projects and studies.

Books *Excavators, disposers and transport bridges on surface mines*, 1967, *Bulldozers, scrapers and deep-drilling machines on surface mines*, 1967, *Belt conveyors on open-pit mines*, 1968, published by Mining Institute Belgrade, *Means of railway and automotive transport on open-pit mines*, 1972 and *Machines for excavation and transport of excavated materials and deep drilling rigs on open-pit mines*, 1982, *Excavators*, 1987, published by Faculty of Mining and Geology, Belgrade, are the first books in these fields in our country and have been used in education of mining students and engineers for decades.

He made a significant contribution to the Serbian mining engineering school and education of generations

образовању генерација студената и инжењера рударства дао је као професор на предмету *Машине за површинску експлоатацију*, као креатор наставних планова и програма, као ментор на изради бројних дипломских радова, магистарских теза и докторских дисертација.

Широк је опус ангажовања проф. Симоновића, био је декан Рударско-геолошког факултета у Београду, шеф Смара и Катедре за електротехнику и машинство у рударству, члан бројних домаћих и међународних научних и стручних асоцијација, организатор и учесник у раду стручних и научних конференција, члан експертских комисија, консултант и саветник у државним институцијама.

За доприносе привреди, науци и инжењерском школству, одликован је Орденом рада са сребрним венцем, Орденом рада са златним венцем, Орденом са црвеном заставом и Орденом Републике са сребрним зрацима. Добитник је бројних признања, повеља, пла克ета, захвалница, јубиларних обележја и новчаних награда. Кандидован је за члана Српске академија наука и уметности.

**Приредили:**

Драган Игњатовић  
Слободан Вујић

of mining students and engineers as a professor of *Open-pit mining machines*, as a creator of curricula, as a mentor in the preparation of numerous graduation theses, master theses, and doctoral dissertations.

The scope of engagement of Prof. Simonović is wide. He was the dean of Faculty of Mining and Geology in Belgrade, the head of the Department for Electrical Engineering and Mechanical Engineering in Mining, a member of numerous national and international scientific and professional associations, the organizer and participant in professional and scientific conferences, a member of expert commissions, a consultant and an advisor in state institutions.

For contributions to the economy, science and engineering education, he was awarded the Order of Labor with Silver Wreath, the Order of Labor with Golden Wreath, the Order with Red Banner and the Order of the Republic with Silver Rays. He won numerous awards, charters, plaques, certificates of appreciation, jubilee markings and money awards. He was a candidate for the member of the Serbian Academy of Sciences and Arts.

**Prepared by:**

Dragan Ignjatović  
Slobodan Vujić



**Бранислав Генчић** (Зајечар, 06. 07. 1924. – Београд, 21.10.1990.) дипл. инж. рударства, др техничких наука, редовни професор Универзитета у Београду, водећи стручњак за подземну експлоатацију слојевитих лежишта. Учесник Народноослободилачке борбе.

Школовао се у родном граду. Дипломирао је 1950. на Рударском факултету Техничке велике школе у Београду, а докторску дисертацију *Утицај концентрације рада на капацитет и економику подземног откопа*.

**Branislav Genčić** (Zaječar, 06/07/1924 - Belgrade, 21/12/1990) BSc in Mining, PhD in technical sciences, a full professor at University of Belgrade, a leading expert for underground exploitation of layered deposits. He was a participant of the People's Liberation War. Branislav attended school in his hometown. He graduated in 1950 from Faculty of Mining of Higher Technical School in Belgrade and defended his doctoral dissertation *The effect of concentration of work on the capacity and economics of underground excavation of layered*

вања слојевитих лежишта угља одбранио 1970. на Рударско-геолошком факултету (РГФ) Универзитета у Београду пред комисијом професора: Велимир Милутиновић, Бранко Глушчевић и Иво Трампуж.

Као инжењер радио је на руководним пословима у Књажевачким рудницима угља, Руднику угља Јунковац (Колубара). У Заводу за нуклеарна и геолошка истраживања у Београду, обављао је дужност руководиоца Одељења за истражне радове, 1951-1961, са задатком истраживања и изградње Рудника уранијума Кална и постројења за прераду руде у Габровници. На РГФ-у је као хонорарни наставник 1960/1961. одржавао вежбе из предмета *Отварање и методе подземног и површинског откопавања*. Избором за доцента 1961. прелази у стални ради однос на РГФ као наставник на предмету *Основи експлоатације*, затим и на предмету *Методе подземног откопавања слојевитих лежишта*. У звање ванредног професора биран је 1971, а за редовног професор 1976. Био је шеф Кафедре за подземну експлоатацију слојевитих лежишта 1970-1988, један је од утемељитеља Смера за подземну експлоатацију лежишта и наставе о методама подземног откопавања слојевитих лежишта. Као професор и руководилац израде бројних дипломских и специјалистичких радова, магистарских теза и докторских дисертација, утицао је и допринео подизању и градњи српске школе рударског инжењерства. Пензионисан је 1989. Аутор је бројних научних и стручних радова представљених и објављених у земљи и иностранству и 5 књига (*Откопавање слојева угља мале дебљине*, РГФ, Београд, 1967; *Основне карактеристике и принципи подземне експлоатације лежишта нуклеарних сировина*, РГФ, Београд, 1969; *Технолошки процеси*

coil deposits in 1970 at Faculty of Mining and Geology (FMG) of University of Belgrade before the committee consisting of professors Velimir Milutinović, Branko Gluščević and Ivo Trampuž.

As an engineer, he worked on managerial positions in Knjazevac coal mines, Junkovac coal mine (Kolubara). At the Institute for Nuclear and Geological Research in Belgrade, he headed the Exploration Department, 1951-1961, with the task of researching and constructing Kalna uranium mine and the ore processing plant in Gabrovnica. At the FMG he was a part-time teacher in 1960/1961 holding tutorials in *Opening and methods of underground and open-pit surface excavation*. Having been elected assistant professor in 1961, he was employed on a permanent basis at FMG as a teacher on the *Basics of Exploitation*, and then on the *Methods of underground excavation of layered deposits*. He was elected an associate professor in 1971 and a full professor in 1976. He was the head of the Department for Underground Exploitation of Layered Deposits 1970-1988, one of the founders of the Department for Underground Exploitation of Deposits and of the course on Methods of underground excavation of layered deposits. As a professor and supervisor of a number of graduate and specialist papers, master theses and doctoral dissertations, he influenced and contributed to the development and raising of the level of the Serbian mining engineering school. He retired in 1989.

He is the author of numerous scientific and expert papers presented and published in the country and abroad and 5 books (Excavation of small-thickness coal layers, FMG, Belgrade, 1967; Basic characteristics and principles of underground exploitation of nuclear material deposits, FMG, Belgrade, 1969; Technological processes of underground exploitation layered

подземне експлоатације слојевитих лежишта, I део - Рударски институт Београд, 1971, II и III део - Завод за издавање уџбеника, Београд, 1972). Руководио је многим пројектима истраживања, експлоатације угља и уранијума, израде инвестиционих програма, студија, експертиза, стручних оцена и друге стручне документације.

Инжењерским и научним делом, учешћем у креирању прописа и закона за рударство, у решавањима бројних рудничких проблема и увођења нових, ефикаснијих и безбеднијих технологија у рудницима са подземном експлоатацијом, утицао је на развој српског рударства у другој половини XX века.

За доприносе науци, привреди и школи рударског инжењерства одликован је Орденом заслуга за народ и Орденом рада. Добитник је бројних признања, плакета, повеља, захвалница и јубиларних обележја.

**Приредио:**  
Слободан Вујић

deposits, Part I - Mining Institute Belgrade, 1971, II and III part - Institute for publishing textbooks, Belgrade, 1972). He led or participated in the development of numerous projects for exploration and exploitation of coal and uranium, investment programs, studies, expertise, expert assessments, etc. By his engineering and scientific work, participation in the creation of regulations and laws on mining, solutions to numerous complex practical problems and the introduction of new more efficient and safer technologies in mines with underground exploitation, he influenced the development trends of Serbian mining in the second half of the 20th century.

For contributions to science, economy and school of mining engineering, he was awarded the Order of Merit and the Order of Labor. He received numerous awards, plaques, charters, certificates of appreciation and jubilee markings.

**Prepared by:**  
Slobodan Vujić



**Чедомир Максимовић** (Врмча, Топола, 20.05.1938 – Лазаревац, 03.07.1998), дипл. инж. рударства, мр техничких наука, истакнути стручњак за површинску експлоатацију минералних сировина. Школовао се у Аранђеловцу. Студије рударства завршио је 1964. на Рударско-геолошком факултету Универзитета у Београду. Магистрирао је на теми „Одводњавање површинског копа Рудника бакра Мајданпек“ 1971. на матичном факултету.

После завршених студија запослио се у Руднику бакра Мајданпек, где је руководио Сектором за развој. У Рударско енергестко индустријски комбинат Колубара Организациона јединица „Тамнавски копови“,

**Čedomir Maksimović** (Vrmča, Topola, 20/05/1938 - Lazarevac, 03/07/1998), B.Sc. in Mining, MSc in Technical Sciences, a prominent expert on surface mining of mineral raw materials. He went to school in Aranđelovac and graduated Faculty of Mining and Geology, University of Belgrade in 1964. He was awarded a *magister* degree for the thesis on "Drainage of Majdanpek Copper Mine Open Pit" in 1971 at the same Faculty. After completing his studies, he was employed in Majdanpek copper mine, where he headed the Development Sector. Afterward, he started working in Miining Energy Industrial Plant Kolubara, Organizational unit "Tamnavski mines" in 1975 on operational and management positions: supervisory engineer, technical manager of mining

прелази да ради 1975. на оперативним и руководним mestима: надзорни инжењер, технички руководилац Рударске оперативе, главни инжењер Рударско-грађевинске службе и инвестиционе изградње. Преузима 1979. дужност директора Бироа за пројектовање и инжењеринг у Лазаревцу. Од 1984. до одласка у пензију 1997. обављао је дужност главног инжењера за координацију градње термоелектране и рудника у оснивању „Колубара Б“ Уб. Студијски је боравио у Польској, Немачкој, Замбији, СССР-у. Аутор и коаутор је већег броја стручних и научних радова представљених и објављених у земљи и иностранству.

Као председник Комисије за техничко-технолошке науке Републичке заједнице за науку Србије, ауторитетом и залагањем опредељујуће је утицао да Министрство за науку Републике Србије одобри 1974. средства (27.000 \$ US) Рударско-геолошком факултету у Београду за набавку цифарског рачунарског система Wang 2200.

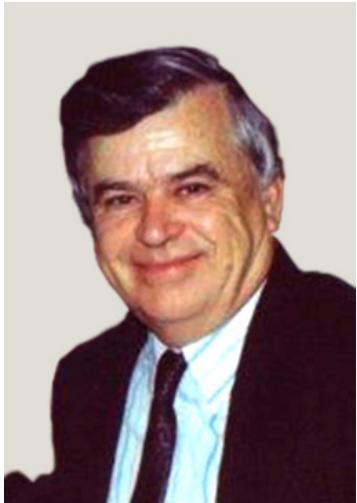
Запажена су његова ангажовања и на другим пољима: био је члан бројних стручних и друштвених организација, председник ФК Мајданпек, учесник у спелеолошким истраживањима и припреми за посетиоце Рајкове пећине код Мајданпека, члан Извршног одбора Републичке заједнице науке, члан председништва Савеза инжењера и техничара Србије, члан Савета Рударско-геолошког факултета у Београду, члан Управног одбора ФК Колубра, секретар Југословенског комитета за површинску експлатацију минералних сировина, члан Организационог одбора за припрему XI светског рударског конгреса у Београду. За стручне и друштвене доприносе носилац је више награда и признања.

**Приредио:**  
Слободан Вујић

operations, chief engineer of mining and construction service and investment construction. In 1979 he became the director of the Design and Engineering Bureau in Lazarevac. From 1984 to the retirement in 1997, he was on the position of the chief engineer for coordination of construction of a thermal power plant and mine during the establishment of "Kolubara B" Ub. He went to study visits in Poland, Germany, Zambia, the USSR. He is the author and co-author of a larger number of professional and scientific papers presented and published in the country and abroad. Being the president of the Commission for technical and technological sciences of the Republican Community of Science of Serbia, his authority and commitment definitely influenced Ministry of Science of the Republic of Serbia to approve funds (\$ 27,000 US) to the Faculty of Mining and Geology in Belgrade for the purchase of the digital computer system Wang 2200 in 1974.

His engagements in other fields are also noteworthy: he was a member of many professional and social organizations, the president of FC Majdanpek, a participant in speleological research and preparation of Rajko's cave near Majdanpek for visitors, a member of the Executive Board of the Republican Community of Science, a member of the Presidency of the Association of Engineers and Technicians of Serbia, a member of the Council of Faculty of Mining and Geology in Belgrade, a member of the Board of Directors of FC Kolubara, the secretary of the Yugoslav Committee for Surface Mining of Mineral Raw Materials, a member of the Organizational Board for the preparation of the XI World Mining Congress in Belgrade. He received several awards and recognitions for professional and social contributions.

**Prepared by:**  
Slobodan Vujić



**Мијо Крешић** (Парсело, Тузла, 1932 – Београд, 2017), дипломирани инжењер рударства, др техничких наука, угледни стручњак за експлоатацију угља. Школовао се у Тузли. Студије рударства завршио 1959. на Рударско-геолошком факултету Универзитета у Београду. Магистарску тезу одбравио 1969. на Рударском факултету Тузла Универзитета у Сарајеву, а докторску дисертацију 1981. на Рударском факултету Универзитета у Тузли.

Радио је десетак година у Рудничку мрког угља Бановићи на оперативним и руководним дужностима: управник јаме Омазићи, руководилац групе за развој и пројектовање, и главни инжењер. У Сложену организацију рудника угља Крека-Бановићи и Сложеном предузећу рудници угља Босне и Херцеговине, рудничким системима са десетинама хиљада запослених и производњом до 15 милиона тона угља годишње, обављао дужности: помоћник техничког директора рудника, руководилац службе развоја, директор за производњу, технички директор, потпредседник и председник пословодног одбора. Радну каријеру завршио је у Београду, на дужности секретара за енергетику у Привредној комори Југославије.

Аутор или коаутор је више стручних и научних радова и организатор неколико домаћих и међународних научних и стручних скупова.

За привредне и стручне доприносе одликован је Орденом рада са златним венцем, добитник је бројних признања и почасни члан Инжењерска академија Србије.

**Приредио:**  
Радомир Митић

**Mijo Krešić** (Parselo, Tuzla, 1932 - Belgrade, 2017), Bachelor of Science in Mining Engineering, Doctor of Technical Sciences, a reputable coal mining expert. Mijo went to school in Tuzla. He graduated from Faculty of Mining and Geology at the University of Belgrade in 1959. Afterward, he defended his master thesis at Faculty of Mining in Tuzla, University of Sarajevo, and his doctoral dissertation at Faculty of Mining at the University of Tuzla in 1969 and 1981, respectively.

Mijo worked for ten years in the Banovici Coal Mine on operational and management positions: Omažići pit manager, development and design team leader, and chief engineer. In the Kreka-Banovići Coal Mine holding organization and the Bosnia and Herzegovina Coal Mines holding company, mining systems with tens of thousands of employees and annual production of up to 15 million tons of coal, he worked as an assistant technical director of the Mines, head of development department, production director, vice president and president of the Board of Directors. He finished his career in Belgrade, as an energy secretary at the Chamber of Commerce of Yugoslavia. He is the author or co-author of several expert and scientific papers and the organizer of several national and international scientific and professional meetings. He was awarded the Order of Labor with a golden wreath for economic and professional contributions, received numerous awards and was an honorary member of the Engineering Academy of Serbia.

**Prepared by:**  
Radomir Mitić



**Милољуб Грбовић** (Дунишићи, Сјеница 09.06.1927 - Београд 21.07.2018), дипл. инж. рударства, у свету познат и признат стручњак за припрему минералних сировина (ПМС), депоновање јаловине из постројења за ПМС и летећег пепела из термоелектрана. Средњу школу завршио је у Новом Пазару, дипломирао је 1954. год. на Рударско-геолошком факултету Универзитета у Београду.

Професионалну каријеру везао је за две организације које је доживљавао као свој други дом, Рудник бакра Мајданпек и Рударски институт Београд. Последњих десетак година радио је у сопственој консултантској фирмама Боровац.

После завршених студија и обављене праксе у Великој Британији, са групом својих колега младих инжењера од 1955, као први управник флотације а затим као технички директор ради на пројектовању и изградњи Рудника бакра Мајданпек (РБМ), један од најмодернијих рудника у свету у то време. Знањем, ентузијазмом и креативношћу у пројекте уноси напредна техничко-технолошка решења. Резултати нису изостали – превазишли су планиране техно-економске показатеље.

У Рударски институт Београд долази 1963, где ради до 1994. на руководним местима: руководилац Одељење за бакар, управник Завода за ПМС, заменик директора за међународне пројекте. Током овог периода, значајане доприносе да је као: директор и саветник на више од 20 пројеката из ПМС-а, главни пројектант флотације Рудника бакра Мајданпек капацитета 11 милиона t/годишње и три фазе експанзије (1960-1980), главни пројектант флотације Рудника бакра Велики Кривељ капацитета 4 милиона t/годишње (1980-1982), главни пројектант и руководилац пројекта више

**Miloljub Grbović** (Dunišići, Sjenica 09/06/1927 - Belgrade 21/07/2018), B.Sc. Mining, was world-renowned expert in the field of minerals processing and mining tailings and power plant fly ash disposals. Mr Grbović completed high school in Novi Pazar and in year 1954 graduated from Faculty of Mining and Geology at the University of Belgrade.

His professional career was closely linked to two organizations that he accepted as his second home: Majdanpek Copper Mine and the Mining Institute of Belgrade. Over the last ten years he worked as an independent consultant through his own firm Borovac.

After graduating from university and completing his work experience in England, in 1955 Mr Grbović was appointed with a group of young graduate engineers to Majdanpek Copper Mine project where he held the position of its first process plant superintendent and then a technical director to manage the design and construction of a new copper mine Majdanpek, one of the most modern mines in the world at that time. Their enthusiasm, knowledge and creativity resulted in the most advanced technical solutions being applied at the mine, as well as excellent commercial outcomes that exceeded expectations.

After moving to the Mining Institute Belgrade in 1963, he worked in the senior management and executive positions until 1994: as the Head of the Copper Group, Manager of the Minerals Processing Department (Zavod 2) and as the Institute's Deputy Director for International Projects. During this period some of his remarkable achievements include the following: Project Director and Advisor on over 20 minerals processing projects around the world; Design Manager for the Majdanpek copper mine's 11Mt/a process plant and subsequently for its three expansion stages (1960-80); Design Manager for Veliki Krivelj copper mine's 4Mt/a process plant (1980-1982); Design and Project Manager

од 15 флотацијских јаловишта и пепелишта термоелектрана широм Југославије, директор пројекта три пепелишта термоелектрана у Чехословачкој на принципу “кључ у руке” (1981-1994), руководилац истраживачког тима за развој технологија чишћења угља, итд.

Фирму Боровац за консултантске услуге основао је 1994. орјентишући се на развој, иновације и промоцију нових технологија за чишћење угља ниског квалитета, а за потребе иностраних клијената урадио је више студија и пројеката за бакар и злато.

Аутор и коаутор је преко 100 научних и стручних радова представљених и објављених у земљи и иностранству, и аутор 8 патената из припреме металничких и енергетских минералних сировина – обаласти којој је стваралаштвом, знањем и енергијом осато посвећен до kraja живота, отварајући и градећи нове путеве у ПМС-у. За научне и стручне доприносе носилац је више признања.

for the over 15 mine tailings facilities and fly ash disposals in former Yugoslavia; Director of projects on a “turnkey” basis for three major power plant fly ash disposals in former Czechoslovakia (1981-1994); Leader of the research team for the development of coal-cleaning technology, etc.

Since 1994, he provided consultancy services through his own company Borovac, mainly related to the development of a new low-quality coal cleaning technology. He also worked on studies for copper and gold projects for foreign customers. Mr Grbović was the author or co-author of over 100 papers presented and published around the world, and author of 8 patents in the field of processing of metallic and energy minerals – the area he remained inspired with. With his creativity and knowledge, and dedication to his work that never wavered, even well into his senior years, he paved the way for many industry professionals and made significant contribution to the minerals processing industry. He holds numerous awards and recognitions for his professional achievements.

**Приредио:**  
Бранислав Грбовић

**Prepared by:**  
Branislav Grbović



**Коста Макар** (Сирач, Осјек, 15.11.1924 – Костолац, 25.12.2018), дипл. инж. рударства, истакнути рударски стручњак, дуго година генерални директор Индустриско-енергетског комбината „Костолац“. Крајем 1941. са породицом избегао је од немачких окупатора и усташа у Чачак код родбину по маџи. Школовао се у родном месту, Осјеку и Чачку. Студије рударства завшио је 1952. на Рударском факултету Техничке велике школе у Београду. Од дипломирања до одласка у пензију радио је у Индустриско-енергетском комбинату „Костолац“, на оперативним и ру-

**Kosta Makar** (Sirač, Osijek, 15/11/1924 - Kostolac, 25/12/2018), BSc. in Mining, a prominent mining expert, longtime general manager of the Industrial and Energy Plant "Kostolac". At the end of 1941, he and his family fled from German and Ustasha occupation to Čačak to his relatives on the mother's side. He studied at his hometown, Osijek, and Čačak. He graduated from Faculty of Mining of Technical High School in Belgrade in 1952. From graduation to retirement, he worked in the Industrial and Energy Plant "Kostolac", on operational and managerial tasks: he was the manager of Kostolac open pit, the

ководним задацима: био је управник површинског копа Костолац, технички директор рудника, заменик генералног директора, а од 1967. до одласка у пензију 1989.

г ерални директор Комбината. Време његовог руковођења је време изградње, развоја и великог производно – технолошког успона Индустриско-енергетског комбината „Костолац“, модернизације постојећих и увођења нових рудничких технологија, отварања површинских копова угља „Кленовник“, „Ђириковац“ и „Дрмно“, изградње термоелектрана, „Костолац“ А (блокови 100 и 210 MW) и „Дрмно“ (два блока по 348,5 MW). Значајан допринос развоју електро-енергетског система Србије дао је залагањем и ставовима о потреби организационог обједињавања производње угља и електричне енергије, и о значају формирања Здружене електропривреде Србије.

Ауторитетом, угледом, инжењерском стручношћу утицао је и помогао развој Костолца као модерно урбанизованог градског насеља. Велику бригу за заштиту животне средине посебно је показивао инсистирањем на рекултивацији, ревитализацији и уређењу рударским радовима деградираних површина.

Посвећеношћу унапређења и развоја површинске експлоатације угља, производње електричне енергије и изградње Костолца насеља, ушао је у легенду и остаће светао пример свима за углед.

За доприносе стручном, привредном и друштвеном развоју одликован је: Орденом заслуга за народ другог реда, Орденом заслуга за народ са сребрним венцем и Орденом рада са црвеном заставом. Носилац је бројних других признања.

**Приредио:**  
Слободан Вујић

technical director of the mine, the deputy general manager, and from 1967 until retirement in 1989, he was the general manager of the Plant.

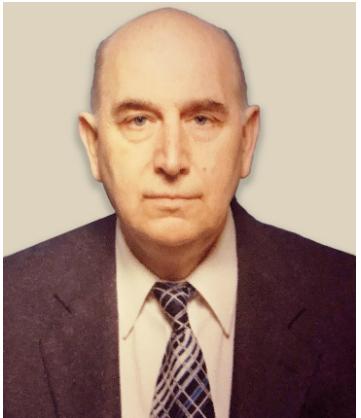
The time of his management is the time of construction, development and great production and technological rise of the Industrial and Energy Plant "Kostolac", the modernization of the existing and introduction of new mining technologies, opening of open pit mines "Klenovnik", "Ćirikovac" and "Drmno", construction of thermal power plants, "Kostolac" A (100 and 210 MW blocks) and "Drmno" (two blocks of 348.5 MW). He gave a significant contribution to the development of the electro-energy system in Serbia by advocating for the need for organizational unification of production of coal and electricity, and the importance of forming the United Serbian Electric Power Industry.

By his authority, reputation, engineering expertise, he influenced and helped the development of Kostolac as a modern urbanized city settlement. He showed great care for protecting the environment, in particular by insisting on the recultivation, revitalization and regulation of mining works on degraded surfaces.

By his commitment to the improvement and development of surface mining of coal, production of electricity and the construction of the Kostolac as a settlement, he became a legend and will remain a bright example to everyone.

He was awarded the Order of Merit for the people (second order), Order of Merit for the people with silver wreath and Order of Work with red flag for contributions to professional, economic and social development. He is the holder of numerous other awards.

**Prepared by:**  
Slobodan Vujić



**Радмило Обрадовић** (Пожаревац, 17.03.1932 – Београд, 01.02.2019), дипл. инж. геологије, др техничких наука, истакнути стручњак за геомеханику. Школовао се у Пожаревцу. На Геолошком одсеку, Смер за инжењерску геологију и хидро-геологију, Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду, дипламирао 1959. Докторску дисертацију *Утицај промене физичко-механичким карактеристика јаловине услед одлагања на стабилност одлагалишта површинских откопа* одбранио је на матичном факултету 1979. пред комисијом професора: Петар Милановић, Борислав Спasoјевић, Никола Најдановић. После завешених студија радио је као : инжењер у лабораторији за механику тла Дирекције за изградњу путева Републике Србије Степојевац, 1959–1960; инжењер за картирање истражних бушотина Нафтагас Нови Сад, 1961–1962; асистент за механику тла и земљане радове Универзитета у Нишу, Технички факултет, Грађевински одсек, 1962 – 1965; и у Рударском институту Београд, 1965–1999, сарадник и руководилац Лабораторије за геомеханику, био је и помоћник директора за научни развој, 1995–1999. На крајим усавршавањима или студијски боравио је у: Чехословачкој Мост и Праг, 1961, 1974 и 1983; Немачкој Фрајберг, 1966, Дрезден и Лајпциг, 1967; Пољској Варшава, Вроцла, и Краков, 1975; ССР-у Кијев 1978. Најзначајније стручне и научне доприносе дао је у истраживањима и испитивањима физичко-механичким и техничким карактеристикама стенских маса, у проучавању стабилности косина површинских копова и одлагалишта, и у истраживању других проблема из геотехнике, геомеханике, механике стена и тла. Аутор или коаутор је 97 научних и стручних радова представље-

**Radmilo Obradović** (Požarevac, 17/03/1932-Belgrade,01/02/2019), BSc. in Geology, PhD in Technical Sciences, a prominent expert in geomechanics. He studied in Požarevac. He graduated in 1959 from the Department of Geology, Division for engineering geology and hydrogeology, of Faculty of Mining and Geology, University of Belgrade. He defended his Doctoral dissertation *The effect of changes in physical and mechanical characteristics of mine dumps caused by depositing on the stability of open pit mine disposal sites* at the same Faculty in 1978 before the Commission of the professors: Petar Milanović, Borislav Spasojević and Nikola Najdanović.

After completing the studies, he worked as an engineer in the Laboratory for Soil Mechanics of Direction for construction of roads of the Republic of Serbia Stepojevac, 1959-1960; an engineer for mapping exploratory boreholes Naftagas Novi Sad, 1961-1962; an assistant for soil mechanics and earthworks of University of Niš, Faculty of Technical Sciences, Department for Construction, 1962 - 1965; and in Mining Institute of Belgrade, 1965-1999, as an associate and manager of the Laboratory for Geomechanics; he was also the assistant director for the scientific development, 1995-1999.

For short training or study visits, he went to: Czechoslovakia, Most and Prague, 1961, 1974 and 1983; Germany, Freiberg, 1966, Dresden and Leipzig, 1967; Poland, Warsaw, Wroclaw, and Krakow, 1975; the USSR, Kiev 1978.

His most important professional and scientific contributions were given in the research and testing of physical-mechanical and technical characteristics of rock masses, in studying the stability of slopes of open pits and landfills, and in the research of other problems in geotechnics, geomechanics, rock and soil mechanics.

He is the author or co-author of 97 scientific and professional pa-

них и објављених у земљи и иностранству, 7 монографија, учествовао је у истраживањима 15 научних пројекта и у изради 45 привредних пројекта. За стручне и научне доприносе добитник је више признања.

pers presented and published in the country and abroad, 7 monographs, he participated in the research of 15 scientific projects and in the development of 45 economic projects. He was awarded numerous recognitions for expert and scientific contributions.

**Приредио:**  
Владимир Чебашек

**Prepared by:**  
Vladimir Čebašek



**Зора Сучић - Протић** (Сарајево, 03.08.1924 – Београд, 07.01.2019), геолог, др геолошких наука, професор Универзитета у Београду. Учесник је Народноослободилачке борбе и носилац Партизанске споменице. Студије геологије завшила је 1952. на Геолошкој групи Природно-математичког факултета у Београду. После дипломирања ангажована је и 1953. изабрана за асистента на предмету *Општа геологија* на Катедри геологије матичног факултета. Докторску дисертацију одбранила је 1960. на Рударско-геолошком факултету Универзитета у Београду.

На Рударско-геолошком факултету Универзитета у Београду изабрана је 1961. у звање доцента, а 1968. за ванредног професора. Пензионисана је 1975.

Њени најзначајнији стручни и научни радови везани у за палеонтолошка истраживања мезозојских брахиопода југословенских Карпато-Балканида (Прилог за стратиграфско и палеонтолошко познавање јурских творевина, у широј окolini рудника Јерме, Геолошки анализи Балканскога полуострва, Књига 26, 1959, 163-176; Тријаски брахиоподи динарида – Планина Ковач, Геолошки анализи Балканскога полуострва, Књига 30, 1963, 59-62; Лијаски брахиоподи југословенског дела карпато-балкана, I и II део, Геолошки анализи Балканскога полуострва,

**Zora Sučić - Protić** (Sarajevo, 03/08/1924 - Belgrade, 07/01/2019), a geologist, a Doctor of Philosophy in Geology, a professor at University of Belgrade. She participated in the People's Liberation War and is the bearer of the Commemorative Medal of the Partisans. She graduated in 1952 from the Geological group of Faculty of Science in Belgrade. After graduating, she was hired in 1953 as a teaching assistant in *General Geology* course at the Department of Geology at her home faculty. She defended her doctoral dissertation in 1960 at Faculty of Mining and Geology of University of Belgrade. At Faculty of Mining and Geology of University of Belgrade, she was elected an assistant professor in 1961 and an associate professor in 1968. Zora retired in 1975.

Her most important expert and scientific work is related to the palaeontological research of the Mesozoic Brachiopods of the Yugoslav Carpatho-Balkanids (Contribution for the stratigraphic and paleontological knowledge of the Jurassic creations, in the wider area of the Jerma mine, Geološki anali Balkanskoga poluostrva, Vol. 26, 1959, 163-176; Triassic Brachiopoda Dinarides - Mount Kovac, Geološki anali Balkanskoga poluostrva, Vol. 30, 1963, 59-62; Liassic Brachiopoda of the Yugoslav part of the Carpatho-Balkan, Part I and II, Geološki anali Balkanskoga poluostrva, Vol. 32, 1966, 37-85; Mesozoic

Књига 32, 1966, 37-85; Mesozoic Brachiopoda of Yugoslavia. Middle Liassic Brachiopoda of the Yugoslav Carpatho-Balkanids. University of Belgrade Monograph 1, 1969, 1-93; Mesozoic Brachiopoda of Yugoslavia. Middle Liassic Brachiopoda of the Yugoslav Carpatho-Balkanids (Part 1), University of Belgrade Monograph 1, 1969, 1-214; Mesozoic Brachiopoda of Yugoslavia, Middle Liassic Brachiopoda of the Yugoslav Carpatho-Balkanids (Part II). University of Belgrade, Monographs 5, 1971, 1-63; Mesozoic Brachiopoda of Yugoslavia. Middle Liassic Brachiopoda of the Yugoslav Carpatho-Balkanids (Part III), Palaeontologia Jugoslavica 32, 1985, 1-60).

Друштвено је била веома ангажована. Више година била је секретар Комитета СК Рударско-геолошког факултета у Београду, члан Комитета СК Универзитета у Београду, члан партијских комисија, члан Савета Рударско-геолошког факултета у Београду, Министар просвете Републике Србије, посланик Републичке Скупштине, 1969 – 1974. За друштвене и друге доприносе одликована је Медаљом за храброст, Орденом заслуга за народ трећег реда, Орденом братства и единства са сребрним венцем.

Brachiopoda of Yugoslavia. Middle Liassic Brachiopoda of the Yugoslav Carpatho-Balkanids, University of Belgrade Monograph 1, 1969, 1-93; Mesozoic Brachiopoda of Yugoslavia. Middle Liassic Brachiopoda of the Yugoslav Carpatho-Balkanids (Part 1), University of Belgrade Monograph 1, 1969, 1-214; Mesozoic Brachiopoda of Yugoslavia, Middle Liassic Brachiopoda of the Yugoslav Carpatho-Balkanids (Part II). University of Belgrade, Monographs 5, 1971, 1-63; Mesozoic Brachiopoda of Yugoslavia. Middle Liassic Brachiopoda of the Yugoslav Carpatho-Balkanids (Part III), Palaeontologia Jugoslavica 32, 1985, 1-60). She was socially very active. For several years she was the Secretary of the Committee of the Association of Communists at Faculty of Mining and Geology in Belgrade, member of the Committee of the Association of Communists at University of Belgrade, member of party committees, member of the Council of Faculty of Mining and Geology University in Belgrade, Minister of Education of the Republic of Serbia, MP of the Republican Assembly, 1969-1974.

For social and other contributions, she was awarded Medal of Courage, the Order of Merit, third class, the Order of Brotherhood and Unity with Silver Wreath.

**Приредила:**  
Светлана Полавдер

**Prepared by:**  
Svetlana Polavder



**Љубомир Вукајловић** (Београд, 29. 05. 1930 – 10. 01. 2019), дипл. инж. рударства, др техничких наука, редовни професор Универзитета у Београду. Школовао се у Београду. Студије рударства завршио је 1962. на Рударско-геолошком факултету Универзитета у Београду. На матичном факултету магистрирао је 1975, а докторирао 1977. на теми из подземне експлоатације металничких минералних сировина *Утицај промена параметара и*

**Ljubomir Vukajlović** (Belgrade, 29/05/1930 – 10/01/2019), BSc in Mining, PhD in Technical Sciences, a full Professor at University of Belgrade. Ljubomir was schooled in Belgrade. He graduated from Faculty of Mining and Geology of University of Belgrade in 1962, and at the same faculty defended the master thesis in 1975 and a doctoral dissertation in 1977 on the underground exploitation of metallic mineral raw materials (*The impact of changes in parameters and meth-*

метода масовног добијања на техничко-економске ефекте при експлоатацији сиромашне руде у Руднику бакра Бор. Дисертацију је одбранио пред комисијом професора: Бранко Глушчевић, Миша Лилић и Петар Милановић.

После завршених студија радио је на оперативним инжењерским пословима у Комбинату Трепча, Рудник Стари Трг до 1964. када је због потреба премештен у Рудник на Руднику на радно место управника јаме. У Рударски институт Београд долази 1966. где као стручни сарадник ради на пројектовању рудничких вентилационих система у Заводу за вентилацију и техничку заштиту. Крајем 1969. запошљава се на Рударско-геолошком факултету Универзитета у Београду на Катедри за подземну експлоатацију лежишта минералних сировина, где остаје до пензионисања 1995. Као наставник на предметима *Технологија подземне експлоатације неслојевитих лежишта* и *Истражни радови са дубинским бушењем* прошао је сва изборна звања, за редовног професора биран је 1990.

Аутор и коаутор је бројних стручних и научних радова представљених и објављених у земљи и иностранству. Учество вао је у изради више значајних пројекта, студија, експертиза и стручних оцена за руднике са подземном експлоатацијом металничких минералних сировина.

Његова посвећеност и доприноси струци, науци и школи огледају се и у другим активностима. Био је заменик и у два мандата шеф Рударског одсека, шеф Катедре за подземну експлоатацију лежишта минералних сировина, члан Савета, комисија и других факултетских тела. Добитник је више признања, плакета, диплома и захвалница.

**Приредио:**  
Слободан Вујић

*ods of mass yield on the technical and economic effects at exploitation of poor ore in the Bor copper mine).* He defended the dissertation before the committee comprised of professors Branko Gluščević, Miša Lilić and Petar Milanović.

After completing his studies, he worked on operational engineering work in plant Trepča, Stari Trg mine until 1964, when he was transferred to Rudnik on Rudnik to work as a pit manager. He came to the Mining Institute of Belgrade in 1966, where as an expert associate he worked on the design of mine ventilation systems at the Institute for Ventilation and Technical Protection. At the end of 1969, he was employed at Faculty of Mining and Geology of University of Belgrade at Department of Underground Exploitation of Mineral Raw Material Deposits, where he taught until retirement in 1995. As a teacher of courses of *Technology of underground exploitation of non-layered deposits* and *Exploration works with deep drilling*, he went through all titles and was elected a full professor in 1990.

He is the author and co-author of numerous expert and scientific papers presented and published in the country and abroad. He participated in the preparation of several important projects, studies, expertise and expert assessments for mines with underground exploitation of metallic mineral raw materials.

His dedication and contribution to the profession, science and school are also reflected in other activities. He was the deputy and also the head in two terms of the Mining Department, the head of the Department for Underground Exploitation of Mineral Raw Material Deposits, a member of the Council, committees and other faculty bodies. He received several awards, plaques, diplomas and certificates of appreciation.

**Prepared by:**  
Slobodan Vujić



YU ISSN 0035-9637