

СТРАТЕШКО УПРАВЉАЊЕ РУДАРЕЊЕМ У СВЕТЛУ
НЕДОСТАТКА РЕСУРСА И ИЗАЗОВА ОДРЖИВОСТИ
И ЗАШТИТЕ ЖИВОТНЕ СРЕДИНЕ

STRATEGIC MINING MANAGEMENT IN LIGHT
OF RESOURCE SCARCITY AND SUSTAINABILITY
AND ENVIRONMENTAL PROTECTION CHALLENGES

DOI: 10.5937/RG2502077S

Прегледни рад
Review

Иван Стевовић¹

Diana Mihaela Țîrcă²

¹Иновациони Центар

Машинског факултета,

Универзитет у Београду, Београд, Република Србија

²Економски факултет, Универзитет „Constantin

Brancusi“ у Тргу Жиуу, Тргу Жиу, Горж, Румунија

istevovic@mas.bg.ac.rs

Ivan Stevović¹

Diana Mihaela Țîrcă²

¹Innovation Center of the

Faculty of Mechanical Engineering

University of Belgrade, Belgrade, Republic of Serbia

²Faculty of Economics, “Constantin Brancusi”

of Targu-Jiu, Targu-Jiu, Gorj, Romania

istevovic@mas.bg.ac.rs

Примљен 22. 9. 2025; Рецензиран 29. 10. 2025; Прихваћен 21. 11. 2025.

Received 22 September 2025; Received in revised version 29 October 2025; Accepted 21 November 2025

Сажетак: *Савремено рударство налази се на раскрићу између растућих потреба за минералним сировинама и ограничених природних ресурса, уз истовремено појачане јавности и регулаторних тела да се очувају екосистеми. Стратешко управљање рударским активностима захтева интеграцију економских, еколошких и социјалних аспеката, као и усклађивање са принципима циркуларне економије. Циљ овог рада је да се анализирају кључни изазови у домену одрживости, идентификују фактори који условљавају недостатак минералних ресурса и понуде стратегије за дугорочно планирање. Методологија је заснована на компаративној анализи глобалних трендова, процени расположивости рудних лежишта и анализи утицаја на животну средину кроз индикаторе као што су емисије CO₂, потрошња воде и деградација земљишта. Резултати указују на потребу примене интегрисаног управљачког приступа, развој технолошких иновација за повећање ефикасности експлоатације и усклађивање стројих еколошких стандарда. Дискусија показује да успешна трансформација рударског сектора зависи од дугорочне визије, јавноприватног партнерства и усмеравања инвестиција ка истраживању и рециклажи секундарних сировина. Закључак истиче да је само холистички приступ, који истовремено подржава економску добит и заштити природно окружење, у стању да обезбеди стабилност и одрживост рударства у наредним деценијама.*

Кључне речи: СТРАТЕШКО УПРАВЉАЊЕ, РУДАРСТВО, ЦИРКУЛАРНА ЕКОНОМИЈА, ОДРЖИВИ РАЗВОЈ, ЗАШТИТА ЖИВОТНЕ СРЕДИНЕ

Abstract: *Modern mining is at the crossroads of growing demand for mineral resources and limited natural resources, while at the same time increasing public and regulatory pressure to preserve ecosystems. Strategic*

management of mining activities requires the integration of economic, environmental and social aspects, as well as compliance with the principles of the circular economy. The aim of this paper is to analyze key challenges in the field of sustainability, identify factors that determine the scarcity of mineral resources and offer strategies for long-term planning. The methodology is based on comparative analysis of global trends, assessment of the availability of mineral deposits and analysis of environmental impacts through indicators such as CO₂ emissions, water consumption and land degradation. The results indicate the need to apply an integrated management approach, develop technological innovations to increase the efficiency of exploitation and establish strict environmental standards. The discussion shows that the successful transformation of the mining sector depends on a long-term vision, public-private partnerships and directing investments towards the exploration and recycling of secondary raw materials. The conclusion emphasizes that only a holistic approach, which simultaneously addresses economic profit and environmental protection, is able to ensure the stability and acceptability of mining in the coming decades.

Keywords: STRATEGIC MANAGEMENT, MINING, CIRCULAR ECONOMY, SUSTAINABLE DEVELOPMENT, ENVIRONMENTAL PROTECTION

УВОД

Рударство је историјски представљало основ индустријског развоја и технолошког напретка, али је истовремено изазвало значајне промене у природним екосистемима. У последњим деценијама, нагли раст светске популације и индустријализација довели су до повећане потражње за металима и минералима, што резултира исцрпљивањем висококвалитетних лежишта и растућим притиском на животну средину. Ограниченост ресурса и све строжи еколошки стандарди намећу потребу за преиспитивањем досадашњих пракси и изработом одговарајуће просторно планске документације [1]. Савремено рударство више не може да се посматра искључиво кроз призму економске добити, већ захтева холистички приступ који укључује концепт одрживог развоја, друштвене одговорности и управљања ризицима.

Истовремено, климатске промене, губитак биодиверзитета и деградација земљишта намећу нове изазове [2]. Стратегије које се примењују у водећим рударским земљама све више интегришу процену животног циклуса и технолошке иновације попут аутоматизације и дигитализације рударских процеса, а посебно су усмерени ка прелазу са линеарне на циркуларну економију, која је при коришћењу необновљивих извора енергије још већи императив него код обновљивих [3]. Циљ овог рада је да истражи како стратешко управљање може допринети ефикаснијем коришћењу ресурса, мини-

INTRODUCTION

Mining has historically been the basis of industrial development and technological progress, but it has also caused significant changes in natural ecosystems. In the recent decades, rapid growth in the world population and industrialization have led to increased demand for metals and minerals, resulting in the depletion of high-quality deposits and increasing pressure on the environment. Resource limitations and increasingly stringent environmental standards impose the need to review previous practices and develop appropriate spatial planning documentation [1]. Modern mining can no longer be viewed exclusively through the prism of economic profit, but requires a holistic approach that includes the concept of sustainable development, social responsibility and risk management.

At the same time, climate change, biodiversity loss and land degradation pose new challenges [2]. Strategies implemented in leading mining countries increasingly integrate life cycle assessment and technological innovations such as automation and digitization of mining processes, and are particularly focused on the transition from a linear to a circular economy, which is an even greater imperative when using non-renewable energy sources than when using renewable ones [3]. The aim of this paper is to explore how strategic management can contribute to more efficient use of resources, minimizing environmental impacts

мизовању еколошких утицаја и обезбеђивању дугорочне одрживости сектора.

Рударство као кључна индустријска грана у XXI веку [4] налази се пред сложеним изазовима који проистичу из све веће глобалне потражње за минералним ресурсима, ограничене доступности сировина, као и еколошких притисака и захтева за одрживим развојем. Стратешко управљање рударењем постаје императив, јер подразумева балансирање између економских интереса, енергетске безбедности, социјалних потреба и заштите животне средине.

МЕТОДОЛОГИЈА

Методолошки приступ у овом раду заснован је на примени мултикритеријалне анализе (МСА) [5], која омогућава евалуацију различитих аспеката рударске индустрије у односу на циљеве одрживог развоја.

Кључни кораци методологије обухватају:

- Идентификација ресурса и потреба – утврђивање кључних минералних и енергетских ресурса у свету и региону, као и трендова њихове потрошње и утицаја на животну средину.
- Компаративна анализа најбољих пракси – студије случаја из земаља са развијеним системима управљања рударством (нпр. Норвешка, Канада, Аустралија).

Методолошки оквир истраживања обухвата анализу глобалних трендова и извора података. Коришћене су статистике Међународне агенције за енергију, Светске банке и УН о производњи, резервама и потрошњи кључних руда/минерала (угаљ, бакар, гвожђе, ретки елементи).

Прикупљени подаци су обрађени статистичким методама коришћењем софтверских пакета Microsoft Excel и IBM SPSS Statistics 24.

Квалитативни подаци прикупљени су из научних радова, студија случаја (Аустралија, Чиле, Србија) и извештаја компанија.

and ensuring the long-term sustainability of the sector.

Mining, as a key industry in the 21st century [4], faces complex challenges arising from the increasing global demand for mineral resources, the limited availability of raw materials, as well as environmental pressures and the requirements for sustainable development. Strategic mining management is becoming imperative, as it involves balancing economic interests, energy security, social needs, and environmental protection.

METHODOLOGY

The methodological approach in this paper is based on the application of multi-criteria analysis (MCA) [5], which allows for the evaluation of various aspects of the mining industry in relation to sustainable development goals.

The key steps of the methodology include:

- Resource and needs identification – determining key mineral and energy resources in the world and the region, as well as trends in their consumption and environmental impact.
- Comparative analysis of best practices – case studies from countries with developed mining management systems (e.g. Norway, Canada, Australia).

The methodological framework of the research includes an analysis of global trends and data sources. Statistics from the International Energy Agency, the World Bank and the UN on the production, reserves and consumption of key ores/minerals (coal, copper, iron, rare earth elements) were used.

The collected data were processed based on statistical methods using the software packages Microsoft Excel and IBM SPSS Statistics 24.

Qualitative data were collected from scientific papers, case studies (Australia, Chile, Ser-

Квантитативни подаци су обрађени и дескриптивном статистиком, графичким и табеларним приказима трендова. Циљ методологије је да омогући системско сагледавање рударства кроз призму ресурса, технологије, регулативе и друштвено-еколошких утицаја.

РЕЗУЛТАТИ

ГЛОБАЛНИ ДЕФИЦИТ РЕСУРСА

Истраживања Међународне агенције за енергију (IEA) [29] спроведена 2024. године [6] и Геолошког института САД (USGS) [7, 30] показују да се резерве висококвалитетних руда у свету смањују. Годишња стопа пада изражена у мегатонама (Mt) приказана је у Табели 1 за бакар, никл, литијум и кобалт. Резултати показују и да је просечан садржај метала у новооткривеним лежиштима знатно нижи него у рудницима који су се експлоатисали у другој половини XX века. На пример, просечан садржај бакра у новоразвијеним рудницама Чилеа опао је са 1,2% на око 0,6% у последње три деценије [8]. Настали услови подразумевају удвостручење количине руде која се мора прерадити за исту тонажу метала, уз повећање потрошње енергије и воде [9].

Quantitative data were also processed using descriptive statistics, graphical and tabular displays of trends. The goal of the methodology is to enable a systemic view of mining through the prism of resources, technology, regulations and socio-ecological impacts.

RESULTS

GLOBAL RESOURCE SHORTAGE

Research by the International Energy Agency (IEA) [29] conducted in 2024 [6] and the United States Geological Survey (USGS) [7, 30] shows that the world's reserves of high-grade ores are decreasing. The annual rate of decline in megatons (Mt) is shown in Table 1 for copper, nickel, lithium and cobalt. The results also show that the average metal content of newly discovered deposits is significantly lower than in mines that were exploited in the second half of the 20th century. For example, the average copper content of newly developed mines in Chile has fallen from 1.2% to about 0.6% in the last three decades [8]. The resulting conditions imply a doubling of the amount of ore that must be processed to produce the same tonnage of metal, with increasing energy and water consumption [9].

Табела 1, Глобални трендови резерви и потражње за одабраним металима у свету

Table 1, Global trends in reserves and demand for selected metals in the world

Метал Metal	Процењене глобалне резерве (Mt) Estimated global reserves (Mt)	Годишња потрошња 2023 (Mt) Annual consumption 2023 (Mt)	Просечни раст потражње (%) Average demand growth (%)	Просечан садржај руде Average ore grade (%)	
				1980.god year	2023.god year
Бакар Copper	870	27	3,5–4,0	1,2	0,6
Никл Nickel	95	3,4	4,5–5,0	2,0	1,1
Литијум Lithium	26	0,14	7,0–10,0	1,5	1,0
Кобалт Cobalt	7,6	0,19	6,0	0,3	0,2

Резултати истовремено показују да светска потражња за критичним минералима драматично расте. Енергетска транзиција, пре свега електрификација транспорта и развој складишта енергије, узрокује годишњи раст тражње за бавром, литијумом, кобалтом и ретким земљама. Само за производњу батерија за електрична возила, очекује се да ће потребе за литијумом до 2030. порастати за више од 300% у односу на ниво из 2020. Ова диспропорција између темпа експлоатације и формирања нових резерви условљава пораст цена на глобалним берзама и генерише геополитичке тензије, посебно између водећих произвођача и потрошача.

У Србији, као делу Западног Балкана, посебну пажњу изазивају лежишта борских бакарних руда [10] и јадарског литијума [11], Табела 2. Историјски гледано, Бор је један од најзначајнијих европских центара за производњу бакра, али дуготрајна експлоатација довела је до пада садржаја бакра у руди са некадашњих 2% на испод 0,6% [12]. Пројекат „Јадар“ код Лознице, иако још увек предмет јавних и регулаторних расправа [13], показује колико су ретка и вредна налазишта литијума у Европи и колико су инвестиције у такве ресурсе повезане са друштвеним отпором и еколошким ризицима.

The results also show that global demand for critical minerals is growing dramatically. Energy transition, primarily electrification of transport and development of energy storage, is driving annual growth in demand for copper, lithium, cobalt and rare earths. For the production of batteries for electric vehicles alone, lithium demand is expected to increase by more than 300% by 2030 compared to the 2020 levels. This imbalance between the rate of exploitation and the formation of new reserves is driving up prices on global stock exchanges and generating geopolitical tensions, especially between leading producers and consumers.

In Serbia, as part of the Western Balkans, the Bor copper ore deposits [10] and Jadar lithium [11] are of particular interest, Table 2. Historically, Bor has been one of the most important European centres for copper production, but long-term exploitation has led to a drop in the copper content of the ore from the former 2% to below 0.6% [12]. The Jadar project near Loznica, although still subject to public and regulatory debate [13], shows how rare and valuable lithium deposits are in Europe and how investments in such resources are associated with social resistance and environmental risks.

Табела 2, Примери из Србије, процене за бакар и литијум
Table 2, Examples from Serbia, estimates for copper and lithium

Лежиште Deposit	Руда/минерал Ore/Mineral	Историјски садржај (%) Historical content (%)	Тренутни садржај (%) Current content (%)	Процењене резерве (Mt) Estimated reserves (Mt)	Кључни изазови Key challenges
Бор (Велики Кривељ, Церово) Bor (Veliki Krivelj, Cerovo)	Бакар Copper	са 2,0 на 1,2 from 2.0 to 1.2	0,5–0,6	>300	Старе технологије прераде, еколошки утицај Old processing technologies, environmental impact
Јадар (Лозница) Jadar (Loznica)	Литијум- борати Lithium- borate	–	1,8 (Li ₂ O)	>100	Еколошка прихватљивост, друштвени отпор Environmental acceptability, social resistance

Ови подаци јасно показују да се светски рударски сектор суочава са „двоструким макама“ – са једне стране расте потреба за минералима због дигитализације и енергетске транзиције, а са друге стране опада квалитет руда и усложњавају се еколошки услови. Повећани ризици од нестабилности снабдевања захтевају развој стратегија за ефикасније коришћење ресурса, рециклажу, замену материјала и улагање у истраживање нових лежишта уз минималан утицај на околину.

ЕКОЛОШКИ ПРИТИСЦИ

Рударске активности имају сложен и вишеслојан утицај на животну средину, који се манифестује кроз емисије гасова стаклене баште, деградацију земљишта, контаминацију водотокова, губитак биодиверзитета и повећање буке и прашине у локалним заједницама. Енергетски интензивни процеси дробљења, млевења и флотације руде захтевају велике количине електричне енергије и воде, што у крајњем исходу води повећању угљеничног отиска и притиску на локалне водне ресурсе. Подаци Међународне агенције за енергетику (IEA) [29] и Међународног савета за рударство и метале (ICMM) [31] из 2023. године показују да рударски сектор глобално учествује са приближно 7% у укупним индустријским емисијама CO₂, при чему отворени копови и металуршке прераде доприносе највећем уделу.

Резултати показују да се негативни утицаји рударских активности на животну средину најчешће појављују у следећим областима:

- Водни ресурси – у периоду 2010–2020. просечна потрошња воде по тони руде повећана је за око 18% [14, 15, 16, 17, 18, 19]. Ово је последица пада садржаја метала, што изискује већи обим прераде и интензивније испирање.
- Контаминација земљишта и воде – цурење киселих рударских вода (acid mine drainage) доводи до растварања тешких метала и њиховог уноса у водене токове, са дуготрајним ефектима на екосистеме.
- Биодиверзитет и пејзаж – велики отворени копови и депоније јаловине узро-

These data clearly show that the global mining sector is facing a “double-edged sword” – on the one hand, demand for minerals is growing due to digitization and energy transition, and on the other hand, the quality of ores is declining and environmental conditions are becoming more complex. Increased risks of supply instability require the development of strategies for more efficient use of resources, recycling, material substitution and investment in the exploration of new deposits with minimal environmental impact.

ENVIRONMENTAL PRESSURES

Mining activities have a complex and multifaceted environmental impact, manifested through greenhouse gas emissions, land degradation, water contamination, biodiversity loss and increased noise and dust in local communities. The energy-intensive processes of crushing, grinding and flotation of ore require large amounts of electricity and water, which ultimately leads to an increase in the carbon footprint and pressure on local water resources. Data from the International Energy Agency (IEA) [29] and the International Council on Mining and Metals (ICMM) [31] from 2023 show that the mining sector contributes approximately 7% of total industrial CO₂ emissions globally, with the largest share of open pit mining and metallurgical processing.

The results show that the negative impacts of mining activities on the environment most frequently occur in the following areas:

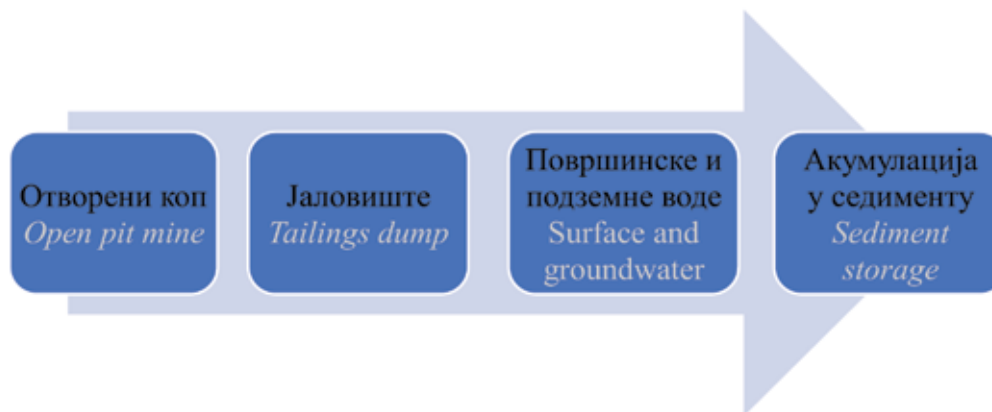
- Water resources – in the period 2010–2020. average water consumption per ton of ore increased by about 18% [14, 15, 16, 17, 18, 19]. This is a consequence of decrease in the metal content, which requires a larger volume of processing and more intensive leaching.
- Soil and water contamination – leakage of acid mine drainage leads to the dissolution of heavy metals and their entry into water courses, with long-term effects on ecosystems.
- Biodiversity and landscape – large open pit mines and tailings dumps cause habitat loss,

кују губитак станишта, фрагментацију екосистема и трајне промене у морфологији терена.

ecosystem fragmentation and permanent changes in terrain morphology.

Пропагација загађења у рударским зонама отворених копова приказана је шематски на Слици 1.

The propagation of pollution in open pit mining zones is shown schematically in Figure 1.



Слика 1, Шематски приказ токова загађења у рударским зонама отворених копова
Figure 1, Schematic representation of pollution flows in open pit mining zones

Резултати истраживања показују да су рударске зоне у Србији најчешће црне тачке животне средине. Загађујуће материје, пре свега тешки метали и полуметали (бакар, арсен, олово, кадмијум), после испуштања у површинске воде (реке, језера) постепено прелазе из водене фазе у чврсту фазу и таложе се у доњим слојевима речног, или језерског дна.

Research results show that mining zones in Serbia are the most common environmental black spots. Pollutants, primarily heavy metals and semi-metals (copper, arsenic, lead, cadmium), after being released into surface waters (rivers, lakes) gradually pass from the aqueous phase to the solid phase and settle in the lower layers of the river or lake bottom.

Хемијска реакција се одвија тако што се растворене јонске форме метала везују за честице глине, органску материју и оксиде гвожђа/мангана, па се таложе као нерастворљива једињења.

The chemical reaction occurs as dissolved ionic forms of metals bind to clay particles, organic matter, and iron/manganese oxides, and are deposited as insoluble compounds.

Једном кад се метали нађу у седименту, они остају дуго, често деценијама, и могу поново прећи у воду ако дође до промене рН, оксидационо редукционих услова или хидродинамике, што у резултату даје дугорочни резервоар загађења.

Once metals are in sediment, they remain for a long time, often decades, and can be re-introduced into the water if there is a change in pH, redox conditions, or hydrodynamics, resulting in a long-term reservoir of pollution.

Еколошки ризик је значајно повећан, јер седимент постаје „складиште“ токсичних материја које могу улазити у ланац исхране (биоакумулација у дну, шкољкама, рибама).

The environmental risk is significantly increased, as sediment becomes a “storage” of toxic substances that can enter the food chain (bioaccumulation in the bottom, shellfish, fish).

Србија има дугу рударску традицију (Бор, Мајданпек, Трепча) [20], што је донело зна-

Serbia has a long mining tradition (Bor, Majdanpek, Treпча) [20], which has brought sig-

чајне економске бенефите, али и озбиљне еколошке последице:

1. Борски рударско-металуршки басен:
 - Деценијска експлоатација бакра довела је до акумулације јаловишта и повећаних концентрација тешких метала (арсен, кадмијум) у околном земљишту и водотоцима.
 - Емисије SO₂ из топионице, иако смањене модернизацијом постројења у 2021. години [21], и даље представљају изазов за квалитет ваздуха и здравље становништва.
2. Јадарски басен (потенцијално лежиште литијума):
 - Могући утицаји укључују измену водног режима реке Јадар, стварање великих количина јаловине са ризиком од цурења у подземне воде и деградацију пољопривредног земљишта.
 - Локалне заједнице изражавају забринутост због недостатка транспарентности и дугорочних гаранција за рекултивацију.
3. Стара јаловишта и несанитарне депоније:
 - На више локација (Столице, Злот, Звечан) присутни су наслеђени проблеми неконтролисаног цурења тешких метала и киселих вода у речне системе, што резултира хроничним загађењем.

Резултати анализе података из комбиних јавно доступних извештаја Међународне агенције за енергетику (IEA) [29], Међународног панела о климатским променама (IPCC) [32], јавни извештаји термоелектрана [33, 34] и академских студија о емисијама угљендиоксида, сумпордиоксида, потрошње воде и садржаја тешких метала у седименту на неким постојећим и планираним локацијама у Србији [22] су приказани у Табели 3 уз поређење са референтним вредностима просечним за ЕУ.

nificant economic benefits, but also serious environmental consequences:

1. Bor Mining and Metallurgical Basin:
 - Decades of copper mining have led to the tailings storage and increased concentrations of heavy metals (arsenic, cadmium) in the surrounding soil and waterways.
 - SO₂ emissions from the smelter, although reduced by modernization of the plant in 2021 [21], continue to pose a challenge to air quality and public health.
2. Jadar Basin (potential lithium deposit):
 - Possible impacts include alteration of the water regime of the Jadar River, generation of large amounts of tailings with risk of leakage into groundwater, and degradation of agricultural land.
 - Local communities express concerns about the lack of transparency and long-term guarantees for reclamation.
3. Old tailing dumps and unsanitary landfills:
 - In several locations (Stolice, Zlot, Zvečan) there are inherited problems of uncontrolled leakage of heavy metals and acidic waters into river systems, resulting in chronic pollution.

The results of the analysis of data from combined publicly available reports of the International Energy Agency (IEA) [29], the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [32], public reports of thermal power plants [33, 34] and academic studies on carbon dioxide, sulphur dioxide emissions, water consumption, and heavy metal content in sediment at some existing and planned sites in Serbia [22] are presented in Table 3, along with a comparison with the EU average reference values.

Табела 3, Кључни индикатори утицаја рударства на животну средину (пример Србије)
Table 3, Key indicators of the impact of mining on the environment (example of Serbia)

Параметар Parameter	Бор (2023) Bor (2023)	Мајданпек (2023) Majdanpek (2023)	Јадар (пројекција) Jadar (projection)	Референтна вредност (ЕУ) Reference value (EU)
Емисија CO ₂ (t/год) CO ₂ emissions (t/year)	~1.250.000	~380.000	450.000	-
SO ₂ (mg/m ³ ваздуха) SO ₂ (mg/m ³ air)	40–80 (пик >100) 40–80 (peak >100)	30–50	-	<20 (лимит) <20 (limit)
Потрошња воде (m ³ /тона) Water consumption (m ³ /ton)	4,2	3,8	5,0	<3,0 (добра пракса) <3,0 (good practice)
Тешки метали у седименту (mg/kg) Heavy metals in sediment (mg/kg)	Cu 320, As 75	Cu 210, Pb 55	Li -	Cu <50 As <20 (оријент.) Cu <50 As <20 (approx.)

Резултати истраживања у Србији су показали да је у зонама Борског Тимока и Пека, вишегодишња активност рудника довела до повећаних концентрација бакра (Cu), олова (Pb) и арсена (As) у седиментима [23], што је потврђено мониторингом и истраживањима Геолошког завода [35].

Акумулација у седименту је опасан трансфер загађења из воде у нанос на дну, који временом делује као „архива“ загађивача и потенцијални секундарни извор, ако услови окружења омогуће поновно ослобађање.

Импликације оваквих загађења утичу негативно на водни биланс. Растућа конкуренција између индустрије, пољопривреде и домаћинства у долинама великих река захтева квалитативну и квантитативну контролу и рециклажу процесних вода.

Резултат оваквих загађења у Србији су дугорочни ризици. Наслеђени стари рударски објекти захтевају санацију, јер представљају латентни извор хроничног загађења. Сходно томе је потребно прилагодити и законодавство. Имплементација ЕУ директива о управљању отпадом и водама остаје изазов, посебно у сегменту мониторинга и транспарентности података.

Research results in Serbia have shown that in the Borski Timok and Pek zones, long-term mining activity has led to increased concentrations of copper (Cu), lead (Pb) and arsenic (As) in sediments [23], which has been confirmed by monitoring and research carried out by the Geological Survey of Serbia [35].

Sediment storage is dangerous transfer of pollution from water to sediment, which over time acts as an “archive” of pollutants and a potential secondary source, if environmental conditions allow for re-release.

The implications of such pollution have a negative impact on the water balance. Growing competition between industry, agriculture and households in the valleys of large rivers requires qualitative and quantitative control and recycling of process waters.

Such pollution in Serbia carries long-term risks. Inherited old mining facilities require rehabilitation, as they represent a latent source of chronic pollution. Accordingly, legislation needs to be adjusted. Implementation of the EU directives on waste and water management remains a challenge, especially in the segment of monitoring and data transparency.

УВИДИ ИЗ СТУДИЈА СЛУЧАЈА

Анализа упоредних примера из Аустралије, Чилеа, Србије и земаља са најразвијенијим системима управљања рударством омогућава да се размотре стварни домети примењених политика и технолошких решења у контексту одрживости и заштите животне средине. Уместо изолованог приказа чињеница, овде су резултати интегрисани у наратив који указује на кључне законитости и поуке релевантне за српски рударски сектор.

У Аустралији се током последње две деценије развио концепт интегрисаног управљања ресурсима [24] који истовремено узима у обзир потребе привреде и очување екосистема. Усвајањем Закона о заштити животне средине и биодиверзитета (EPBC) створен је правни оквир који не допушта отварање великог рудника без свеобухватне процене утицаја и јавне расправе. Истраживања показују да је систем „прогресивне рекултивације“, при коме се већ ископане површине паралелно обнављају током рада копа, значајно смањило деградацију земљишта и омогућио враћање функционалних екосистема на преко 40% површина у року од пет година по завршетку експлоатације. Додатно, увођење сувог одлагања јаловине и затворених кругова воде смањило је ризик од изливања и губитка воде, што се посебно истиче у полусушним подручјима Западне Аустралије.

Чиле, као водећи светски произвођач бакра, суочава се са изразитим водним дефицитом у аридним зонама Атакаме [25]. Резултати примене постројења за десалинизацију показују да је више од половине потреба воде за велике руднике, попут Ескондида, обезбеђено из морских извора, чиме је избегнут притисак на подземне и површинске токове. Паралелно, систем онлајн мониторинга емисија прашине и сумпор-диоксида омогућава тренутно реаговање надлежних служби и транспарентност према јавности. Оваква пракса не само да редукује негативне утицаје већ и доприноси изградњи поверења локалних заједница, што се уочава кроз смањење броја конфликта и правних спорова након увођења ових мера.

INSIGHTS FROM CASE STUDIES

Analysis of comparative examples from Australia, Chile, Serbia and countries with the most developed mining management systems allows us to consider the real scope of the applied policies and technological solutions in the context of sustainability and environmental protection. Instead of an isolated presentation of facts, here the results are integrated into a narrative that points out key regularities and lessons relevant to the Serbian mining sector.

In Australia, the concept of integrated resource management [24] has developed over the past two decades, simultaneously taking into account the needs of the economy and the preservation of ecosystems. The adoption of the Environmental Protection and Biodiversity Act (EPBC) created a legal framework that does not allow the opening of a large mine without a comprehensive impact assessment and public debate. Research shows that the system of “progressive reclamation”, in which previously excavated areas are restored in parallel during mining operations, has significantly reduced soil degradation and enabled the restoration of functional ecosystems to over 40% of the areas within five years of the end of exploitation. In addition, the introduction of dry tailings disposal and closed water circuits has reduced the risk of spills and water loss, which is particularly emphasized in the semi-arid areas of Western Australia.

Chile, the world’s leading copper producer, is facing severe water shortages in the arid Atacama Desert [25]. Results of implementation of desalination plants show that more than half of the water needs of large mines, such as Escondido, are met from sea sources, thus avoiding pressure on groundwater and surface watercourses. In parallel, an online monitoring system for dust and sulphur dioxide emissions enables immediate response by the relevant authorities and public transparency. This practice not only reduces negative impacts but also contributes to building trust among local communities, as can be seen in the reduction in the number of conflicts and legal disputes following the introduction of these measures.

Србија се налази у транзиционом положају, где историјски наслеђени проблеми – посебно у Бору и Мајданпеку – и даље оптерећују квалитет воде и седимената тешким металима [26]. Нови Закон о рударству и геолошким истраживањима (2021) поставио је темељ за усаглашавање са европским еколошким стандардима, али спровођење остаје изазов због ограничених инспекцијских капацитета и недовољне дигитализације података. У појединим пројектима, попут истраживања литијума у долини Јадра [27], захтеви јавности за транспарентност и заштиту животне средине довели су до суспензије активности и отворили расправу о социјалној лиценци за рад. Ипак, пилот-пројекти рециклаже старих јаловина и претварања отпадних материјала у секундарне сировине показују да постоји потенцијал за увођење циркуларне економије у рударство Србије.

Увид у праксу Норвешке [36] и Канаде даје драгоцене смернице за даље унапређење. Норвешка је развила специфичан модел одлагања у фјордовима уз строг мониторинг концентрација тешких метала, чиме је ризик за биоту сведен на минималан ниво и омогућено континуирано праћење кумулативних ефеката. Канада, с друге стране, инсистира на изради детаљног плана затварања рудника пре почетка рада, уз активно укључивање домородачких заједница у процес одлучивања и дељење економских користи [28]. Такав приступ не само да смањује потенцијалне сукобе него гради дугорочни друштвени консензус о прихватљивости рударских активности.

Упоредни резултати указују да су ефикасност мера и степен прихватања рударских пројеката у великој мери условљени транспарентношћу, правовременим укључивањем јавности и техничким решењима која смањују водни и енергетски отисак. Док земље попут Аустралије и Чилеа демонстрирају да се и у интензивном рударству могу постићи високи еколошки стандарди, искуства Норвешке и Канаде наглашавају важност предвидивих регулаторних механизма и социјалне лиценце. За Србију, која настоји да повећа учешће рударства у БДП-у, поука је да без унапређења мониторинга, транспарентности и укључивања локалних заједница

Serbia is in a transitional situation, where historically inherited problems – especially in Bor and Majdanpek – continue to burden water quality and sediments with heavy metals [26]. The new Mining and Geological Exploration Act (2021) has laid the groundwork for compliance with the European environmental standards, but enforcement remains a challenge due to limited inspection capacity and insufficient data digitization. In some projects, such as lithium exploration in the Jadar Valley [27], public demands for transparency and environmental protection have led to suspension of activities and opened a debate on a social work permit. However, pilot projects for the recycling of old tailings and the conversion of waste materials into secondary raw materials show that there is potential for introducing a circular economy into Serbia's mining industry.

Insights into the practices of Norway [36] and Canada provide valuable guidance for further improvement. Norway has developed a specific model for disposal in fjords with strict monitoring of heavy metal concentration, which minimizes the risk to biota and allows for continuous monitoring of cumulative effects. Canada, on the other hand, insists on the development of a detailed mine closure plan before the beginning of operations, with active involvement of indigenous communities in the decision-making process and sharing of economic benefits [28]. Such approach not only reduces potential conflicts but also builds long-term social consensus on the acceptability of mining activities.

Comparative results indicate that the effectiveness of measures and the degree of acceptance of mining projects are largely determined by transparency, timely public involvement and technical solutions that reduce water and energy footprints. While countries such as Australia and Chile demonstrate that high environmental standards can be achieved even in intensive mining, the experiences of Norway and Canada emphasize the importance of predictable regulatory mechanisms and social licences. For Serbia, which is striving to increase the share of mining in the GDP, the lesson learned is that without improved monitoring, transparency and involvement of the local communities,

нема дугорочне одрживости ни друштвене прихватљивости рударских подухвата.

there is no long-term sustainability or social acceptability of mining ventures.

ИСКОПАВАЊЕ И КВАЛИТЕТ УГЉА У СРБИЈИ

MINING AND QUALITY OF COAL IN SERBIA

Србија располаже значајним резервама лигнита, пре свега у Колубарском и Костолачком басену, са укупним процењеним количинама преко 4 милијарде тона [37]. Лигнит чини више од 65% примарне енергије у електроенергетском миксу земље. Међутим, квалитет овог угља је релативно низак – карактерише га висока влажност (до 50%), низак до средњи доњи топлотни потенцијал (7–9 MJ/kg) и повећан садржај пепела и сумпора. Та својства условљавају већу специфичну потрошњу по произведеном kWh и вишу емисију CO₂ у поређењу са угљем вишег квалитета који се користи у појединим развијеним земљама.

Serbia has significant reserves of lignite, primarily in the Kolubara and Kostolac basins, with total estimated quantities of over 4 billion tons [37]. Lignite accounts for more than 65% of primary energy in the country's electric power mix. However, the quality of this coal is relatively low - it is characterized by high humidity (up to 50%), low to medium lower heating potential (7–9 MJ/kg) and increased ash and sulphur content. These properties result in higher specific consumption per kWh produced and higher CO₂ emissions compared to higher quality coal used in some developed countries.

Термоелектране „Никола Тесла“ и „Костолац“ су главни потрошачи домаћег лигнита и извор око 70% националних емисија CO₂ из енергетског сектора [38]. Низак степен ефикасности старих блокова (25–33%) додатно повећава емисијски фактор. Прелазак на технологије са вишим степеном искоришћења, санација губитака и увођење система за десулфуризацију представљају кључне кораке за смањење угљеничног отиска. У контексту европске енергетске транзиције, Србија ће морати да преиспита дугорочну улогу лигнита и убрза улагања у обновљиве изворе енергије и мере енергетске ефикасности.

The Nikola Tesla and Kostolac thermal power plants are the main consumers of domestic lignite and the source of about 70% of national CO₂ emissions from the energy sector [38]. The low efficiency of old units (25–33%) further increases the emission factor. Switching to technologies with higher efficiency, remediation of losses and introduction of desulphurization systems are key steps for reducing the carbon footprint. In the context of the European energy transition, Serbia will have to reconsider the long-term role of lignite and accelerate investments in renewable energy sources and energy efficiency measures.

Резултати статистичких анализа међународног мониторинга квалитета неких угљева [29] у Србији и неким земљама ЕУ [32] са последичним емисијама [33] су приказани у Табели 4.

The results of statistical analyses of international monitoring of the quality of some coals [29] in Serbia and some EU [32] countries with the resulting emissions [33] are presented in Table 4.

Емисија CO₂ по kWh варира у зависности од квалитета угља (од садржаја воде, сумпора, пепела), ефикасности постројења, начина рада (пун капацитет, половичан рад), као и од мера као што су разни системи за смањење емисија.

CO₂ emissions per kWh vary depending on coal quality (moisture content, sulphur, ash), plant efficiency, operating mode (full capacity, half-load operation), as well as measures such as various emission reduction systems.

Табела 4, Поређење топлотног потенцијала и емисија CO₂ из угља (просек)
Table 4, Comparison of thermal potential and CO₂ emissions from coal (average)

Земља / Регион Country / Region	Тип угља Coal type	Доњи топлотни потенцијал (MJ/kg) Lower heating potential (MJ/kg)	Емисије CO ₂ (g/kWh) CO ₂ emissions (g/kWh)	Напомена Note
Србија (Колубара) Serbia (Kolubara)	Лигнит Lignite	7–9	1.050–1.150	ТЕ „Никола Тесла“, ниска ефикасност ТРП “Nikola Tesla”, low efficiency
Немачка (Лузатија) Germany (Lusatia)	Лигнит Lignite	9–11	950–1.000	Савремени блокови >38% Modern units >38%
Пољска Poland	Камени угаљ Hard coal	18–22	850–900	Средња ефикасност Medium efficiency
Аустралија Australia	Камени угаљ Hard coal	22–25	820–860	Висок квалитет угља High quality coal
САД (ПРБ - Вајоминг) USA (PRB - Wyoming)	Суббитуминозни Subbituminous	16–19	880–930	Модерне електране Modern power plants

ДИСКУСИЈА

Рударска индустрија је један од стубова економског развоја, јер обезбеђује неопходне сировине за енергетику, индустрију грађевинских материјала, високотехнолошке секторе и пољопривреду. Међутим, историјски развој рударства био је праћен бројним негативним последицама – деградацијом земљишта, загађењем воде и ваздуха, уништавањем биодиверзитета и озбиљним утицајима на здравље локалних заједница. Зато се у савременим условима глобализације и климатских промена, поставља императив за новим приступом управљању рударским активностима.

Недостатак ресурса, нарочито ретких метала и минерала који су кључни за дигиталну и енергетску транзицију (литијум, кобалт, никл, ретке земље), условљава промену стратегије и захтева развој одрживих модела управљања. Питање одрживости није више само опција већ нужност која обухвата све фазе рударског циклуса – од истраживања и експлоатације до рекултивације и затварања рудника.

У том контексту, стратешко управљање рударством треба посматрати као синтезу ду-

DISCUSSION

The mining industry is one of the pillars of economic development, as it provides the necessary raw materials for the energy sector, the construction materials industry, high-tech sectors and agriculture. However, the historical development of mining was accompanied by numerous negative consequences – land degradation, water and air pollution, destruction of biodiversity and serious impacts on the health of local communities. Therefore, in the modern conditions of globalization and climate change, an imperative is set for a new approach to the management of mining activities.

The lack of resources, especially rare metals and minerals that are key to the digital and energy transition (lithium, cobalt, nickel, rare earths), necessitates a change in strategy and requires the development of sustainable management models. The issue of sustainability is no longer just an option but a necessity that encompasses all phases of the mining cycle – from exploration and exploitation to reclamation and mine closure.

In this context, strategic mining management should be seen as a synthesis of long-term

горочног планирања, управљања ризицима, имплементације чистијих технологија и поштовања принципа друштвене одговорности. Управо оваква интегрална перспектива омогућава да рударство не буде само индустрија експлоатације, већ и сектор који може да допринесе остваривању глобалних циљева одрживог развоја.

Анализом тренутног стања рударства у свету уочава се неколико кључних трендова:

- Глобални пораст потражње за критичним минералима: Према проценама Међународне агенције за енергију [29], до 2040. године потражња нпр. за литијумом биће увећана за четири до пет пута. Слични трендови уочавају се и за кобалт и никл, што ствара притисак на постојеће ресурсе.
- Недостатак еколошки одрживих пракси: У многим земљама у развоју, рударство се још увек заснива на застарелим технологијама које доводе до прекомерне потрошње воде, енергије и загађења.
- Потреба за циркуларном економијом: Ресурси из секундарних извора (рециклажа електронског отпада, обрада индустријских остатака) постају све важнији, јер могу делимично заменити примарну експлоатацију.
- Еколошка рекултивација: Модерне стратегије рударења морају укључити планове за рекултивацију простора након затварања рудника/отворених копова, што подразумева пошумљавање, обнову земљишта и развој нових намена (екотуризам, пољопривреда).
- Друштвена одговорност: Успешни примери (нпр. Канада) показују да укључивање локалних заједница у процес одлучивања смањује конфликте и повећава прихватљивост рударских пројеката.

Стратешки исправан приступ оптималном управљању минералним ресурсима мора да садржи, али и да не буде ограничен на:

- Еколошку анализу – процена утицаја рударства на земљиште, воду, ваздух и

planning, risk management, implementation of cleaner technologies and respect for the principles of social responsibility. It is precisely this integral perspective that allows mining to be not only an extractive industry, but also a sector that can contribute to the achievement of global sustainable development goals.

An analysis of the current state of mining in the world reveals several key trends:

- Global growth in demand for critical minerals: According to estimates by the International Energy Agency [29], by 2040, demand for, for example, lithium will increase by four to five times. Similar trends are observed for cobalt and nickel, which creates pressure on existing resources.
- Lack of environmentally sustainable practices: In many developing countries, mining is still based on outdated technologies that lead to excessive consumption of water, energy and pollution
- Need for a circular economy: Resources from secondary sources (e-waste recycling, industrial residue processing) are becoming increasingly important, as they can partially replace primary exploitation.
- Environmental reclamation: Modern mining strategies must include plans for the reclamation of areas after the closure of mines/open pits, which includes afforestation, land restoration and the development of new uses (ecotourism, agriculture).
- Social responsibility: Successful examples (e.g. Canada) show that involving local communities in the decision-making process reduces conflicts and increases the acceptability of mining projects.

A strategically sound approach to optimal mineral resource management must include, but not be limited to:

- Environmental analysis – an assessment of the impact of mining on land, water, air

биодиверзитет, укључујући емисије гасова са ефектом стаклене баште.

- Економску анализу – анализа трошкова и користи, укључујући дугорочне ефекте на локалну и националну економију.
- Социјалне аспекте – процена утицаја рударства на локалне заједнице, запошљавање, здравље становништва и миграције.
- Управљање ризицима – израда сценарија за могуће еколошке и економске кризе у сектору.

Идентификација еколошких индикатора је значајна у процени угљеничног отиска, водног биланса и губитка земљишта, као и упоредна анализа нормативних оквира (ЕУ директиве, ISO 14001 стандарди) и представљају кључне кораке при стратешком управљању рударским ресурсима.

Унапређење Стратешких анализа могуће је применом SWOT (анализа снага, слабости, прилика и претњи, Слика 2) и PESTEL (политичког, економског, друштвеног, технолошког, еколошког и правног, Слика 3) приступа за идентификацију прилика, ризика и неопходних мера у планирању рударских активности.

and biodiversity, including greenhouse gas emissions.

- Economic analysis – an analysis of costs and benefits, including long-term effects on the local and national economy.
- Social aspects – assessment of the impact of mining on local communities, employment, population health and migration.
- Risk management – development of scenarios for possible environmental and economic crises in the sector.

Identification of environmental indicators is important in the assessment of carbon footprint, water balance and soil loss, as well as comparative analysis of regulatory frameworks (EU directives, ISO 14001 standards) and represent key steps in the strategic management of mining resources.

Improvement of Strategic Analysis is possible by applying SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats Analysis, Figure 2) and PESTEL (Political, Economic, Social, Technological, Environmental and Legal, Figure 3) approaches to identify opportunities, risks and necessary measures in planning mining activities.



Слика 2, SWOT анализа за унапређење стратешког управљања рударством
Figure 2, SWOT analysis for improving strategic mining management



Слика 3, Обухваї ПESTEL анализе у функцији сїраїшеикої уїрављања рударсївом
Figure 3, Scope of PESTEL analysis in the function of strategic mining management

Системска интеграција економских, еколошких и социјалних фактора представља предуслов одрживог рударства. Примена концепта „Нето позитивног утицаја“ (Net Positive Impact) подразумева да рударски пројекат, поред ублажавања негативних ефеката, активно доприноси и обнови екосистема. Истовремено, дугорочно планирање резерви и истраживање алтернативних извора сировина (рециклажом електронског отпада) могу значајно ублажити дефицит минерала.

Спроведене анализе показују да је неопходно премештање фокуса са краткорочних економских добитака на дугорочне бенефите одрживог управљања. Савремени концепт рударења подразумева и примену дигиталних технологија (вештачка интелигенција, „паметни рудници“) ради смањења потрошње ресурса и повећања безбедности.

Препоруке су да се даља истраживања могу развијати у следећим стратешким правцима:

- Технолошке иновације – увођење аутоматизованих система, прерада руде уз нижу потрошњу енергије и рециклирање секундарних сировина.
- Циркуларна економија – искоришћавање рударског отпада за производњу

The systemic integration of economic, environmental and social factors is a prerequisite for sustainable mining. The application of the concept of “Net Positive Impact” implies that a mining project, in addition to mitigating negative effects, actively contributes to and restores the ecosystem. At the same time, long-term reserve planning and research into alternative sources of raw materials (recycling electronic waste) can significantly alleviate the mineral deficit.

The conducted analyses show that it is necessary to shift the focus from short-term economic gains to long-term benefits of sustainable management. The modern concept of mining also implies the application of digital technologies (artificial intelligence, “smart mines”) to reduce resource consumption and increase safety.

Recommendations are that further research can be developed in the following strategic directions:

- Technological innovations – introduction of automated systems, ore processing with lower energy consumption and recycling of secondary raw materials.
- Circular economy – utilization of mining waste for the production of construction

грађевинских материјала, извлачење метала из секундарних токова.

- Регулаторни инструменти – усклађивање са међународним стандардима, транспарентно извештавање о еколошким, социјалним и управљачким (ESG) индикаторима и укључивање локалних заједница у одлучивање.

Социјални аспект рударства као привредне гране је врло значајан. Рударство је често извор запошљавања и инфраструктурног развоја, али и социјалних конфликта. Досадашња искуства показују да рано укључивање заједнице, праведна расподела добити и поштовање људских права и критеријума заштите животне средине значајно смањују ризик од отпора и правних спорова.

ЗАКЉУЧАК

Стратешко управљање рударењем у условима недостатка ресурса и све већих еколошких изазова захтева промену парадигме – од краткорочне експлоатације ка дугорочном управљању природним ресурсима. Рударство више не може бити посматрано само као извор сировина, већ као комплексни систем који ће интегрисати економске, еколошке и друштвене циљеве.

Резултати показују да будућност рударства лежи у примени концепата циркуларне економије, развоју чистих технологија и увођењу система за еколошку реституцију. Истовремено, укључивање локалних заједница и транспарентност у процесу управљања представљају услов без кога није могуће обезбедити друштвену прихватљивост рударских пројеката.

Увођење стратешког планирања, које интегрише и еколошке и социјалне индикаторе у процес доношења одлука, омогућава смањење ризика, повећање друштвене прихватљивости и очување биосфере за будуће генерације. Само холистички приступ који надилази традиционалне економске оквире може гарантовати да рударство, као једна од најстаријих привредних делатно-

materials, extraction of metals from secondary streams.

- Regulatory instruments – harmonization with international standards, transparent reporting on environmental, social and governance (ESG) indicators and inclusion of local communities in decision-making.

The social aspect of mining as an economic sector is very significant. Mining is often a source of employment and infrastructure development, but also of social conflicts. Experience to date shows that early community involvement, fair distribution of benefits and respect for human rights and environmental protection criteria significantly reduce the risk of resistance and legal disputes.

CONCLUSION

Strategic management of mining in the context of resource scarcity and growing environmental challenges requires a paradigm shift – from short-term exploitation to long-term management of natural resources. Mining can no longer be viewed solely as a source of raw materials, but as a complex system that will integrate economic, environmental and social goals.

The results show that the future of mining lies in the application of circular economy concepts, the development of clean technologies and the introduction of environmental restitution systems. At the same time, the involvement of local communities and transparency in the management process is a pre-condition without which it is not possible to ensure the social acceptability of mining projects.

The introduction of strategic planning, which integrates both environmental and social indicators into the decision-making process, allows for risk reduction, increased social acceptability and preservation of the biosphere for future generations. Only a holistic approach that goes beyond traditional economic frameworks can guarantee that mining, as one of the oldest economic activities, remains a driver of

сти, остане покретач развоја уз минималан еколошки траг.

Закључује се да је стратешко управљање рударством кључно не само за смањење негативних еколошких последица, већ и за убрзање енергетске транзиције и постизање глобалних циљева одрживог развоја. У том смислу, рударство може бити препознато као сектор који, уколико је правилно вођен, доприноси одрживој будућности, а не као претња њој.

ЗАХВАЛНОСТ

Резултати представљени у овом истраживању су подржани од стране Министарства за науку, технолошки развој и иновације Републике Србије, број уговора: 451-03-136/2025-03/200213.

ЛИТЕРАТУРА / LITERATURE

- [1] Đurić N., Stevović I., Đurić D.: The importance of knowledge of the geological environment when designing spatial – planning documents, *Contemporary Materials* 2023, Banja Luka, 7–8. September 2023., 191-207.
- [2] Stevovic S., Miloradovic M., Stevovic I.: Management of environmental quality and Kostolac mine areas natural resources usage, *Management of Environmental Quality: An International Journal* 25.3, 2014., 285-300.
- [3] Stevovic I., Mirjanic D., Petrovic N.: Integration of solar energy by nature-inspired optimization in the context of circular economy, *Energy* 235, 2021., 121297.
- [4] Walter M., Deniau Y., Herrera Vargas V.: The politics of 'Green' extraction frontiers: mapping metals and mineral mining conflicts related to the energy transition in the Americas, *Critical Sociology* 51.4-5, 2025., 907-934.
- [5] Stevović I., Mirjanić D., Stevović S.: Possibilities for wider investment in solar energy implementation, *Energy* 180, 2019., 495-510.
- [6] Van de Loo K.: IEA Recommendations for Just Transitions in the Coal Sector, *Mining Report* 160.6, 2024.
- [7] Lederer G., et al. USGS critical minerals review, *Min. En* 76.5, 2024., 29-42.

development with a minimal environmental footprint.

It is concluded that strategic management of mining is crucial not only for reducing negative environmental impacts, but also for accelerating the energy transition and achieving global sustainable development goals. In this sense, mining can be recognized as a sector that, if properly managed, contributes to a sustainable future, rather than being a threat to it.

ACKNOWLEDGEMENTS

The results presented in this research were supported by the Ministry of Science, Technological Development and Innovation of the Republic of Serbia, contract number: 451-03-136/2025-03/200213.

- [8] Wood D., Andre van As: Discovery and underground mining of large deposits, *Essential training to ensure copper supply*, *SEG Discovery* 139, 2024., 11-23.
- [9] Marinova S., et al. Water footprint of battery-grade lithium production in the Salar de Atacama, Chile, *Journal of Cleaner Production* 487, 2025., 144635.
- [10] Vujović N., et al. Towards Circularity in Serbian Mining, *Unlocking the Potential of Flotation Tailings and Fly Ash*, *Minerals* 15.3, 2025., 254.
- [11] Vivoda V., Loginova J.: Lithium at the crossroads: geopolitical, economic, and socio-environmental complexities of the Jadar project in Serbia: Lithium at the crossroads: geopolitical, economic, and socio-environmental complexities of the Jadar project in Serbia, *Mineral Economics*, 2025., 1-17.
- [12] Stanojević N.: Improving Serbia's copper exports, *Key challenges and solutions*, *Industry/Industrija* 52, 2024.
- [13] Stefanović N., Danilović Hristić N., Petrić J.: Spatial planning, environmental activism, and politics—case study of the Jadar project for lithium exploitation in Serbia, *Sustainability* 15.2, 2023., 1736.
- [14] João Pedro Machado de Lima, Miriam Cristina Santos Amaral, Sonaly Cristina Rezende

- Borges de Lima: Sustainable water management in the mining industry, Paving the way for the future, *Journal of Water Process Engineering* 71, 2025., 107239.
- [15] Ndlovu Sehliselo, Sefiu O. Adewuyi: Towards sustainable metal extraction, Navigating energy and water challenges in the South African mining industry, *The Extractive Industries and Society* 24, 2025., 101760.
- [16] Lagos G. et al. Potential copper production through 2035 in Chile, *Mineral Economics* 33.1-2, 2020., 43-56.
- [17] Bana Irwan Syah, Wenjing Wan, Leiting Shen: Optimization of High-pressure Acid Leaching for Nickel and Cobalt Recovery from Ultra-low-Grade Laterite Ores, *JOM* 2025., 1-1.
- [18] Vegh Gary, et al. Life cycle assessment of nickel, manganese, cobalt critical minerals: lithium hydroxide monohydrate (mine-to-material) in Québec, Canada.” *Journal of Power Sources* 657, 2025., 238149.
- [19] Islam Kamrul et al. Geological resource production constrained by regional water availability, *Science* 387.6739, 2025., 1214-1218.
- [20] Manić E., Lutovac M.: Natural resources and manufacturing sector, *The Geography of Serbia: Nature, People, Economy*. Cham: Springer International Publishing, 2021., 207-220.
- [21] Nevrlý, Matěj: Chinese influence on the energy sector of Serbia and Bosnia and Herzegovina. Diss. Masaryk University, Faculty of Social Studies, 2025.
- [22] Mihalj I. et al. Particulate air pollution in Central Serbia and some proposed measures for the restoration of degraded and disturbed mining areas, *Geographica Pannonica* 28.3 2024., 205-220.
- [23] Osenyeng Olaotse, et al. Environmental risk assessment of the contamination of river water and sediments from the Bor mining area, East Serbia—Secondary Cu enrichment at the reservoir site, *Resource Geology* 73.1, 2023., e12314.
- [24] Thom Bruce, Celine Steinfeld: Natural resource management and regional planning: a geographical perspective, *Australasian Journal of Environmental Management*, 2025., 1-18.
- [25] Odell Scott D.: Desalination in Chile’s mining regions: Global drivers and local impacts of a technological fix to hydrosocial conflict, *Journal of Cleaner Production* 323, 2021., 129104.
- [26] Vukosavić S. N.: Minerals for the green agenda, implications, stalemates, and alternatives, *Open Geosciences* 17.1, 2025., 20250813.
- [27] Allen Calvin, and Béla Galgóczi: The Jadar lithium mining project in Serbia: imperatives mean complex decision-making, *SEER Journal for Labour and Social Affairs in Eastern Europe* 27.1, 2024., 77-98.
- [28] Vegh Gary et al. Life cycle assessment of nickel, manganese, cobalt critical minerals: lithium hydroxide monohydrate (mine-to-material) in Québec, Canada, *Journal of Power Sources* 657, 2025., 238149.
- [29] <https://www.iea.org/>
- [30] <https://www.usgs.gov/>
- [31] <https://www.icmm.com/>
- [32] <https://www.ipcc.ch/>
- [33] <https://www.energyflux.net/>
- [34] <https://www.eps.rs/eng/Pages/default.aspx>
- [35] <https://www.gzs.gov.rs/>
- [36] <https://zerowasteurope.eu/>
- [37] <https://www.eps.rs/eng/poslovanje-ugalj/Pages/Proizvodnja-uglja.aspx>
- [38] <https://www.eps.rs/eng/Pages/Istorija.aspx>