

# Процена ризика од загађивања водних ресурса под утицајем напуштених рударских радова на простору Србије; Risk assessment of water pollution caused by abandoned mining operations in Serbia

Nebojša B. Atanacković



Дигитални репозиторијум Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду

[ДР РГФ]

Процена ризика од загађивања водних ресурса под утицајем напуштених рударских радова на простору Србије; Risk assessment of water pollution caused by abandoned mining operations in Serbia | Nebojša B. Atanacković | Универзитет у Београду | 2018-08-31 | |

<http://dr.rgf.bg.ac.rs/s/repo/item/0004078>

Дигитални репозиторијум Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду омогућава приступ издањима Факултета и радовима запослених доступним у слободном приступу. - Претрага репозиторијума доступна је на [www.dr.rgf.bg.ac.rs](http://www.dr.rgf.bg.ac.rs)

The Digital repository of The University of Belgrade Faculty of Mining and Geology archives faculty publications available in open access, as well as the employees' publications. - The Repository is available at: [www.dr.rgf.bg.ac.rs](http://www.dr.rgf.bg.ac.rs)

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ  
РУДАРСКО-ГЕОЛОШКИ ФАКУЛТЕТ

Небојша Б. Атанацковић

**ПРОЦЕНА РИЗИКА ОД ЗАГАЂИВАЊА  
ВОДНИХ РЕСУРСА ПОД УТИЦАЈЕМ  
НАПУШТЕНИХ РУДАРСКИХ РАДОВА  
НА ПРОСТОРУ СРБИЈЕ**

докторска дисертација

Београд, 2018

UNIVERSITY OF BELGRADE  
FACULTY OF MINING AND GEOLOGY

Nebojša B. Atanacković

**RISK ASSESSMENT OF WATER  
POLLUTION CAUSED BY ABANDONED  
MINING OPERATIONS IN SERBIA**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2018

**Ментор:**

др Веселин Драгишић, редовни професор, ужа научна област: хидрогеологија  
Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет

**Чланови комисије:**

др Никола Лилић, редовни професор, ужа научна област: заштита на раду и  
заштита животне средине  
Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет

др Миле Димитријевић, ванредни професор, ужа научна област: хемија, хемијска  
технологија и хемијско инжењерство  
Универзитет у Београду, Технички факултет у Бору

др Јана Штрбачки, доцент, ужа научна област: хидрогеологија  
Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет

др Владимир Живановић, доцент, ужа научна област: хидрогеологија  
Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет

**Датум одбране:** \_\_\_\_\_

## ЗАХВАЛНИЦА

Истраживања изведена у оквиру докторске дисертације спроведена су кроз Пројекат Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије (Пројекат III 43004). Велики део теренских и лабораторијских истраживања изведен је у оквиру пројекта Министарства животне средине, рударства и просторног планирања (Пројекат истраживања утицаја отпадних рудничких вода на животну средину), у периоду 2009-2011. године.

Захваљујем се члановима комисије и колегама са Департмана за хидрогеологију на стручној помоћи и саветима приликом израде дисертације. Посебну захвалност дугујем ментору, проф. др. Веселину Драгишићу на стручној помоћи и усмерењу, од формирања теме до саме израде дисертације. Захваљујем се проф. др. Петру Папићу што ми је омогућио учешће на научно-истраживачком пројекту Министарства просвете, науке и технолошког развоја.

Захваљујем се колегама из Института за водопривреду „Јарослав Черни“ и ЈКП „Кучево“ на уступљеним подацима о хемијском саставу подземних вода, које су ми послужили за верификацију резултата.

Посебну захвалност дугујем својој породици на стрпљењу, разумевању и подршци током израде дисертације.

**ПРОЦЕНА РИЗИКА ОД ЗАГАЂИВАЊА ВОДНИХ РЕСУРСА  
ПОД УТИЦАЈЕМ НАПУШТЕНИХ РУДАРСКИХ РАДОВА  
НА ПРОСТОРУ СРБИЈЕ**

**САЖЕТАК**

Велики број напуштених рударских радова и ограничена средства за рекултивацију и ремедијацију деградираних простора подстакле су развој метода за издвајање приоритетних локација на које је потребно усмерити даља истраживања. У датом контексту, у склопу израде дисертације спроведене су научно-истраживачке активности које су за предмет имале анализу утицаја значајнијих напуштених рударских радова на водне ресурсе на простору Србије јужно од Саве и Дунава.

Разматрање предметне проблематике извршено је кроз развој и примену семи-квантитативне методологије за анализу ризика од загађивања површинских и подземних вода на регионалној размери. Примењена методологија делом представља адаптацију концепта мапирања ризика од загађивања подземних вода, и као таква такође се базира на извор-транспорт-рецептор концепту.

Међу одабраним критеријумима, као они са највећим утицајем на степен ризика од загађивања водних ресурса издвојени су присуства флотацијског јаловишта и физичко-хемијске карактеристике рудничких вода. Спроведена истраживања омогућила су категоризацију и рангирање напуштених рударских радова на бази ризика. На основу ових резултата идентификована су потенцијално угрожена водна тела површинских и подземних вода и припадајући сливови.

Верификацијом добијених резултата кроз упоређивање доступних података о квалитету и статусу водних тела, потврђена је могућност примене предложене методологије, чиме је дат допринос концепту просторне анализе ризика. Предложен приступ за издвајање и рангирање потенцијално угрожених локација, са техничког аспекта представља једну од основа за даље управљање, мониторинг и заштиту водних ресурса површинских и подземних вода.

**Кључне речи:** анализа ризика, водни ресурси, водна тела, рудничке воде, рударски отпад, аналитички хијерархијски процеси, кластер анализа, математичка теорија атрибута, функције припадности, семи-квантитативне методе

**Научна област:** Геолошко инжењерство

**Ужа научна област:** Хидрогеологија

**УДК:** 556.388:622(043.3)

628.112/.113:622(043.3)

## **RISK ASSESSMENT OF WATER POLLUTION CAUSED BY ABANDONED MINING OPERATIONS IN SERBIA**

### **ABSTRACT**

Numerous abandoned mining operations and limited funding for the recultivation and remediation of degraded soils have motivated the development of a method for prioritizing locations on which further investigations should focus. In this context and as part of the work on the thesis, research activities were undertaken to assess the impact of major abandoned mining operations on water resources in Serbia, south of the Sava and Danube rivers.

The subject matter outlined above was examined through the development and application of a semi-quantitative methodology for assessing the risk of pollution of surface water and groundwater resources on a regional scale. The methodology is in part an adaptation of the groundwater pollution risk mapping concept and, as such, is based on the source-transport-receptor model.

Among the selected criteria, those deemed to have the greatest effect on the level of risk of water pollution are flotation tailings and physicochemical characteristics of mine water. The research undertaken in connection with the thesis enabled risk-based classification and ranking of abandoned mining operations. The results were used to identify potentially threatened surface water and groundwater bodies and associated drainage areas.

The outcome was verified by comparing the results with available water body status and quality data, whereby the applicability of the proposed methodology was corroborated, thus contributing to the spatial risk analysis concept. The proposed approach for the identification and ranking of potential hazard sites is part of the technical groundwork for subsequent management, monitoring and protection of surface water and groundwater resources.



**Key words:** risk assessment, water resources, water bodies, mine water, mining waste, analytical hierarchical processes, cluster analysis, theory of attributes, membership functions, semi-quantitative methods.

**Scientific discipline:** Geological Engineering

**Concentration:** Hydrogeology

**UDC:** 556.388:622(043.3)

628.112/.113:622(043.3)

## САДРЖАЈ

### I УВОДНА РАЗМАТРАЊА И ТЕОРИЈСКЕ ПОСТАВКЕ

<b>1. УВОД.....</b>	<b>2</b>
<b>2. ПРОБЛЕМАТИКА НАПУШТЕНИХ РУДАРСКИХ РАДОВА И ЖИВОТНЕ СРЕДИНЕ .....</b>	<b>7</b>
<b>2.1. Напуштени рударски радови - појам и карактеристике .....</b>	<b>9</b>
2.1.1. Опис појма „напуштени рударски радови“ .....	9
2.1.2. Карактеристике напуштених рударских радова.....	10
2.1.3. Напуштени рударски радови у свету и на простору Србије .....	13
<b>2.2. Рудничке воде из напуштених рударских радова .....</b>	<b>16</b>
2.2.1. Хидрогеохемија рудничких вода .....	19
2.2.1.1. Оксидација сулфидних минерала .....	20
2.2.1.2. Кинетика оксидације сулфида .....	23
2.2.1.3. Микроорганизми у рудничким водама .....	27
2.2.1.4. Процес неутрализације киселости .....	29
2.2.1.5. Одлагање минерала из рудничких вода.....	32
<b>2.3. Површинске и подземне воде у подручју напуштених рударских радова.....</b>	<b>35</b>
2.3.1. Утицај површинских копова .....	38
2.3.2. Утицај јамских радова.....	42
2.3.3. Површинске и подземне воде у подручју рудних јаловишта .....	44
2.3.4. Површинске и подземне воде у подручју флотацијских јаловишта .....	47
<b>3. ПРЕГЛЕД ВОДНИХ РЕСУРСА РЕПУБЛИКЕ СРБИЈЕ .....</b>	<b>53</b>
<b>3.1. Подземне воде.....</b>	<b>55</b>
<b>3.2. Површинске воде.....</b>	<b>58</b>
<b>4. АНАЛИЗА РИЗИКА.....</b>	<b>65</b>
<b>4.1. Појам и дефиниција ризика.....</b>	<b>65</b>
<b>4.2. Процес анализе ризика .....</b>	<b>69</b>

4.2.1. Формулисање проблема.....	70
4.2.1.1. Формирање питања .....	71
4.2.1.2. Развој концептуалног модела.....	71
4.2.1.3. Планирање анализе ризика .....	72
4.2.1.4. Прелиминарна процена ризика и издвајање приоритета.....	73
4.2.2. Процена ризика.....	74
4.2.2.1. Идентификација хазарда .....	75
4.2.2.2. Процена потенцијалних последица .....	76
4.2.2.3. Процена вероватноће.....	77
4.2.2.4. Карактеризација ризика и неодређености .....	78
4.2.3. Процена опција за управљање ризиком .....	80
4.2.4. Ублажавање и искоришћавање ризика.....	82
<b>4.3. Приступуи у анализи ризика.....</b>	<b>82</b>
<b>4.4. Методе за процену ризика.....</b>	<b>85</b>
4.4.1. Матрице за процену ризика.....	85
4.4.2. Стабла одлучивања.....	87
4.4.3. Параметарске методе.....	90
4.4.4. Примена математичких модела у процени ризика.....	95
<b>4.5. Постојећи приступуи у анализи ризика од загађивања под     утицајем напуштених рударских радова.....</b>	<b>97</b>

## II КОНЦЕПЦИЈА И МЕТОДОЛОГИЈА ИСТРАЖИВАЊА

<b>5. КОНЦЕПЦИЈА И МЕТОДОЛОГИЈА ИСТРАЖИВАЊА.....</b>	<b>101</b>
<b>5.1. Теренска истраживања .....</b>	<b>102</b>
5.1.1. Узорковање рудничких и површинских вода.....	103
<b>5.2. Лабораторијска испитивања хемијског састава воде .....</b>	<b>105</b>
<b>5.3. Статистичка обрада података.....</b>	<b>106</b>
5.3.1. Систематизација и верификација хидрохемијских података....	106
5.3.2. Мултиваријантне статистичке методе.....	110
5.3.2.1. Кластер анализа .....	111
5.3.2.2. Факторна анализа .....	111

5.4. Анализа рањивости подземних вода.....	113
--	-----

### III РАЗВОЈ МЕТОДОЛОГИЈЕ ЗА ПРОЦЕНУ РИЗИКА

<b>6. РАЗВОЈ МЕТОДОЛОГИЈЕ ЗА КАРАКТЕРИЗАЦИЈУ РУДАРСКИХ РАДОВА НА БАЗИ РИЗИКА ОД ЗАГАЂИВАЊА ВОДНИХ РЕСУРСА .....</b>	<b>116</b>
<b>6.1. Основне претпоставке за развој методе .....</b>	<b>117</b>
<b>6.2. Поступак примене методе .....</b>	<b>119</b>
6.2.1. Идентификација и карактеризација хазарда .....	120
6.2.1.1. Прорачун тежинских коефицијената АНР методом .....	122
6.2.1.2. Прорачун хазард индекса .....	125
6.2.2. Процена угрожености и рањивости површинских и подземних вода .....	125
<b>6.3. Процена ризика.....</b>	<b>128</b>
<b>6.4. Карактеризација укупног ризика .....</b>	<b>130</b>
6.4.1. Методологија за одређивање укупног ризика .....	131
6.4.1.1. Анализа мере припадности појединачних фактора .....	131
6.4.1.2. Анализа мере припадности синтезног вишеструког индекса .....	134
6.4.1.3. Анализа припадности одређеној класи ризика .....	134

### IV РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА И ДИСКУСИЈА

<b>7. РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА .....</b>	<b>137</b>
<b>7.1. Преглед напуштених рударских радова обухваћених     истраживањима .....</b>	<b>137</b>
<b>7.2. Физичке карактеристике напуштених рударских радова .....</b>	<b>143</b>
7.2.1. Површина јаловишта.....	143
7.2.2. Присуство флотацијског јаловишта и сепарације угља.....	145
7.2.3. Геолошка средина.....	146
<b>7.3. Физичко-хемијске карактеристике рудничких вода .....</b>	<b>148</b>
7.3.1. Хемијски састав испитиваних рудничких вода .....	150

7.3.2. Хемијски састав рудничких вода у односу на врсту минералне сировине .....	153
7.3.3. Процеси формирања хемијског састава испитиваних рудничких вода .....	157
7.3.3.1. Резултати факторне анализе (FA) .....	157
7.3.3.2. Интерпретација резултата FA анализе и издвајање основних процеса формирања хемијског састава рудничких вода .....	159
7.3.4. Резултати хијерархијске кластер анализе (HCA).....	163
7.3.4.1. Груписање рудничких вода према физичко-хемијским карактеристикама.....	163
7.3.4.2. Хидрохемијске карактеристике рудничких вода у односу на припадајући HCA кластер .....	164
<b>7.4. Карактеризација напуштених рударских радова као потенцијалних извора загађујућих супстанци.....</b>	<b>167</b>
7.4.1. Одређивање тежинских коефицијената.....	167
7.4.2. Резултати прорачуна индекса хазарда.....	170
<b>7.5. Карактеризација напуштених рударских радова према степену ризика од загађивања водних ресурса.....</b>	<b>174</b>
7.5.1. Процена ризика од загађивања подземних вода.....	174
7.5.1.1. Резултати анализе рањивости подземних вода .....	175
7.5.1.2. Резултати прорачуна индекса ризика од загађивања подземних вода ( $Ri_{pod}$ ).....	182
7.5.2. Процена ризика од загађивања површинских вода.....	186
7.5.2.1. Резултати анализе угрожености површинских вода.....	186
7.5.2.2. Резултати прорачуна индекса ризика од загађивања површинских вода ( $Ri_{pov}$ ) .....	193
7.5.3. Карактеризација укупног ризика .....	196
7.5.3.1. Резултати процене укупног ризика .....	197
<b>7.6. Прелиминарна процена ризика од загађивања површинских и подземних вода на нивоу слива .....</b>	<b>206</b>

<b>8. ВЕРИФИКАЦИЈА ПРИМЕНЕ ПРЕДЛОЖЕНЕ МЕТОДОЛОГИЈЕ ЗА ПРОЦЕНУ РИЗИКА И ДИСКУСИЈА РЕЗУЛТАТА .....</b>	<b>210</b>
<b>8.1. Оцена квалитета површинских вода у зони напуштених рударских радова.....</b>	<b>210</b>
<b>8.2. Верификација резултата процене ризика.....</b>	<b>213</b>
8.2.1. Површинске воде.....	213
8.2.2. Подземне воде.....	216
8.2.3. Процена ризика на нивоу слива .....	219
<b>8.3. Критички осврт на примењену методологију и добијене резултате .....</b>	<b>224</b>
<b>9. ЗАКЉУЧАК.....</b>	<b>228</b>
<b>ЛИТЕРАТУРА .....</b>	<b>233</b>

**I**  
**УВОДНА РАЗМАТРАЊА И**  
**ТЕОРИЈСКЕ ПОСТАВКЕ**

## 1. УВОД

Експлоатација минералних сировина, од својих почетака у доба неолита па до данас, представља базу технолошког развоја људског друштва. Поред позитивних, присутни су и негативни ефекти рударске активности, који укључују стварање значајних количина рудничког отпада. У односу на претходна раздобља, постојећи изазов у савременој рударској производњи укључује прелазак на експлоатацију дубљих делова лежишта, или примену техника масовног откопавања, којима се врши експлоатација угља и ниско процентних металичних руда. Том приликом долази до стварања великих количина рударског отпада и до деградације терена на великим размерама.

Поред заједничке особине да могу представљати значајне изворе загађујућих супстанци, за разлику од активних, код већине напуштених рударских радова није могуће идентификовати „носиоца проблема“ или титулара, с обзиром да су неке локације старе и по више стотина година. Оваквим историјским наслеђем посебно су оптерећене државе на простору Европе, као колевке индустријског развоја. С обзиром на дугу историју експлоатације минералних сировина, процењује се да на у Европи постоји преко сто хиљада напуштених рударских радова различитих обима и карактеристика; од појединачних поткопа па до великих индустријских постројења.

Смањење антропогеног утицаја на животну средину као и на водне ресурсе представља једну од водећих одредница и правац даљег развоја човечанства. У последњих неколико деценија, рударске компаније значајно раде на унапређењу мера за заштиту животне средине, како у периоду експлоатације, тако и након њеног завршетка. На нивоу Европске уније, правни оквир за деловање у овој области постављен је између осталог и издавањем оквирне директиве о водама (енгл. *Water Framework Directive, WFD*) и тзв. директиве о рударском отпаду (енгл. *Mining Waste Directive, MWD*), којима се ограничавају емисије штетних материја и дају смернице за контролу и спречавање загађивања. Ове смернице се на националним нивоима детаљније дефинишу и усвајају у форми закона и



правилника. Посматрано у контексту утицаја на животну средину, посебно се истиче утицај који напуштени рударски радови имају на површинске и подземне воде. Он се првенствено одвија кроз формирање и неконтролисано истицање киселих рудничких вода, или кроз такозване *AMD*<sup>1</sup> (енгл. *Acid Mine Drainage, AMD*) процесе (Younger et al. 2002, Lottermoser 2007, Wolkersdorfer 2008). Постојеће околности везане за напуштене рударске радове условљавају да средства за ремедијацију угрожених локација и спровођење мера за ублажавање негативних ефеката на животну средину, најчешће обезбеђују државе у сарадњи са међународним фондовима.

Неусаглашеност између великог броја напуштених рударских радова и расположивих средстава за ремедијацију и рекултивацију, условило је потребу за развојем методологија, на бази којих би се издвојили они на које је неопходно усмерити средства. Европском директивом о рударском отпаду прописана је обавеза израде катастра рударског отпада, са прелиминарном карактеризацијом напуштених одлагалишта према степену ризика. Поред овог приступа, у већини држава које су значајно оптерећене наслеђем везаним за напуштене руднике, развијени су засебни методски приступи за процену степена угрожености и издвајање приоритетних локација (Puura and D'Alessandro 2005, Jordan and Abdaal 2013).

С обзиром да на степен утицаја напуштених рударских радова на околину утичу изгледи, тачније вероватноћа да дође до нежељених последица, као и озбиљност последица, концепт анализе ризика (енгл. *risk assessment*) налази све већу примену у области процене утицаја ових објеката на различите чиниоце животне средине. У предметним истраживањима управо је концепт анализе ризика искоришћен као методски оквир за процену утицаја који напуштени рударски радови имају на ресурсе површинских и подземних вода на простору Србије.

---

<sup>1</sup>*AMD се односи на процес у ком долази до стварања киселих рудничких вода првенствено као последица оксидације сулфидних минерала (Lottermoser 2007).*

Предмет истраживања у оквиру докторске дисертације представља процена ризика од загађивања површинских и подземних вода под утицајем напуштених рударских радова. За те потребе развијена је методологија за њихову карактеризацију према степену ризика од загађивања водних ресурса. Истраживањима су обухваћене значајније појаве у оквиру лежишта металичних сировина, појединих неметаличних минералних сировина, урана и напуштени рудници угља, на простору Србије јужно од Саве и Дунава. У ужем смислу, у оквиру дисертације издвојене су и анализиране карактеристике и процеси везани за напуштене рударске радове, а који су од значаја за евалуацију степена хазарда, а касније и за процену ризика. Додатно, разматрана је и прелиминарна процена угрожености водних тела површинских и подземних вода, као и припадајућих сливова. Од главних фаза у процесу анализе ризика, у оквиру дисертације детаљно су разматране фазе формулисања проблема и процене ризика, док развој стратегија и конкретне мере за ублажавање ризика, потенцијално коришћење рудничких вода, као и анализа ефеката излагања различитих популација загађујућим супстанцама, нису детаљно разматрани.

Циљ истраживања је да се на основу издвојених природних фактора, као и обима и карактеристика самих напуштених рударских радова развије методологија којом би се извршила њихова карактеризација и класификација према степену ризика од загађивања површинских и подземних вода. Са техничког аспекта, развој и примена методологије на регионалном нивоу омогућили су издвајање појединачних локација, као и угрожених водних тела и сливова на којима је неопходно спровести детаљнија истраживања у циљу планирања мера за ремедијацију и ублажавање негативног утицаја. Додатно, предметна дисертације представља допринос напорима на смањењу негативног утицаја напуштених рударских радова на животну средину и водне ресурсе.

Спроведена истраживања представљају имплементацију концепта ризика од загађивања у ком су водни ресурси посматрани као рецептори загађујућих супстанци. Процена ризика изведена је на регионалној размери. Предложена методологија базирана је на извор-транспорт-рецептор концепту, у облику

примењеном за израду карте ризика од загађивања подземних вода. У предметним истраживањима извршена је модификација приступа за израду карте ризика, како би се истакле и уважиле особености напуштених рударских радова као потенцијалних извора загађујућих супстанци. Такође, поред подземних вода, предложене модификацију омогућују примену овог концепта и на површинске воде. Полазна хипотеза изведених истраживања налази се у тестирању могућности примене предложене методологије у анализи ризика од загађивања водних ресурса под утицајем напуштених рударских радова. Такође, кроз верификацију примењене методологије практично је тестирана хипотеза да су предложене модификације адекватне и да су издвојени фактори примењиви за регионалну процену степена ризика од загађивања.

Научно-истраживачке активности сумиране су у оквиру докторске дисертације која се састоји од четири целине:

- I У првој целини је након уводног дела разматрана проблематика напуштених рударских радова, дате су теоријске поставке анализе ризика и извршена је анализа интеракције напуштених рударских радова и површинских и подземних вода на бази концептуалних модела. Такође, приказан је преглед тренутног стања водних ресурса на подручју републике Србије.
- II Друга целина укључује преглед метода примењених у склопу спроведених истраживања у циљу прикупљања података и припреме подлога за анализу ризика.
- III Развој методологије за карактеризацију напуштених рударских радова према степену ризика од загађивања водних ресурса, и прелиминарне процене степена ризика за потенцијално угрожена водна тела и сливове издвојени су као трећа целина.

IV Четврта целина обухвата примену предложене методологије на простору Србије, анализу и интерпретација добијених резултата и верификација резултата.

У сврху испуњавања постављених циљева извршена је интеграција савремених мултиваријантних статистичких метода и математичке теорије атрибута. За потребе процене ризика предложена је параметарска, семи-квантитативна, методологија за карактеризацију напуштених рударских радова према степену ризика у регионалној размери.

## 2. ПРОБЛЕМАТИКА НАПУШТЕНИХ РУДАРСКИХ РАДОВА И ЖИВОТНЕ СРЕДИНЕ

Рударска активност од свог настанка била је покретач и носилац развоја друштва и држава и припадајућих рударских регија. Са друге стране, у процесу експлоатације, припреме и прераде руде долази до стварања велике количине чврстог, течног и гасовитог отпада. Поред позитивних социолошких и економских ефеката, експлоатација минералних сировина и пратеће активности, уз неадекватно управљање рударским отпадом, често доводе до значајних измена природних одлика простора који је, или је био предмет рударских активности. Ове измене најчешће укључују промене у намени и коришћењу земљишта као и његових физичко-механичких својстава и морфолошких карактеристика, измене у природном билансу вода и типу и распореду дренажне мреже, погоршање квалитета ваздуха, земљишта као и површинских и подземних вода, и измене станишта биљног и животињског света.

У контексту заштите животне средине рударство се најчешће спомиње са негативном конотацијом. Овоме су значајно допринели акциденти великих размера који су окарактерисани као једни од највећих еколошких катастрофа у свету, а везани су за експлоатације и прераде руде. Најозбиљнији акциденти су углавном последица колапса брана на флотацијским јаловиштима, а међу најтежим примерима су рудници: *Aberfan* - Велс, *Stava* - Италија, *Aznalcollar* - Шпанија, и у 2000. год. колапс флотација *Baia Mare* и *Baia Borsa* у Румунији које су за последицу имале изливање око 120 000 m<sup>3</sup> отпадних вода богатих цијанидом и тешким металима у оближње водотоке па даље у Тису (Jordan et al. 2004). Такође, на простору Северне Америке током 2014-е забележена су два већа примера изливања флотацијске јаловине, први везан за рудник *Mount Polley* у Канади, а други у САД везан за пуцање дренажне цеви (Кнежевић и др. 2014). На простору Србије у последњих неколико деценија XX века дошло је до значајних изливања флотацијске јаловине на простору Мајданпека (Dragišić et al. 1997). На простору западне Србије је током 2014. године услед обилних падавина дошло је до колапса бране и изливања флотацијске јаловине напуштеног рудника антимона „Столице“.

Ови акциденти су били покретач иницијатива за формирање експертских тимова који су радили на развоју процедура за превенцију сличних догађају у будућности. На простору Европе допринос оваквих иницијативе се пре свега огледа кроз увођење проблематике рударског отпада у легислативу Европске уније.

У последњих неколико деценија рударске компаније су под све већим притиском од стране међународних организација и локалних државних институција везаним за примену и испуњавање највиших еколошких норми у свим фазама развоја рудника, од припреме преко експлоатације до затварања рудника. Са друге стране, треба имати у виду и специфичности рударске индустрије, која се у највећој мери своди на експлоатацију необновљивих ресурса. Тако поједини аутори доводе у питање суштинску примењивост концепта одрживог развоја у рударству. Имајући ово у виду, одрживим рударством се могу сматрати активности на експлоатацији и преради минералних сировина које доносе бенефит за постојеће и будуће генерације без угрожавања основних еколошких процеса (Aswathanarayana 2003).

Престанком истраживања или експлоатације руде без успостављања одговарајућих мера за рекултивацију и ремедијацију деградираних простора, негативан утицај ових објеката на животну средину може трајати деценијама након њиховог затварања. Потенцијални нежељени ефекти настали под утицајем искључиво напуштених рударских радова пре свега су везани за погоршање квалитета површинских и подземних вода. Овај утицај се најчешће одвија кроз неконтролисано истицање и мешање киселих, минерализованих рудничких вода са површинским токовима и подземним водама. Процењује се да неконтролисано истицање киселих рудничких вода збирно представља један од највећих ефлуената отпадних вода у свету (Wolkersdorfer et al. 2004).

Са аспекта утицаја на животну средину, напуштени рударски радови у оквиру лежишта металичних минералних сировина и угљева, као и одређених врста индустријских минералних сировина често доводе до погоршања квалитета животне средине у целини или њених елемената. Са друге стране напуштени рударски радови у оквиру лежишта грађевинског материјала ретко доводе до

генерисања хазардних супстанци. Њихов утицај се углавном огледа кроз емисију прашине и физичку деградацију простора на ком су се одвијале рударске активности, који посредно може утицати на режим и биланс површинских и подземних вода. Из тог разлога, у оквиру докторске дисертације разматрани су напуштени рударски радови у оквиру лежишта металичних, неметаличних минералних сировина (изузев лежишта грађевинског материјала), урана и угља.

У односу на активне, проблематика напуштених рударских радова је додатно изазовна због чињенице да су неке локације старе више стотина па и хиљада година, па самим тим није могуће идентификовати „носиоца проблема“. У таквим условима већина постојећих механизма који уређују и контролишу предметне активности су неефикасни, па одговорност за решавање проблема преузимају државне институције, које углавном располажу ограниченим фондовима.

Неки од најизраженијих примера размере изазова у области управљања утицајима рударских активности на површинске и подземне воде на простору Европе везана су за затварање веома великих рудника угља, који су дуго били база развоја и примарни енергетски ресурс у многим европским земљама. Овај тренд је у највећим размерама заступљен у угљеним басенима западне Немачке (*Ruhr, Saar, Aachen*), Француске (*Nord-Pas de Calais, Lorraine*), Пољске (*the Silesian Coal Basins*), као и у одређеним деловима Шкотске, Енглеске и Велса (Younger and Wolkersdorfer 2004).

## **2.1. Напуштени рударски радови - појам и карактеристике**

### **2.1.1. Опис појма „напуштени рударски радови“**

У страној литератури на енглеском језику се за напуштене рударске радове најчешће употребљава појам „*abandoned mine*“. С обзиром да појам није универзално дефинисан, у литератури се такође јављају следећи синоними (енгл.): „*unused*“, „*closed*“, или „*orphaned*“ (Wolkersdorfer 2008). Зависно од земље или

контекста у ком се употребљава, обим појма некада укључује и пратећа постројења, као и простор на ком су извођене рударске активности.

У домаћој терминологији Драгишић и Поломчић (2009) појам напуштени рудник описују као: „*Рудник у коме се више не експлоатишу минералне сировине. Услед неадекватног конзервирања рударских радова по завршеној експлоатацији, из њих најчешће истичу рудничке воде, неповољног хемијског састава, које загађују околне површинске и подземне воде и тло*“.

Интернационални институт за животну средину и развој (IIED) из Лондона, у оквиру пројекта Рударство, минерали и одрживи развој (MMSD) дефинише напуштене рударске радове као места на којима су престала истраживања и експлоатација, а на којима мере рекултивације нису спроведене или нису завршене у потпуности (IIED 2002).

Америчка Агенција за заштиту животне средине (енгл. *United States Environmental Protection Agency, US EPA*) дефинише термин подручје напуштеног рудника (енгл. *Abandoned mine lands*) као простор са водама и припадајућим сливовима у којем се одвијала експлоатација и прерада руде (US EPA 2017a).

У оквиру дисертације, под појмом напуштени рударски радови подразумевају се истражни или експлоатациони рударски радови (подземни и површински), са припадајућим одлагалиштима јаловине и постројењима за припрему и прераду руде (уколико постоје), који нису активни, а за које нису примењене или су делимично примењене мере за затварање и рекултивацију рудника и јаловишта.

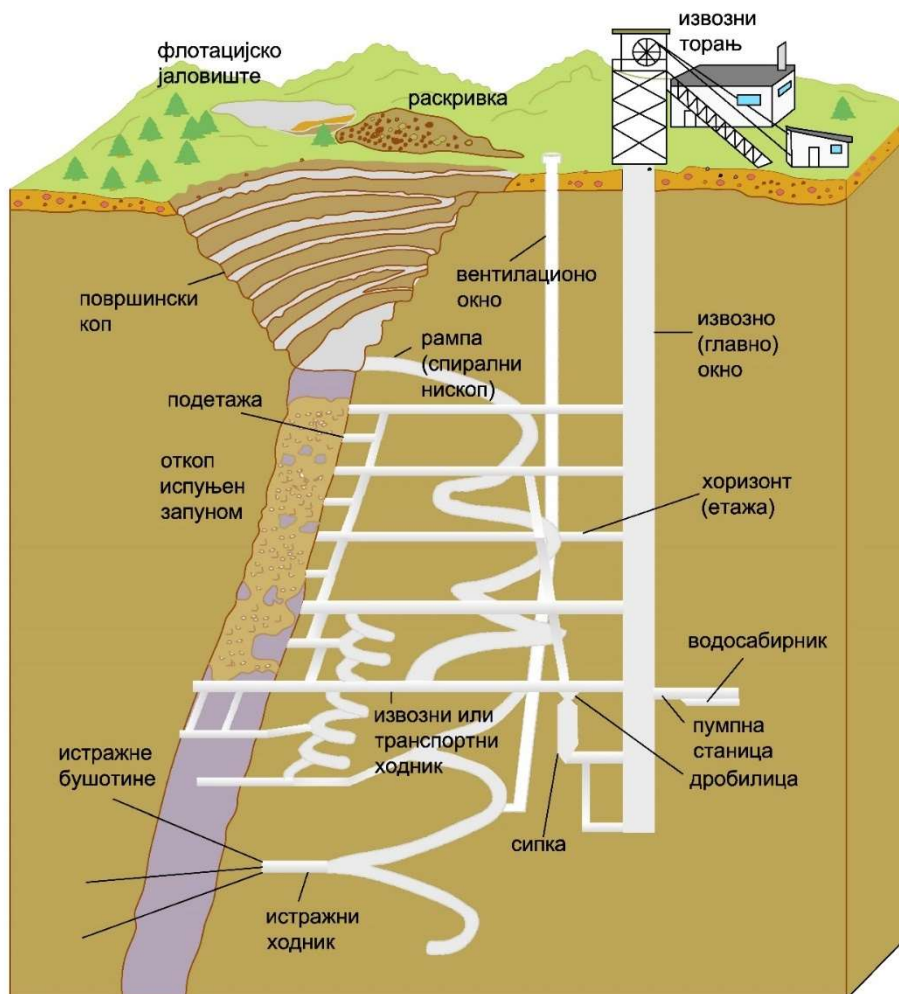
### 2.1.2. Карактеристике напуштених рударских радова

Неки од основних елемената који су допринели стварању негативног наслеђа, и од којих неки и даље отежавају решавање проблема напуштених рударских радова су следећи (IIED 2002):



- Регулатива - већина земаља до последњих неколико деценија 20-ог века није имало развијену законску регулативу која би обавезивала компаније да изврше ремедијацију и рекултивацију простора након престанка експлоатације.
- Непостојање података - локације, размере и планови рударских просторија су често недоступни што умногоме отежава карактеризацију напуштених рудника.
- Политичке прилике - локални политички проблеми могу довести до непланираног затварања рудника. Такође, у бившим комунистичким државама, након промене политичког система део рудника је прешао у приватно власништво, док је велики број рудника напуштен.
- Рударски радови малих размера - илегални рудници малих размера често бивају напуштени без икаквих података о њиховим локацијама и карактеристикама. Такође, постоји велики број истражних рударских радова који нису прописно затворени и рекултивисани.

У зависности од тога да ли су примењиване подземне или површинске методе експлоатације, напуштени рударски радови могу бити окна, поткопи, нископи, површински копови, а често се срећу и комбинације више врста рударских радова (слика 2-1). Напуштени истражни рударски радови као и радови на отварању лежишта су често извођени у виду поткопа, посебно у планинским теренима где је морфологија таква да омогућава хоризонталан приступ лежишту. Примењене методе отварања и експлоатације и размере рударских радова у комбинацији са структурно-геолошким и хидрогеолошким карактеристика терена значајно утичу на ниво промене физичко-механичких и хидрауличких својстава околорудних стена.



Слика 2-1. Основне врсте рударских радова (Harmin 1997)

На локацијама напуштених рударских радова најчешће су присутне следеће врсте рударског отпада:

- Рудна јаловина – хетерогени стенски материјал настао како би се обезбедили приступ и експлоатација лежишта, који може садржати минералне сировине али у концентрацијама које нису економичне у одређеном временском периоду (Lottermoser 2007).
- Флотацијска јаловина – представља отпадни производ из процеса припреме минералних сировина који, у време прераде, нема комерцијалну нити употребну вредност (Кнежевић и др. 2014).

- Хемијски и чврсти отпад – хемијска једињења преостала из процеса флотирања руде, као и чврсти отпад од преостале механизације и машинске опреме.

Приликом површинске експлоатације руде долази до стварања већих количина јаловинског материјала, у односу на руднике са подземном експлоатацијом, па се тако у близини напуштених површинских копова често налазе и одлагалишта јаловине већих размера.

### 2.1.3. Напуштени рударски радови у свету и на простору Србије

Од почетака рударства у доба палеолита, преко старог и средњег века, па до индустријског доба, упоредо са развојем човечанства расла је и потреба за минералним сировинама. Европа, као колевка индустријског развоја, посебно је оптерећена проблемима везаним за напуштене руднике. Практично свака држава у Европи на својој територији има напуштене рударске радове. О размери проблема сведочи и број напуштених рударских радова у неким од европских земаља, па је тако у Француској идентификовано око 4000, 1500 у Пољској, преко 100000 у Енглеској и Велсу (ISRM 2008). У зависности од извора информација постоје различите процене о броју напуштених рударских радова. Процењује се да се на територији САД налази између 100000 и 500000 напуштених рудника (UNEP 2001), Канади око 10000, а у Аустралији преко 50000. У последњих неколико деценија присутан је тренд затварања рудника у високо развијеним земљама. Један од најизраженијих примера је Јапан, у ком је највећи број металичних рудника затворен, осим два већа рудника злата, док је последњи рудник угља затворен 1997 године. Данас Јапан на својој територији има преко 6000 напуштених или затворених рудника, чиме је скоро у потпуности угашена рударска индустрија (ISRM 2008). Са друге стране државе као што су Јужноафричка Република и Канада, поред великог броја старих радова, и даље улажу значајна средства у развој рударске индустрије.

Проблематика напуштених рударских радова и киселих рудничких вода разматрана је кроз више међународних иницијатива и пројеката. На простору САД неколико програма на националном и регионалном нивоу је спроведено (енгл. „Abandoned Mine Land Reclamation“ програм и „Abandoned Mine Land Fund“), са циљем ремедијације и рекултивације локација напуштених рударских радова. Такође Геолошки завод САД (енгл. *United States Geological Survey, USGS*) током 2000 године покрене „*Abandoned Mine Lands Initiative*“ иницијативу која укључује и испитивања рудничких вода из напуштених рудника (Wolkersdorfer 2008). Уз наведене, развијен је и информациони систем „e-Amlis“ (енгл. *Abandoned Mine Land Inventory System*) за складиштење, управљање и извештавање о проблемима везаним за напуштене руднике. Слична иницијатива покренута је и у Канади под називом „НОАМИ“ (енгл. *National orphaned/abandoned mines initiative*).

На простору Европе протеклих 20 година реализовано је више пројеката који су за циљ имали развој стратегија за управљање рударским отпадом и ублажавање негативних последица рударства на животну средину. Међу најзначајније пројекте у области напуштених рударских радова могу се сврстати „PIRAMID“ (енгл. *Passive In-situ Remediation of Acidic Mine / Industrial Drainage*) реализован у периоду 2000-2003, којим су дате инжењерске смернице за ремедијацију рудника са истицањем киселих рудничких вода, и „ERMITE“ из 2004 који је за циљ имао припрему подлога и смерница за развој ЕУ легислативе у области управљања водама у рударском сектору. Током 2003. године у оквиру Интернационалне асоцијације за рудничке воде (енгл. *International Mine Water Association, IMWA*) формирана је стална комисија „PADRE“ (енгл. *Partnership for Acid Drainage Remediation in Europe*) која за циљ има подизање свести и промоцију истраживања о киселим рудничким водама и напуштеним рудницима. У оквиру индустријског сектора, велике мултинационалне рударске компаније формирале су групу за превенцију формирања киселих рудничких вода – „INAP“ (енгл. *The International Network for Acid Prevention*) са циљем да се смање негативни утицаји киселих рудничких вода на животну средину.

Иако је у стручној јавности проблем напуштених рударских радова, са аспекта хемије рудничких вода и процене утицаја радова на животну средину, разматран у великом броју студија и научних публикација, широј јавности је ова проблематика остала непозната. Велику пажњу напуштени рудници добијају само у ситуацијама када дође до акцидента великих размера, приликом којих долази до угрожавања живота и здравља људи, као и тешких последица по животну средину чије санирање изискује значајне ресурсе. Ови акциденти, када утичу на међугранична водна тела имају међународни карактер. Овакве ситуације су биле повод за формирање стручних тимова и комисија које су постепено уводиле проблематику рударске индустрије и напуштених рудника у правне оквире Европске уније. Као одговор на неколико катастрофалних изливања флотацијске јаловине, Европска комисија издаје тзв. директиву о рударском отпаду<sup>2</sup> (*MWD*) која прописује и обавезу израде катастра рударског отпада са прелиминарном карактеризацијом ризика. Поред смерница из директиве о рударском отпаду везаних за прелиминарну процену ризика, на нивоу појединачних држава спроведена су засебни истраживачки пројекти и развијене националне стратегије. Ове методе и програми на нивоу држава развијени су уз уважавање специфичности које државе имају како у погледу природних одлика, тако и броја и размера напуштених рудника.

Експлоатација минералних сировина у Србији има веома дугу традицију. Најстарији археолошки налази везани за рударство на овим просторима потичу још из доба неолита (локалитет Рудна глава), од када се рударска активност, практично без прекида, одвија до данас. Најинтензивнија истраживања и експлоатација минералних сировина изведена су у другој половини 20-ог века. Већина рудника који су и даље активни отворена је у периоду после II светског рата. Дуга историја рударства у Србији за последицу има и велики број старих рударских радова, који су након престанка експлоатације бивали напуштени, без претходног успостављања мера за заштиту животне средине.

---

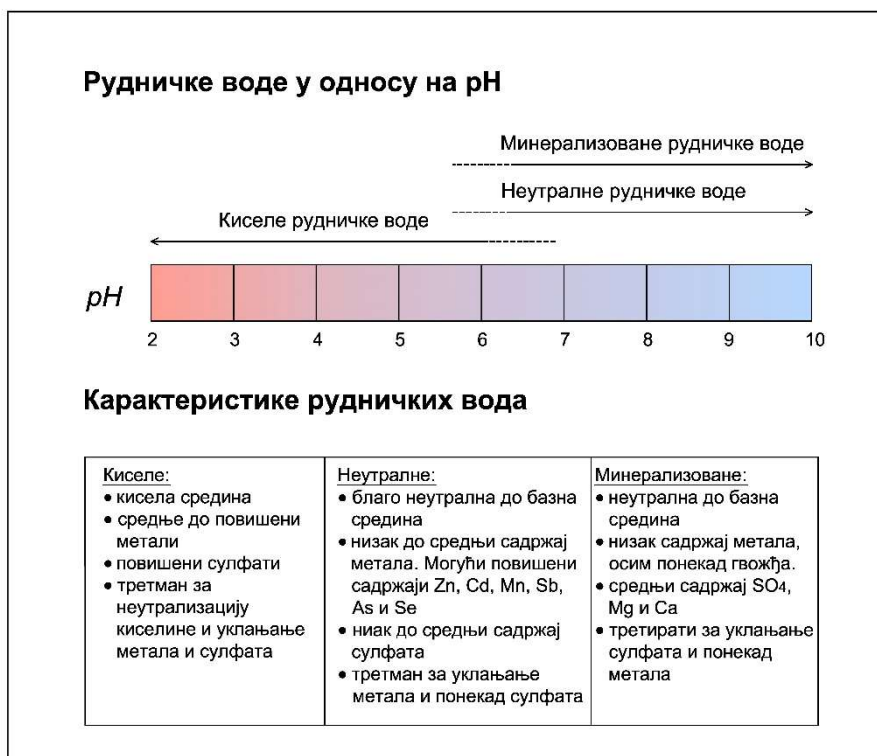
<sup>2</sup> *Directive 2006/21/EC of the European Parliament and of the Council of 15 March 2006 on the management of waste from extractive industries and amending Directive 2004/35/EC - Statement by the European Parliament, the Council and the Commission.*

Испитивањима у оквиру пројекта „Истраживања утицаја отпадних рудничких вода на животну средину на простору Србије“, спроведеним од стране Универзитета у Београду, Рударско-геолошког факултета (РГФ 2009-2011) идентификовано је око 80 напуштених рударских радова у оквиру лежишта металичних, радиоактивних, индустријских сировина и угљева. Претпоставља се да на простору Србије постоји још појава, док су наведеним пројектом обухваћени значајнији напуштени рудници. У оквиру истраживања вршена су испитивања хемијског састава рудничких вода које истичу из рударских радова и површинских вода у зони напуштених рудника. У периоду 2014-2015 година, такође од стране Рударско-геолошког факултета, Универзитета у Београду реализован је пројекат „Израда катастра напуштених копова на територији Војводине“ (РГФ 2014). Овом приликом на простору АП Војводина идентификовано је око 217 напуштених копова, пре свега индустријских сировина (грађевинског материјала) и извршена је њихова класификација према степену штетности. У оквиру ИПА програма (енгл. *Instrument for Pre-Accession Assistance, IPA*) у 2017-ој започета је реализација трогодишњег пројекта израде катастра рударског отпада на простору Србије. Пројекат се изводи у сарадњи немачких компанија „PLEJADES“ и „DMT“ и за циљ има карактеризацију и класификацију рударског отпада са проценом ризика (према смерницама из директиве о рударском отпаду), као и три пилот пројекат за ремедијацију везаних за различите типове отпада.

## 2.2. Рудничке воде из напуштених рударских радова

Под појмом рудничке воде, подразумевају се све воде које ступе у рударске радове, а које према пореклу могу бити подземне, површинске, атмосферске као и технолошке воде из процеса експлоатације и прераде руде (Драгишић 2005). Приликом експлоатације руде долази до откривања и излагања минерала оксидационим условима. Ова појава посебно може имати негативне ефекте у оквиру металичних лежишта (Cu, Pb, Zn, Au, Ni, Fe, U), лежишта фосфата и угља, у чијој грађи претежно учествују минерали из групе сулфида (Lottermoser 2007). Честа последица интеракције воде и сулфидних минерала у оксидационим условима је формирање киселих рудничких вода (енгл. *Acid Mine Drainage, AMD*).

Поред ниске рН вредности, ове воде се одликују повишеним садржајем сулфата, метала и металоида. Потребно је напоменути да повишена минерализација и садржај токсичних супстанци није само везан за киселе рудничке воде, већ се повишен садржај опасних материја може јавити и у неутралним и алкалним рудничким водама (слика 2-2).



Слика 2-2. Основни типови рудничких вода у односу на рН (INAP 2009)

Неутралне рудничке воде могу имати високе садржаје метала и/или сулфата, и најчешће настају у следећим условима (Lottermoser 2007):

- процеђивањем из флотацијских јаловишта које садрже остатке алкалија коришћених у процесу лужења метала,
- у лежиштима која не садрже сулфидне минерале,
- у зонама сулфидних лежишта и одлагалишта јаловине која садржи сулфиде, али који су комплетно оксидовани током припреме и/или експлоатације рудног тела,

- у лежиштима која поред сулфида садрже и високе садржаје карбоната који неутралишу киселе рудничке воде и
- у зонама рударских радова у којима су сулфидни минерали који генеришу киселину растворени, а која су обogaћена сулфидима који не производе киселе рудничке воде приликом оксидације кисеоником (галенит, сфалерит...).

Активности одређених микроорганизама имају важну функцију приликом формирања хемијског састава рудничких вода. Од значаја за процес формирања киселих рудничких вода су ацидофилни микроорганизми, пре свега бактерије које убрзавају процес оксидације сулфида, а тиме и доводе до погоршања квалитета рудничких вода (Kelly and Wood 2000).

У зависности од рН-Еh услова и хемијског састава рудничких вода, долази до издвајања и таложења секундарних минерала у форми седимента или филма на зидовима рударских радова, као и на местима истицања рудничких вода на површину терена. У саставу ових талоба доминирају оксиди и хидроксици гвожђа који им дају карактеристичну наранџасту боју, као и оксиди и хидроксици бакра и алуминијума (Nordstrom 1982, Alpers et al. 1994a).

Са друге стране, постоје рудничке воде високог квалитета, које се на појединим локацијама користе за водоснабдевање. Овакве рудничке воде су углавном везане за лежишта неметаличних минералних сировина, у оквиру којих су доминантни хидролитички процеси растварања околних стена приликом којих долази до формирања рудничких вода које се према саставу не разликују значајно од природних подземних вода (Dragišić et al. 2012).

Разноликост у физичко-хемијским карактеристикама рудничких вода указује на веома компликован међусобни утицај различитих природних и вештачких фактора који утичу на формирање хемијског састава ових вода. У наредним поглављима биће дат приказ основних процеса формирања хемијског састава рудничких вода. Посебан акценат биће на формирању киселих рудничких вода (*AMD*), које



представљају један од највећих изазова везаних за заштиту животне средине у зонама напуштених рударских радова. Наиме, рудничке воде код којих су у формирању хемијског састава доминантни сумпорно-киселински процеси доприносе повећању концентрације токсичних и тешких метала знатно изнад максимално дозвољених концентрација у површинским и подземним водама и речном седименту (Edraki et al. 2005, Hudson-Edwards et al. 2008).

### 2.2.1. Хидрогеохемија рудничких вода

На локацијама напуштених рударских радова рудничке воде се најчешће формирају у оквиру следећих процеса:

- дренарањем подземних вода и површинских вода у подземне рударске радове,
- на рачун атмосферских падавина и површинских вода које се сливају у напуштене површинске копове и
- процеђивањем атмосферских падавина и површинских вода кроз рудна и флотацијска јаловишта.

У наведеним процесима долази до интеракције између подземних и површинских вода и рудних и околорудних стена. У зависности од минералног састава и структурно-геолошких и хидрогеолошких карактеристика стенских маса формирају се рудничке воде различитог хемијског састава. У оквиру лежишта минералних сировина, на формирање хемијског састава подземних вода утиче више геохемијских процеса: сумпорно-киселински, кисеонични, угљендиоксидни и хидролитички (Драгишић 2005).

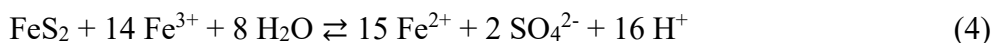
Иако се наведени процеси одвијају у природним условима, приликом анализе напуштених рударских радова највећа пажња у домаћој и иностраној литератури посвећена је управо сумпорно-киселинским процесима тј. процесима оксидације сулфидних минерала, а пре свих пирита. Ово је и очекивано с обзиром да у процесу оксидације пирита долази до ослобађања протона и до формирања киселих вода које могу имати негативан утицај на животну средину. Овде треба напоменути да

и рудничке воде које имају неутралне вредности индекса рН могу имати значајно повишену минерализацију и концентрације метала, и као такве такође могу утицати на погоршање квалитета животне средине.

Иако већина напуштених рудника има својих специфичности у погледу хемијског састава рудничких вода, посматрајући проблем на глобалном нивоу може се рећи да су са аспекта утицаја на животну средину процеси растварања сулфидних минерала од највећег значаја.

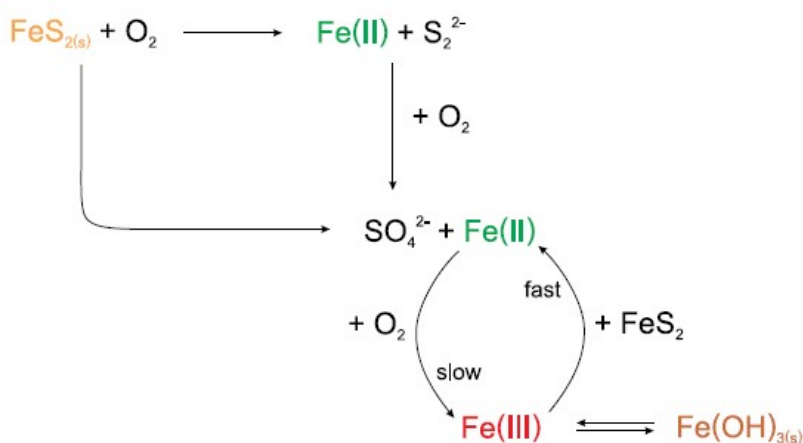
### 2.2.1.1. Оксидација сулфидних минерала

Оксидација сулфида представља низ повезаних реакција у којима долази до растварања минерала и ослобађања сулфата и метала. Иницијалне процеси у стварању киселих рудничких вода укључују оксидацију најраспрострањенијег сулфида пирита, који даље потпомаже оксидацију других сулфидних минерала (сфалерит, галенит, арсенопирит, марказит...). На примеру пирита овај процес се може приказати следећим реакцијама (Wolkersdorfer 2008):



Уколико је у раствору присутно довољно кисеоника или ако је средина у контакту са атмосфером, растворено двовалентно гвожђе ће бити оксидовано до фери гвожђа ( $\text{Fe}^{3+}$ ) приликом чега се смањује киселост раствора (реакција 2). Ослобађање протона и повећање киселости се наставља хидролизом тј. формирањем хидроксида гвожђа (реакција 3), који се издваја у виду карактеристичног наранџастог талоба, или даљом реакцијом тровалентног гвожђа са пиритом

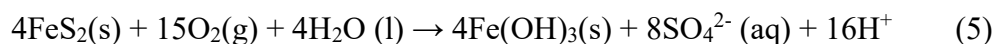
(реакција 4), приликом чега поред протона долази до ослобађања феро јона (Younger et al. 2002). Шематски приказ оксидације пирита приказан је на слици 2-3.



Слика 2-3. Шематски приказ процеса оксидације пирита (Wolkersdorfer 2008)

Процес оксидације пирита, поред тога што је аутокаталитички, припада групи егзотермних реакција, приликом којих долази до ослобађања топлоте. Такође, реакције (1) и (2) могу бити убрзане дејством микроорганизама, док је реакција (3) абиотичка и углавном се одвија када рудничке воде напусте рудник.

Сумарно реакција оксидације пирита се може приказати на следећи начин (Димитријевић 2013):



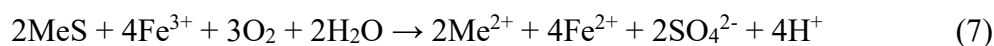
Производи оксидације пирита који директно утичу на погоршање квалитета животне средине укључују издвајање хидроксида гвожђа у виду карактеристичног наранџастог талога и снижење рН вредности воде. Овде треба напоменути да је процес оксидације пирита доста комплексан и да укључује хемијске, микробиолошке и електрохемијске реакције приликом којих се јављају различити прелазни облици, а пре свега сулфати. Гвожђе-сулфат оксидише у присуству тионских бактерија до  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  који постаје интензивно оксидационо средство на

сулфиде других метала, превodeћи их у лако растворљива сулфатна једињења (Драгишић 2005).

Поред пирита, у оквиру металичних лежишта се често у парагенези налазе и други минерали из групе сулфида (најчешће халкопирит, галенит, сфалерит), чија стабилност зависи од рН-Е<sub>h</sub> услова. Увођењем кисеоника преко рударских радова мењају се хидрохемијски услови и долази до оксидације сулфидних минерала, која се генерално може приказати следећом реакцијом (Wolkersdorfer 2008):



У реакцији (6) ознака *Me* се односи на неки од метала који улазе у састав минерала. Из наведене реакције се види да оксидацијом осталих сулфида (поред пирита) кисеоником долази до повећања концентрације сулфата, метала и арсена у рудничким водама (у зависности од врсте минерала). Са друге стране, уколико гвожђе (III) није у потпуности исталожено у виду оксихидроксида, већ је присутно у раствору, оно такође може оксидовати сулфиде и произвести киселе рудничке воде према следећој реакцији (Димитријевић 2013):



У наведеној реакцији ознака *Me* се односи на двовалентни метал (Zn, Cu, Pb, Ni, Cd...). Преглед значајнијих сулфидних минерала који приликом оксидације генеришу киселину дат је у табели 2-1.

**Табела 2-1.** Најзаступљенији сулфидни минерали који генеришу киселину када се оксидују (Димитријевић 2013)

Сулфиди који генеришу киселину са кисеоником као оксидансом		Сулфиди који генеришу киселину са гвожђем (III) као оксидансом	
Минерал	Формула	Минерал	Формула
Пирит, маркасит	FeS <sub>2</sub>	Сви минерали из претходне групе плус:	
Пиротин	Fe <sub>1-x</sub> S	Сфалерит	ZnS
Борнит	Cu <sub>5</sub> FeS <sub>4</sub>	Галенит	PbS
Арсенопирит	FeAsS <sub>4</sub>	Халкопирит	CuFeS <sub>2</sub>
Енаргит/фаманитит	Cu <sub>3</sub> AsS <sub>4</sub> /Cu <sub>3</sub> SbS <sub>4</sub>	Ковелин	CuS
Тенантит/ тетраедрит	(Cu,Fe,Zn) <sub>12</sub> As <sub>4</sub> S <sub>13</sub> / (Cu,Fe,Zn) <sub>12</sub> Sb <sub>4</sub> S <sub>13</sub>	Цинабарит	HgS
Реалгар	AsS	Милерит	NiS
Аурипигмент	As <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	Пентландит	(FeNi) <sub>9</sub> S <sub>8</sub>
Стибнит	Sb <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	Гриноцит	CdS

#### 2.2.1.2. Кинетика оксидације сулфида

Брзина реакције оксидације сулфида и њено трајање утичу на формирање киселих рудничких вода, и у значајној мери одређују потенцијал напуштених рударских радова као извора загађујућих супстанци. Реакција оксидације се одиграва на контакту између минерала и раствора. Стога врста и морфологија минерала, као и особине стенске масе које стварају услове за могућност циркулације флуида као што су структурно геолошке и хидрогеолошке карактеристике, одређују брзину реакције. Ова тематика је разматрана у бројним студијама (Nordstrom 1982, Bailey and Hansford 1993, Elberling et al. 2000, Belzile et al. 2004.), из којих се закључује да велики број физичких, хемијских и биолошких фактора у међусобној комбинацији утиче на брзину оксидације сулфида. Међу многобројним факторима, као преовлађујући могу се издвојити следећи:

- карактеристике минерала (пре свега врста и активна површина),
- садржај Fe<sup>3+</sup> и O<sub>2</sub> у воденом раствору и
- присуство микроорганизама.

Активна површина минерала представља један од најнеизвеснијих параметара. С обзиром на значај овог параметра за прогнозу и оцену брзине оксидације, Younger et al. (2002) предлажу приступ за процену овог параметра у реалним условима на основу упоређивања количине репрезентативног елемента на терену и у лабораторијским условима.

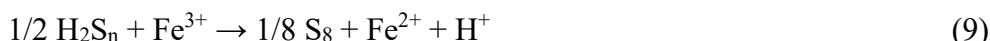
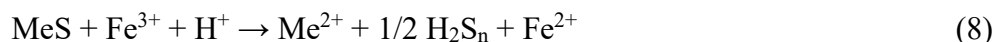
Испитивања су показала да се реакција оксидације путем гвожђа (III) одвија брже у односу на оксидацију сулфида која се одвија под дејством кисеоника (Nordstrom and Southam 1997). Из тог разлога је у случају пирита реакција (2) кључна за брзину оксидације. Иако је ова реакција брза при неутралним и алкалним вредностима рН, процес је веома спор у киселим условима. Ипак, у киселој средини долази до развоја ацидофилних бактерија које могу имати улогу катализатора, чиме се реакција убрзава чак до милион пута (Singer and Stumm, 1970, Younger et al. 2002). У табели 2-2 је дат преглед брзина абиотичке и биотичке реакције оксидације пирита и  $\text{Fe}^{2+}$  у теренским и лабораторијским условима.

**Табела 2-2.** Брзина оксидације пирита и  $\text{Fe}^{2+}$  у абиотичким и биотичким ( $\text{pH} \approx 2,5$ ;  $25^\circ\text{C}$ ; *At. Ferrooxidans*) условима и на основу теренских мерења (Димитријевић 2013)

Реакција/процес	Абиотичка брзина	Биотичка брзина	Брзина на терену
Оксидација $\text{Fe}^{2+}_{(\text{aq})}$ кисеоником	$3 \times 10^{-12} \text{ mol/L s}$	$5 \times 10^{-7} \text{ mol/L s}$	$< 10^{-9} - 3 \times 10^{-6} \text{ mol/L s}$
Оксидација $\text{FeS}_2$ кисеоником	$0,3 - 3 \times 10^{-9} \text{ mol/m}^2\text{s}$	$8,8 \times 10^{-8} \text{ mol/m}^2\text{s}$	
Оксидација $\text{FeS}_2$ гвожђем (III)	$1 - 2 \times 10^{-8} \text{ mol/m}^2\text{s}$		
Оксидација отпадних стена			$0,03 \times 10^{-8} \text{ mol/m}^2\text{s}$
Оксидација јаловине			$20 - 60 \times 10^{-8} \text{ mol/m}^2\text{s}$

За правилно разумевање кинетике оксидације неопходно је познавање прелазних облика који се стварају у процесу оксидације, а који су кључни за метаболизам ацидофилних микроорганизама. У зависности од степена растворљивости

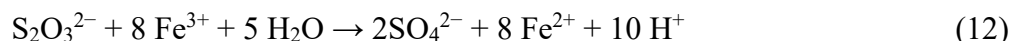
сулфидних минерала у киселој средини Станковић (2016) даје приказ водоник-сулфидног и тиосулфатног механизма оксидације сулфидних минерала. За сулфидне минерале растворљиве у киселој средини (нпр. сфалерит, ковелин, галенит) општи облик оксидације водоник-сулфидним механизмом се може приказати следећим реакцијама (Edwards et al. 2000):



У оквиру водоник-сулфидног механизма оксидације долази до стварања елементарног сумпора, који даљом оксидацијом у присуству микроорганизама доводи до повећања киселости раствора према реакцији (Edwards et al. 2000):

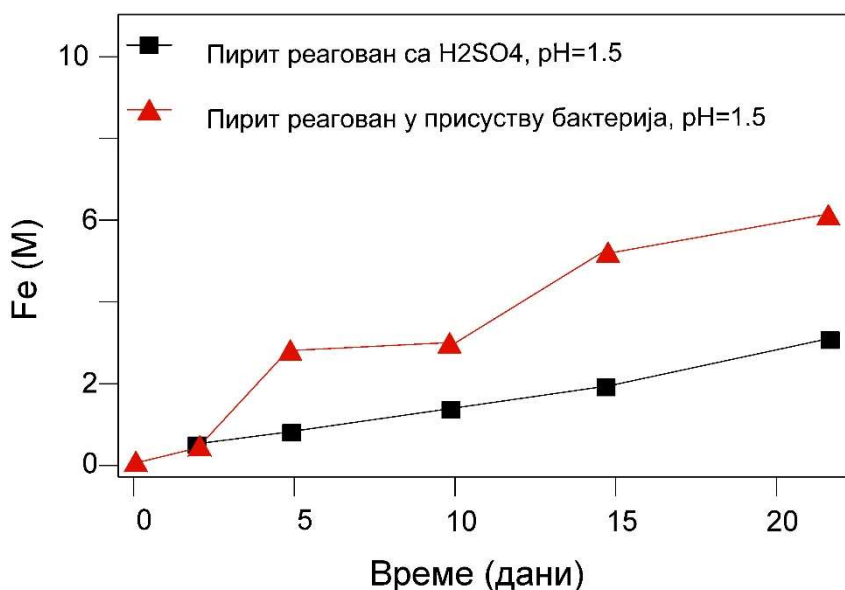


У случају минерала који су нерастворљиви у киселој средини, сулфиди оксидишу тиосулфатним механизмом, који се на примеру пирита може приказати следећим реакцијама (Димитријевић 2013, Vera et al. 2013, Станковић 2016):



Прво прелазно једињење које се гради у овом процесу су тиосулфати који су нестабилни у присуству гвожђа (III) и прелазе у тетратионате. Даље се тетратионати хидролизују приликом чега долази до стварања сулфата и дисулфон-моносулфонске киселине која је реактивна и подстиче реакције које доводе до стварања елементарног сумпора, тиосулфата (тиосулфат може поново ући у реакцију чиме се циклус понавља) и три- и пентатионата (Димитријевић 2013).

Као продукт оба механизма настаје сумпор, који уз гвожђе обезбеђује неопходну енергију за метаболичке процесе кроз синтезу АТП-а чиме се стварају услови за развој микроорганизама. Ово погодује развоју пре свега литотрофних микроорганизама који користе неорганске супstrate као извор енергије (пре свих гвожђе и сумпор). На слици 2-4 је приказана брзина растварања пирита, изражена преко промене концентрације гвожђа у раствору, у абиотичким условима и потпомогнута микроорганизмима.



**Слика 2-4.** Брзина растварања пирита изражена преко промене концентрације гвожђа у времену, у условима абиотичког растварања у сумпорној киселини као и у присуству бактерија (Edwards et al. 2000)

На основу дијаграма, растварање пирита у присуству микроорганизама је дупло бржа у односу на абиотичку реакцију. Овде треба напоменути да је фактор за који се оксидација убрзава у присуству бактерија веома променљив што указује на комплексност самог процеса. Посматрајући садржај сумпора у присуству бактерија, у односу на фактор повећања брзине растварања упућује да је за брзину растварања сулфидних минерала од значаја заједничко присуство бактерија које користе и сумпор и гвожђе као супstrate за оксидацију (Edwards et al. 2000).



### 2.2.1.3. Микроорганизми у рудничким водама

У рудничким водама се првенствено јављају бактерије, али су поред њих заступљене и поједине врсте алги и гљива – квасци и плесни. Микроорганизми у рудничким водама имају двојаку улогу. Они катализују оксидацију пирита и других сулфида али такође се употребљавају и приликом ремедијације загађене воде и земљишта (Wolkersdorfer 2008).

Екстремно до умерено ацидофилни микроорганизми живе у стаништима чији је рН < 3 и између 3 и 5, а према оптималној температури за раст микроорганизми се деле на: мезофиле (20-40 °C); умерене термофиле (40-60 °C); и оне који живе на температурама већим од 60 °C - екстремне термофиле (Станковић 2016).

Први ацидофилни микроорганизми који су изоловани били су сумпор-оксидујуће бактерије *Thiobacillus thiooxidans* и бактерије *Thiobacillus ferrooxidans* које поред могућности оксидације сумпора и његових једињења, имају и способност оксидације  $Fe^{2+}$  јона (Станковић 2016). Новијом поделом *Thiobacillus* је рекласификован на три рода: *Acidithiobacillus*, *Halothiobacillus*, и *Thermithiobacillus*. Како би се издвојили они који живе у киселој средини *Thiobacillus thiooxidans* и *Thiobacillus ferrooxidans* су преименовани у *Acidithiobacillus ferrooxidans* и *Acidithiobacillus thiooxidans* (Kelly and Wood 2000, Wolkersdorfer 2008).

Станковић (2016) описује следеће родове бактерија које се јављају у рудничким водама: *Leptospirillum*, *Acidithiobacillus*, *Acidiphilium*, *Sulfobacillus*, *Alycyclobacillus*, *Acidocella*, *Acidimicrobium* и *Ferrimicrobium*.

Према врсти реакције у којима учествују тј. према једињењима из којих добијају енергију бактерије у рудничким водама се могу поделити на начин приказан у табели 2-3.

**Табела 2-3.** Бактерије укључене у оксидацију гвожђа и/или сумпора и његових једињења, а које су везане за рудничке воде (модификовано према Wolkersdorfer 2008, Димитријевић 2013)

Бактерије	Извор енергије (e <sup>-</sup> )	Група према оптималним рН условима	Група према оптималној температури
Оксидују гвожђе			
<i>Leptospirillum ferrooxidans</i>	Fe <sup>2+</sup>	Ацидофилне	Мезо
<i>L. ferriphilum</i>		Ацидофилне	Мезо
<i>L. thermoferrooxidans</i>		Ацидофилне	Умерено термо.
" <i>Thiobacillus ferrooxidans</i> " m-1		Ацидофилне	Мезо
" <i>Ferrimicrobium acidiphilum</i> "		Ацидофилне	Мезо
<i>Ferroplasma acidiphilum</i>		Ацидофилне	Мезо
" <i>Fp. acidarmanus</i> "		Ацидофилне	Мезо
Оксидују сумпор и његова једињења			
<i>Acidithiobacillus thiooxidans</i>	H <sub>2</sub> S, S <sup>0</sup> , S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>2-</sup> , S <sub>3</sub> O <sub>6</sub> <sup>2-</sup> , S <sub>4</sub> O <sub>6</sub> <sup>2-</sup>	Ацидофилне	Мезо
<i>At. caldus</i>		Ацидофилне	Умерено термо.
<i>Thiomonas cuprina</i>		Ацидофилне	Мезо
<i>Hydrogenobaculum acidophilum</i>		Ацидофилне	Умерено термо
<i>T. albertis</i>		Ацидофилне	Мезо
<i>T. thioparus</i>		Неутрофилне	Мезо
<i>T. neopolitanus</i>		Неутрофилне	Мезо
<i>Sulfolobus solfataricus</i>		Ацидофилне	Термо
Оксидују гвожђе и сумпор			
<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	H <sub>2</sub> S, сулфидни минерали, S <sup>0</sup> , S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>2-</sup> , S <sub>4</sub> O <sub>6</sub> <sup>2-</sup> , Fe <sup>2+</sup>	Ацидофилне	Мезо
<i>Acidianus brierleyi</i>		Ацидофилне	Термо
<i>S. acidocaldarius</i>		Ацидофилне	Термо
Оксидују/редукују гвожђе			
<i>Acidimicrobium ferrooxidans</i>	Fe <sup>2+</sup> , Fe <sup>3+</sup>	Ацидофилне	Мезо
Оксидују/редукују гвожђе и оксидују сумпор			
<i>Sulfobacillus spp.</i>	Fe <sup>3+</sup> , H <sub>2</sub> S, S <sup>0</sup>	Ацидофилне	Термо
<i>Acidiphilium spp.</i>		Ацидофилне	Мезо

У природним условима у рудничким водама, а у зависности од рН, температуре и минералног састава, обично се заједно јавља више врста бактерија које живе у симбиози. Поред улоге које имају у развоју и катализацији стварања киселих рудничких вода, бактерије су такође кључне у примени метода пасивног третмана ових вода као и у процесима био-лужења метала.

#### *2.2.1.4. Процес неутрализације киселости*

Лежишта минералних сировина су углавном формирана у комплексном геолошком окружењу које укључује различите минералне парагенезе и присуство како рудних, тако и околорудних стена које могу припадати различитим групама. Циркулацијом подземних и површинских вода у зони напуштених рударских радова долази до интеракције између воде и стена, које у односу на састав могу садржати минерале који се у реакцијама са киселим водама понашају као акцептори протона.

Минерали који неутралишу киселину припадају групи карбоната и силиката. Од карбоната најзначајнији су: калцит, доломит и сидерит. Када карбонати нису присутни или су изреаговали, хидроксиди метала и хидроксисулфати могу да пуферују рН. Иако према садржају спадају у веома заступљене петрогене минерале, алумосиликати су мање реактивни од карбоната и њихово пуферско дејство се испољава у већ успостављеној киселој средини (само при ниским рН вредностима), односно они неутралишу већ формиране киселе рудничке воде (Димитријевић 2013).

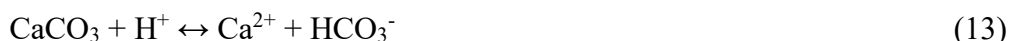
У табели 2-4 да је преглед минерала који најчешће учествују у реакцијама неутрализације.

**Табала 2-4.** Карактеристични минерали и опсег вредности рН у ком учествују у неутрализацији

Минерал	Формула	Опсег рН		
		Wolkersdorfer 2008	Димитријевић 2013	Lottermoser 2007
Калцит	CaCO <sub>3</sub>	6,5 – 7,5	6,5 – 7,5	6,5 – 7,5
Доломит	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	6,5 – 7,5	6,5 – 7,5	
Сидерит	FeCO <sub>3</sub>	4,8 – 6,3	5,0 – 5,5	5,0 – 6,0
Гипсит	Al(OH) <sub>3</sub>	4,0 – 4,3	4,0 – 4,3	3,0 – 5,0
Ферихидрит	Fe <sub>5</sub> O <sub>3</sub> (OH) <sub>9</sub>	< 3,5	< 3,5	3,0 – 5,0
Лимонит/гетит	FeOOH	1,3 – 1,8	< 3,5	3,0 – 5,0
К-јарозит	KFe <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub>	1,7 – 2,0		
Алумосиликати		1,0 – 2,0 експеримент		5,0 – 6,0

Приказани опсег рН вредности треба посматрати као индикативан, с обзиром да се разликује у зависности од аутора.

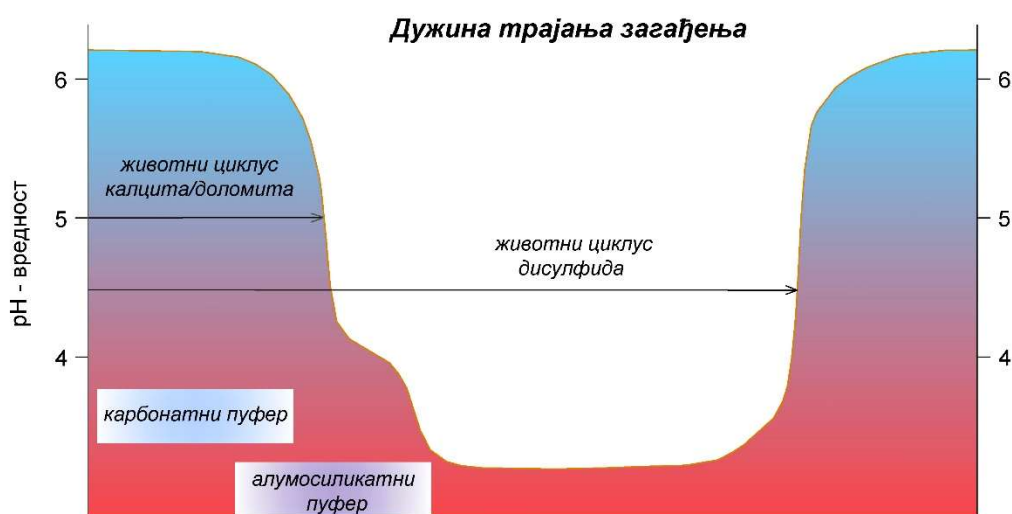
Механизам неутрализације се одвија ступњевито у зависности од рН услова. Калцит је један од најзаступљенијих и најреактивнијих минерала. Он ће пуферовати рН на 6,5-7 према реакцији (13), док се у киселој средини одвија реакција (14) при чему се формира угљен диоксид и угљена киселина (Димитријевић 2013):



Калцит такође може да реагује са двовалентним гвожђем које настаје у процесу оксидације сулфида, при чему се формира сидерит према реакцији (Wolkersdorfer 2008):

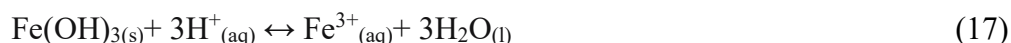
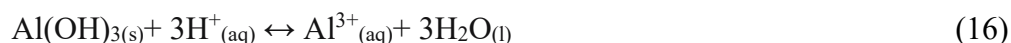


У тренутку када калцит или доломит више нису доступни, долази до пада рН вредности до нивоа на ком ће следећи доступан минерал пуферовати рН. Треба напоменути да се реакције неутрализације у зависности од врсте минерала одвијају различитим брзинама (слика 2-5). Растварање карбоната се одвија брже у односу на растварање сулфида, па је очекивано да докле год је калцит доступан, неће доћи до снижења рН вредности рудничких вода.



**Слика 2-5.** Концептуални приказ еволуције рН вредности рудничких вода у времену, у условима када је садржај пирита већи у односу на садржај карбоната (Wolkersdorfer 2008)

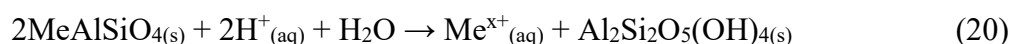
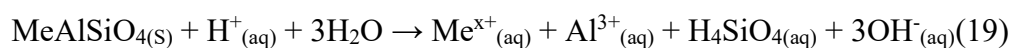
Сидерит је такође карбонатни минерал који пуферује рН у вредностима између 5 и 6. Након карбоната, процеси неутрализације се настављају растварањем металних хидроксида (гибсита, ферихидрита, швертманита...), приликом чега се ослобађају јони метала према следећим реакцијама (Lottermoser 2007):



При вредностима рН између 4 и 5, процеси јонске измене са минералима глина могу да пуферују раствор, приликом чега долази до ослобађања базних катјона (Lottermoser 2007):



Иако су значајно заступљени у саставу стена, алумосиликати су мање реактивни од карбоната и њихово пуферско дејство се испољава само при ниским рН вредностима (Димитријевић 2013). Растварање алумосиликата приликом чега долази до везивања протона, одвија се спорије од растварања хидроксида метала. У општем облику растварање алумосиликата се може приказати следећим реакцијама (Lottermoser 2007):



Где *Me* замењује: Са, На, К, Mg, Mn или Fe.

#### 2.2.1.5. Одлагање минерала из рудничких вода

Једна од најизраженијих физичких особености простора у зони напуштених рудника је присуство карактеристичног, најчешће наранцастог талога, који се јављају на местима истицања рудничких вода из рударских радова. Истицањем рудничких вода у површинске токове ова појава може бити заступљена и километрима низводно од напуштеног рудника.

Таложење секундарних минерала из рудничких вода изазвано је променама у физичко-хемијским условима, а најчешће је везано за следеће факторе (Wolkersdorfer 2008):

- испаравање воде чиме се мења степен засићења рудничких вода,
- оксидација редукованих једињења,
- промена рН/Еh услова,
- флокулација и коагулација,
- мешање вода различитог хемијског састава и
- издвајање CO<sub>2</sub> из воде.

Исталожавањем минерала долази до смањења укупне минерализације рудничких вода као и садржаја појединих метала, у зависности од врсте минерала. Такође, овај процес може бити и обрнут са обзиром да су поједини секундарни минерали растворљиви у води (табела 2-5).

**Табела 2-5.** Приказ појединих минерала који се јављају у зонама рударских радова (модификовано према Lottermoser (2007) и Wolkersdorfer (2008))

Минерал	Група	Формула	Боја
Растворљиви минерали који пуферују рН			
Малахит	Карбонати	Cu <sub>2</sub> [(OH) <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ]	зелена
Церузит	Карбонати	PbCO <sub>3</sub>	бела
Хидроцинкит	Карбонати	Zn <sub>5</sub> [(OH) <sub>3</sub> CO <sub>3</sub> ] <sub>2</sub>	бела
Растворљиви минерали који ослобађају киселину			
Јурбанит	Al <sup>3+</sup> хидроксисулфат	Al(OH)SO <sub>4</sub> · 5H <sub>2</sub> O	бела
Мелантерит	Fe <sup>2+</sup> сулфат	Fe(SO <sub>4</sub> ) · 7H <sub>2</sub> O	плаво-зелена
Сомолнокит	Fe <sup>2+</sup> сулфат	Fe(SO <sub>4</sub> ) · H <sub>2</sub> O	бела, зелена
Алунит	К-Al хидроксисулфат	KAl <sub>3</sub> [(OH) <sub>6</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ]	бела, наранџаста
Јарозит	К-Fe хидроксисулфат	KFe <sub>3</sub> [(OH) <sub>6</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ]	наранџаста, црвена
Растворљиви минерали који не утичу на рН			
Емпсомит	Mg сулфат	Mg(SO <sub>4</sub> ) · 7H <sub>2</sub> O	бела, наранџаста
Госларит	Zn сулфат	Zn(SO <sub>4</sub> ) · 7H <sub>2</sub> O	бела
Гипс	Ca сулфат	Ca(SO <sub>4</sub> ) · 2H <sub>2</sub> O	бела
Халкантит	Cu сулфат	Cu(SO <sub>4</sub> ) · 5H <sub>2</sub> O	плава
Арсенолит	As оксид	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	бела, жута

Приликом поновног плавлјења рударских радова може доћи до њиховог растварања и до мобилизације метала и сулфата. Појава иницијалног погоршања квалитета рудничких вода након затварања и плавлјења рудника се у енглеској литератури назива „*first flush*“ и истраживана је на више локалитета (Younger 2000, Gzyl & Banks 2007).

Сезонске варијације у хемијском и микробиолошком саставу рудничких и површинских вода могу се у одређеним случајевима довести у везу са таложењем и поновним растварањем секундарних минерала (најчешће гвожђе сулфата) у зависности од хидролошких услова (Alpers et al. 1994б, Olias et al. 2004, Kumpulainen et al. 2007). Поред сезонских варијација у хемијском саставу воде, таложење секундарних минерала се најчешће одвија према одређеном редоследу. Rude (2004) наводи да се са променом рН услова дуж површинског тока прво таложи јарозит, па следи швертманит, док се последњи издваја гетит. Исталожавање минерала представља значајан механизам којим се смањује концентрација метала у води, јер поред основног састава, секундарни минерали често садрже и додатне метале као примесе. Wolkersdorfer (2008) сумира резултате истраживања на копреципитацији различитих метала и приказује степен афинитета према оксидима гвожђа и мангана следећим низовима:

Fe-оксиди: As(III) – Pb ≥ Cu > Zn > Ni ≥ Cd > Co > As(V)

Mn-оксиди: As(III) – Pb – Co > Cu > Zn > Ni > Cd > As(V)

Поред копреципитације, адсорбција такође представља једна од важних механизма за транспорт и таложење метала у воденом окружењу. Генерално анјони се боље адсорбују при ниским рН вредностима, а катјони у неутралним условима. Од метала, у киселој средини се најбоље адсорбују арсен и олово, док се при неутралним вредностима рН адсорбују цинк, кадмијум и никл (Lottermoser 2007). Из тог разлога промена рН услова приликом ремедијације мора бити строго контролисана како не би дошло до ремобилизације хазардних супстанци из талога.



### 2.3. Површинске и подземне воде у подручју напуштених рударских радова

Експлоатација минералних сировина је препозната као једна од основних антропогених активности које суштински утичу на ресурсе подземних вода (UNESCO 2004). Површинске и подземне воде су у интеракцији са рударским радовима, како током радног века рудника, тако и након престанка експлоатације и затварања рударских радова.

Утицај рударске активности на површинске и подземне воде се разликује у односу на фазу развоја рудника. Иако у неким случајевима утицај рударских активности може бити и позитиван, нежељени ефекти на животну средину и водне ресурсе су углавном везани за процесе експлоатације и прераде руде, одводњавања рударских радова, као и за плавлeње рударских радова и неконтролисано истицање или процеђивање рудничких вода.

Напуштени рударски радови на водне ресурсе могу утицати кроз измену режима и биланса површинских и подземних вода и физичко-хемијских карактеристика тј. квалитета вода. Загађење површинских и подземних вода има највећи утицај како на деградацију флоре и фауне у оквиру водних и са њима зависних екосистема, тако и на здравље људи - директно коришћењем воде неодговарајућег квалитета и индиректно путем уноса прехранбених производа.

Степен и карактер утицаја на водне ресурсе пре свега зависи од карактеристика напуштених рударских радова и од могућности миграције и транспорта загађујућих супстанци. Самим тим, основни фактори који утичу на последице интеракције рударских радова и водних ресурса могу се генерално сврстати у групу природних и вештачких (антропогених) фактора. Од природних фактора издвајају се: геолошке и хидрогеолошке карактеристике лежишта и околорудних стена, а пре свега садржај пирита и других сулфида; садржај карбоната и других минерала који имају способност неутрализације киселости; изложеност минерала и њихова реактивност; хидрауличка својства стенских маса и климатске карактеристике (пре

свих падавине и евапотранспирација). Од вештачких фактора од значаја су геометрија тј. размере рударских радова, примењена метода експлоатације, начин одлагања јаловине, гранулометријски састав јаловинског материјала.

Нежељени ефекти по квалитет и квантитет водних ресурса који се јављају у зонама напуштених рударских радова су најчешће последица плављења рударских радова након престанка одводњавања, и истицања рудничких вода у реципијенте. Процес плављења рударских радова (познат и као енгл. “*rebound*”), поред промена у квалитету воде може довести и до следећих физичких ефеката (Younger et al. 2002):

- слегање терена,
- реактивација раседа,
- промена нивоа подземних вода и
- стварање гасних цепова.

Утицај истицања и мешања рудничких вода са површинским и подземним водама разматран је у великом броју студија (Pinto et al. 2004, Mendoza et al. 2005, Nakkou et al. 2008, Hudson-Edwards et al. 2008, Grande et al. 2013). На основу досадашњих истраживања може се констатовати да неконтролисано истицање рудничких вода из напуштених рударских радова може довести до следећих последица:

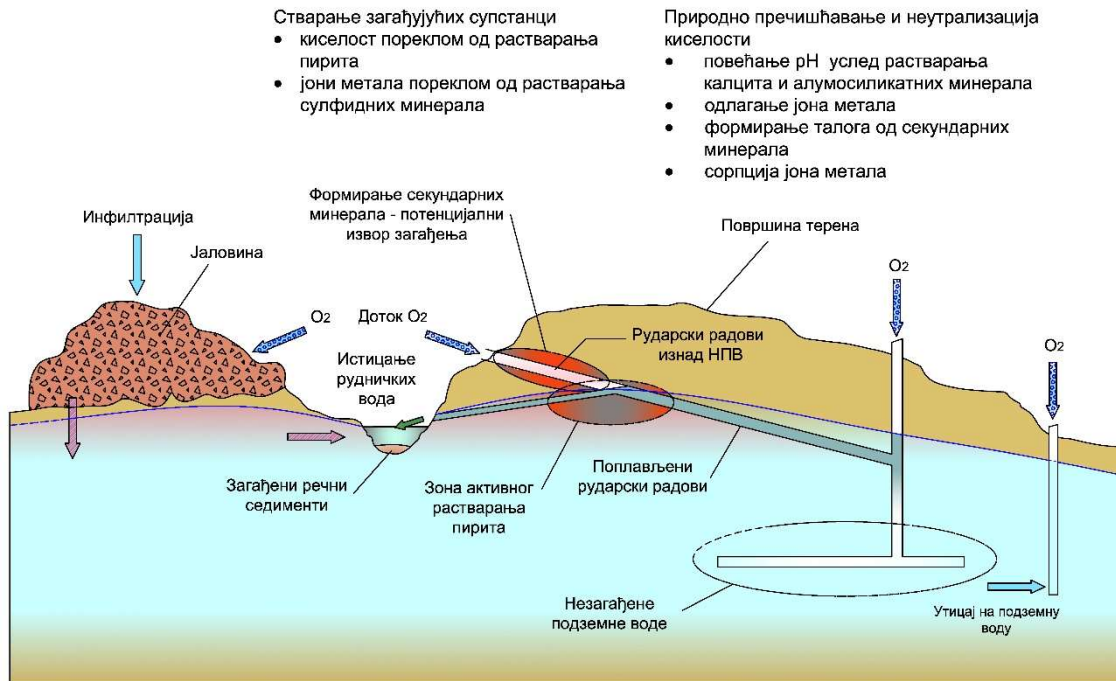
- загађења површинских вода, седимента и земљишта и утицај на водене екосистеме,
- загађења издани у зони и/или низводно од рударских радова и
- појаву локалних поплава и стварање бујичних токова.

У табели 2-6 сумирани су негативни утицаји који одређени параметри киселих рудничких вода могу имати на животну средину.

**Табела 2-6.** Основне карактеристике киселих рудничких вода и њихов утицај на животну средину (Ritchie 1994, Lottermoser 2007)

Параметар	Загађујућа супстанца	Опсег вредности у раствору	Утицај на животну средину
Киселост	$H^+$	$pH < 4.5$	Губљење бикарбоната неопходних за фотосинтезу; изумирање биљака и животиња; погоршање квалитета воде за пиће; миграција метала.
Гвожђе	$Fe^{3+}$ , $Fe^{2+}$ , $Fe(OH)_{3(s)}$	$100 - 1-9 \times 10^3$ mg/l	Повећање мутноће воде у површинским токовима и смањење продора сунчеве светлости. Угрожавање бентосних алги и таложене у шкргама риба.
Растворени метали и металоиди	Cu, Pb, Zn, Co, Cd, Ni, Hg, As, Sb	$0.01 - 1-9 \times 10^3$ mg/l	Угрожавање биљног и животињског света; биоаккумуляција; погоршање квалитета воде за пиће; загађење земљишта и седимента.
Минерализација	Ca, Mg, Na, K, Fe, Al, Si, Mn, $SO_4$	$100 - 1-9 \times 10^4$ mg/l	Погоршање квалитета воде, загађење земљишта и седимента

Од свих негативних ефеката које рударска активност има на животну средину, истицање рудничких вода из напуштених радова представља процес који је у временским оквирима најдуготрајнији и може се одвијати и више хиљада година. Услови стварања киселих рудничких вода и транспорта загађујућих супстанци у зонама напуштених јамских радова шематски је приказан на слици 2-6.



Слика 2-6. Основни извори и стварања киселих рудничких вода и путеви транспорта загађујућих супстанци (Younger et al. 2002)

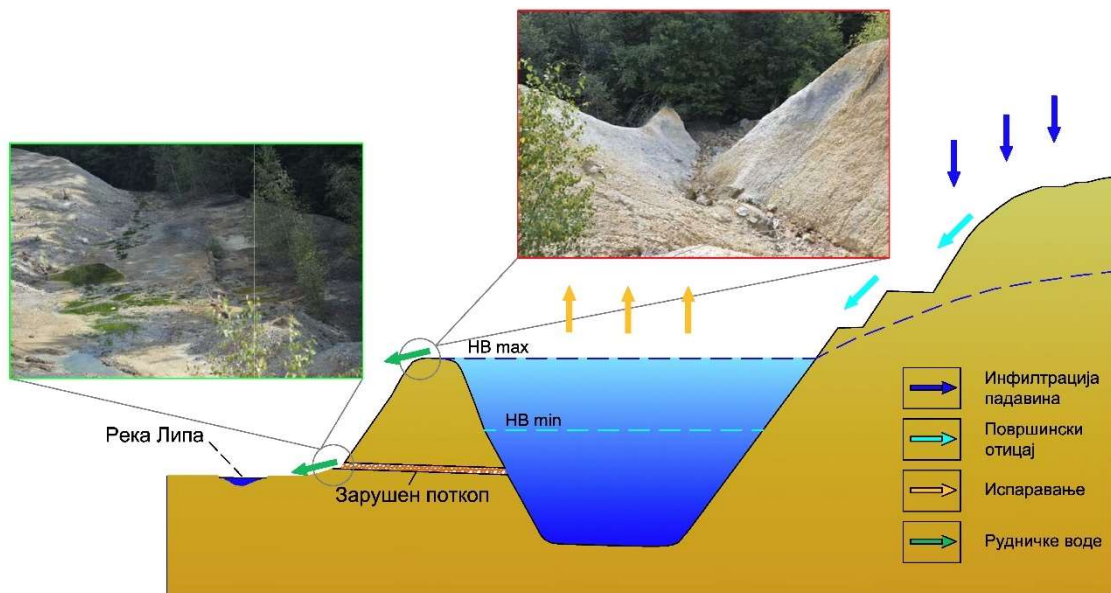
За правилну карактеризацију и процену утицаја напуштених рударских радова потребно је познавања механизма и фактора који доводе до деградације водних ресурса. Анализа утицаја полази од поставке концептуалних модела који укључују изворе загађујућих супстанци, путеве транспорта и рецепторе или средину под утицајем (подземне и површинске воде).

### 2.3.1. Утицај површинских копова

Методe површинске експлоатације се масовно примењују при експлоатацији угља и металичних сировина. Један од предуслова је да се рудно тело налази релативно плитко како би експлоатација била економична, мада постоје и примери веома дубоких површинских копова („*Bingham Canyon*“ – дубина 1.2 km, „*Chuquicamata*“ – дубина 850 m). Приликом површинске експлоатације лежишта долази до манипулације великим количинама стенског материјала. Такође у зонама површинских копова често долази до измештања површинских токова. Развој површинског копа је често праћен и операцијама одводњавања израдом линијама

дренажних бунара, којима се ниво подземних вода у зони копа обара испод зоне експлоатације. Након престанка експлоатације, у зависности од хидролошко-хидрогеолошких услова, често долази до делимичног плављења површинског копа и до формирања језера (енгл. *pit lake*). Формирање хемијског састава вода ових језера, њихове карактеристике и утицај на животну средину разматрани су у великом броју научних радова и публикација (Драгишић 1995, Davis and Eary 1997, Shevenell 2000, Bowell 2003, Davis 2003, Falagán et al. 2016, Станковић 2016) Треба напоменути да се кисела језера са високим садржајем хазардних супстанци формирају у условима када је ниво воде у језеру у контакту са стенама са сулфидним минералима, док се велики број језера формираних у оквиру површинских копова одликује добрим квалитетом воде (Bowell et al. 1998).

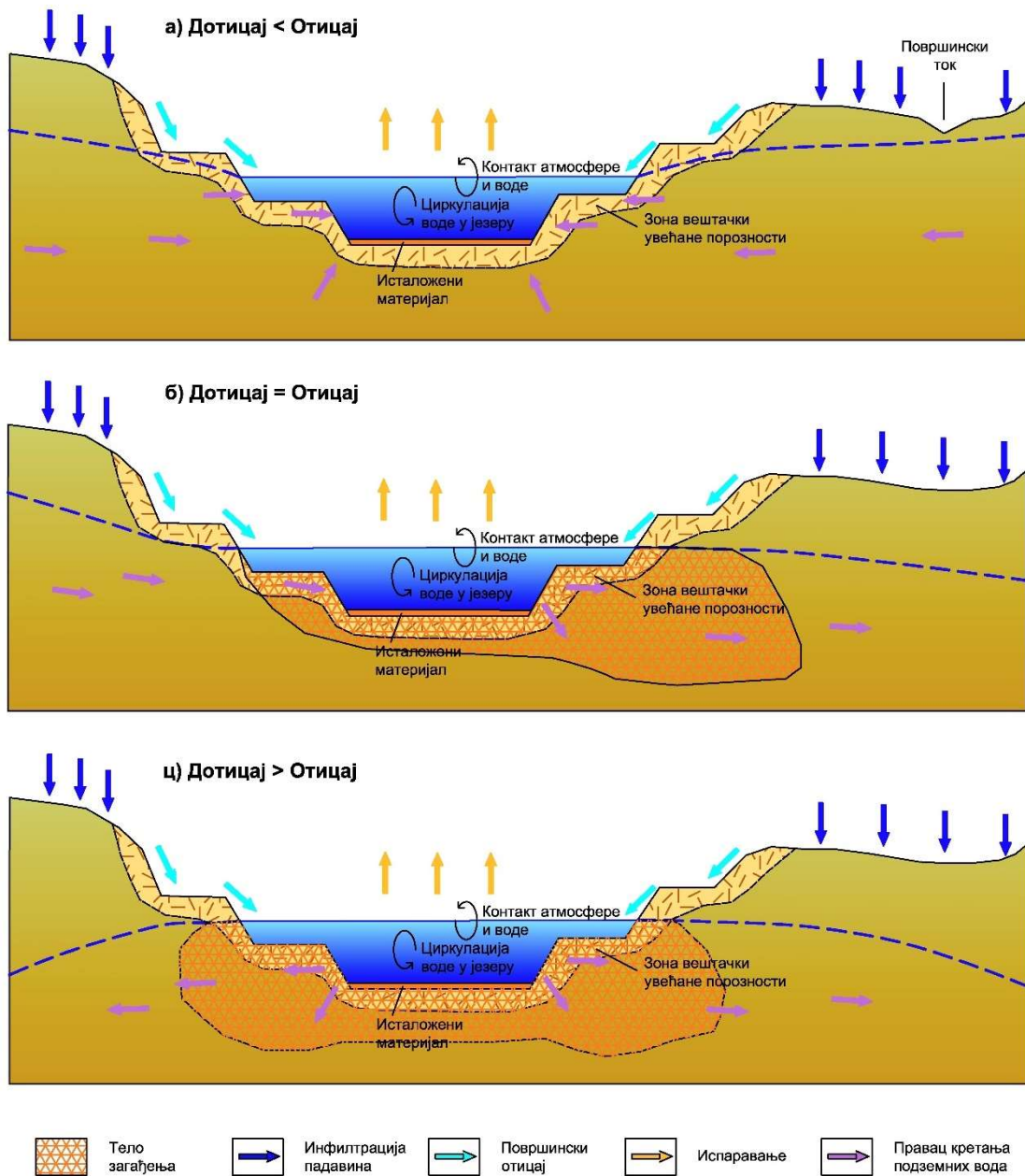
У зонама површинских копова се често налазе и подземни рударски радови, било да су они служили као истражни, за одводњавање (дренажне галерије) или је експлоатација дубљих делова лежишта настављена преласком на подземне методе експлоатације. Површински и подземни радови, када су у хидрауличкој вези заједно утичу на природне правце кретања и на режим и биланс подземних вода. Напуштени површински копови на површинске и подземне воде директно утичу истицањем воде из језера у потоке и реке и инфилтрацијом језерске воде у издан (слика 2-7).



Слика 2-7. Шематски профил кроз напуштени рудник бакра „Липа“ у источној Србији (Драгишић 1995)

У неким ситуацијама долази до планског плављења површинских копова преусмеравањем површинских токова. Један од примера оваквог управљања су површински копови лигнита у околини Лајпцига (Немачка), који се претварају у језера за туризам и рекреацију, а такође се укључени у хидролошки систем као мера одбране од поплава и контролу водостаја.

У зонама напуштених копова може доћи до измене режима нивоа подземних вода. У зависности од водног биланса, површински копови могу представљати зоне дренарања као и зоне прихрањивања издани (слика 2-8).



Слика 2-8. Концептуални модели могућег утицаја површинског копа на подземне и површинске воде

У условима када је дотицај у површински коп на рачун падавина, површинских и подземних вода већи од отицаја кроз инфилтрацију и евапотранспирацију, долази до формирања језера приликом чега долази до подизања нивоа подземних вода и до инфилтрације воде из језера у стенску масу (слика 2-8а). Отицај воде из језера се у појединим случајевима може одвијати преливањем или директним истицањем

из копа као и посредно, преко подземних радова. Када су дотицај и отицај у релативној равнотежи површински коп се може посматрати као изданско око, па је самим тим могућност природне заштите подземних вода од уношења загађујућих супстанци веома смањена. У овом случају вода из копа (која може садржати загађујуће супстанце) се инфилтрира у стенску масу и креће се у правцу природног тока подземних вода (слика 2-8б). Када је количина воде која отиче из површинског копа кроз евапотранспирацију и површински и подземни отицај већа од укупног дотицаја, површински коп има функцију дрена, преко ког се врши истицање подземних вода. (слика 2-8ц).

Утицај површинског копа на хидрогеолошке карактеристике издани зависи и од природног нивоа подземних вода као и степен колматације дна језера. У појединим случајевима површински копови могу бити формирани у потпуности изнад нивоа подземних вода, када они представљају колекторе површинских вода из којих се оне даље инфилтрирају кроз надизданску зону до издани. Такође степен запуњености дна површинског копа финим материјалом и талогом од секундарних минерала, уз природну и вештачки изазвану водопропусност стенске масе може утицати на брзину водозамене и хидрауличку везу језера и подземних вода.

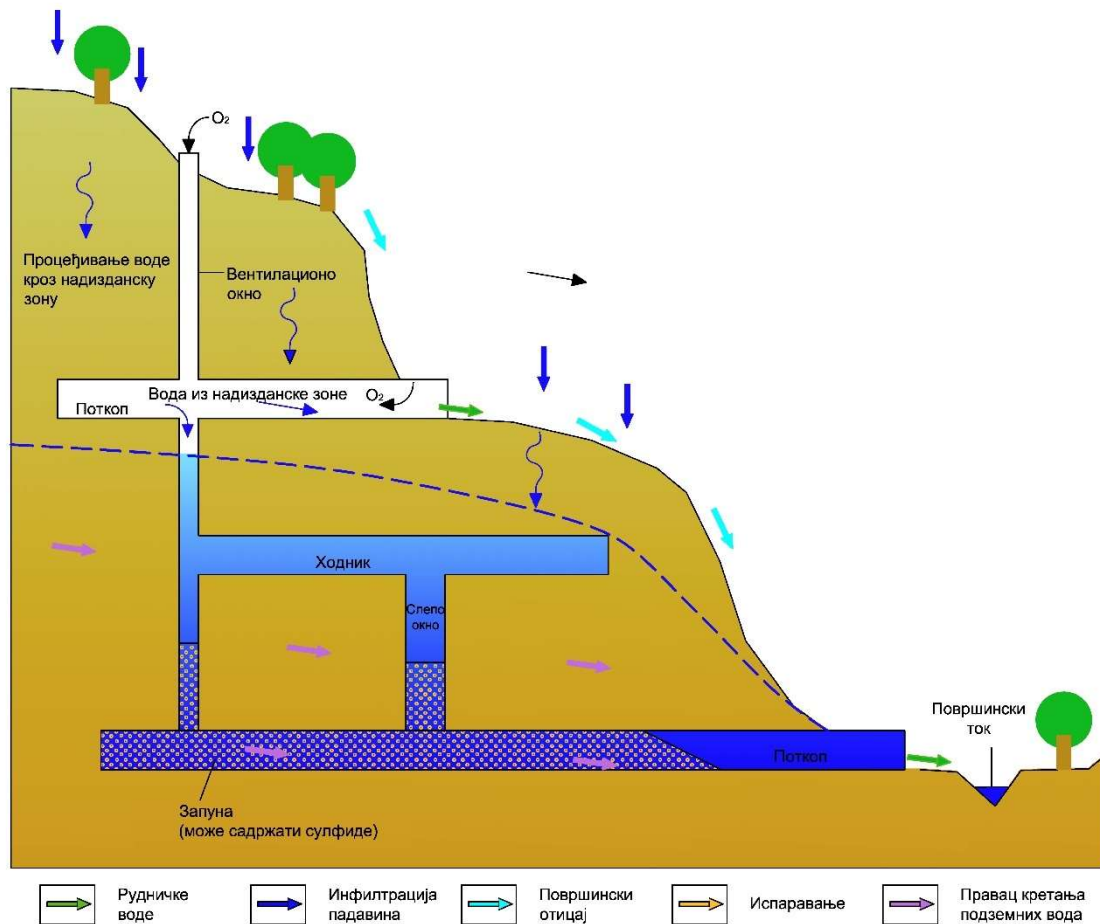
### 2.3.2. Утицај јамских радова

Након престанка експлоатације долази до делимичног или потпуног плављења подземних рударских радова. У зависности од примењене методе експлоатације долази до измене геомеханичких карактеристика стенске масе које се пре свега односе на повећање испуцалости и секундарне порозности. Напуштени јамски радови, чак и у условима када су запуњени, представљају привилеговане правце кретања подземних вода у оквиру којих су брзине циркулације знатно веће (често долази до турбулентног кретања) у односу на природне (Younger et al. 2002, Wolkersdorfer 2008). У временским оквирима, режим нивоа као и хемијског састава подземних вода може бити доста променљив током хидролошког циклуса. Такође, у оквиру потопљених рударских радова јавља се зоналност у саставу подземних вода (са дубином се повећава минерализација), која у одређеним случајевима може



довести до формирања конвективног тока који је условљен разликом у густини подземних вода (Wolkersdorfer et al. 2016).

Подземни рударски радови уобичајено се изводе у више хоризоната који су међусобно повезани хоризонталним, косим и вертикалним рударским радовима. У зависности од нивоа подземних вода део радова може бити потопљен, док неки делови могу бити изнад нивоа подземних вода (слика 2-9). У овим радовима, као и у онима који се налазе у зони осцилације нивоа подземних вода најбоље је развијен процес оксидације сулфидних минерала.



**Слика 2-9.** Шематски приказ формирања и истицања рудничких вода у зони напуштених јамских радова (модификовано према INAP 2009)

Често се у циљу обезбеђивања стабилности радова, као и услед смањења одлагалишта стенског материјала, јаловина користи за припрему материјала којим

се врши запуна јамских радова. Ова запуна може садржати сулфидне минерале и представљати средину за формирање киселих рудничких вода.

Уколико су радови изведени у стенама са пукотинском порозношћу, и ако се налазе изнад локалних ерозионих базиса, они углавном бивају делимично потопљени и практично представљају дренажне галерије. У оваквим условима процес оксидације је интензиван јер је омогућено обогаћивање воде кисеоником. Рудничке воде из подземних рударских радова најчешће из поткопа истичу у површинске токове, често мењајући њихов хемијски састав.

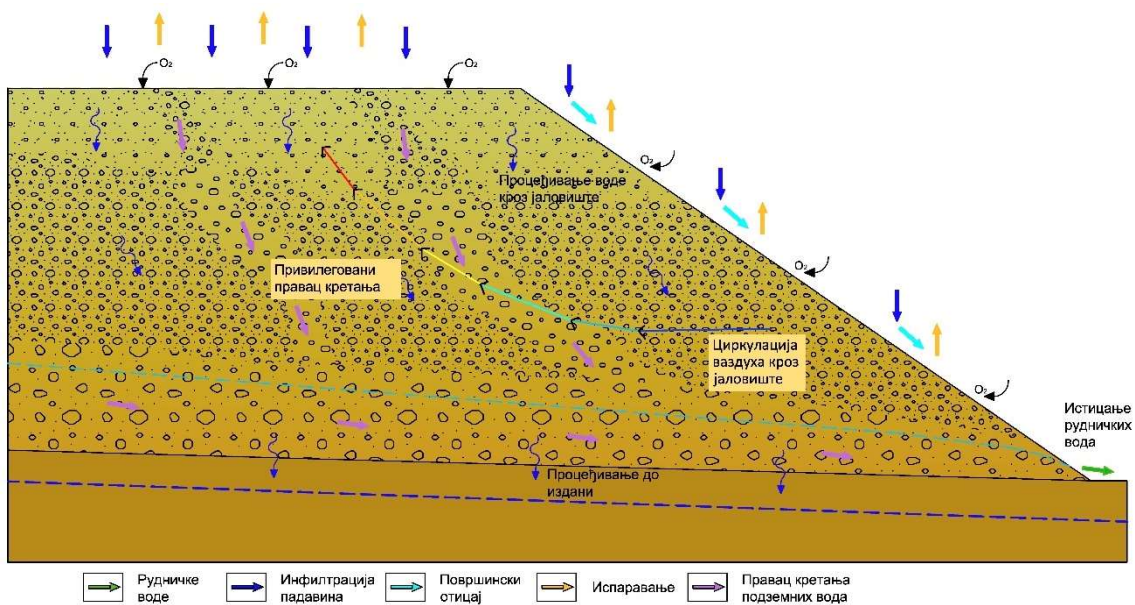
Најочигледнија последица мешања киселих рудничких вода са површинским токовима је формирање наранџастог талога од оксихидроксида и хидроксида гвожђа и повећање концентрације растворених метала у води (као што су гвожђе, кадмијум, цинк, бакар, олово). Талог формиран у речном кориту спречава продор сунчеве светлости, ометајући фотосинтезу код бентосних алги чиме се угрожава сама база ланца исхране. Такође, и у одсуству талога, повишене концентрације метала утичу на смањење популације риба и бескичмењака у површинским токовима (Younger et al. 2002, Church et al. 2007).

### 2.3.3. Површинске и подземне воде у подручју рудних јаловишта

Развојем површинских метода експлоатације лежишта са релативно ниским садржајем руде, током 20-ог века драстично је увећана количина јаловине у процесу рударења. Као пратилац развоја површинских копова формирана су одлагалишта стенског материјала великих размера која представљају посебан изазов за рекултивацију и ремедијацију.

Са аспекта утицаја на водне ресурсе разумевање хидрогеолошких и геохемијских процеса у оквиру јаловишта је од пресудног значаја. Основни фактори који утичу на хидрогеолошке карактеристике јаловишта су првенствено везани за његове физичке карактеристике. Оне су пре свега везане за гранулометријски састав и заступљеност и просторни распоред зона са везаним материјалом и растреситих

зона са нецементованим фрагментима (Smith and Beckie 2003, INAP 2009). У односу на наведене факторе начин одлагања јаловина има велики значај за хидрогеолошке карактеристике јаловишта након затварања рудника. Једна од најзаступљенијих метода је одлагање јаловине камионима приликом чега се формира зона са ситнијом гранулацијом при врху, док се крупнији материјал транспортује даље низ падину. На крају процеса формирано јаловиште се обично састоји од смене косих слојева (угао 33-37°) са крупнијом и ситнијом фракцијом (INAP 2009). Након затварања/напуштања рудника долази до формирања земљишног слоја и до раста вегетације, било природним путем или као мера рекултивације. Формиран земљишни слој такође има утицаја на процес инфилтрације и задржавања воде (слика 2-10).



**Слика 2-10.** Шематски приказ циркулације воде и ваздуха кроз рудно јаловиште (модификовано према INAP 2009, Amos et al. 2014)

У контексту вода, за јаловишта су карактеристичне две основне компоненте; површински отицај и присуство лебдеће издани. Када је формирана, издан у оквиру јаловишта се одликује израженим сезонским осцилацијама у нивоу подземних вода и њиховим кретањем у привилегованим правцима. У засићеној зони ови правци су везани за подручја са крупнијом растреситом фракцијом, а у надизданској зони за ситнију фракцију која садржи већи проценат влаге (Younger et al. 2002). У

незасићеној зони долази и до појаве циркулације подземних вода у макропорама, у којима је струјање каналисано и брзина циркулације је већа.

Брзина оксидације минерала и квалитет вода које се процеђују из јаловишта зависе од великог броја процеса, укључујући проток кисеоника и осталих гасова, транспорт топлоте, циркулација воде, сумпорно-киселински процеси и реакције неутрализације и микробиолошка активност (Amos et al. 2014). Транспорт ваздуха и топлоте и водопропусност јаловинског материјала стварају повољне услове за оксидацију сулфида, стога јаловишта могу представљати значајан извор *AMD*-а. На простору Србије формирање и процеђивање рудничких вода из јаловишта присутно је како код напуштених рударских радова (нпр. рудник Липа), тако и у оквиру активних рудника (рудници бакра у оквиру РТБ Бор). Један од најизраженијих примера драстичног погоршања квалитета површинских вода као последица мешања са процедурним водама из рудног јаловишта везан је за рудника бакра Церово (слика 2-11).



Слика 2-11. Рудно јаловиште рудника бакра Церово (фото Живановић В.)

#### 2.3.4. Површинске и подземне воде у подручју флотацијских јаловишта

Флотацијска јаловишта представљају један од највећих изазова везаних за контролу утицаја рударских активности на животну средину у зонама напуштених рудника. Количина флотацијске јаловине која се производи у свету се процењује на око 18 милијарди кубика годишње (Aswathanarayana 2003). Процене су да се на нивоу Европске уније на годишњем нивоу одлаже око 1,2 милијарде тона флотацијске јаловине (BRGM 2001). Као одговор на велике количине рударског отпада који настаје у процесу прераде руде и притиска на рударски индустрију да смањи негативна утицај на околину, развијене су нове савремене методе припреме и одлагања јаловине (густе пулпе, пасте и филтерски кек). Ове технике су значајно повећале опције које су на располагању при суочавању са изазовима одрживог развоја (Franks et al. 2011).

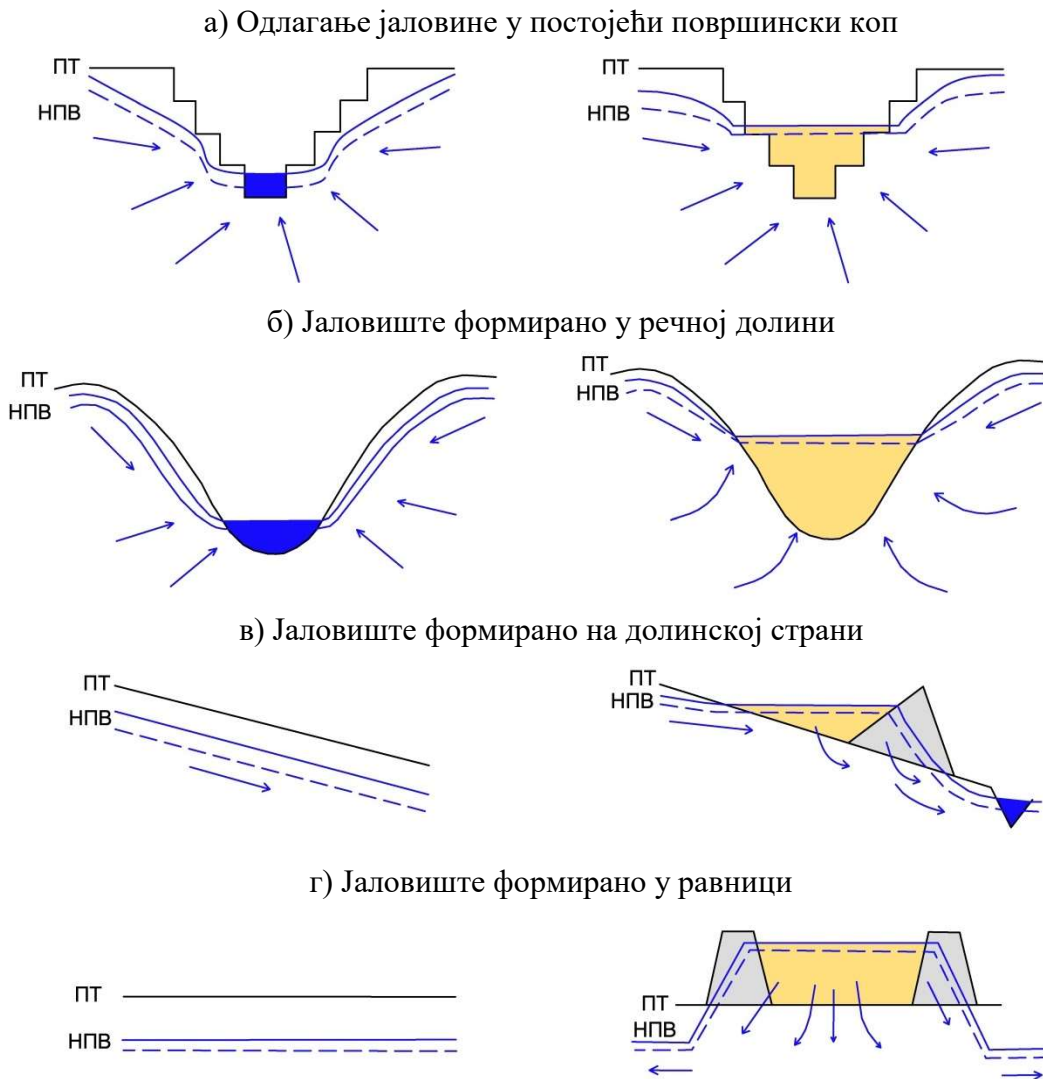
Одлагалишта флотацијске јаловине на животну средину негативно могу утицати на следеће начине (Ellis & Robertson 1999, Aswathanarayana 2003):

- Емисија загађујућих супстанци – у оквиру флотацијских јаловишта може доћи до формирања киселих рудничких вода, које заједно са хазардним супстанцама преосталим из процеса флотирања руде могу изазвати дугорочне (опоравак екосистема може трајати деценијама) нежељене последице на екосистеме низводно од јаловишта.
- Измена станишта – у зависности од величине рудника, флотацијска јаловишта могу зауимати значајну површину чиме долази до измене морфолошких карактеристика рељефа и нарушавања природних биљних и животињских станишта.
- Колапс и изливање јаловине – нарушавање структурне стабилности брана на флотацијским јаловиштима, било као последица земљотреса, обилних падавина или неадекватне израде и управљања, доводе до катастрофалних последица по биљни и животињски свет и квалитет воде и земљишта, а често и до директног губитка људских живота.

Са аспекта водних ресурса, поред погоршања квалитета површинских и подземних вода, флотацијска јаловишта у зависности од начина и услова одлагања могу утицати и на измену режима нивоа подземних вода и брзине и правца кретања (слика 2-12).

### Природни ток подземних вода

### Струјна слика након формирања јаловишта



**Слика 2-12.** Шематски приказ теоријске струјне слике у зони јаловишта пре и после одлагања. ПТ-површина терена, НПВ-ниво подземних вода (ЕС 2009)

У зависности од процеса прераде руде и врсте минералне сировине разликују се и карактеристике флотацијске јаловине, али у највећем броју случајева она представља мешавину воде, процесних једињења и честица гранулације у опсегу песак-прашина. Флотацијска јаловишта су нешто хомогенијег састава у односу на одлагалишта рудне јаловине, са преовлађујућом ситнијом фракцијом и одсуством крупних блокова. Зависно од садржаја воде разликују се начини транспорта и одлагања флотацијске јаловине. Код металичних лежишта, у минералном саставу преовлађују силикатни минерали, уз које се јављају сулфиди и оксиди (Aswathanarayana 2003).

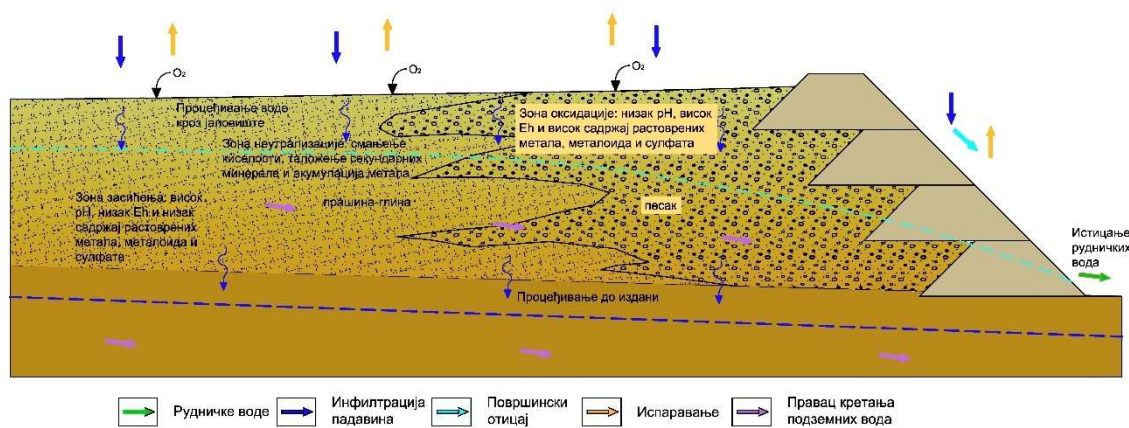
Код енергетских минералних сировина, тачније угљева, уз механичку сепарацију заступљени су процеси чишћења и флотирања угља којима се повећава удео сагорљивог дела и смањује количина пепела. Млађи угљеви (лигнит, мрки) се чисте поступцима гравитацијске концентрације у води и тешкој средини, док се за старије угљеве (камени, антрацит) поред ових користе и процеси флотацијске концентрације (Кнежевић и др. 2014). Код процеса мокре сепарације или чишћења, као и приликом флотирања угља негативан утицај на животну средину је више изражен у односу на процес сувог механичког чишћења угља (Миладиновић 2015).

Најзаступљенији вид одлагања флотацијске јаловине је путем израде брана (најчешће преграђивањем долина) и формирањем флотацијских језера у које се јаловина допрема цевоводом у форми муља. Испумпавањем јаловине долази до сеграгације материјала на начин да се ситнији материјал таложи даље, а крупнија фракција ближе месту истицања. У односу на стандардне земљане бране код акумулација површинских вода, бране флотацијских јаловишта се разликују у томе што се оне најчешће надвисују и дограђују са развојем јаловишта и повећањем количине депонованог материјала. Код формирања брана постоје три основна начина израде тј. типа: узводни, низводни и централни (UNEP 1991).

Код активних јаловишта формира се водена површина (језеро), које успорава оксидацију сулфида умањујући доток кисеоника, док је код старих, издренираних јаловишта процес оксидације интензиван.

Одржавање флотацијске јаловине под водом се показало као једна од успешнијих мера за контролу AMD-а и након престанка рада рудника (Lottermoser 2007). Са друге стране одржавање сталне водене површине након затварања рудника може изискивати значајна улагања. Ова мера за контролу загађивања је тешко остварива на дужи рок, посебно када су услови такви да није могуће формирање и одржавање језера природним путем. Поред овог, постоје и друге методе за рекултивацију јаловишта као што су прекривање јаловишта водонепоропусним слојем са високим садржајем влаге, успостављање мочварног екосистема, подизање нивоа подземних вода тако да материјал који садржи сулфиде буде у zasiћеној зони (ЕС 2009), али је тематика везана за мере ублажавања негативних последица изван оквира дисертације.

Шематски приказ хидрогеолошких и геохемијских услова формирања и циркулације воде у оквиру флотацијског јаловишта приказан је на слици 2-13.



**Слика 2-13.** Пuteви циркулације воде и основни процеси формирања хемијског састава рудничких вода (према Dold & Fontbote 2001 и Lottermoser 2007) код напуштеног флотацијског јаловишта без слободне водене површине. Доле - фотографија издренираног флотацијског јаловишта „Руднице“ формираног у алувијону Ибра (фото Живановић В.)



Код напуштених флотацијских јаловишта развија се вертикална зоналност између геохемијских средина. Ова појава је поред минералношког састава условљена и типом климата тј. односом падавина и евапотранспирације и положајем нивоа подземних вода. Dold & Fontbote (2001) наводе да у условима у којим преовлађују падавине елементи и једињења ослобођени у процесу оксидације мигрирају на доле ка засићеној зони, док се код климата у ком доминира евапотранспирација миграција елемената врши на горе, под дејством капиларних сила.

На приказаној шеми (слика 2-13) издвајају се три геохемијске средине. Изнад нивоа подземних вода налази се зона оксидације обogaћена кисеоником и водом која се инфилтрира. Код јаловишта која садрже сулфидне минерале у овој зони долази до њихове оксидације и до формирања киселих рудничких вода. У појасу око нивоа подземних вода налази се зона неутрализације у оквиру које долази до таложења секундарних минерала и до акумулације метала. Трећу зону представља део јаловишта испод нивоа подземних вода. У оквиру засићене зоне долази до пораста рН вредности и до смањења садржаја кисеоника и оксидо-редукционог потенцијала (Dold & Fontbote 2001, Lottermoser 2007).

У зависности од природног нивоа подземних вода, као и водопрпусности подлоге тј. присуства водонепропусног екрана зависи и степен интеракције између вода у јаловишту и издани. Поред подземног отицаја истицање рудничких вода из јаловишта се одвија процеђивањем кроз брану, и у појединим случајевима преливањем преко бране. У аридним климатским условима дренарање је углавном базирано на испаравању, приликом чега на површини флотацијског јаловишта долази до формирања слоја тј. коре од секундарних минерала.

Акциденти везани за нагло изливање јаловине након колапса брана често су изазвани екстремним временским условима тј. обилним падавинама и топљењем снега. Имајући у виду значајне количине јаловине које се производе у свети и активне климатске промене, за очекивати је да ће екстремне временске непогоде све чешће узроковати изливања флотацијске јаловине (Kossoff et al. 2014). Пример оваквог сценарија на простору Србије забележен је у мају 2014, када је након

интензивних падавина и катастрофалних поплава дошло до пуцања бране флотацијског јаловишта напуштеног рудника антимона „Столице“. Изливањем јаловине у реку Корениту драстично је нарушен њен квалитет дуж целог тока, а талас загађења је преко Јадра дошао и до Саве.

Поред примера новијег датума, 1974. године дошло је до активирања понора у оквиру флотацијског јаловишта „Ваља Фундата“ у близини Мајданпека, формираног на карбонатној подлози. Том приликом дошло је до инфилтрације неколико милиона кубика флотацијске јаловине у карстну издан, а преко ње директно у реку Велики Пек (Milanović et al. 2015). Средином 90-их година XX века, такође на простору Мајданпека дошло је до колапса бране флотацијског јаловишта „Шашки поток“ праћено изливањем око 100 000 m<sup>3</sup> јаловине и велике количине рудничких вода у Шашку, а затим даље у Поречку реку и Дунав. Ово је изазвало загађење подземних вода и угрожавање изворишта за водоснабдевање Доњег Милановца и неколико околних насеља (Dragišić et al. 1997).

### 3. ПРЕГЛЕД ВОДНИХ РЕСУРСА РЕПУБЛИКЕ СРБИЈЕ

Стратешким опредељењем да постане чланица Европске уније, иако се налази у раној фази припрема у области животне средине, Србија је кренула правцем усвајања принципа и метода управљања и заштите водних ресурса<sup>3</sup> према узору на праксу у земљама ЕУ. У циљу обезбеђивања довољних количина воде одговарајућег квалитета за будуће генерације, а као одговор на растуће притиске којима су водни ресурси изложени у свим деловима света (као последица растуће популације и све већих потреба за водом), Европска унија је почетком новог миленијума донела Оквирну директиву о води<sup>4</sup> (у даљем тексту *WFD*) и више „ћерки директива“, које представљају јединствен законодавни оквир на простору Европе.

Оквирна директива о води уводи интегрисани и координирани приступ управљању водним ресурсима, који сагледава површинску и подземну воду и узима у обзир повезаност утицаја одређених активности, повезаност квалитета и квантитета воде, као и намену и коришћење земљишта; притом уважавајући природне хидролошке целине кроз концепт управљања на нивоу сливова (АЗЖС 2015а). Оквирном директивом о водама се уводе појмови као што су „статус воде“ у односу на хемијске и биолошке показатеље и „водно тело“ површинских или подземних вода. На простору Србије издвајање водних тела површинских и подземних вода извршено је на основу *Правилника о утврђивању водних тела површинских и подземних вода* („Сл. Гласник РС“, бр. 96/2010). Такође, директивом се предвиђа да државе (кроз законске и подзаконске акте) успоставе систем класификације вода и да спроведу неопходне мере како би се спречило даље погоршање квалитета. Ово представља предуслов за даље унапређење, са крајњим циљем који подразумева успостављање најмање доброг статуса за сва водна тела на простору ЕУ.

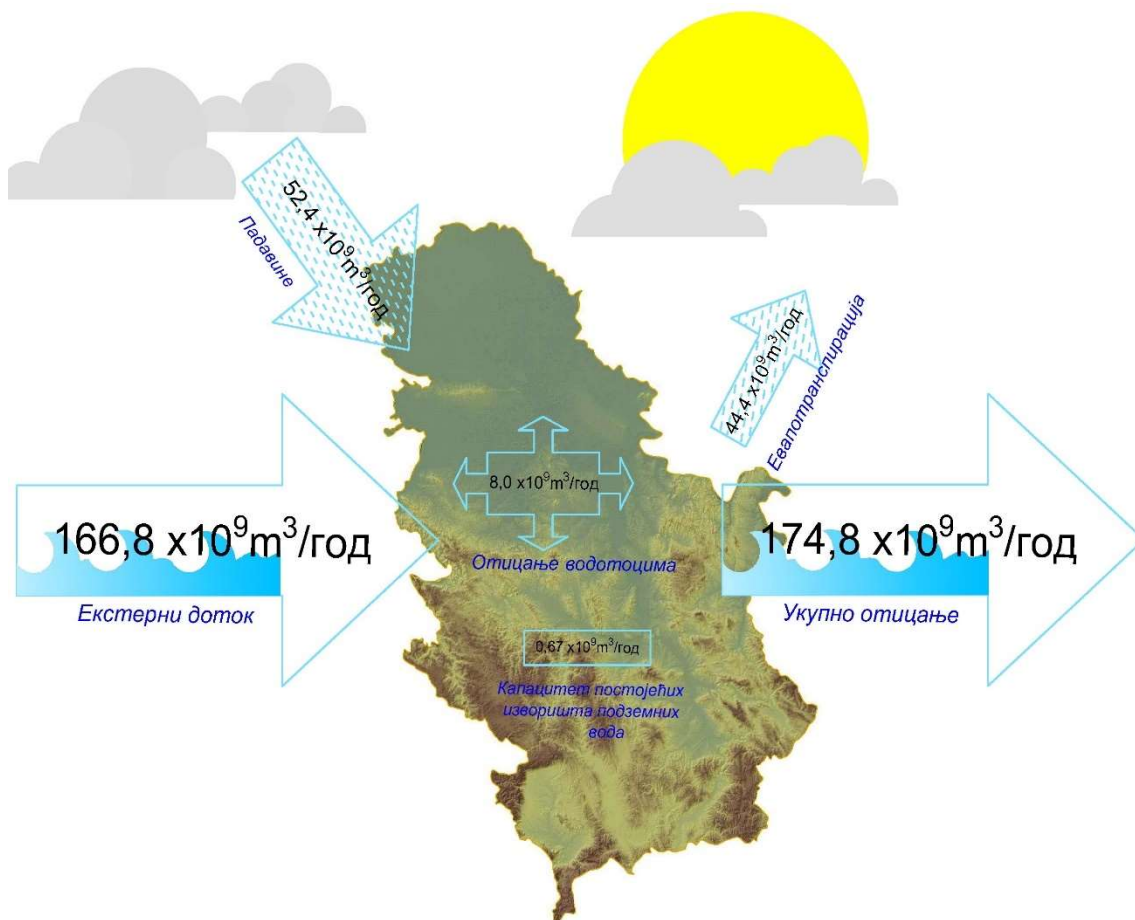
---

<sup>3</sup>*Расположиве количине вода, или оне које могу бити расположиве, за употребу у довољној количини и са потребним квалитетом, на некој локацији (Драгишић и Поломчић 2009).*

<sup>4</sup>*Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy.*

*WFD* прописује и обавезу држава да изврше анализу карактеристика свих водних подручја, утврде антропогени утицај и притиске на квантитет (ниво експлоатације) и квалитет воде (Стевановић 2011). У том контексту идентификација напуштених рударских радова и процена утицаја на водне ресурсе представља пресек између Оквирне директиве о водама и Директиве о рударском отпаду.

Основни елементи биланса вода одређеног подручја укључују: падавине, површински и подземни отицај и евапотранспирацију. За територију Србије, на основу података прикупљених за израду водопривредне основе Србије (ВОС) и допуњених за период 2000-2011, квантификовани елементи укупног биланса вода шематски су приказани на слици 3-1.



Слика 3-1. Биланс вода републике Србије за период 2000-2011 (АЗЖС 2015б)

На основу приказаног биланса може се рећи да се на простору Србије на рачун падавина формира око 8 милијарди  $m^3$  воде, која у највећој мери учествује у формирању површинских токова који доприносе укупном отицају са територије наше земље.

У даљем тексту ће бити приказан преглед основних квантитативних и квалитативних карактеристика водних ресурса на простору Србије на основу постојећих података, а у обиму релевантном за циљ и предмет дисертације.

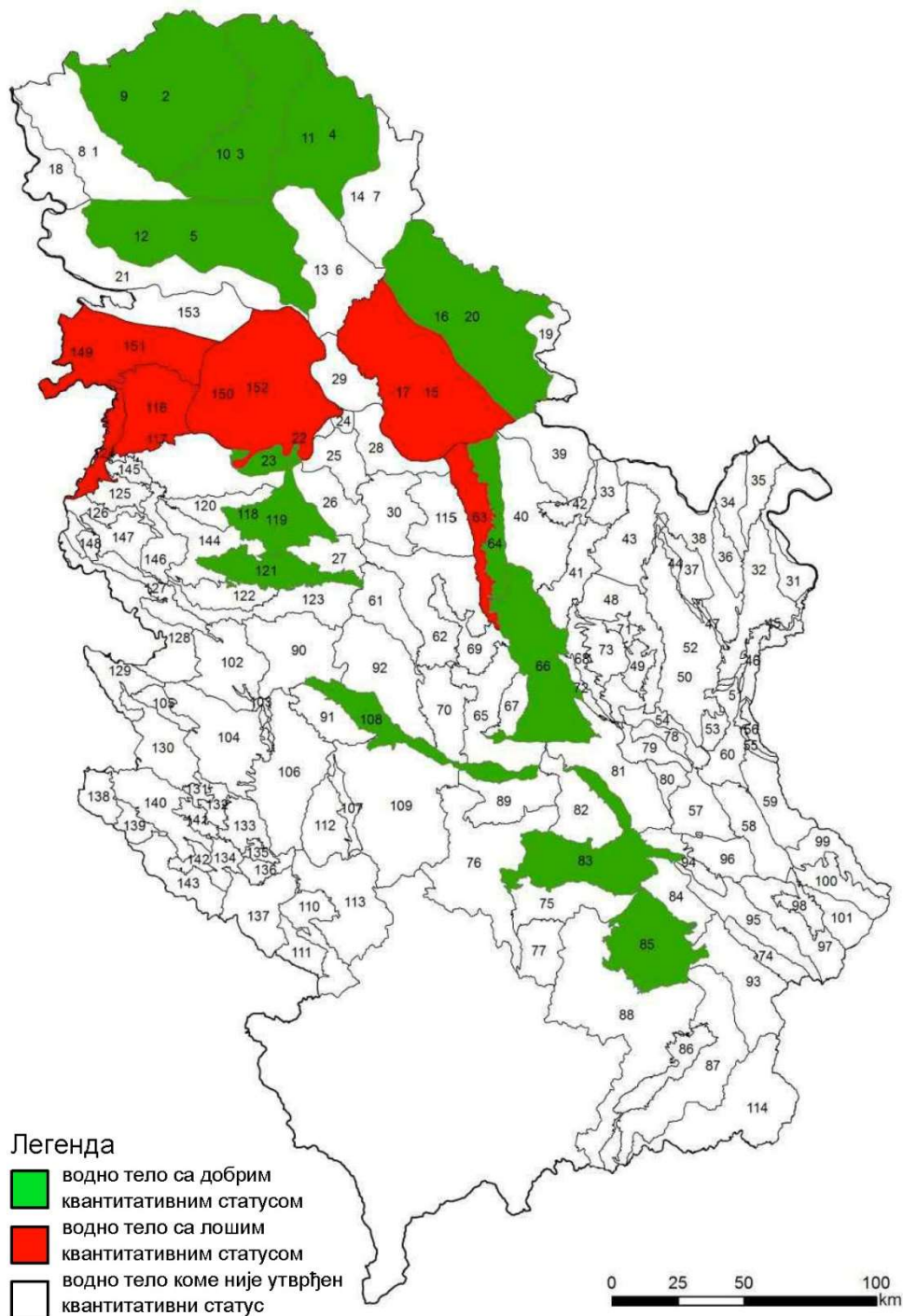
### 3.1. Подземне воде

На територији Србије се за потребе водоснабдевања насеља и градова користе подземне воде (пре свега из алувијалних наслага дуж долина већих река) са учешћем од око 75 % у укупним количинама пијаће воде, при чему су процењене могућности коришћења још веће (Стевановић 2011). Са друге стране, посматрано из угла укупно захваћених количина воде, за потребе индустрије (без удела за хидроенергију), пољопривреде и водоснабдевања, значајно преовлађује експлоатација површинских вода са учешћем од 87 % (АЗЖС 2015б).

С обзиром да је степен истражености подземних вода релативно низак, варирају и процене о укупним расположивим количинама, па су тако у зависности од извора података процењене количине од 65-100  $m^3/s$ . Према Стратегији за управљање водама на територији републике Србије (ИЈЧ 2015а) укупан ресурс подземних вода у Србији без Косова и Метохије износи око 65  $m^3/s$ , од којих се тренутно користи око 23  $m^3/s$ .

У склопу имплементације смерница из оквирне директиве о водама, у Републици Србији укупно су издвојена 153 водна тела подземних вода, од којих 152 припадају Дунавском (Црноморском) сливу, а једно Егејском сливу. Величина појединачних издвојених водних тела се креће у распону од 35  $km^2$  до 2.643  $km^2$  (ИЈЧ 2015а).

Од издвојених 153 подземних водних тела подаци о квантитативном статусу (према „Правилнику о параметрима еколошког и хемијског статуса површинских вода и параметрима хемијског и квантитативног статуса подземних вода“ - Сл. Гласник РС, бр. 74/2014) су доступни за 19 водних тела (слика 3-2).



Слика 3-2. Квантитативни статус водних тела за 2013. годину (АЗЖС 2015б)

Од 19 разматраних подземних водних тела, према извештају РХМЗ Србије из 2014, слаб статус је констатован на 6 водних тела подземних вода (АЗЖС 2015б).

У односу на издвојена водна тела изражен је значајан недостатак у подацима и осматрањима основних елемената режима подземних вода. Осматрачки објекти мреже станица подземних вода налазе се у оквиру 31 водног тела, а и међу онима који су предмет мониторинга има водних тела која су неравномерно покривена или са недовољним бројем станица.

У стратегији управљања водама износи се податак да само 18 водних тела (12% од укупног броја) има слаб статус, при чему већину (њих 12) чине водна тела у Војводини. Као основни разлог слабог квантитативног статуса наводе се надексплоатација подземних вода и неконтролисана експлоатација шљунка посебно у долини Мораве (ИЈЧ 2015а).

У погледу квалитативног статуса, према Агенцији за заштиту животне средине доступни су подаци са 56 мерних станица (пијезометара), од којих је већина везана за интергрануларну издан у квартарним и неогеним наслагама у подручју Војводине и у алувијонима значајних водотока. Постојећа мрежа станица за мониторинг квалитета подземних вода на територији Србије у погледу броја објеката и њиховог распореда није довољна да би се добила адекватна процена квалитативног статуса подземних воданих тела.

Са друге стране према подацима наведеним у Стратегији управљања водама (ИЈЧ 2015), резултати оцене хемијског статуса подземних вода показују да је 7 водних тела у слабом хемијском статусу, 27 водних тела је вероватно у слабом хемијском статусу, док се за 119 водних тела подземних вода (око 77 %) сматра да су у добром статусу (табела 3-1).

**Табела 3-1.** Карактеризација водних тела подземних вода у Србији према хемијском ризику (ИЈЧ 2015а)

Водна тела	Водна подручја						
	Бачка и Банат	Срем	Сава	Београд	Морава	Доњи Дунав	Укупно Србија
У ризику	0	0	2	1	2	2	7
Вероватно у ризику	2	1	5	3	6	10	27
Вероватно није у ризику	10	2	25	5	36	16	94
Није у ризику	9	2	1	0	11	2	25
<b>Укупно</b>	<b>21</b>	<b>5</b>	<b>33</b>	<b>9</b>	<b>55</b>	<b>30</b>	<b>153</b>

Овде треба напоменути да су у току активности на узорковања подземних вода са постојећих изворишта за јавно водоснабдевање, као и за проширење постојеће националне мреже за мониторинг подземних вода, чиме ће се добити мало потпунија слика о стању квалитета подземних вода.

### 3.2. Површинске воде

Највећи део територије Србије припада сливу Црног Мора односно сливу Дунава (92 % површине). Са територије Србије поред црноморског, воде гравитирају и према Јадранском и Егејском мору. Према подацима из Водопривредне основе Србије (ВОС) водотоцима на територију Србије дотиче 162,5 милијарди  $m^3$  воде, а на рачун падавина у току године још око 65 милијарди  $m^3$ , од којих око 25 % одлази на отицај а остатак на евапотранспирацију. Укупан отицај са простора Србије је процењен на око 178,5 милијарди  $m^3$ .

Водоснабдевање становништва површинским водама се врши из „живог“ тока или из акумулација у количини од око 6,5  $m^3/s$ . На територији Републике Србије за потребе индустрије, укључујући и термоенергетске комплексе који за хлађење користе рецикулационе системе, 1991. године користило око 613 милиона  $m^3$  воде (ВОС). Од тада бележи се тренд драстичног опадања потрошње у индустрији, па је тако према подацима за 2012. количина захваћене воде за индустрију износила око 90 милиона  $m^3$ , од којих су 30 % чиниле подземне воде (ИЈЧ 2015а). Захваћене

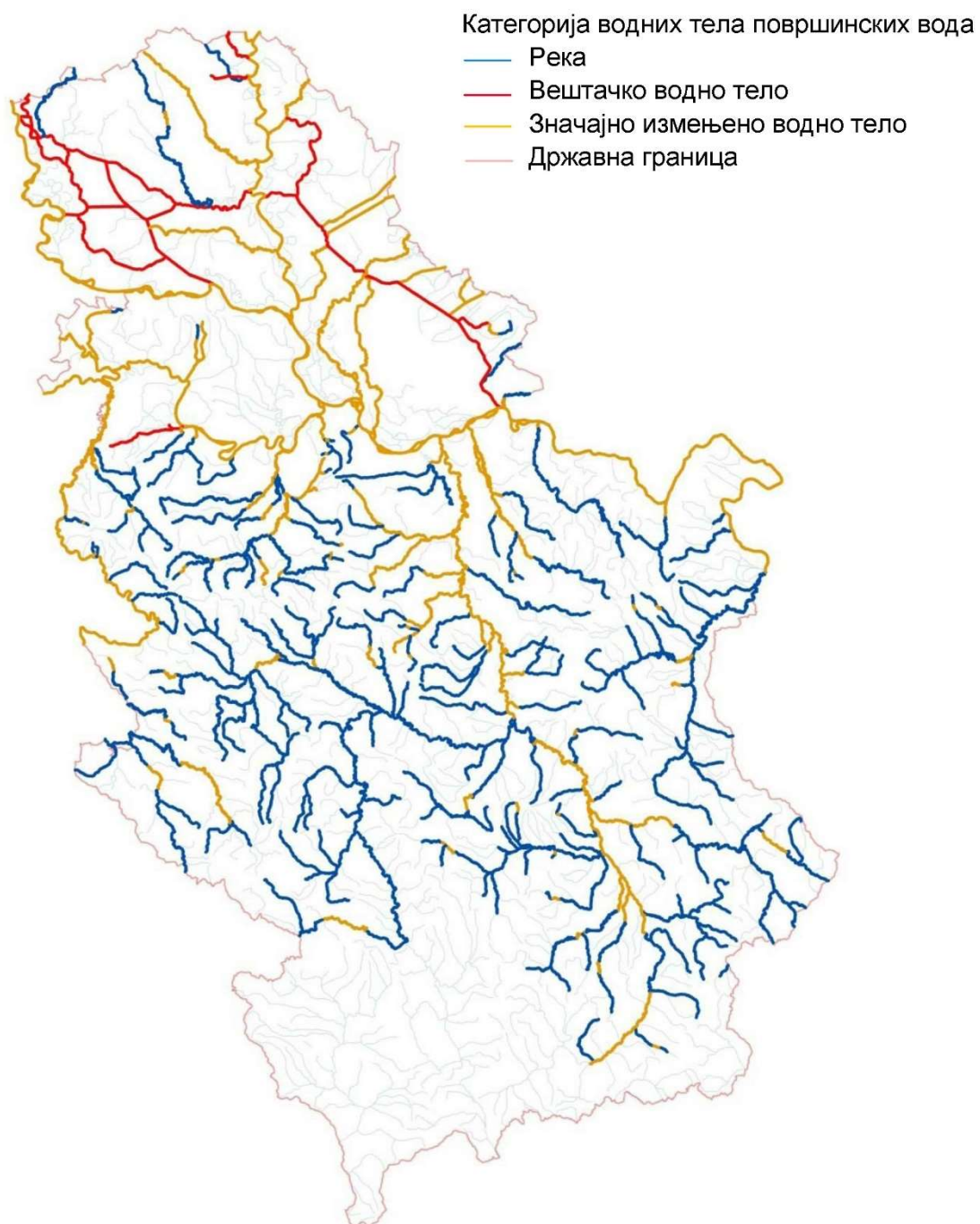


количине воде за наводњавање обрадивих површина износе око 141 милион m<sup>3</sup> годишње, од чега се претежно (око 90 %) користи површинска вода (ИЈЧ 2015а).

У циљу управљања водама простор Србије је подељен на водна тела, која су утврђена на водотоцима са површином слива већом од 100 km<sup>2</sup> и на свим значајним међудржавним водотоцима без обзира на величину слива (слика 3-3).

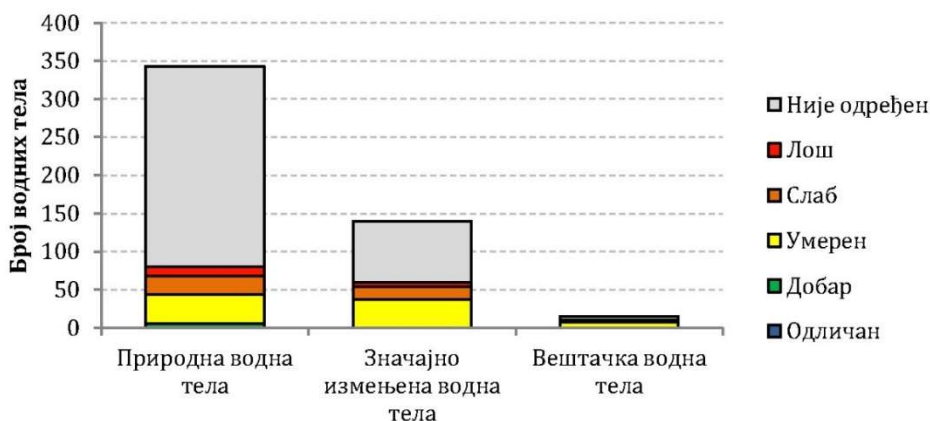
Укупно је утврђено 499 водних тела, од чега 492 на сливу Дунава (ИЈЧ 2015а). У категорију природних водних тела (река и језера) сврстано је 343 водна тела површинских вода; у категорију значајно измењених водних тела (акумулације, регулисани водотоци) сврстано је 140, док је у категорију вештачких водних тела (канални) сврстано 15 водних тела површинских вода (АЗЖС 2015а).

Поред хемијског и биолошког статуса, за природна водна тела површинских вода уведен је појам „еколошки статус“ који се дефинише на основу: биолошких, хидроморфолошких и физичко-хемијских елемената. Уз еколошки статус уведен је и појам „еколошки потенцијал“ који се одређује за значајно измењена и вештачка водна тела.



Слика 3-3. Приказ водних тела површинских вода према категорији  
(АЗЖС 2015а)

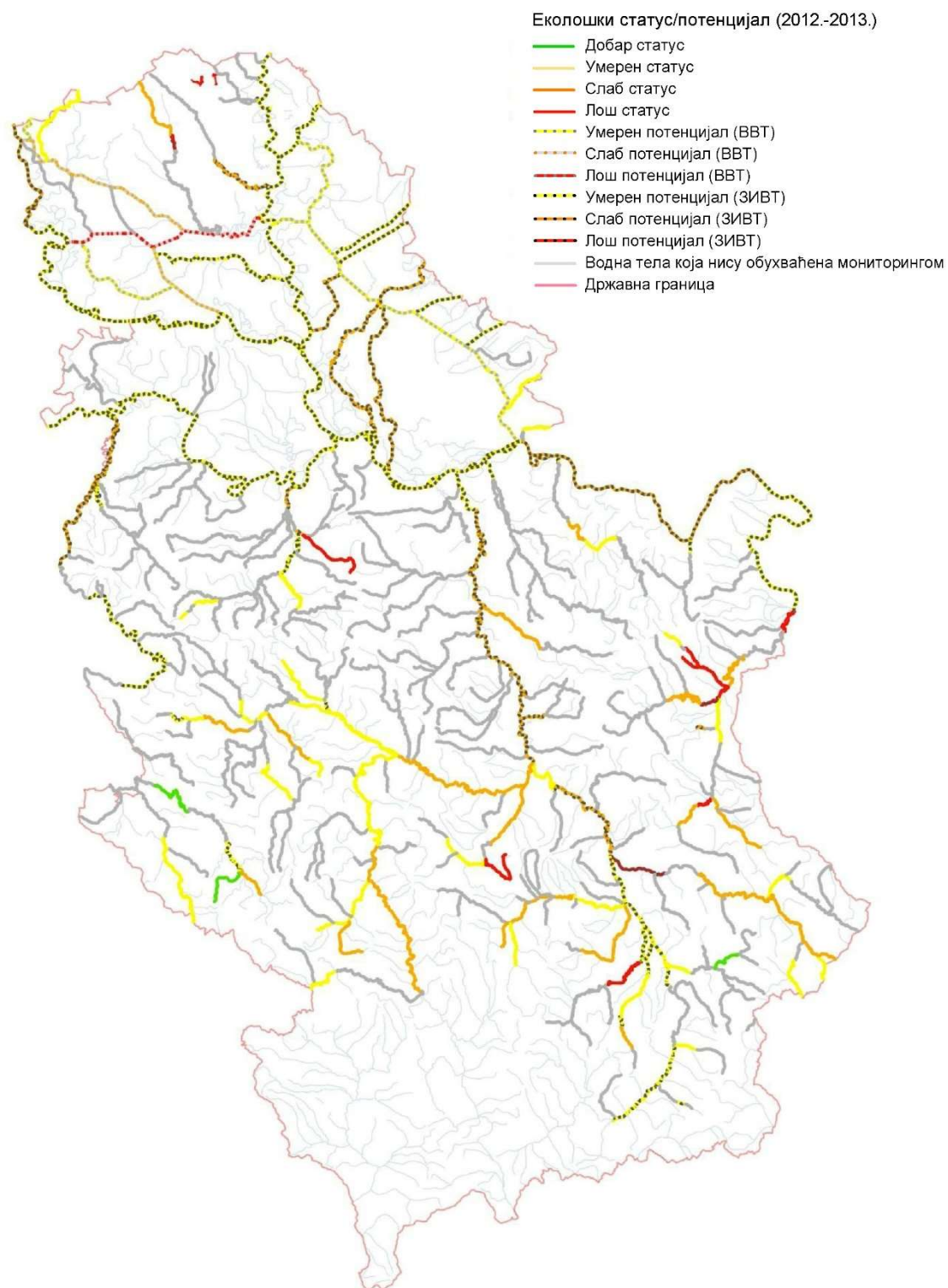
Према подацима (АЗЖС 2015а) мониторингом статуса у периоду 2012-2014 године обухваћено је 23 % природних, 42 % значајно измењених и 67 % вештачких водних тела површинских вода (слика 3-4).



**Слика 3-4.** Еколошки статус природних водних тела и еколошки потенцијал значајно измењених и вештачких водних тела у Србији, обухваћених мониторингом статуса у периоду 2012.-2014.г. (АЗЖС 2015а)

Од природних водних тела обухваћених мониторингом највећи број је имао умерен статус, док је добар еколошки статус утврђен код њих пет. У категорији значајно измењених и вештачких водних тела површинских вода обухваћених мониторингом добар и бољи еколошки потенцијал нису утврђени (АЗЖС 2015а).

Посматрајући водна тела река може се констатовати да је свега 1% од оних која су обухваћена мониторингом има добар еколошки статус (слика 3-5), док је код водних тела језера ситуација још лошија (АЗЖС 2015а).

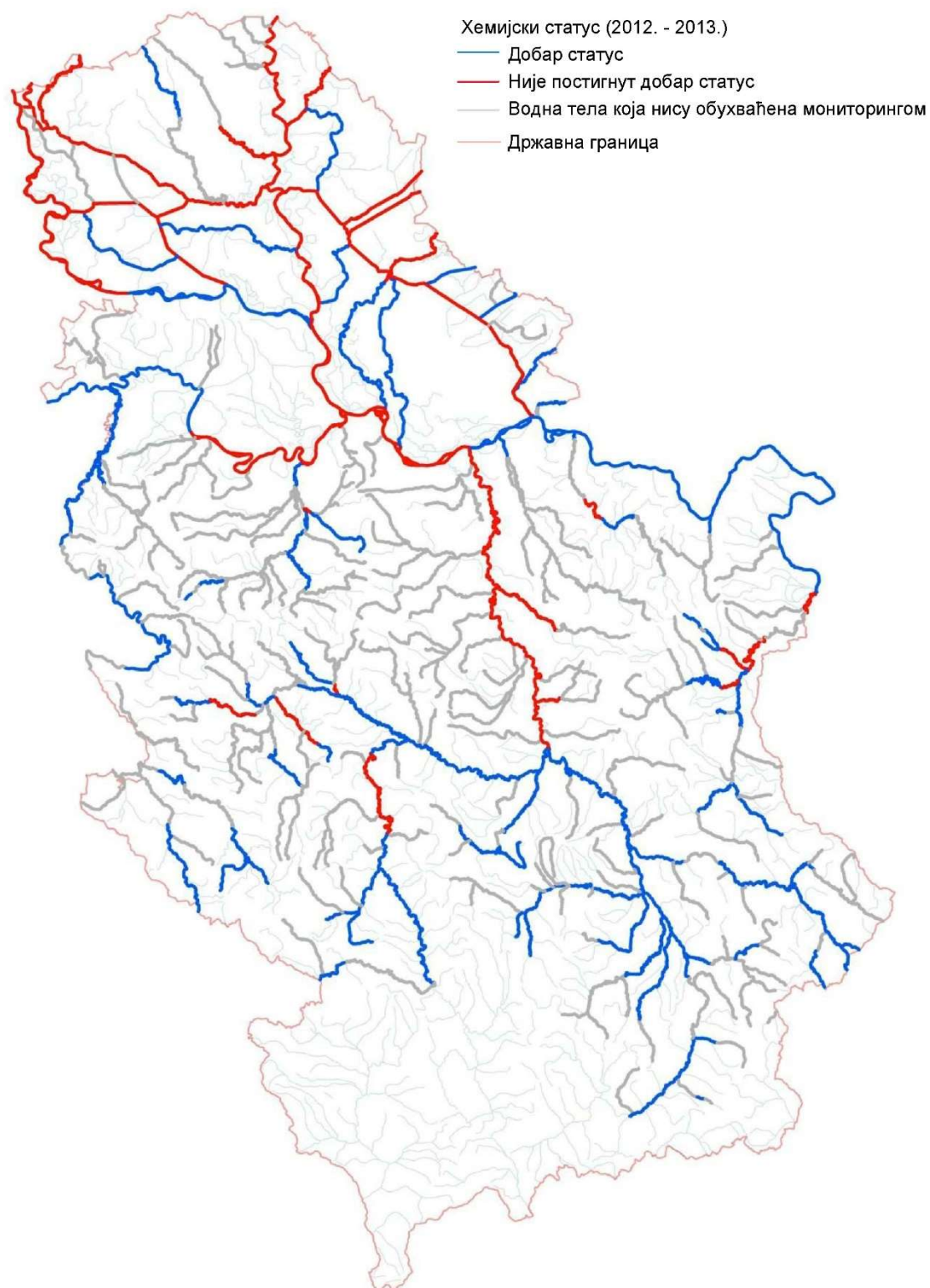


Слика 3-5. Еколошки статус/потенцијал водних тела површинских вода Србије у периоду 2012.-2013.г. (АЗЖС 2015а)

Хемијски статус површинских вода одређује се преко присуства приоритетних и приоритетно-хазардних супстанци у површинским водама из *Уредбе о граничним вредностима приоритетних и приоритетних хазардних супстанци које загађују површинске воде и роковима за њихово достизање* (Сл. гласник РС, бр. 24/2014). Уколико је садржај барем једне хазардне супстанце изнад граничне вредности прописане уредбом, сматра се да „није постигнут добар статус“ у односу на стандарде квалитета животне средине (слика 3-6).

Према наводима Агенције за заштиту животне средине (АЗЖС 2015а), хемијски статус је у 2012. години одређен за 94 водна тела површинских вода (водотока), од тога је *добар* статус утврђен код 65% и *није постигнут добар статус* код 35% водна тела. Од параметара који се налазе у концентracијама изнад прописаних граничних вредности најчешће се јавља никл, а за њим олово и кадмијум.

Прегледом постојећих података може се констатовати да је постојећа мрежа за мониторинг водних тела површинских и подземних вода на простору Србије неадекватна и недовољна за правилно сагледавање и праћење стања водних ресурса. Степен поузданости постојећих података о хемијском и еколошком статусу је од стране Агенције за заштиту животне средине процењен као средњи. Ова процена је изнета на основу броја испитиваних параметара и у односу на учесталост испитивања која је нижа од предвиђене. Такође, није успостављен јединствени регистар потенцијалних загађивача и није извршено адекватно сагледавање извора притисака на подземне и површинске воде. Изнете чињенице указују на неопходност значајних будућих улагања и истраживања на пољу мониторинга и управљања водним ресурсима на територији Србије.



Слика 3-6. Хемијски статус површинских водних тела за 2012. годину  
(АЗЖС 2015а)

#### 4. АНАЛИЗА РИЗИКА

Анализа ризика је систематски приступ у анализи одређене ситуације или проблема, која за циљ има стварање што објективнијих подлога за доношење одлука. Овај концепт се примењује у великом броју дисциплина, а нашао је широку примену и у области заштите животне средине и процене утицаја објеката на здравље људи, биотоп и биоценозу.

Један од начина за анализу утицаја рударске активности на различите медије (воду, ваздух, земљиште, флору и фауну, људско здравље итд.) представља анализа ризика. Ризик од загађивања се карактерише кроз вероватноћу да до загађивања дође и последицу које то загађење изазива. Већа вероватноћа и већа последица утичу на повећање укупног ризика. Генерално, анализа ризика се састоји од издвајања хазарда, процене тежине и вероватноће последица и процене ризика у оквиру које се резултати претходних фаза интегришу у форму ризика (Troldborg 2010).

##### 4.1. Појам и дефиниција ризика

Терминологија везана за анализу ризика је релативно нова и још увек се развија. Различите дефиниције ризика постоје у зависности од области и контекста у оквиру којих се разматрају. Детаљан преглед терминологије везане за концепт ризика са дефиницијама појмова дат је у извештају Интернационалног програма за хемијску безбедност (енгл. *International Programme on Chemical Safety, IPCS*) израђеног под окриљем Светске здравствене организације (IPCS 2004).

Прве значајније референце из области анализе ризика појављују се 80-тих година XX века, од којих су најважније публикације Краљевског друштва из Лондона (Royal Society 1983) и Америчке агенције за заштиту животне средине (US EPA 1984), којима су постављене основе анализе и процене ризика.

Краљевско друштво из Лондона појам ризика дефинише као: *вероватноћа да дође до штете као последица догађаја или процеса, у току одређеног временског периода* (Royal Society 1992). Драгишић и Поломчић (2009) појам ризик дефинишу као: *вероватноћа неповољног догађаја или зоне ризика, одређена на основу хазарда и рањивости животне средине*.

Са техничког аспекта ризик се дефинише преко две променљиве - вероватноће да дође до појаве штете и обима те штете (Royal Society 1992). Уобичајена анализа ризика за циљ има процену вероватноће да до неког будућег догађаја дође, као и разматрање евентуалних последица. Код анализе ризика које за предмет имају контаминирани локације, већ је дошло до загађења, па се анализа ризика своди на анализу последица таквих догађаја. Приликом анализе ризика везаних за експлоатацију минералних сировина заступљена су оба приступа, у зависности од тога да ли се анализа врши у фази истраживања лежишта, у фази експлоатације или затварања рударских радова. За фазу истраживања је карактеристична анализа ризика која обухвата вероватноћу да дође до нежељених ефеката, док су у фази експлоатације присутна оба сценарија. У фази затварања и рекултивације рударских радова анализа ризика се спроводи у циљу процене будућих ефеката мера за рекултивацију и санацију рударских објеката, и евентуалне последице уколико неке од мера не дају очекиване резултате.

Поред различитог временског оквира, ризик може бити разматран у локалној или регионалној размери, а у појединим случајевима и на нивоу држава. У локалној размери се обично ради детаљна анализа ризика угрожених локација. Такође, анализа може да обухвати тачкасте изворе загађивања (енгл. *point source*), или се може анализирати загађење проистекло од линијских и површинских извора загађивања. У области процене утицаја на животну средину често се врши анализа ризика у условима комбинованог утицај више извора загађујућих супстанци на нивоу слива (енгл. *risk assessment at the catchment scale*).

С обзиром на то да се у оквиру предметних истраживања концепт анализе ризика примењује у контексту процене негативног утицаја напуштених рударских радова



на квалитет водних ресурса, поред ризика, неопходно је и дефинисати основне појмове везане за сам процес загађивања.

Љешевић (2000) загађивање животне средине дефинише као деградацију која подразумева уношење материја и енергије у средину при чему се у организму човека и других живих бића дешавају патогене промене. Драгишић и Поломчић (2009) загађивање (енгл. *pollution*) дефинишу као директно или индиректно уношење загађујућих супстанци или топлоте у земљиште, воду или ваздух, односно животну средину, као резултат људске активности, у концентracијама које поменуте средине чине неподесним за даљу употребу. На бази наведених дефиниција, у оквиру предметне дисертације појам загађивање водних ресурса је разматран као процес уношења загађујућих супстанци у површинске и подземне воде. Живановић (2016) загађујуће супстанце или контаминанте подземних вода и хидрогеолошке средине уопште дефинише као *све органске и неорганске супстанце које негативно утичу на квалитет воде, најчешће антропогеног, али и природног порекла, које се уносе у надизданску и изданску зону, директно или индиректно, континуирано или повремено, а чије порекло се може раздвојити од основних састојака и особина које подземне воде и хидрогеолошка средина већ генетски поседују*. Загађујуће супстанце (енгл. *pollutants*) у конкретном случају су најчешће метали, сулфати, суспендоване материје. Оне воде порекло од извора загађујућих супстанци или у овом случају напуштених рударских радова. За разлику од загађивања, које представља процес, појам загађење се може схватити као присуство загађујућих супстанци у води, ваздуху, земљишту; у концентracијама које угрожавају људе и друга жива бића. Зона у којој су дисперговане загађујуће супстанце у површинским и подземним водама видно присутне или се њихова концентracија може измерити, и које воде порекло од одређеног извора загађујућих супстанци, назива се тело загађења или у англосаксонској литератури „*contaminant plume*“ (WMO 2012). Поред наведених, у домаћој легислативи у употреби је појам загађивач (енгл. *polluter*) који је према Закону о заштити животне средине дефинисан као физичко или правно лице које својом активношћу или неактивношћу загађује животну средину. Овако дефинисан одговара појму извор загађујућих супстанци, па је у том контексту и употребљаван у оквиру дисертације.

Анализа ризика од загађивања је најчешће конципирана тако да укључује анализу извора загађујућих супстанци, механизам њиховог транспорта и потенцијално угрожене групе. Уколико анализа ризика укључује процену утицаја на људско здравље, онда се назива анализа ризика по здравље (енгл. *human health risk assessment*). Када се односи на процену изгледа да животна средина буде нарушена под утицајем једног или више извора загађујућих супстанци или процеса (нпр. хазардне супстанце, промена рељефа, климатске промене), онда је то анализа еколошког ризика (US EPA 2017b) или енгл. „*ecological risk assessment*“. Анализа еколошког ризика је активност у којој се процењују изгледи за негативне еколошке ефекте да могу настати или се јављају као резултат изложености једном или више стресора<sup>5</sup> (US EPA 1992a). Процес анализе еколошког ризика се користи за систематично евалуирање података, информација и претпоставки и њихових неодређености, у циљу предвиђања узрочних веза између загађивача и еколошких ефеката на начин и у облику који је подесан за доношење одлука (US EPA 1998). У студијама везаним за рударске активности присутне су и анализе ризика по здравље људи као и анализе еколошког ризика.

У ранијим фазама развоја концепта и метода за анализу ризика, агенције за заштиту животне средине и друга регулаторна тела су имала праксу да посматрају површинске и подземне воде искључиво као медије за транспорт загађујућих супстанци до рецептора (најчешће људи или флора и фауна). Даљим развојем концепта ризика и његовом применом у домену водних ресурса, површинске и подземне воде су, поред улоге које имају у транспорту загађујућих супстанци, почеле да се посматрају и као рецептори, односно објекат анализе ризика (Butler 1998, Rees 2002, Zwahlen 2004, US EPA 2007a). У односу на основна два типа, анализа ризика од загађивања водних ресурса се може посматрати као анализа еколошког ризика, са обзиром да површинске и подземне воде представљају саставне делове животне средине.

---

<sup>5</sup>Физички, хемијски или биолошки субјекти који могу изазвати штетне ефекте на екосистеме или здравље људи.

Са аспекта методологије, постоје две основне групе метода за анализу ризика: квалитативне и квантитативне (Linkov et al. 2009); у оквиру којих се карактеризација ризика базира на квалитативним и/или квантитативним критеријумима.

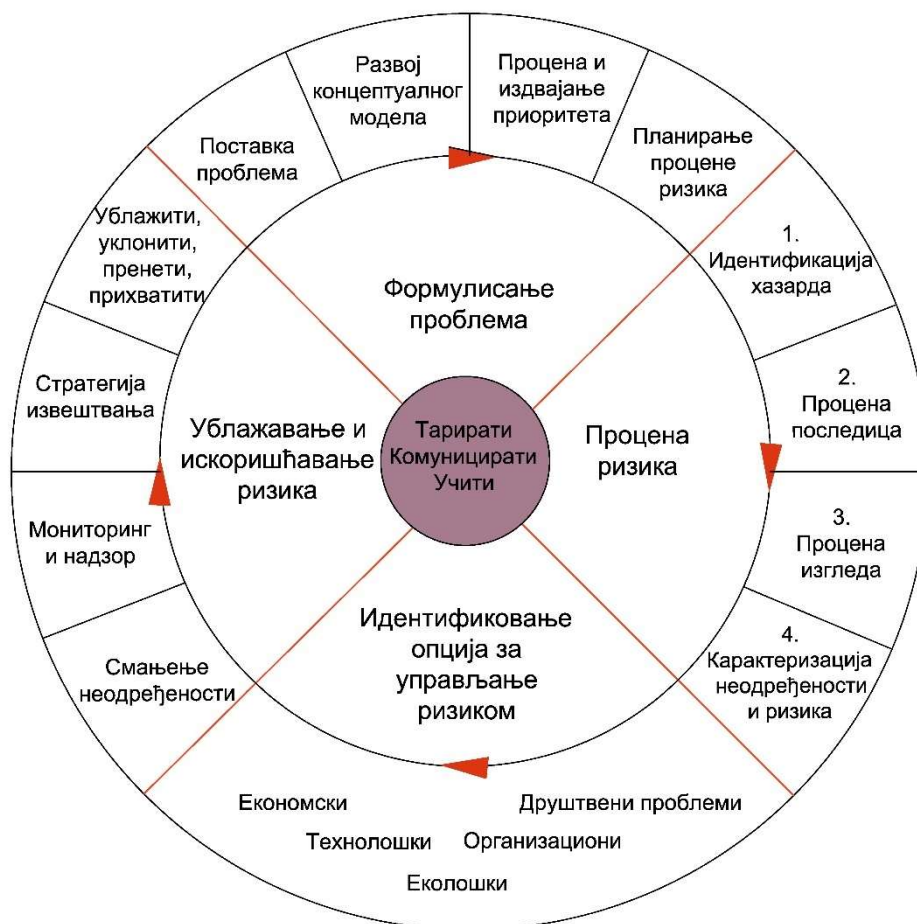
Имајући у виду да се концепт и анализа ризика примењује у великом броју различитих области, и циљеве и предмет дисертације, већа пажња ће бити посвећена приступима и методама у анализи ризика који су примењиви у разматрању проблематике рударских активности и животне средине.

#### 4.2. Процес анализе ризика

Многе државе и институције су развиле различите методске приступе за анализу ризика, који се користе као смернице за менаџере ризика и у процесу доношења одлука. US EPA (1998) издваја три основне фазе у анализи еколошког ризика: формулисање проблема, анализа ризика и карактеризација ризика. Департман за екологију, храну и руралне послове универзитета у Крејнфилду (енгл. *The Department for Environment, Food and Rural Affairs, DEFRA*) из Велике Британије у оквиру свог приступа за управљање еколошким ризиком укључује четири основна корака (DEFRA 2011):

1. Формулисање проблема
2. Процена ризика
3. Идентификовање могућих опција за управљање ризиком
4. Ублажавање и искоришћавање ризика

У оквиру сваке од наведених фаза може се издвојити неколико подфаза како је и приказано на слици 4-1.



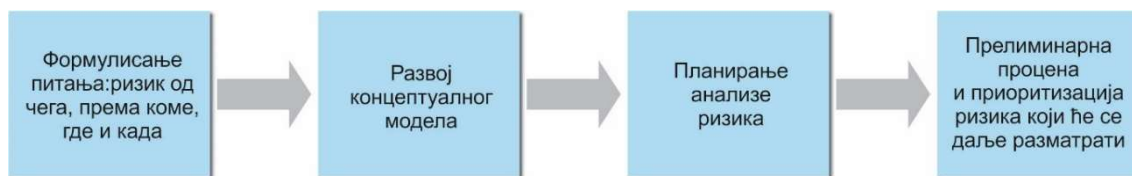
**Слика 4-1.** Главне фазе и подфазе у оквиру анализе и управљања еколошким ризиком (DEFRA 2011)

С обзиром да је приступ који предлаже *DEFRA* из угла аутора дисертације најпотпунији, ове смернице су коришћене за даљи генерални приказ основних фаза у процесу анализе ризика.

#### 4.2.1. Формулисање проблема

Правилно формулисање проблема има велики утицај на избор метода које ће бити примењене приликом процене ризика. У почетној фази анализе неопходно је да се прикупе информације које укључују који део животне средине је потенцијално угрожен, на ком простору, чиме и у ком временском оквиру.

Фаза формулисања проблема се састоји од неколико подфаза (Слика 4-2).



Слика 4-2. Компоненте у оквиру фазе формулисања проблема (DEFRA 2011)

#### 4.2.1.1. Формирање питања

Приликом формирања питања корисно је да се консултују сви потенцијални актери и организације које могу да допринесу у правилном сагледавању проблема. Такође у оквиру припремне фазе одређују се и циљеви анализе и управљања ризиком ((DEFRA 2011).

#### 4.2.1.2. Развој концептуалног модела

Постављање концептуалног модела је од суштинске важности за правилно сагледавање међусобних утицаја између различитих параметара у оквиру система који се анализира. За поставку концептуалног модела за процену еколошког ризика од загађивања водних ресурса неопходно је познавање извора загађујућих супстанци и њихових карактеристика, природне рањивости ресурса и осетљивости рецептора<sup>6</sup>. Она се најчешће процењује на основу геолошких, хидрогеолошких, морфолошких и педолошких карактеристика. Оваква анализа је обично базирана на извор-транспорт-рецептор концепту (енгл. *Source-Pathway-Receptor, SPR*).

Овај концепт се заснива на анализи извора загађења, миграције загађујућих супстанци кроз различите средине и степена и могућности изложености одређених рецептора загађењу.

<sup>6</sup> *Рецептор представља еколошки субјекат који је изложен стресору. Овај израз може се односити на људе, биљке и животиње, станишта или читаве екосистеме или њихове поједине делове.*

Израда концептуалних модела је веома значајна приликом процене ризика од загађивања који се јавља као последица рударске активности. Према природи проблема, развој концептуалних модела је заступљен приликом разматрања заштите подземних вода, било да се ради анализи на локалној размери или се анализира сливно подручје. Концептуални модел треба да укључи изворе загађујућих супстанци, физичке карактеристике средине и потенцијалне рецепторе. Израда концептуалног модела даље пружа могућност за развој различитих сценарија загађивања.

У контексту анализе ризика и заштите водних ресурса, развој концептуалних модела је база за правилно доношење одлука и управљања ризиком. Са тим у вези Америчко одељење за енергију, канцеларија за менаџмент животне средине, у оквиру програма за анализу ризика приликом ремедијације животне средине даје смернице за израду концептуалних модела за анализу еколошког ризика (Suter 1996). Такође, Европска комисија, у склопу стратегија за имплементацију Европске директиве о водама даје смернице за развој концептуалних модела за потребе анализе ризика од угрожавања квалитета и квантитета подземних водних ресурса (European Communities 2010).

#### *4.2.1.3. Планирање анализе ризика*

Фаза планирања ризика укључује дефинисање захтева и метода за прикупљање података неопходних за анализу ризика (DEFRA 2011). У областима која су под утицајем рударске активности (активне или историјске), подаци неопходни за анализу ризика се односе на карактеризацију загађивача, врсте загађујућих супстанци (најчешће „тешки“ метали), хидролошки и хидрогеолошке услови, брзине и правац ветра, физичке особине и хемијски састав земљишта, флора и фауна, насељеност подручја и стање и начин коришћења водних ресурса.

#### 4.2.1.4. Прелиминарна процена ризика и издвајање приоритета

У оквиру ове фазе, која следи након развоја концептуалног модела, анализира се доступност података за квантитативну анализу ризика и да ли је таква анализа неопходна. Квантитативна анализа ризика захтева значајне ресурсе и подразумева експертска мишљења и различите видове моделирања.

Прелиминарна процена ризика се пре свега односи на издвајање ризика који се сматрају неважним и оних који захтевају детаљнију анализу. Ова процена може бити базирана на следећим критеријумима (DEFRA 2011):

- могућности везе између извора загађујућих супстанци и рецептора,
- штетности хазарда, могућности миграције или рањивости рецептора,
- вероватноћи екстремног загађивања, на бази историјских података или као последица промене одређених околности и
- преглед и анализу учинка мера за контролу ризика, које уколико се покажу неуспешним могу изазвати додатне нежељене последице.

Међу издвојеним ризицима даље се врши издвајање приоритета. Приликом анализе ризика од загађивања водних ресурса, овај процес је најчешће базиран на значају ресурса који је потенцијално угрожен за водоснабдевање људи или је саставни део заштићених подручја и станишта.

С обзиром да се на територији готово свих држава у Европи налазе остаци рударске активности, било у виду појединачних рудника или великих рударских центара, Европска комисија је 2006 године издала Директиву о рударском отпаду (*MWD*). Према овој директиви, државе чланице ЕУ су у обавези да направе евиденцију напуштених рударских радова и да изврше прелиминарну анализу ризика од загађивања животне средине и издвајање приоритетних локација за будуће активности на ремедијацији. Поред смерница из директиве, један од успешнијих приступа за рангирања према приоритету локација под утицајем напуштених рудника развијен је на простору Енглеске и Велса. Примењеном методом је упркос

броју напуштених радова, извршена свеобухватна процена утицаја напуштених рудника на ресурсе површинских и подземних вода (Mayes et al. 2009, Environment Agency 2012,)

#### 4.2.2. Процена ризика

Процена ризика се генерално састоји из четири корака (DEFRA 2011):

- 1) Идентификација хазарда
- 2) Процена потенцијалних последица
- 3) Анализе вероватноће поледица
- 4) Карактеризација ризика и неодређености

Сличан приступ предлаже и US EPA, са тим што се ова фаза назива карактеризација ризика (US EPA 1992, US EPA 2007). Овде треба напоменути да су одређени кораци, као што је процена потенцијалних последица, према смерницама US EPA налазе у фази анализе. Иако постоје генералне смернице, пракса је показала да су у зависности од врсте проблема и расположивих података присутне бројне модификације, и да је распрострањен приступ развоја специфичних метода.

Процена ризика може бити квалитативна, квантитативна или семи-квантитативна (Linkov et al. 2009, DEFRA 2011). Квалитативне методе се ослањају на испитивање различитих атрибута често на бази логике или експертског мишљења, али без могућности њихове интеграције као ни поређења различитих случајева. У квалитативну групу спада метода за прелиминарну карактеризацију и приоритизацију напуштеног рударског отпада, проистекла из европске директиве о рударском отпаду. Семи-квантитативне методе су се показале корисне када је потребно извршити приоритизацију ризика. Базиране су на рангирању и индексирању задатих критеријума. Овим, као и додељивањем тежинских фактора смањује се субјективност и неодређеност у процени, али је она и даље на високом нивоу. У контексту подземних вода ове методе су нашле широку примену у анализи природне рањивости подземних вода. Квантитативне методе са друге стране имају



највећи степен поузданости, али је за њихову примену потребно велика количина и детаљност података. Код квантитативне анализе ризика честа је употреба нумеричких модела као и комплексних модела одлучивања базираних на више критеријума и њиховим вероватноћама. Такође код метода из ове групе могуће је извршити квантификацију неодређености методе.

Са аспекта утицаја рударске активности на водне ресурсе, квантитативне методе заступљене првенствено приликом анализе појединачних локација, док се семи-квантитативне и квалитативне методе најчешће примењују приликом регионалних анализа које укључују већи број потенцијално угрожених локација.

#### *4.2.2.1. Идентификација хазарда*

Први корак у фазној процени ризика односи се на идентификацију хазарда. Хазард као појам има различита тумачења и дефиниције у зависности од контекста и области у којима се употребљава. Приликом процене ризика, хазард се дефинише као ситуација или биолошки, хемијски или физички агенс који може у одређеним условима да изазове штету или негативне последице (IPCS 2004, DEFRA 2011). Иако је ризик шири појам од хазарда (анализа ризика укључује и идентификацију и процену хазарда), чест је случај да се ови термини употребљавају као синоними. Са тим у вези анализа хазарда може бити дефинисана као процес који се састоји од идентификације и карактеризације хазарда, а за циљ има утврђивање потенцијалних нежељених ефеката којима организам, систем или популација могу бити изложени. Овај процес је фокусиран на хазард, за разлику од анализе ризика, која додатно укључује и анализу угрожености или изложености објекта анализе (IPCS 2004).

У домаћој литератури једна од дефиниција хазарда је следећа: „*универзални термин који подразумева опасност поступака или непредузимања мера, које могу изазвати штетне последице по животну средину. Представља опасност или могућу опасност на посматраном терену. Хазард не узима у обзир природну рањивост животне средине*“ (Драгишић и Полоччић 2009).

У циљу процене релативне претње у вези са постојећим или потенцијалним испуштањем хазардних супстанци US EPA је развила систем за рангирање хазарда (енгл. *Hazard Ranking System*) на основу ког се врши прелиминарна карактеризација потенцијално опасних локација (US EPA 1992b).

Са аспекта заштите подземних вода хазард је дефинисан као потенцијали извор загађујућих супстанци који представља резултат људских активности као што су инфраструктура, пољопривреда и индустрија (Zwahlen 2004).

Приликом анализе ризика на нивоу сливова који су оптерећени рударском активношћу, потенцијални хазарди могу бити: активни и напуштени површински и подземни рудници, рудна јаловишта, флотацијска јаловишта и постројења за припрему и прераду руде. У том контексту је и појам хазарда прихваћен и разматран у оквиру дисертације. Један од најчешћих хазарда који се везује за рударску активност представља неконтролисано изливање рудничких вода у природне реципијенте и емисија прашине и штетних гасова у атмосферу. Хазардне супстанце које се везују за рударску активност су: „тешки“ метали, сумпорна једињења, токсични гасови и различити видови радиоактивног зрачења. Врста хазардне супстанце најчешће зависи од типа минералне сировине која се експлоатише, па се тако радиоактивност везује за руднике урана, док се „тешки“ метали најчешће јављају код експлоатације лежишта металних минералних сировина.

#### *4.2.2.2. Процена потенцијалних последица*

У овој фази врши се разматрање свих могућих последица одређеног хазарда. Ово укључује процену интензитета (тежине) последице, просторне дистрибуције и временског оквира у ком се последице могу јавити (DEFRA 2011).

Последице одређеног хазарда могу бити нарушавање или потенцијално нарушавање здравља људи, уништење имовине. или животне средине (DEFRA

2011). Приликом разматрања еколошког ризика, најчешће последице рударске активности се огледају у погоршању квалитета површинских, подземних вода и ваздуха. Оне за собом повлаче низ секундарних последица, као што су погоршање квалитета земљишта и негативан утицај на флору и фауну.

Савремени приступ у истраживању лежишта минералних сировина и припреми за експлоатацију подразумева и израду Студије о процени утицаја на животну средину. Ова студија је саставни део неопходне документације за добијање дозволе за почетак рударских радова, како према нашем, тако и према интернационалним стандардима. Према међународним стандардима, у фази истраживања лежишта и пројектовања рударских објеката, обавезна је израда Студије о процени утицаја на друштво и животну средину (енгл. *Environmental and Social Impact Assessment, ESIA*). Анализа ризика се све више примењује приликом израде *ESIA* студија, у циљу оптимизације планова за управљање животном средином и процене нивоа утицаја који може бити толерисан.

#### 4.2.2.3. Процена вероватноће

Изгледи да дође до потенцијалних последица се могу изразити преко вероватноће или учесталости (фреквенције). Приликом анализе, изгледи да дође до негативних последица се разматрају са три аспекта (DEFRA 2011):

- *Вероватноћа да дође до догађаја који може изазвати последице.*  
Уколико постоји довољан број података, могуће је извршити математичку квантификацију вероватноће. Међутим, у највећем броју случајева вероватноћа заправо представља изгледе да дође до штетног догађаја, а базирани су на карактеристикама потенцијалног извора загађујућих супстанци или процеса.
- *Вероватноћа излагања хазарду.*  
На вероватноћу да дође до излагања одређеном хазарду након његовог испуштања, утиче удаљеност рецептора и могућност миграције тела загађења. Ова проблематика се често разматра у хидрогеолошкој пракси,

приликом чега се користе различите методе и модели. Семи-квантитативан начин подразумева рангирање одређених параметра и израду карте рањивости подземних вода, док постоје и квантитативне методе тј. нумерички модели транспорта загађујућих супстанци. Приликом анализе еколошког ризика израђују се тзв. профили излагања (енгл. *exposure profile*), који могу варирати у односу на интензитет излагања или особине рецептора. Ова зависност се у појединим случајевима може исказати преко кумулативне функције расподеле или преко функције густине вероватноће (US EPA 1992a).

- *Вероватноћа да хазард нанесе последице рецептору.*

Евентуалне последице које одређени хазарди могу изазвати зависе од осетљивости (рањивости) рецептора на хазард, штетности хазарда и количини или обиму излагања.

Приликом анализе, могуће је вероватноћу да дође до последица разматрати са сва три аспекта заједно у оквиру једног модела, или узрочно, када су изгледи за следећу фазу условљени резултатима претходне (DEFRA 2011).

#### *4.2.2.4. Карактеризација ризика и неодређености*

Карактеризација ризика обједињује информације из претходних фаза и базира се на утврђивању квалитативне и/или квантитативне вероватноће да дође до потенцијалних негативних ефеката као последица утицаја неког догађаја или агенса на угрожене групе и популације под одређеним условима излагања, узимајући у обзир све претпоставке и неодређености (DEFRA 2011, OECD 2011). У овој фази информације се интегришу у форми обједињујућег закључка о ризику који је свеобухватан, информативна и користан за доносиоце одлука (US EPA 2000a).

Процена ризика може бити изведена и преко упоређивања са неком граничном вредношћу (нпр. упоређивање концентрације тешких метала у подземним водама са максимално дозвољеном концентрацијом). За оцену екотоксиколошког ризика

често се користи однос измерене концентрације са предвиђеном не-токсичном концентрацијом или се рачунају дозе излагања.

Приликом карактеризације ризика, мора се водити рачуна о квалитету улазних података и колико се они уклапају у постављени концептуални модел. Такође, од велике користи је и експертско мишљење у свим фазама процене ризика.

Као и сви други модели, и они који се користе за анализу ризика представљају апроксимацију реалних услова, па самим тим садрже компоненту неодређености. Неодређеност је везана за сваку фазу у процесу процене ризика. За карактеризацију неодређености од значаја су три компоненте (Walker et al. 2003):

- *предмет неодређености* који упућује на извор неодређености односно где се она манифестује у оквиру модела (садржај, структура модела, параметри, улази и излаз из модела),
- *ниво неодређености* који се налази између потпуног детерминизма (све је познато) и потпуног незнања (када ништа није познато). Као прелазни између ове две граничне вредности, издвајају се следећи нивои: *статистичка неодређеност, неодређеност сценарија и непознавање*, и
- *природа неодређености* која може бити везана за недостатак података и својствену неодређеност која потиче од природе самог система који се анализира и као таква не може бити умањена.

Неке од метода за анализу и смањење неодређености приликом анализе еколошког ризика су следеће: даља истраживања, корекциони фактор сигурности, експертско мишљење; инверзно моделирање; функција густине вероватноће, метод Бејзове линеарне регресије, анализа сценарија, анализа осетљивости параметара (Refsgaard et al. 2007, DEFRA 2011).

#### 4.2.3. Процена опција за управљање ризиком

С обзиром да је ризик у одређеној мери увек присутан, у склопу евалуације и управљања ризиком уведене су категорије „подношљив“ и „прихватљив“ ризик. Под подношљивим ризиком се подразумева онај код ког је неопходно спровести разумне мере за његово ублажавање, док је прихватљив онај код ког је преостали ризик довољно низак да није неопходна примена мера за ублажавање ризика (IRGC 2005).

За ризике који су у фази анализе процењени као високи, неопходно је предвидети мере којима би се довели на прихватљив ниво (слика 4-3). Опције за управљање ризиком обично укључују: укидање извора ризика, ублажавање ефеката, трансфер ризика, искоришћавање потенцијалних користи и прихватање ризика (DEFRA 2011). Која од потенцијалних метода за управљање ризиком ће бити примењена и избор оптималне стратегије зависе од позитивних ефеката које оне остварују. Фактори у односу на које се процењује да ли одређена мера има позитивне или негативне ефекте могу бити следећи: технички, економски, еколошки, друштвени и организациони (DEFRA 2011). Како ни једна од мера није једнозначна, тј. постоји преплитање између позитивних и негативних ефеката у односу на различите факторе, у процесу одабира најадекватније методе неопходна је систематска анализа могућих опција. Приликом анализе различитих алтернатива за управљање и контролу ризика, неопходно је уважити и универзалне постулате као што су превентивно деловање, еколошка безбедност и укључивање заинтересованих страна и јавности (ЕЕА 2001, DEFRA 2011). Поред различитих фактора, у појединим случајевима потребан исход примењених мера може бити и законски дефинисан (ЕА 2008).



Слика 4-3. Стратегије управљања ризиком (DEFRA 2011)

Имајући у виду комплексност приликом одабира стратегија за управљање ризиком, проистеклих од великог броја критеријума (економски, социјални, еколошки...) и алтернатива, вишекритеријумска анализа доношења одлуке (енгл. *multi-criteria decision analysis, MCDA*) је нашла широку примену у области управљања ризиком.

У области заштите животне средине, методе у оквиру *MCDA* које се примењују се најчешће базирају на додељивању вредности за различите алтернативе, које се после множе са тежинским коефицијентима и на крају упоређују и комбинују да би се добио укупан индекс. Једне од најзаступљенијих су следеће: *AHP/ANP, FAHP, MAUT/MAVT, PROMETHEE, ELECTRE, TOPSIS, DEMATEL, NAIADE, DELPHI*. Linkov et al. (2006), Hajkovicz & Collins (2007), Huang et al. (2011), и Бајић (2015) дају одличан преглед постојећих метода и области примене кроз анализу великог броја објављених радова.

#### 4.2.4. Ублажавање и искоришћавање ризика

Ова фаза подразумева примену стратегија за управљање ризиком које су предвиђене у оквиру претходне фазе. Приликом спровођења стратегије за управљање ризиком неопходно је вршити стално праћење и евалуацију насталих промена и процену секундарних ризика који могу настати приликом примене одређених мера (DEFRA 2011). У контексту напуштених рударских радова најчешће се примењују методе које укључују пасивни третман рудничких вода. Овакав третман претежно укључује формирањем мокрих поља у оквир којих се под дејством био-хемијских и физичких процеса рудничке воде пречишћавају, чиме се смањује њихов утицај на квалитет водних ресурса (US EPA 2000b, Johnson and Hallberg 2005, URS 2014, Skousen et al. 2017) Такође, напуштени рударски радови могу представљати и прилику за остваривање позитивних ефеката кроз њихову адаптацију у туристичке сврхе, или путем коришћења рудничких вода за потребе водоснабдевања или за грејање и хлађење.

Такође, и у овој фази, као и током целог процеса анализе ризика може доћи до појаве нових ризика који могу бити изазвани климатским променама, интензивном урбанизацијом, променом легислативе, променом става локалног становништва према пројекту. Из тог разлога анализа ризика треба да представља активан процес, који подразумева итерације претходних анализа, и прилагођавање стратегија за управљање ризиком новонасталим околностима (DEFRA 2011).

#### 4.3. Приступуи у анализи ризика

За потребе прегледа и сврставања постојећих приступа у анализи и процени ризика у одређене категорије неопходно је усвојити основне поставке и критеријуме. Као што је већ напоменуто анализа ризика је широк појам и разликује се у зависности од области примене. Генерално, методе за анализу и процену ризика се могу поделити на: квалитативне, семи-квантитативне и квантитативне. Linkov et al. (2009) испитујући постојеће систематичне и структуриране приступе на бази



публикованих радова, у анализи ризика издваја следеће начине за процену ризика (слика 4-4):

- **Навођење чињеница** (енгл. *listing evidence*) - односи се на процесе утврђивања чињеница везаних за неки процес или појаву без покушаја да се оне интегришу и повежу.
- **Експертско мишљење** (енгл. *best professional judgment*) - у односу на просто изношење чињеница, овде постоји процес њихове интеграције и изношења закључака на основу мишљења експерата.
- **Логички модели** (енгл. *logic*) – подразумева стандардизовану процену одређених критеријума релевантних за процену ризика на бази квалитативних логичких модела.
- **Узрочни критеријуми** (енгл. *causal criteria*) – подразумева разматрање да ли је одређени критеријум задовољен, а који даље указује на узрочно-последичну везу између одређених појава и ефеката.
- **Индексирање и рангирање** (енгл. *indexing and scoring*) – индексирање и рангирање подразумева интеграцију више критеријума на основу додељивања тежинских фактора и израчунавање укупног индекса. Спадају у групу упоређујућих или релативних приступа и за резултат немају експлицитну процену последица или вероватноће, већ дају релативну меру за степен ризика изражен кроз вредност индекса. Оваква анализа је корисна када је циљ рангирање на бази штетности или ургентности и приликом одређивања приоритета (Covello & Merkhoher 1993).
- **Квантификација** (енгл. *quantification*) – подразумева употребу математичких метода за интеграцију и рангирање различитих критеријума. Најчешће подразумева употребу статистичких метода, *MCDA*, нумеричко моделирање. Ово омогућава примену оваквих метода на различитим случајевима и њихово упоређивање.



**Слика 4-4.** Основни приступи у анализи ризика у односу на начин на који се одређени критеријуми, алтернативе или последице разматрају и упоређују (модификовано према Linkov et al. 2009)

Прегледом постојеће литературе дошло се до закључка да су квалитативне методе и даље заступљеније од квантитативних, иако је присутан тренд повећања удела квантитативних метода (Linkov et al. 2009). У оквиру анализе еколошког, у односу на анализу ризика по здравље људи, заступљен је правац развоја различитих метода за процену ризика, што указује да и даље није успостављен консензус у научној заједници, и да је универзални и обједињујући приступ у овој области и даље у фази развоја (Linkov et al. 2009).

У зависности од ситуације и расположивих података анализа ризика може да укључује и комбинацију наведених приступа у односу на фазу анализе. Такође, одређене методе могу припадати и групи квалитативних и квантитативних у зависности од коришћених података (нпр. када се користе вредности за вероватноћу или се она изражава путем исказа).

#### 4.4. Методе за процену ризика

Најзаступљеније методе које се користе приликом анализе ризика од загађивања животне средине су следеће:

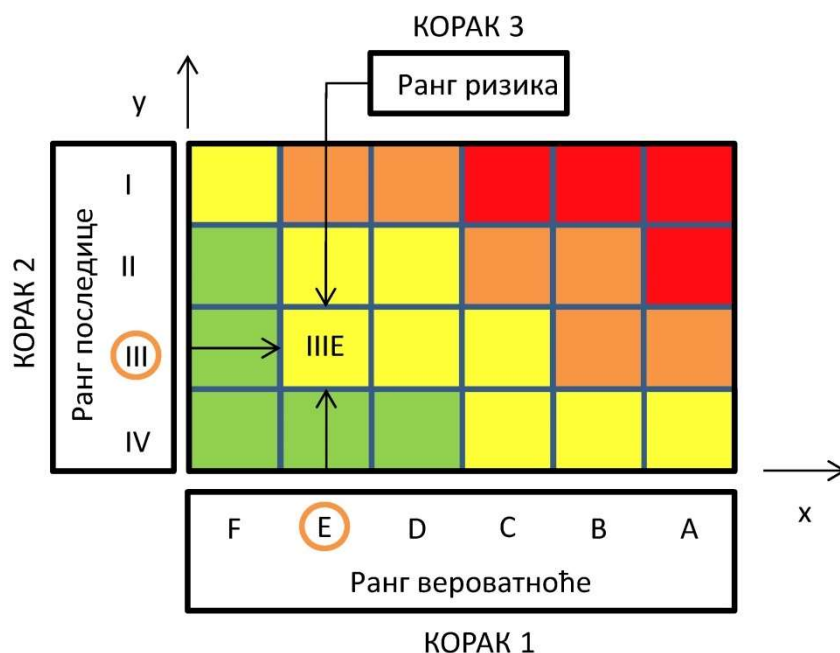
- матрице за процену ризика,
- стабло одлучивања,
- параметарске методе,
- *MCDА* и моделирање

У зависности од размере у којој се врши анализа, за регионалне студије се углавном примењују квалитативне и семи-квантитативне методе као што су матрице, стабла одлучивања и индексне методе, док се у размери слива или појединачних загађених локација најчешће примењује моделирање.

##### 4.4.1. Матрице за процену ризика

Матрице ризика су широко распрострањена метода у различитим областима примене анализе ризика, од управљања пројектима, преко анализе заштите на раду до процене утицаја на животну средину. Спадају у групу квалитативних (или семи-квантитативних) метода и у контексту анализе ризика од загађивања се углавном користе за прелиминарне процене ризика.

Матрице се формирају тако што се на *x*- осе наносе рангови вероватноће да дође до штете као последица одређеног хазарда, а на *y*-оси рангови последица које предметни хазард изазива, чијом комбинацијом се долази до рангирања ризика (слика 4-5). Често се уместо вероватноће, на *x*- осе приказује учесталост појављивања или фреквенција. Такође, у зависности од методе разликује се и број категорија ризика, па се он некад изражава преко три категорије (висок средњи и низак), а некад се уз ове издвајају и екстремне вредности (веома низак и веома висок).



Слика 4-5. Формирање матрице ризика (модификовано према Гемовић 2011)

Формирање матрица са различитим бројем колона и редова је могуће у односу на област примене. Такође, могуће је у процесу процене ризика формирање подматрица за потребе процене вероватноће, која се касније интегрише у финалну матрицу ризика.

Предности ове методе углавном леже у њеној релативно једноставној и интуитивној примени, док су основне мане изражене кроз ограничену прецизност и примену код комплексних анализа, као и субјективност.

Поред матрица, још један од начина за приказивање везе између вероватноће, последице и ризика је преко тродимензионалних дијаграма. С обзиром да се преко матрице ризик исказује у односу на припадност одређеној категорији израженој преко лингвистичких израза нпр. низак, веома висок или висок, фази логика (енгл. *fuzzy logic*) је нашла примену у овој области. Како би се смањиле неизвесности и ублажиле оштре границе између припадности одређеним категоријама, а тиме добили поузданији и прецизнији подаци, Markowski & Mannanb (2008) предлажу употребу фази матрице ризика (енгл. *fuzzy risk matrix*).

Ni et al. (2010) предлажу даље приступе за унапређење анализе ризика коришћењем матрица кроз увођење одговарајућих аритметичких формула.

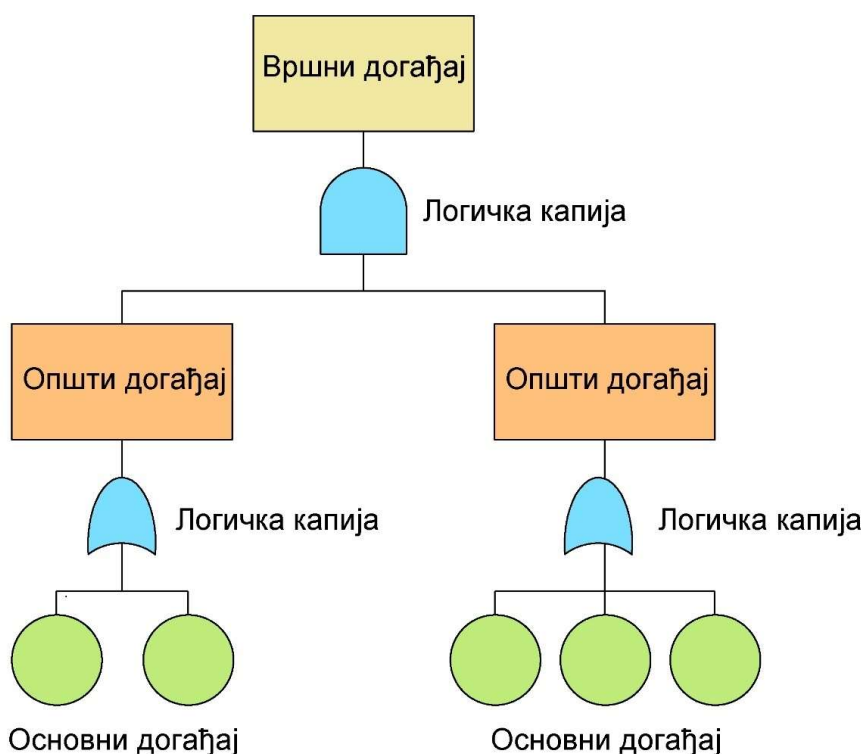
#### 4.4.2. Стабло одлучивања

Технике које се базирају на дијаграмима одлучивања су широко заступљене у области економије и управљања пројектима. Неколико метода је развијено као што су стабло одлучивања, стабло циљева, дијаграм тока процеса, анализа стабла догађаја (енгл. *Event Tree Analysis, ETA*), анализа стабла неисправности (енгл. *Fault Tree Analysis, FTA*) и анализа начина настајања и ефеката отказа (енгл. *failure mode and effects analysis, FMEA*). За све ове методе је заједничко да обједињују одређене одлуке, догађаје или процесе и њихове последице. Графички оне се представљају у виду дијаграма код ког се компоненте рачвају као гране на стаблу, тако да се могу јасно сагледати последице одлуке и лако израчунати заједничка вероватноћа и извршити анализа очекиване вредности одлуке (Ђуричић и др. 2010). Методе *FMEA* и *FTA* имају широку примену у различитим дисциплинама па су из тог разлога и стандардизоване одговарајућим ИСО и њиховим домаћим еквивалентима СПРС стандардима (*FMEA* – СПРС ЕН 60812:2011 и *FTA* – СПРС ЕН 61025:2011).

Метода *FMEA* подразумева идентификовање компоненти одређеног система и њихово рангирање према вероватноћи и последицама отказивања као и изгледима за њихово детектовање и контролу, чиме се врши идентификовање и спречавање ризичних догађаја. Liu et al. (2013) на основу анализе публикованих радова даје преглед примене *FMEA* метода у анализи ризика и предлога за њено унапређење, најчешће кроз примену *MCDM* метода и вештачке интелигенције (*Rule-base* и *Fuzzy rule-base system*).

У области анализе ризика од загађивања највећу примену имају анализа стабла неисправности и анализа стабла догађаја.

*FTA* метода веома често се назива и анализа стабла грешака, а заснива се на дедуктивном откривању узрока грешака (тзв. *top-down* анализа). Научна оправданост *FTA* методе је у томе што она указује на логичне узроке или комбинацију узрока који могу да доведу до нежељеног вршног догађаја (Башић 2017). На слици 4-6 дат је шематски приказ анализе стабла неисправности.



**Слика 4-6.** Шематски приказ стабла неисправности - *FTA* (Башић 2017)

На слици се примећује да се анализа састоји од вршног догађаја и узрочних општих и основних догађаја. Поред ових у оквиру анализе се могу наћи и неразвијени и нормално очекивани догађај. Догађаји су повезани логичким капијама. Основне логички оператери који се примећују у *FTA* анализи су „и“ и „или“. Капија „и“ подразумева да су се десили сви улазни догађаји, док код капије „или“ да би се десио излазни догађај мора да се деси макар један улазни догађај.

Поред ових, још се примењују: „не“, „ни“, „нили“ и „ексклузивно или“ капије. Башић (2017) даје више информација о карактеристикама и примени *FTA* методе.

За разлику од *FTA* методе, анализе стабла догађаја (*ETA*) представља индуктивну анализу могућих последица иницијалног догађаја. Метода *ETA* у односу на *FTA* није условљена постојањем одређеног познатог хазарда, већ се њом могу анализирати читаве групе хазарда (NRC 2002). Ова метода има широку примену у анализи могућности отказивања одређених индустријских система и предвиђених контролних и заштитних мера. Пример дијаграма анализе стабла догађаја приказан је на слици 4-7. *ETA* метода се састоји од идентификовања иницијалног догађаја и мера које доводе до смањења негативних последица. Такође, метода укључује и класификацију исхода, а може садржати и дефинисање учесталости или вероватноће иницијалног догађаја као и зависне вероватноће појединих грана.

Уколико су у анализу укључене вредности вероватноће могуће је израчунавање вероватноће исхода или последица. За разлику од *FTA*, код *ETA* методе од логичких оператер користи се искључиво „или“ капија из која се у највећем броју случајева рачвају две алтернативе (успех или неуспех).



Слика 4-7. Шематски приказ стабла догађаја - *ETA* метода

#### 4.4.3. Параметарске методе

Параметарске методе се базирају на одређивању репрезентативних критеријума којима се додељују одговарајући индекси и тежинске вредности на основу којих се врши рангирање. Опсег вредности индекса се задаје тако да буде упоредив између различитих критеријума. Укупна сума или производ индекса за појединачне критеријуме даје укупну вредност индекса ризика, на основу ког се врши категоризација ризика. Ове методе припадају групи семи-квантитативних метода које за карактеризацију ризика користе индексе уместо егзактне процене еколошког утицаја. Анализа ризика на бази параметарских метода се још назива и анализа релативног ризика.

Предност параметарских метода огледа се пре свега у њиховој широкој и релативно једноставној примени, и у условима када се располаже са малим бројем података. Основни недостаци параметарских метода огледају се у израженој субјективности приликом додељивања тежинских фактора и вредности индекса за поједине параметре (Живановић 2016). Такође, резултати анализе се најчешће исказују у релативним мерама, што омогућава међусобно упоређивање испитиваних појава али не даје егзактне резултате.

Параметарске методе су нашле широку примену у регионалним анализама ризика, као и у прелиминарној процени ризика и одређивању приоритетних локација за детаљнија истраживања и ремедијацију деградираних простора. Европска агенција за заштиту животне средине (енгл. *European Environment Agency, EEA*) даје преглед 27 постојећих метода развијаних у оквиру 11 земаља (ЕЕА 2004). У табели 4-1 дат је преглед важнијих метода за процену ризика од контаминираних локација са њиховим основним карактеристикама.



**Табела 4-1.** Преглед значајнијих параметарских метода за регионалну процену ризика од загађивања под утицајем контаминираних локација (допуњено према ЕЕА 2004)

Метода	Клима	Хидрогеолошки	Геолошки	Хидролошки	Геоморфолошки	Користиће	Петрологија	Физичко-	Токсиколошки	Извор загађења	регулаторни	Држава	Голина	Референца
A.G.A.P.E.		x				x		x	x	x		Немачка	1988	ЕЕА 2004
C.S.S.M.	x	x		x	x	x	x	x	x	x		Италија	1993	ЕЕА 2004
H.R.S.	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	САД	1990	ЕЕА 2004
R.R.S.M.		x		x		x		x				Енглеска	2001	ЕЕА 2004
RI.SI.CO.	x	x	x	x		x	x			x	x	Италија	2001	ЕЕА 2004
S.P.P.S.		x	x	x		x		x	x	x	x	Данска	2003	ЕЕА 2004
PR.A.MS		x	x	x	x	x		x	x	x		ЕУ	2005	ЕЕА 2005
SYRIADE		x	x	x		x		x	x	x		Италија	2011	Pizzol et al. 2011
R.P.G.P.S.C.R		x	x			x		x	x			Данска	2012	Overheu et al. 2014
R.P.M.C.G.P.S.		x				x		x	x			Италија	2015	Pizzol et al. 2015

Методе су базирани на анализи три основне компоненте у извор-транспорт-рецептор (*SPR*). Њихова примена се врши кроз додељивање одговарајућих индекса, у циљу процене укупног индекса релативног ризика на регионалном нивоу (Pizzol

et al. 2011). На основу прегледа постојећих метода издвојене су основне групе фактора који се примењују у прелиминарној процени ризика од загађивања. У групи климатских фактора најчешће су заступљени годишња сума падавина и инфилтрација. Од хидрогеолошких, у највећем броју метода примењују се дубина до издани тј. дебљина надизданске зоне, удаљеност до најближег бунара и намена подземних вода, док су најмања удаљеност до површинских вода и њихова намена најчешће коришћени из групе хидролошких фактора. У оквиру разматрања геолошких услова, најчешће се у обзир узимају дебљина и присуство слабо водопрпусних слојева, док се од геоморфолошких фактора разматра нагиб терена. У оквиру групе фактора која описује намену и употребу земљишта најчешће се у процени ризика користи удаљеност до насеља или заштићеног подручја као и намена земљишта. Од педолошких карактеристика, у процени ризика користе се тип земљишта и његове карактеристике у погледу водопрводности. Од физичко-хемијских особина загађујућих супстанци најчешће се процењује њихова мобилност и растворљивост у води, као и њихова токсичност. У оквиру карактеризације потенцијалних извора загађујућих супстанци, од фактора релевантних за процену ризика издвајају се врста хазардне супстанце, њена концентрација и подаци о испуштању хазардних супстанци у површинске и подземне воде. Међу физичким карактеристикама потенцијалних извора загађујућих супстанци, као фактори се најчешће користе површина, врста отпада и количина или запремина. Од регулаторних фактора у највећем броју метода се користе максимално дозвољене концентрације појединих елемената и једињења у површинским и подземним водама.

У последње две деценије, просторна анализа ризика на регионалном нивоу се све чешће врши применом метода у *GIS* (енгл. *geographic information system, GIS*) окружењу. Такође, присутан је и тренд увођења *MCDА* метода (Xu and Liu 2009, Huang et al. 2011, Giubilato et al. 2014, Pizzol et al. 2015) у фазама одређивања тежинских коефицијената и рангирања појединих критеријума, као и приликом издвајања приоритетних локација сврстаних у исту категорију ризика.

У области заштите подземних водних ресурса велика примена параметарских метода присутна је у области анализе рањивости подземних вода. Живановић (2011) даје преглед основног концепта рањивости и постојећих метода (*DRASTIC*, *COP*, *PI*, *EPIC*) за процену рањивости подземних вода карстних издани.

У области заштите, развијен је приступ анализи ризика од загађивања подземних вода као ресурса, који се ослања на *SPR* концепт и зависи од три основна елемента (Zwahlen 2004):

- хазарда коју представља потенцијално загађујућа активност (еквивалент извору загађења),
- природне рањивости подземних вода (одговара компоненти транспорта) и
- потенцијалне последице загађивања (рецептор су подземне воде у овом случају).

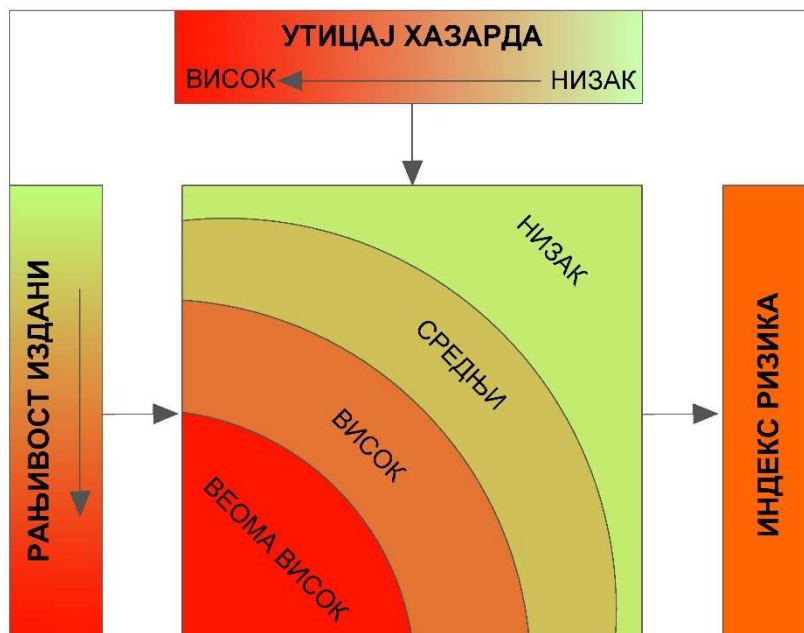
У процени ризика од загађивања подземних вода као ресурса, у анализу је неопходно укључити и факторе који су везани за њихову еколошку и економску вредност, као и садашњу и будућу намену и коришћење. Са тим у вези анализа ризика се спроводи кроз две основне компоненте (Zwahlen 2004):

- процена интензитета ризика и
- процена осетљивости ризика.

Методологија за израду карте интензитета ризика од загађивања подземних вода укључује три основна корака (Hötzl 2004):

1. Израда карте рањивости
2. Израда карте хазарда
3. Спајање карте рањивости и карте хазарда и добијање карте ризика од загађивања

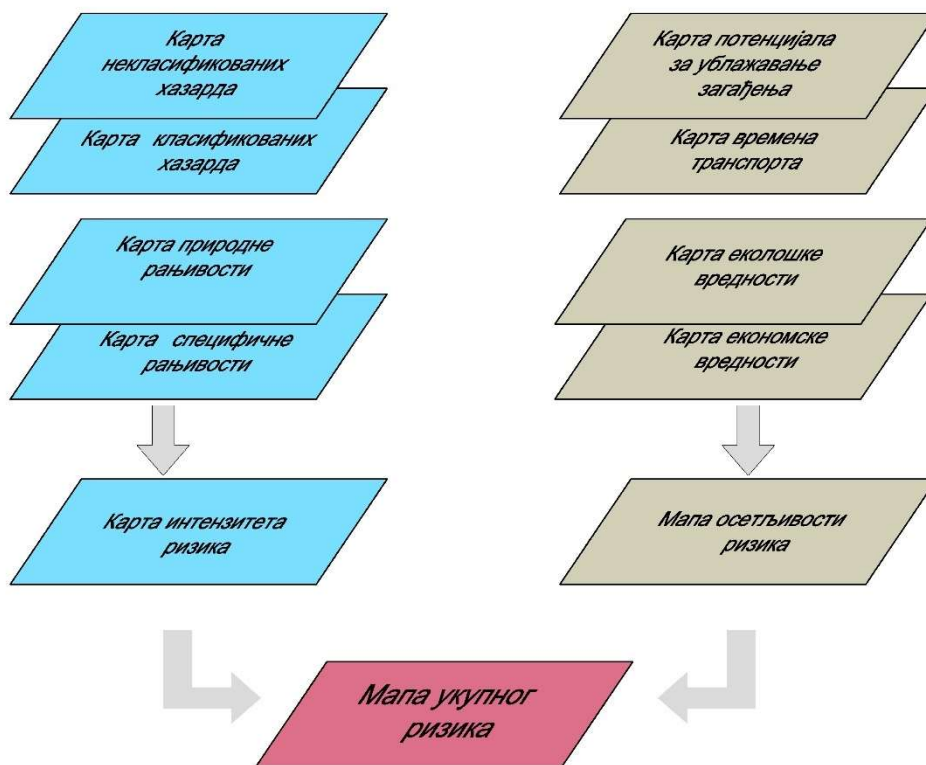
Интеграцијом процењене рањивости подземних вода и степена хазарда одређује се просторни распоред зона са високим интензитетом ризика према шеми приказаној на слици 4-8.



**Слика 4-8.** Шема одређивања интензитета ризика од загађивања подземних вода на бази процене рањивости и карактеризације хазарда (Živanović i dr. 2015)

Анализа осетљивости ризика подразумева процену последица под утицајем нежељеног догађаја. Додатно, осетљивост ризика укључује и процену штете у односу на економску и еколошку вредност ресурса.

За сваку од основних компоненти се израчунава фактор ризика чијом комбинацијом се процењује укупан ризик од загађивања подземних воданих ресурса (слика 4-9). Интеграција неопходних фактора се врши у *GIS* окружењу, а резултати се приказују графички у виду карте ризика (енгл. *risk map*) која приказује просторни распоред зона са различитим степеном ризика од загађивања подземних вода.



Слика 4-9. Шема процедуре израде карте ризика подземних вода комбиновањем засебних олеата (Zwahlen 2004)

#### 4.4.4. Примена математичких модела у процени ризика

Анализа ризика се често може вршити у облику симулације или нумеричког моделирања, у зависности од стресора тј. извора ризика, доступности одговарајућих критеријума или максимално дозвољених вредности и обима доступних података. Статистичке методе или математички модели се могу користити за квантификацију и анализу везе између извора ризика и ефеката US EPA (2007а). У односу на фазу анализе ризика, моделирање је присутно у фазама процене и управљања, као и приликом оцене различитих сценарија и мера за ублажавање и контролу ризика.

Различити модели популација и екосистема успешно су примењени да би се проценили еколошки ризици, укључујући одрживост популације угрожених врста, фрагментацију станишта и проблематику везану за утицај хазардних супстанци на биљне и животињске организме (Pastorok et al. 2003). Pastorok et al. (2002), Nelson et al. (2009) и US EPA (2009) дају смернице за израду еколошких модела и њихову примену у анализи ризика.

За разлику од еколошких модела који у себи садрже и процену утицаја анализираних процеса на биотоп и биоценозу, у контексту анализе ризика од загађивања водних ресурса модели су најчешће базирани на прорачуну транспорта и концентрације загађујућих супстанци (енгл. *fate and transport modeling*). Нумерички модели струјања подземних вода и транспорта загађујућих супстанци су нашли велику примену у пракси у области заштите подземних вода. У контексту анализе еколошког ризика и ризика по здравље људи ови модели су најчешће интегрисани у фази процене потенцијалних путева и могућности излагања рецептора хазардним супстанцама. Chambon et al. (2011) даје приказ неких модела за процену ризика који укључују и прорачун струјања подземних вода, као што су: *ROME*, *BIOBALANCE*, *RISC4*, *CatchRisk*. С обзиром да примена метода базираних на математичким моделима захтева велики број улазних података, овакве анализе се најчешће раде у локалној размери и везане су за детаљна испитивања контаминираних локација.

Иако су најчешће везане за појединачне загађиваче, постојеће тенденције укључују употребу модела приликом анализа ризика на нивоу сливова. Студије Dimitriou et al. (2008) и Troldborg et al. (2008) представљају неке од успешних примера анализе ризика од загађивања подземних вода на нивоу сливова.

#### 4.5. Постојећи приступи у анализи ризика од загађивања под утицајем напуштених рударских радова

Преласком у нови миленијум и премештањем фокуса на заштиту животне средине, у многим земљама се дошло до закључка да су напуштени рударски радови један од најважнијих узрока деградације околине (Venkateswarlu et al. 2016). Како би се приступило решавању овог проблема, на националном и међдржавном нивоу покренуте су иницијативе и програми за идентификовање локација напуштених рударских радова, њихових карактеристика и процену утицаја на животну средину и здравље људи.

С обзиром да ове студије укључују више стотина, а често и хиљаде напуштених рударских радова, подаци о њиховим карактеристикама су углавном базирани на прегледу постојеће литературе и на примени метода даљинске детекције. Имајући у виду размере проблема, у појединим државама развијене су националне стратегије и приступи за процену утицаја на екосистем и здравље људи. Већина ових метода је базирана на прелиминарној процени ризика од загађивања и на издвајању приоритетних локација које ће бити предмет детаљних истраживања. За прелиминарну процену ризика на регионалном нивоу, најадекватнијим су се показале параметарске методе за процену ризика. У прилогу 1а дат је преглед неких од постојећих приступа за регионалну идентификацију и класификацију утицаја активних и напуштених рударских радова и отпада на животну средину (допуњено према Puura and D'Alessandro 2005).

Већина метода коришћених за карактеризацију рударских радова на простору Европске уније односи се на одлагалишта рудне или флотацијске јаловине. Као резултат *PECOMINES* пројекта, на основу података прикупљених за простор централне и источне Европе, развијена је методологија за рангирање рударских радова на основу утицаја рудничких вода. Поред наведених, на нивоу појединачних држава развијени су национални приступи за карактеризацију активних и напуштених рударских радова и рударског отпада (прилог 1б).

Прегледом постојећих приступа установљено је да су методе развијене на државном нивоу бројније од универзалних приступа. Ово је и очекивано с обзиром на разлике између земаља у броју напуштених рударских радова, нивоу детаљности и доступности података као и расположивости материјалних средства за анализу контаминираних локација и ремедијацију. Из истог разлога се и национални приступи разликују између појединих држава. Заједничко за већину метода је да се базирају на прелиминарној процени еколошког, ризика по здравље људи или комбинацији ова два приступа за рангирање напуштених радова. За процену ризика најзаступљеније су семи-квантитативне тј. параметарске методе, којима се за издвојене критеријуме додељују одговарајући индекси. Поред параметарских, у мањој мери је присутан и метод базиран на стаблу одлучивања. Пример овог приступа је метода за прелиминарну процену ризика предложена према смерницама из европске директиве о рударском отпаду. Код већине анализираних метода усвојен је приступ за анализу ризика који се разликује у односу на стандардне форме, услед великог броја потенцијалних извора ризика као и броја хазардних супстанци које су присутне у зонама напуштених рудника.

Анализом постојећих приступа може се констатовати следеће:

- Изузев универзалног критеријума за процену ризика (Puuga and D'Alessandro 2005) предложеног на основу резултата *PECOMINES* пројекта, мали број метода је развијен за примену на међународном нивоу (Sol et al. 1999, ICPDR 2000, BRGM 2001 и Tabakov 2002).
- С обзиром да се европска легислатива махом односи на рударски отпад, већи број метода (BRGM 2001, Broadhurst & Petrie 2010, Stanley et al. 2011, Turner et al. 2011, IGME 2016,) је базиране на анализи одлагалишта рударског отпада, без разматрања и самих рударских радова као потенцијалних извора загађујућих супстанци.
- Рангирање напуштених и активних рудника и одлагалишта рударског отпада на бази процене релативног ризика на регионалном нивоу је заједничко за све методе. Са тим у вези примењени су специфични приступи



у процени ризика, како би се одговорило на услове у земљама у којима су развијене.

- Присутан је тренд развоја метода прилагођених за примену у *GIS* окружењу. Како би се смањио ниво субјективности у процени запажен је тренд увођења *MCDА* приступа у одређивању и квантификацији фактора за процену утицаја.

Почевши од 2006. године у Европској унији је на снази директива о рударском отпаду према којој су државе чланице биле обавезне да до 2012. године формирају катастар напуштених одлагалишта са прелиминарном анализом ризика. Иако је дошло до значајних помака на овом пољу, актуелним међународним пројектима као што су *ProMine*, *Minerals4EU* и *UNEXMIN* који се делом дотичу и ове проблематике, констатоване су разлике и неусаглашености у нивоу и детаљности података широм Европе. Ово указује на актуелну потребу за даљим изучавањем и хомогенизацијом података везаних за напуштене руднике на простору Европе.

**II**

**КОНЦЕПЦИЈА И МЕТОДОЛОГИЈА**  
**ИСТРАЖИВАЊА**

## 5. КОНЦЕПЦИЈА И МЕТОДОЛОГИЈА ИСТРАЖИВАЊА

Научно-истраживачке активности предвиђене у циљу испуњавања основних задатака и доказивања хипотеза дефинисаних у предмету ове докторске дисертације, конципиране су тако да се најпре издвоје доминантни фактори који утичу на степен штетности одређеног рудника и изврши карактеризација напуштених рударских радова као потенцијалних емитера загађујућих супстанци. Даље, спроведена је анализа природне рањивости подземних вода, као и процена угрожености површинских вода, и на крају су ови фактори сублимирани кроз прорачун индекса ризика од загађивања. За потребе процене ризика предложена је методологија у склопу које је развијена прорачунска шема за додељивање одговарајућих вредности индекса за одабране факторе. Овај приступ карактеризацији ризика базиран је на концепту развијеном и примењиваном за потребе израде карте ризика од загађивања подземних вода (Zwahlen 2004), уз одговарајуће модификације како би се истакле специфичности и омогућила адекватна категоризација и квантификација напуштених рудника као потенцијалних загађивача.

У циљу разматрања предметне проблематике и развоја методологије за процену ризика од загађивања водних ресурса, у склопу израде дисертације научно-истраживачке активности су подељене у пет фаза: кабинетски рад; теренска истраживања; лабораторијска испитивања; систематизација и анализа прикупљених података и развој методе; и валидација предложене методе.

Као што је напоменуто у претходним поглављима, предмет дисертације су напуштени рударски радови формирану у оквиру лежишта металичних минералних сировина, угља, урана и појединих неметаличних сировина. Ови рударски радови су одабрани с обзиром на њихов потенцијал да представљају значајне изворе загађујућих супстанци. Истраживањима је обухваћена територија Србије јужно од Саве и Дунава, са обзиром да су геолошке карактеристике територије Војводине такве да не постоје значајне појаве напуштених рудника металичних сировина и угља.

У склопу научно-истраживачких активности спроведених у пет фаза, током израде предметне дисертације примењене су следеће методе:

- теренска истраживања и узорковање површинских и подземних вода,
- лабораторијска испитивања хемијског састава,
- статистичка обрада података (мултиваријантне методе),
- *GOD* метода за процену рањивости подземних вода,
- параметарска метода за процену ризика,
- метода процене укупног ризика базирана на фази приступа и
- квалитативна процена ризика употребом матрице ризика.

У даљем тексту дат је приказ и опис поступка примене наведених метода коришћених у склопу спроведених истраживања.

### **5.1. Теренска истраживања**

Истраживања на терену обухватила су идентификације како познатих тако и до сада непознатих напуштених рудника и прикупљања података о размери рударских радова, начину експлоатације, присуству и размери јаловишта и истицању рудничких вода. У оквиру обиласка локација, извршено је узорковање рудничких вода као и површинских токова низводно од места уливања рудничких вода. Теренска истраживања су изведена етапно, кроз обилазак напуштених рудника на простору источне, западне и централне и јужне Србије. Обилазак терена, идентификација напуштених радова и узорковање површинских и подземних вода спроведени су у оквиру пројекта анализе *Утицаја отпадних рудничких вода на животну средину на простору Србије*, изведеног од стране Универзитета у Београду, Рударско-геолошког факултета (РГФ 2009-2011). За потребе реализације истраживања формиран је тим претежно састављен од стручњака са Департамана за хидрогеологију, у који сам био укључен у својству сарадника.

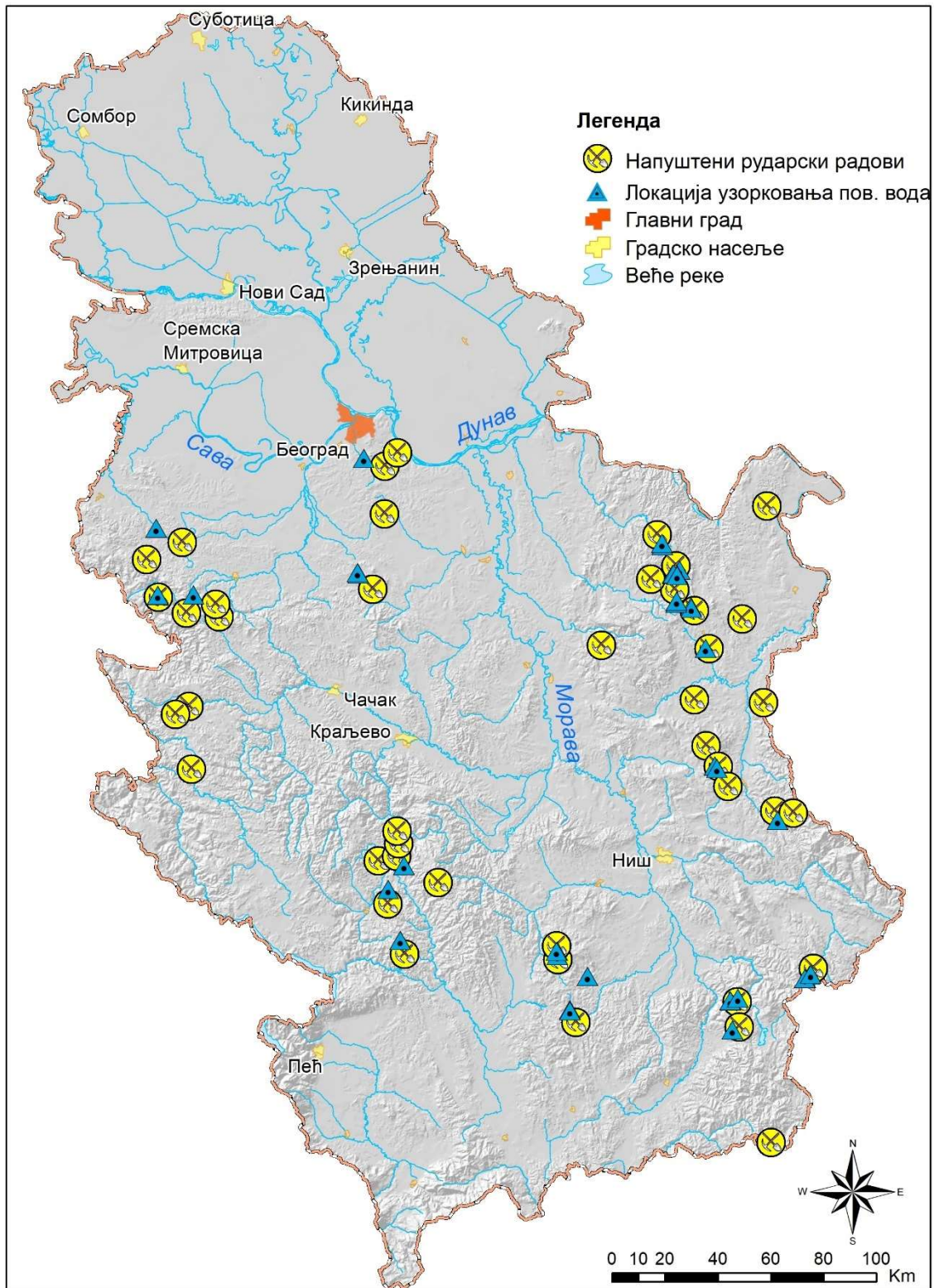
Истраживањима су обухваћени напуштени рударски радови у оквиру металичних лежишта (Cu, Pb-Zn, Au, Fe, Sb, Mo, Bi, Hg), неметаличних минералних сировина (угља, магнезијума, флуора и бора), и напуштени рудници урана.

#### 5.1.1. Узорковање рудничких и површинских вода

За потребе испитивања хемијског састава узорци рудничких вода су узимани на местима истицања из поткопа и на најнижим етажама површинских копова. За потребе истраживања узето је 80 узорака рудничких вода везаних за 59 напуштених рударских радова (слика 5-1). На локацијама на којима је утврђено присуство више рударских радова са истицањем рудничких вода, извршено је узроковање сваке од идентификованих појава.

У циљу процене непосредног утицаја на ресурсе површинских вода, извршено је узроковање вода из речних токова, након њиховог спајања и мешања са рудничким водама. У више наврата узимани су и узорци узводно, у самој зони и низводно од напуштених рударских радова. У склопу истраживања узето је 48 узорака површинских вода. Кампање узорковања су у највећој мери спроведене током летњих и раних јесењих месеци, како би се проценили најнеповољнији услови приликом минималних протицаја површинских токова. Подаци о хемијском саставу површинских вода су у каснијој фази коришћени за валидацију предложене методе за процену ризика

Мерење основних физичко-хемијских параметара вода као што су рН вредност, електропроводљивост, и температура извршена су на терену употребом теренског мерног инструмента Mi805 произвођача *Hanna Instruments*, опремљеног са MA851D/1 мулти-параметарском сондом. Узорци су узимани у полиетиленским боцама запремине 1,5 L и 0,5 L. Да би се спречило обарање метала из воде, мањи део узорка је закисељен азотном киселином (до рН<2).



**Слика 5-1.** Локације напуштених рударских радова у оквиру којих је извршено узорковање рудничких и површинских вода

## 5.2. Лабораторијска испитивања хемијског састава воде

Лабораторијска испитивања хемијског састава рудничких и површинских вода обухватила су утврђивања физичко-хемијских карактеристика, основног јонског састава и укупне концентрација метала и металоида. Анализе су вршене у лабораторији ХЕМОЛАБ и лабораторији Института за хемију, технологију и металургију (ИХТМ) из Београда. Испитивањима су обухваћени следећи параметри:

### Основне физичко-хемијске карактеристике

- Суви остатак на 180 °C
- Минерализација
- Тврдоћа воде
- Електропроводљивост
- Индекс рН
- Утрошак  $\text{KMnO}_4$

### Макрокомпоненте

- Основни катјони ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  и  $\text{K}^+$ )
- Основни анјони ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ )
- Амонијум јон, нитрити, фосфати, силицијум

### Метали и металоиди

- Гвожђе, манган, алуминијум, цинк, бакар, олово, кадмијум, никл, арсен, стронцијум, литијум, хром и селен

### Специфичне компоненте у зависности од врсте лежишта

- Молибден, флуориди, антимон, и садржај појединих радиоактивних елемената (уранијум, торијум, радијум)

За потребе одређивања параметара хемијског састава испитиваних вода примењене су следеће аналитичке методе:

### Гравиметрија

- Минерализација

**Волуметрија**

- Тврдоћа воде
- Утрошак  $\text{KMnO}_4$
- $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$

**Турбидиметрија**

- Сулфати

**Спектрофотометрија (UV-VIS)**

- $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$
- Фосфати

**Атомска адсорбциона спектрометрија (AAS)**

- $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$
- Fe, Mn, Cr, Al, Zn, Cu, Pb, Cd, Ni, As, Mo, Sb, F, U, Sr, Li, Se

**Спектрометрија (ICP-OES)**

- Силицијум

Границе детекције у mg/l за примењене методе за анализиране метале и металоиде су следеће: Fe – 0.01, Mn – 0.01, Cr – 0.001, Al – 0.1, Zn – 0.001, Cu – 0.001, Pb – 0.005, Cd – 0.001, Ni – 0.002, As – 0.0002, Mo – 0.02, Sb – 0.001, Se – 0,0002, Li – 0,0005.

**5.3. Статистичка обрада података**

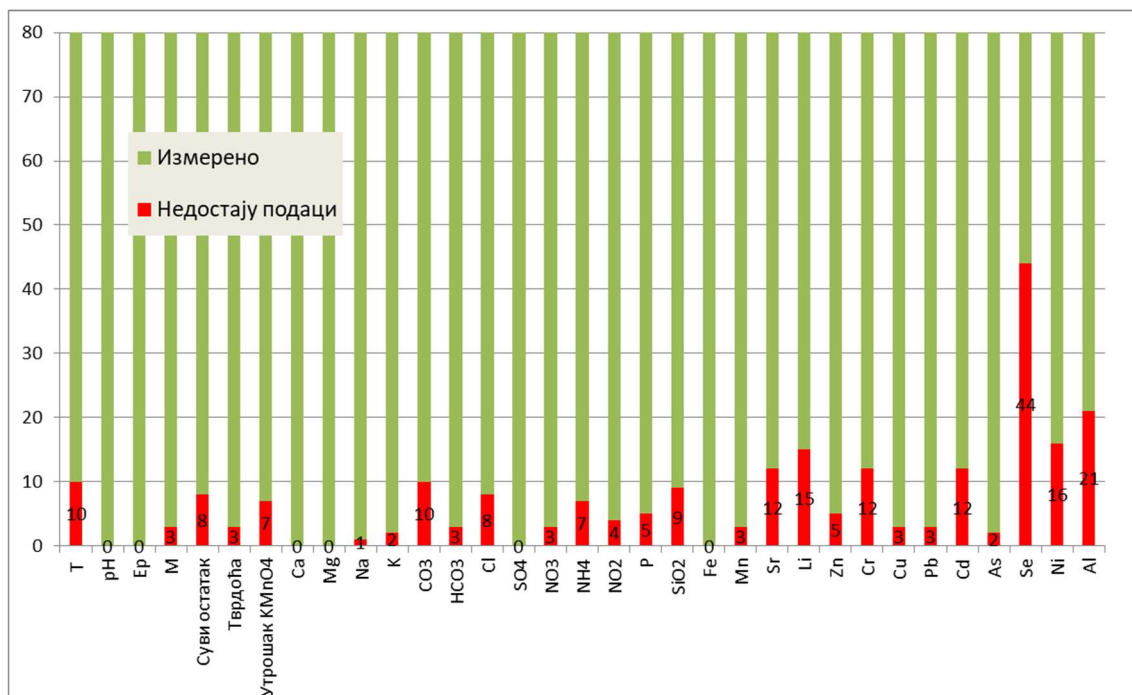
Примане статистичких метода у обради података у највећој мери је коришћена за анализу и интерпретацију резултата хидрохемијских испитивања. Приликом примене статистичких метода коришћени су специјализовани софтверски пакети *IBM SPSS Statistics 19.0* и *StatSoft STATISTICA 10.0*.

**5.3.1. Систематизација и верификација хидрохемијских података**

Након спроведених истраживања извршена је систематизација података хидрохемијских испитивања рудничких и површинских вода. Прегледом резултата утврђено је да од укупно 80 анализа рудничких вода, концентрација селена није



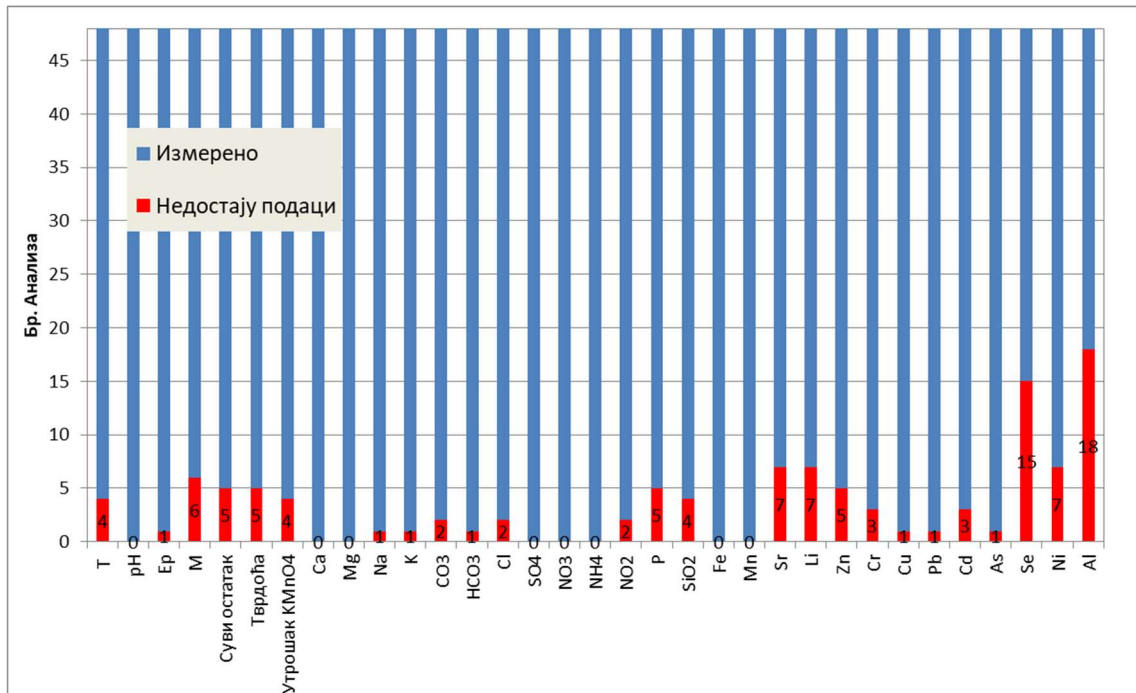
одређивана у 46 узорка, алуминијума у 21 узорку, никла у 16 и литијума у 15 узорка (слика 5-2). За већину анализираних параметара, број података који недостају је мањи од 10, што у односу на укупан број анализа износи мање од 12,5 %.



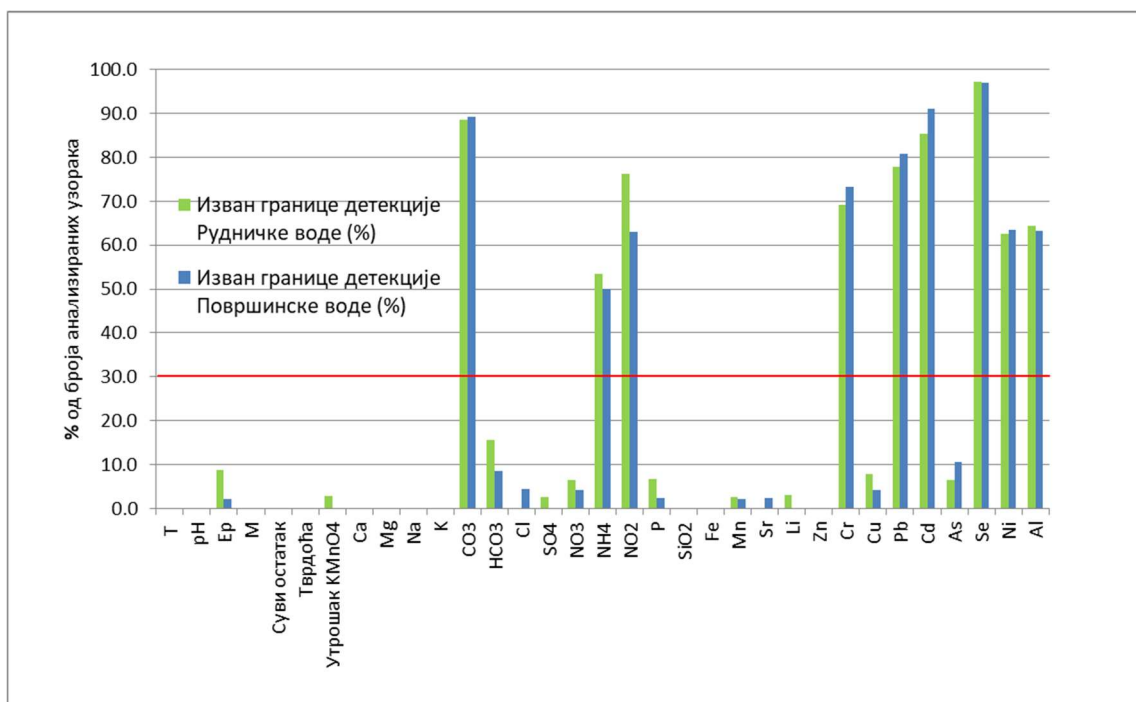
Слика 5-2. Однос броја узорка у којима су измерени разматрани параметри, наспрам броја узорка рудничких вода за које недостају подаци

Када је у питању скуп узорка површинских вода који чини 48 анализа, садржај алуминијума није одређиван у 18, а селена у 15 узорка. Остали анализирани параметри су добро заступљени, са бројем недостајућих података мањим од 10 % за највећи број параметара (слика 5-3).

Процент измерених вредности анализираних параметара који су били испод или изнад прага детекције примењених аналитичких метода приказан је на слици 5-4.



Слика 5-3. Однос броја узорка у којима су измерени разматрани параметри, наспрам броја узорка површинских вода за које недостају подаци



Слика 5-4. процентуално учешће резултата изван границе детекције у укупном броју анализираних вредности параметара хемијског састава рудничких и површинских вода

Са дијаграма се уочава да је значајан проценат резултата мерења садржаја карбоната, амонијум јона и нитрита у испитиваним узорцима испод прага детекције. Када су у питању карбонати ово је и очекивано са обзиром да се у овом облику јављају у базној средини. Од метала, изнад 60% мерења је било испод прага детекције у рудничким и површинским водама за концентрације хрома, олова, кадмијума, селена, никла и алуминијума. Код осталих анализираних параметара учешће броја резултата који су били испод границе мерних инструмената је мање од 10%. С обзиром да су концентрације  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$ , Cr, Cd, Ni, Pb, Al и Se у већини узорака рудничких вода (значајно преко 30 %, што представља предложену границу), биле испод прага детекције примењених аналитичких метода, ови параметри нису даље разматрани у статистичкој обради података. Утрошак  $\text{KMnO}_4$ , с обзиром да није релевантан за спроведена истраживања, такође није детаљније разматран у даљој анализи.

Приликом статистичке обраде података коришћена су 23 параметра, од којих је детаљније разматрано 16 параметара физичко-хемијског састава рудничких вода. Код издвојених параметара, вредности које су биле изнад нивоа детекције замењене су са 75 % вредности границе детекције. Вредности које нису мерене, уколико су неопходне за анализу замењене су просечном вредношћу (тачније медијаном) за дати параметар (Стојковић 2013).

Систематизацијом прикупљених резултата одређен је скуп хидрохемијских података сачињен од 18 параметара хемијског састава мерених на 80 узорака рудничких вода везаних за 59 напуштених рудника на простору Србије. Скуп података за површинске воде чини 20 параметара хемијског састава одређиваних у 48 анализа узоркованих са 35 водотока. За прикупљене податке израчунате су основне статистичке величине: минимум, максимум, опсег, стандардна девијација, аритметичка и геометријска средина, медијана, коефицијент асиметрије. Испитивања међусобних зависности између концентрација појединих елемената у рудничким водама спроведено је на основу Спермановог коефицијента корелације (енгл. *Spearman's correlation*).

### 5.3.2. Мултиваријантне статистичке методе

У циљу класификације прикупљених података и идентификације основних процеса који су довели до формирања хемијског састава рудничких вода, примењене су мултиваријантне статистичке методе, пре свега кластер анализа (енгл. *Hierarchical Cluster Analysis, HCA*) и факторна анализа (енгл. *Factor Analysis, FA*). Ове мултиваријантне статистичке методе су успешно примењене у бројним студијама о хидрогеохемијским карактеристикама површинских и подземних вода (Cloutier et al. 2008, Juahir et al. 2011, Singh et al. 2013, Taoufik et al. 2017). У области рудничких вода ове методе се углавном примењују приликом испитивања генезе и дистрибуције основних типова вода, као и приликом процене квалитета рудничких вода, земљишта и речног седимента у зони утицаја рударских активности (Alvarez et al. 2006, Stiles et al. 2011, Li et al. 2017). Мултиваријантне статистичке методе су такође примењене у анализи ризика од загађивања под утицајем рударске индустрије и рудничких вода (Carlton et al. 2001, Pandey et al. 2016, Sahoo et al. 2017).

Пре примене мултиваријантних статистичких метода извршена је провера да ли је постојећи скуп података адекватан за спровођење предметних анализа. На основу Кајзер-Мајер-Олкинове мере адекватности (енгл. *Kaiser-Meyer-Olkin Measure of Sampling Adequacy, KMO*) оцењено је да постоји довољан број узорака воде у односу на број анализираних варијабли. Вредност *KMO* за скуп хидрохемијских података рудничких вода износи 0,807, при чему се све вредности веће од 0,5 сматрају прихватљивим (Hutcheson and Sofroniou 1999, Стојковић 2013).

За свих 16 разматраних параметара извршена је стандардизација података, тако што су израчунате њихове тзв. стандардне z-вредности (Güler et al. 2002, Стојковић 2013).

### 5.3.2.1. Кластер анализа

Хијерархијска кластер анализа (*HCA*) представља статистичку методу која се користи за груписање великог броја испитиваних узорака, на основу сличности у физичким особинама и хемијском саставу. Применом кластер анализе могуће је груписање и класификација појава рудничких вода на основу више параметара, у односу на класичан приступ испитивања међусобних зависности између појединих параметара. Ове особине кластер анализу чине примењивом приликом груписања већег броја узорака рудничких вода, с обзиром на велику варијабилност њихових хидрохемијских особина, често и у оквиру истих или сличних типова лежишта и напуштених радова.

Карактеристично за издвојене кластере (групе узорака) јесте да су узорци у оквиру једног кластера сличних особина, а да се разликују од узорака у другим кластерима (Güler et al. 2002, Стојковић 2013). За процену сличности између узорака, као мера сличности коришћено је Еуклидско растојање (енгл. *Euclidean distance*), док је за повезивања сличних узорака у кластере примењена Вардова (енгл. *Ward's method*) метода (Ward 1963, Massart and Kaufman 1983).

На пољу примене *HCA* анализе постоје опречна мишљења у погледу расподеле података са којима се улази у анализу. Преовлађујуће мишљење је да мултиваријантне статистичке методе, па тиме и кластер анализу, треба примењивати на подацима који су нормално распоређени. Међутим, с обзиром да кластер анализа не укључује тестирање хипотезе и прорачун степена важности (енгл. *significance levels*), прихватљиво је применити кластер анализу и на подацима који не задовољавају у потпуности овај услов (Romesburg 2004). У оквиру истраживања, на скупу хидрохемијских података рудничких вода кластер анализа је изведена у две варијанте: са трансформисаним подацима и са сировим подацима. Имајући у виду да је циљ спроведене кластер анализе у овом истраживању груписање појава рудничких вода према параметрима индикативним за процену потенцијала за изазивање загађења, резултати *HCA* анализе примењене на сирове податке, оцењени су као адекватнији.

Резултати кластер анализе исказују се графички преко дендограма. Груписање појава врши се визуелном инспекцијом дендограма, кроз задавање тзв. границе груписања (енгл. *phenon line*). Узорци чије је еуклидско растојање мање од границе груписања сврстани су у један кластер, при чему је граница груписања одабрана тако да се истакну разлике у хидрохемијским особинама издвојених група (Sneath and Sokal 1973, Оуебог, et al. 2012, Стојковић 2013).

За потребе процене ризика, *HCA* је примењена за класификацију рудничких вода на основу потенцијалног утицаја на животну средину. Да би се добили подаци који могу бити употребљени у даљој анализи утицаја на водне ресурсе, коришћени су следећи параметри: рН, минерализација,  $\text{SO}_4^{2-}$ , Fe и As. Ови параметри су одабрани јер могу бити индикатори загађења вода као последица утицаја рударских радова (Atanacković et al. 2013).

#### 5.3.2.2. Факторна анализа

Факторна анализа се базира на утврђивању интеркорелација између параметара, односно груписању варијабли које су међусобно корелисане, на основу којих се могу изводити закључци о преовлађујућим хидрохемијским процесима. Основни циљ факторне анализе јесте издвајање фактора, којих треба да је што мање, а који при том објашњавају значајан део варијансе полазног скупа података (Стојковић 2013).

Факторна анализа примењена је на 16 параметара хемијског састава одређених на 80 узорка рудничких вода. Параметри укључени у анализу су: Ca, Mg, Na, K,  $\text{HCO}_3$ , Cl,  $\text{SO}_4$ , P,  $\text{SiO}_2$ , Fe, Mn, Zn, Cu, и As, као и ЕС и рН. За примену анализе извршена је ln трансформација података. На овај начин значајно је побољшана нормалност расподеле података. Уз трансформацију, извршена је и, већ споменута, стандардизација података.

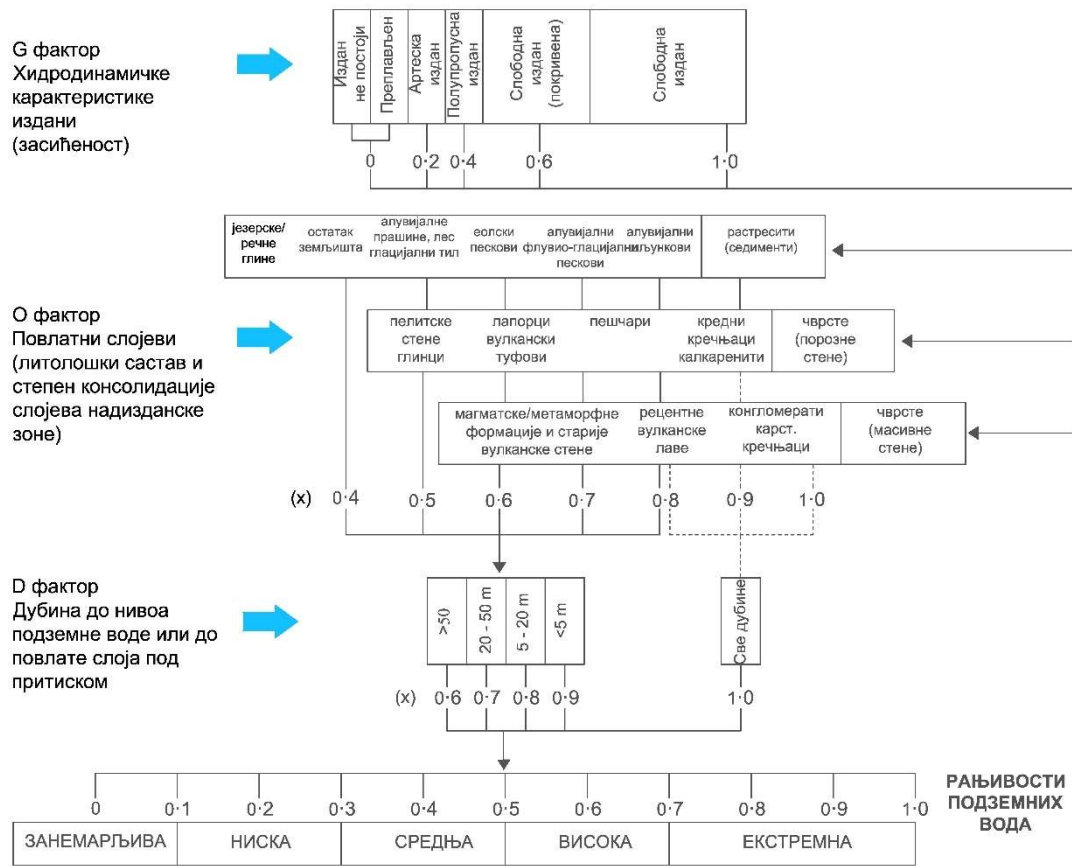
За потребе издвајања преовлађујућих фактора примењена је метода анализе главних компонената (енгл. *Principal Component Analysis, PCA*). Приликом одабира главних фактора у обзир су узети Кајзеров критеријум (Kaiser 1960), Кателов графички тест одрона (Cattell 1966) и кумулативни проценат варијансе, који објашњава сваки од фактора. Ради лакше интерпретације издвојених фактора, у контексту доприноса одређених варијабли (хемијских параметара) издвојеним факторима, примењена је варимакс ортогонална ротација (Helena et al. 1999, Стојковић 2013).

#### 5.4. Анализа рањивости подземних вода

Регионалном анализом рањивости подземних вода обухваћен је простор јужно од Саве и Дунава. Као што је већ напоменуто територија АП Војводина није узета у разматрање због веома малог броја напуштених рударских радова формираних у оквиру разматраних лежишта. С обзиром на величину простора и доступност података, за анализу рањивости примењена је *GOD* метода (Foster 1987). Основни критеријум за одабир методе била је њена релативна једноставност, примењивост за различите типове издани и доступност неопходних података. Рањивост подземних вода је процењена на основу три параметра (Живановић 2009):

- Хидродинамичке карактеристике издани (енгл. *Groundwater occurrence*).
- Литолошки састав и степен консолидације слојева у зони аерације (енгл. *Overall Aquifer Class*).
- Дубина до нивоа подземних вода или слоја под притиском (*Depth to groundwater*).

Модификована шема (Vrba and Zaporozec 1994, Foster et al. 2002, Живановић 2009) је коришћена за квантификацију параметара (слика 5-5).



Слика 5-5. Шема за квантификацију параметара према GOD методи (Foster et al. 2002, Живановић 2009)

Регионална анализа рањивости је спроведена на бази геолошке карте Србије размере 1:300 000 (по подацима групе аутора 1970). Резултати прорачуна GOD индекса су даље коришћени приликом процене индекса од загађивања подземних вода и укупног индекса ризика.



**III**  
**РАЗВОЈ МЕТОДОЛОГИЈЕ ЗА**  
**ПРОЦЕНУ РИЗИКА**

## 6. РАЗВОЈ МЕТОДОЛОГИЈЕ ЗА КАРАКТЕРИЗАЦИЈУ РУДАРСКИХ РАДОВА НА БАЗИ РИЗИКА ОД ЗАГАЂИВАЊА ВОДНИХ РЕСУРСА

Прегледом постојећих приступа у решавању проблематике напуштених рударских радова приказаних у поглављу 4.5., може се констатовати да су и поред смерница проистеклих из директиве о рударско отпаду, на нивоу појединачних држава присутни национални приступи за њихову идентификацију и рангирање према степену ризика од загађивања. Разлог за развој појединачних приступа лежи у различитости броја и размере напуштених радова, нивоа детаљности постојећих података и расположивости средстава за истраживања и ремедијацију. У том контексту предложена је параметарска метода за карактеризацију напуштених рударских радова на бази ризика од загађивања водних ресурса на простору Србије. За разлику од квалитативне методе из *MWD* директиве, предложена методологија се базира на семи-квантитативном приступу кроз увођење и додељивање одговарајућих индекса за одабрани скуп параметара. Такође, поред одлагалишта рударског отпада у разматрање су узети и напуштени рударски радови (поткопи, површински копови...).

Иако могу утицати и на друге елементе животне средине (ваздух, земљиште), акценат у предложеној методи је на водним ресурсима, а овакав приступ базиран је на следећем:

- површинске и подземне воде представљају ресурсе од виталног значаја за живот и здравље људи, као и базу за правилан развој и функционисање екосистема,
- негативан је најдуготрајнији и у највећој мери се огледа у погоршању квалитета површинских и подземних вода у зони и низводно од напуштених рударских радова и
- неконтролисано истицање рудничких вода из напуштених рударских радова и одлагалишта рударског отпада представља процес који најзначајније утиче на стање водних ресурса, и појединачно представља један од највећих изазова у области интеракције ових објеката и животне средине.

Овде треба напоменути да поред водних ресурса, напуштени рударски радови могу утицати на погоршање квалитета земљишта, ваздуха и промене рељефа. У неким случајевима ови ефекти могу бити веома изражени, што у многоструко зависи од климатских, геолошких, хидрогеолошких услова и врсте рударских радова. Такође, треба имати у виду да су основни елементи животне средине међусобно повезани, и да често загађење ваздуха може довести до погоршања квалитета вода кроз појаву киселих киша, као и да воде оптерећене повећаним садржајем загађујућих супстанци могу довести до загађења земљишта.

### **6.1. Основне претпоставке за развој методе**

Предложена методологија за прелиминарну процену ризика (на регионалном нивоу) који напуштени рударски радови представљају у контексту загађивања водних ресурса, развијена је на бази следећих претпоставки:

- Предложени приступ за процену ризика је базиран на концепту развијеном и примењеном за израду карте ризика од загађивања подземних вода (Zwahlen 2004), уз одговарајуће модификације како би се истакле специфичности и омогућила адекватна категоризација и квантификација напуштених рударских радова као потенцијалних загађивача.
- За процену ризика примењен је семи-квантитативни приступ, приликом чега су за издвојене факторе додељиване одговарајуће вредности индекса за одабране параметре. Процена степена хазарда и ризика од загађивања површинских и подземних вода, извршена је сврставањем у одређену категорију на основу укупно прорачунате вредности индекса.
- Процена укупног ризика извршена је применом математичке теорије атрибута базиране на фази приступа, док је за прелиминарна процена ризика на нивоу сливова коришћена квалитативна матрица ризика.
- Прорачунска шема је развијена на бази карактеристика рударских радова које су релевантне са аспекта процене утицаја на водне ресурсе.

- Граничне вредности за одабране параметре су успостављене на бази постојећих услова на простору Србије.
- Методологија је базирана на извор-транспорт-рецептор концепту.
- Предложена методологија је развијена за примену у *GIS* окружењу.

Подаци неопходни за примену предложене методологије су следећи: локација напуштених рударских радова; присуство одлагалишта јаловине и његове размере; присуство флотацијских јаловишта; појаве истицања рудничких вода и количина; хидрохемијске карактеристике рудничких вода; тип минералне сировине; преовлађујући тип стене; тип издани; дубина до нивоа подземних вода; удаљеност до најближег површинског тока и ред најближег водотока. За процену укупног ризика, поред наведених, у обзир су узети и удаљеност до најближег насеља низводно од напуштених рударских радова као и удаљеност до заштићеног подручја (парка природе, националног парка итд.). С обзиром на неопходне подлоге, за примену методологије потребно је претходно извршити прикупљање постојећих података. Поред примене на простору Србије, процена је да већина земаља у оквиру различитих база података и геолошких информационих система, као и у оквиру катастра рударског отпада, поседују потребне податке. Такође неки од података могу бити прикупљени на основу примене метода даљинске детекције. Уколико подаци о хидрохемијским карактеристикама нису доступни, за примену методологије је неопходно узорковање и испитивање хемијског састава рудничких вода.

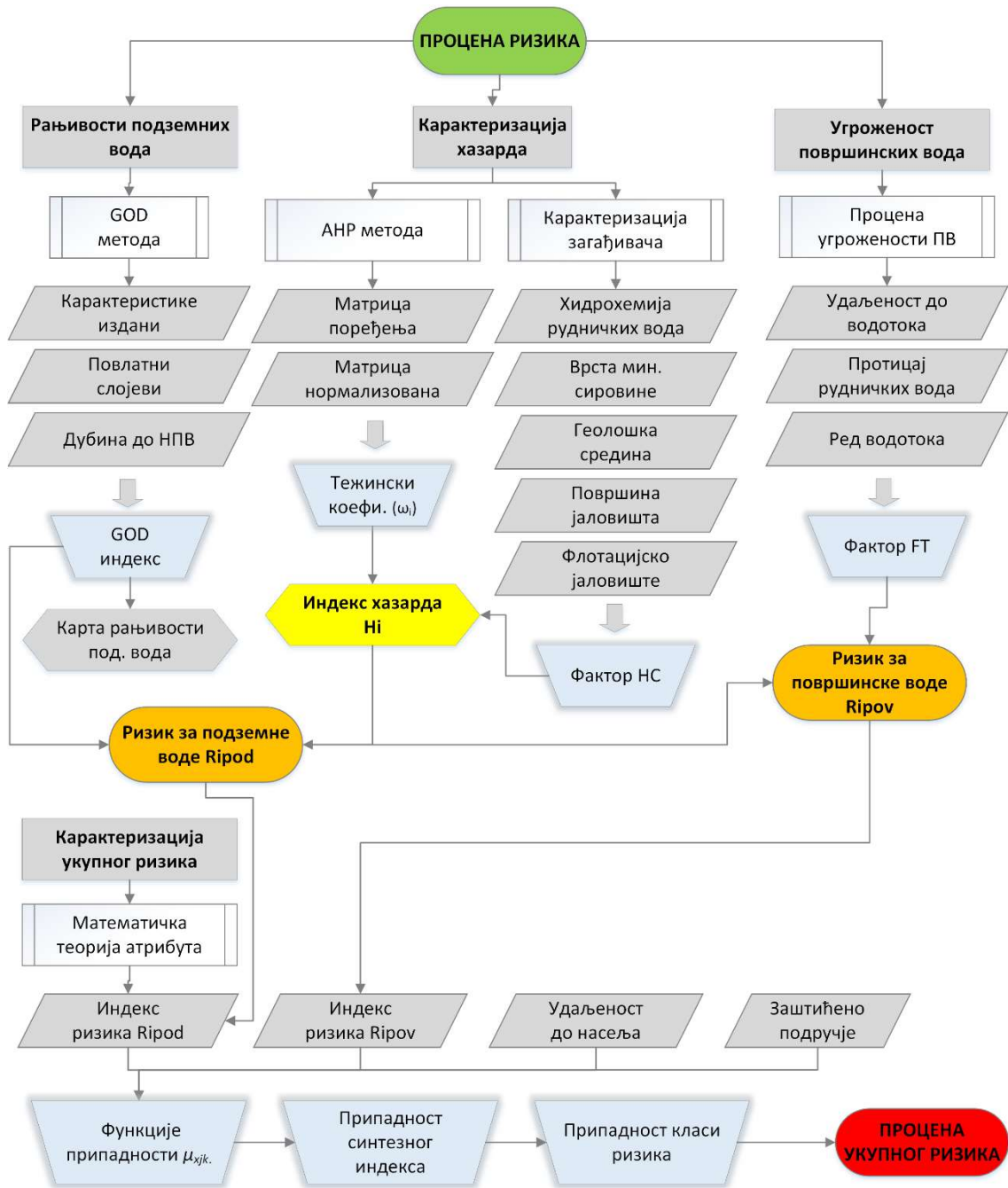
Методологија за процену ризика од загађивања водних ресурса базирана је на интеграцији напуштених рударских радова као потенцијалних загађивача или хазарда у овом случају, природне рањивости подземних вода и потенцијала за транспорт загађујућих супстанци од њиховог извора до површинских вода.

## 6.2. Поступак примене методе

Основни кораци приликом примене предложене методологије укључују: евалуацију напуштених рударских радова као потенцијалних хазарда, процену рањивости подземних вода применом *GOD* методе и процену угрожености површинских вода. Даље, на бази ових елемената врши се израчунавање индекса ризика од загађивања за подземне и површинске воде. Коначна интеграција се врши у форми укупног ризика (слика 6-1).

Поступак примене методе за прелиминарну процену ризика базиран је на 4 основна корака:

1. идентификација и класификација хазарда (напуштених рударских радова),
2. процена угрожености и рањивости површинских и подземних вода,
3. процена ризика од загађивања површинских и подземних вода, и
4. карактеризација укупног ризика.



Слика 6-1. Шематски приказ поступка примене методологије за карактеризацију напуштених рударских радова на бази ризика

### 6.2.1. Идентификација и карактеризација хазарда

За потребе процене степена хазарда, тј. класификације напуштених рударских радова као потенцијалних извора загађујућих супстанци, разматрано је пет критеријума (Atanacković et al. 2016):

- 1) физичко-хемијске карактеристике рудничких вода изражене преко припадности одређеном кластеру издвојеном на основу *НСА* анализе,
- 2) врста минералне сировине,
- 3) геолошка средина тј. преовлађујућа група минерала који улазе у састав стена у оквиру којих је формирано лежиште,
- 4) величина рудног јаловишта изражена преко његове површине, и
- 5) постојање флотацијског јаловишта или мокре сепарације угља у зони напуштених рударских радова

Предложеним критеријумима додељене су вредности у опсегу од 0 до 300, за сваки од анализираних напуштених рударских радова (табела 6-1). Како би се одредила њихова релевантност, за сваки од критеријума израчунати су тежински коефицијенти.

**Табела 6-1.** Критеријуми и вредности за прорачун индекса хазарда

Критеријуми	Вредности и индекси			
	A1	A2	B3 и B4	C5 и C6
НСА Кластер* (НС1)	200	100	300	300
Врста минер. сировине (НС2)	Индустријске	Угаљ	Металичне и радиоактивне	
	100	200	300	
Геолошка средина (НС3)	Карбонатне	Карбонатне и силикатне	Силикатне	
	100	200	300	
Површина рудног јаловишта (НС4)	<0.01 km <sup>2</sup>	0.01-0.05 km <sup>2</sup>	0.05-0.1 km <sup>2</sup>	>0.1 km <sup>2</sup>
	100	175	250	300
Флотацијско јаловиште и сепарација (НС5)	Не	Сепарација	Да	
	0	200	300	

\* На бази резултата примене *НСА* анализе на узорцима рудничких вода

Уколико за неки од напуштених радова нису познати неопходни подаци, предлаже се конзервативни приступ и за репрезентативну се усваја максимална вредност индекса.

### 6.2.1.1. Прорачун тежинских коефицијената АНР методом

За потребе прорачуна тежинских коефицијената примењена је матрица поређења према методи аналитичког хијерархијског процеса (енгл. *analytic hierarchy process*, АНР), чији је зачетник Thomas L. Saaty (1980).

Метода је развијена крајем 70-их година XX века, и од тада је постала једна од најраспрострањенијих метода за више-критеријумско одлучивање (MCDM). АНР метода подразумева структурирану процену која укључује сет критеријума на основу којих се врши одабир најповољније опције. На основу матрица се за сваки од разматраних критеријума додељују тежински коефицијенти, и врши се рангирање (табела 6-2).

**Табела 6-2.** Сатијева 1-9 скала за примену у АНР методи (Saaty 2008)

Интензитет значајности	Дефиниција	Коментар
1	Једнака важност	Доприносе једнако циљу
2	Незнатно или слабо	
3	Средње значајан	Благо фаворизују једну активност
4	Средње плус	
5	Јако значајан	Јако фаворизују једну активност
6	Јако плус	
7	Веома јако	Активност је веома јако фаворизована, и њен значај је доказан у пракси
8	Строго значајнији	
9	Екстремна важност	Активност је на највиши начин фаворизована у односу на другу
Реципрочне вредности	Уколико активност $i$ има једну од наведених вредности када се пореди са активношћу $j$ , онда $j$ има реципрочну вредност када се пореди са $i$	
1,1-1,9	Уколико су активности веома блиске по значају	



За сваки од 5 издвојених критеријума (НС1-НС5) израчунати су тежински коефицијенти на основу матрице поређења. За формирање матрице коришћена је Сатијева 1-9 скала.

Ако претпоставимо да се матрица  $A$  састоји од  $n \times n$  вредности, где  $n$  заправо означава број критеријума (у нашем случају 5), свака вредност  $a_{ij}$  у матрици  $A$  представља важност критеријума  $i$  у односу на критеријум  $j$ , а према скали 1-9 из табеле 6-2. Уколико је  $a_{ij} > 1$ , онда је  $i$ -ти критеријум важнији од  $j$ -ог критеријума, а уколико је  $a_{ij} < 1$  онда је критеријум  $i$  мање значајан од критеријума  $j$ . Производ између вредности  $a_{ij}$  и  $a_{ji}$  је једнак јединици, што значи да у случају када је  $a_{ij}$  позитивна вредност, онда је  $a_{ji} = 1/a_{ij}$ .

Након формирања матрице врши се нормализација и формира се нормализована матрице  $A_{\text{норм}}$  од нормализованих вредности  $\bar{a}_{ij}$ , тако што се свака вредност  $a_{ij}$  дели са сумом колоне којој припада, а према следећој једначини (Saaty 1980):

$$\bar{a}_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^n a_{kj}} \quad [1]$$

Коначно тежински фактор  $\omega$  се израчунава као аритметичка средина вредности у сваком појединачном реду у матрици, према једначини (Saaty 1980):

$$\omega_i = \frac{\sum_{k=1}^n \bar{a}_{ik}}{n} \quad [2]$$

Након израчунавања тежинских коефицијената проверава се валидност усвојених односа. Валидност постављене матрице се проверава преко коефицијента конзистенције ( $CR$ ), који представља однос између индекса конзистенције ( $CI$ ) и насумичног индекса конзистенције ( $RI$ ).

Индекс конзистенције се израчунава преко следеће формуле (Saaty 2003):

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{(n-1)} \quad [3]$$

где је  $\lambda_{max}$  сопствена вредност матрице, а  $n$  је број фактора. Вредност  $\lambda_{max}$  се израчунава тако што се вредности у свакој колони матрице  $A$  најпре помноже са одговарајућим тежинским фактором  $\omega$  за сваки од критеријума, а након тога се за новоформирану матрицу врши сумирање вредности у сваком од редова и добија се  $\omega_s$ .

Након прорачуна, вредност  $\omega_s$  се дели са претходно одређеном вредношћу за тежински фактор  $\omega$  за сваки од издвојених критеријума. Аритметичка средина овако добијених количника  $\omega_s/\omega$  представља сопствену вредност матрице  $\lambda_{max}$ .

Вредност за насумични индекс конзистенције ( $RI$ ) се преузимају из табеле 6-3, а у зависности од броја критеријума.

**Табела 6-3.** Вредности насумичног индекса конзистенције ( $RI$ ) у односу на број анализираних критеријума (Saaty 1980)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.46	1.49

Коначно, на основу добијених вредности израчунава се коефицијент конзистенције према следећој једначини:

$$CR = CI/RI \quad [4]$$

Уколико је вредност  $CR < 0,1$  (10 %) сматра се да је матрица упоређивања према *AHP* методи конзистентна (Saaty 1994, Saaty 2003).

### 6.2.1.2. Прорачун индекса хазарда

Индекс хазарда који напуштени рударски радови представљају за ресурсе површинских и подземних вода процењен је на основу прорачунске шеме за предложене факторе (НС1-НС5) из табеле 6-1 и израчунатих тежинских фактора ( $\omega$ ), а према следећој једначини:

$$N_i = \sum_{i=1}^n NS_i \times \omega_i \quad [5]$$

На основу индекса хазарда анализирани напуштени рударски радови су класификовани према потенцијалу да представљају изворе загађења у пет категорија:

Индекс хазарда	
Категорија хазарда	Вредност
Веома низак	<80
Низак	80-100
Средњи	100-135
Висок	135-170
Веома висок	>170

### 6.2.2. Процена угрожености и рањивости површинских и подземних вода

Како би се проценио интензитет ризика, поред идентификације и класификације хазарда, потребно је проценити и подложност и изложеност рецептора, у овом случају површинских и подземних вода, загађивању.

У том циљу, угроженост површинских вода тј. могућност транспорта загађујућих супстанци од потенцијалног извора загађења (напуштених рударских радова) до најближег површинског тока, као и могућност ублажавања загађења процењена је на основу три фактора (Atanacković et al. 2016):

- 1) удаљеност до најближег површинског тока (Т1),
- 2) протицај рудничких вода (Т2) и
- 3) ред најближег водотока (Т3)

За издвојене факторе предложене су вредности у опсегу од 0 до 1, а према прорачунској шеми приказаној у табели 6-4.

**Табела 6-4.** Критеријуми за избор вредности фактора за процену угрожености површинских вода од загађивања под утицајем напуштених рударских радова

Удаљеност до површинског тока (Т1)		Протицај рудничких вода (Т2)		Ред водотока (Т3)	
Удаљеност (m)	Вредност	Протицај (L/s)	Вредност	Ред	Вредност
< 100	0,50	< 1	0,15	1	1
100 – 500	0,30	1 - 10	0,30	2-3	1,5
> 500	0,15	> 10	0,50	> 3	3

Вредности фактора ( $FT$ ) процењене су уз претпоставку да се потенцијал за транспорт загађујућих супстанци повећава са смањењем раздаљине рудника и површинског тока, као и повећањем количине рудничких вода које истичу из напуштених радова. Ово је обрнуто пропорционално са протицајем потенцијално угроженог површинског тока. У недостатку података о протицајима за већину токова у близини рударских радова, количина воде је изражена преко релативног појма ред водотока. Наиме, са повећањем реда водотока повећава се и протицај, а самим тим и могућност разблажења и ублажавања загађења (Atanasković et al. 2016). Оваква претпоставка такође је примењена и приликом развоја методе за процену ризика за напуштена одлагалишта рударског отпада на простору Шпаније, развијене од стране шпанског геолошког института (IGME 2016).

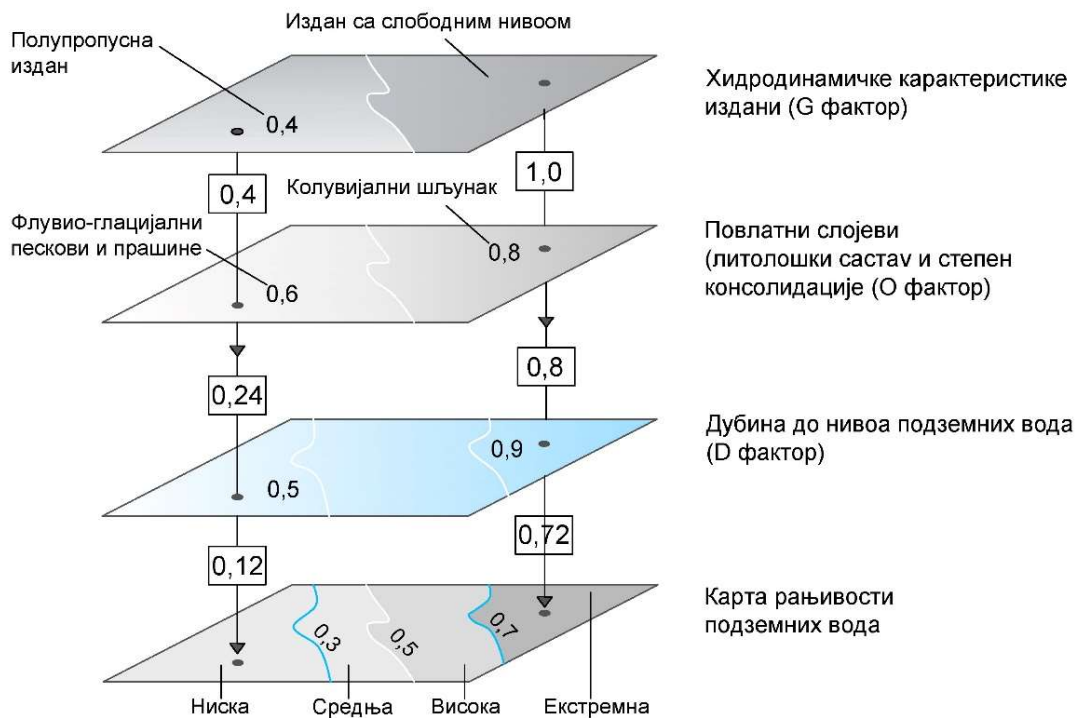
Наведене претпоставке за процену фактора ( $FT$ ) су математички изражене у виду једноставног израза приказаног у следећој једначини:

$$FT = \frac{T_1 + T_2}{T_3} \quad [6]$$

Подложност подземних вода загађивању под утицајем напуштених рударских радова процењена је на основу анализе природне рањивости подземних вода. Као што је већ напоменуто у одговарајућем поглављу, за процену рањивости подземних вода примењена је *GOD* метода, која је базирана на три фактора (Foster 1987, Живановић 2009):

- 1) хидродинамичке карактеристике издани (*G*),
- 2) литолошки састав и степен консолидације слојева у зони аерације (*O*) и
- 3) дубина до нивоа подземних вода или слоја под притиском (*D*)

Вредности *GOD* индекса се крећу у интервалу од 0 до 1, уз повећање рањивости подземних вода са повећањем вредности индекса. Израчунавање индекса рањивости изведено је преклапањем одговарајућих олеата у *GIS* окружењу, у сагласности са примером приказаним на слици 6-2.



**Слика 6-2.** Шематски приказ примене *GOD* методе за процену природне рањивости подземних вода (Foster et al. 2002, Живановић 2009)

С обзиром да је карактеризација према степену ризика извршена на регионалној размери, напуштени рударски радови су задавани као тачкасти ентитети (енгл. *point features*). Највиша вредност *GOD* индекса у кругу од 1 km од тачке којом су представљени напуштени рударски радови је усвојена као репрезентативна вредност индекса рањивости подземних вода, која је даље укључена у процену ризика (Atanacković et al. 2016).

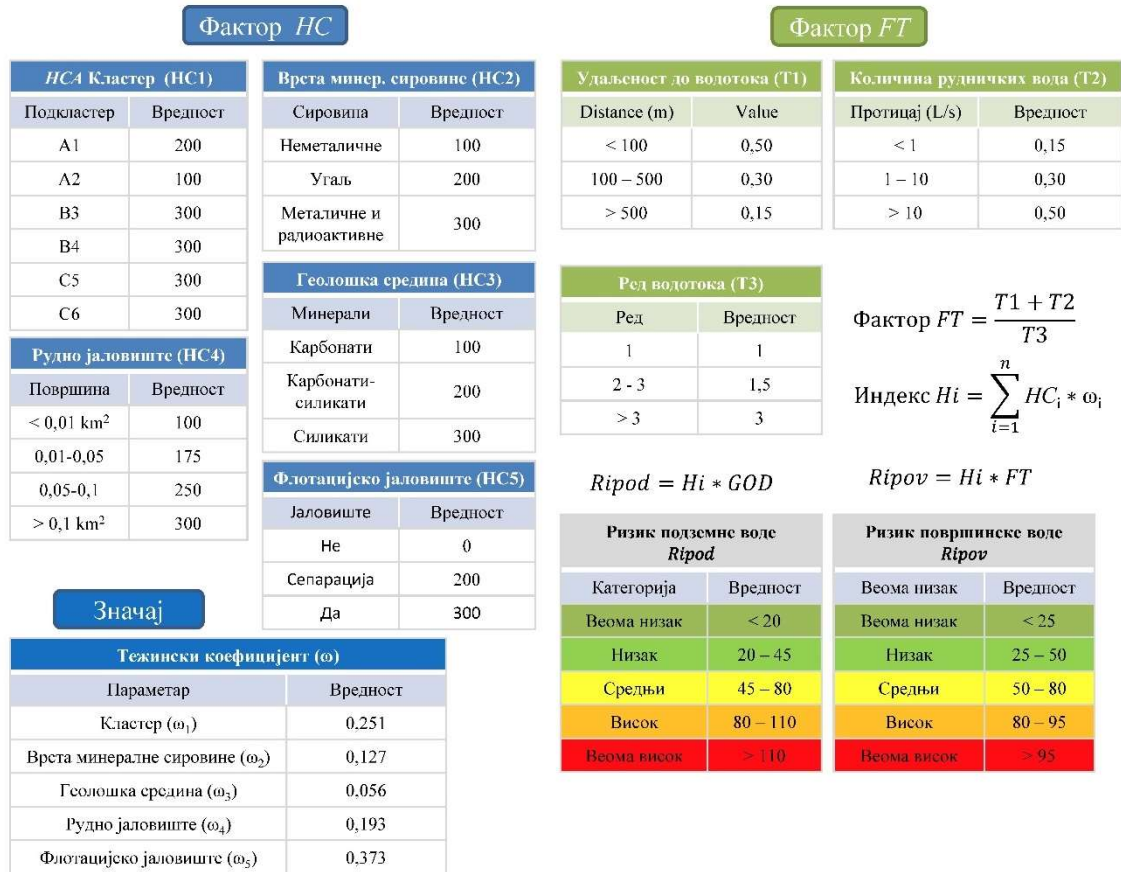
### 6.3. Процена ризика

Карактеризација напуштених рударских радова на бази ризика изведена је на основу индекса укупног ризика, као и на бази ризика од загађивања површинских и ризика од загађивања подземних вода. За процену ова два ризика коришћен је индекс хазарда, уз разлику да је ризик од загађивања површинских вода процењен множењем индекса хазарда и фактора *FT* (јед. 7), док је степен ризика који напуштени радови представљају за подземне воде оцењен као производ индекса хазарда и *GOD* индекса рањивости (јед. 8).

$$R_{i_{\text{пов}}} = H_i \times FT \quad [7]$$

$$R_{i_{\text{под}}} = H_i \times GOD \quad [8]$$

Прорачунска шема развијена за процену ризика који напуштени рударски радови представљају у контексту загађивања водних ресурса приказана је на слици 6-3.



**Слика 6-3.** Прорачунска шема за процену степена ризика који напуштени рударски радови представљају по загађивање површинских и подземних вода (модификовано према Atanacković et al. 2016)

Категоризација напуштених рударских радова према степену ризика извршена је груписањем појава према индексу ризика за подземне и за површинске воде у следеће категорије:

	Индекс ризика подземне воде	Индекс ризика површинске воде
Категорија ризика	Вредност	Вредност
Веома низак	<20	<25
Низак	20-45	25-50
Средњи	45-80	50-80
Висок	80-110	80-95
Веома висок	>110	>95

#### 6.4. Карактеризација укупног ризика

Ради сагледавања укупног ризика који напуштени рударски радови представљају по ресурсе површинских и подземних вода, потребно је узети у обзир и њихову осетљивост. Она може бити изражена преко степена у коме еколошка и економска вредност коју ови ресурси поседују може бити умањена, као и евентуалну смањење изгледа за њихову будућу употребу. С обзиром да се анализа изводи на регионалном нивоу, ови елементи су процењени посредно. Наиме, усвојена је претпоставка да се у оквиру насељених места површинске и подземне воде, поред јавног водоснабдевања, захватају и користе и на нивоу индивидуалних домаћинстава. Захватање се најчешће врши за потребе наводњавања и напајања стоке, а често и за пиће. Такође, у оквиру заштићених зона са специфичним природним одликама површинске и подземне воде имају посебан значај за развој биоценозе ових подручја.

У том циљу, за процену потенцијалних нежељених ефеката који се могу јавити као последица погоршања квалитета водних ресурса, у склопу карактеризације укупног ризика у обзир су узети следећи фактори:

- 1) индекс ризика за површинске воде,
- 2) индекс ризика за подземне воде,
- 3) удаљеност до најближег насељеног места низводно од напуштених рударских радова, и
- 4) удаљеност до најближег заштићеног подручја

На основу наведених фактора напуштени рударски радови су према укупном степену ризика сврстани у четири категорије: низак, средњи, висок и веома висок. Квантификација је базирана на додељивању бројних вредности индекса за одабране параметре. Како би се избегла категоризација на основу строго утврђених граничних вредности, примењене су математичке операције које омогућавају одређивање мере припадности атрибута класама ризика. Примењена методологија



је базирана на фази (енгл. *fuzzy*) приступу за груписање појава у категорије према укупном степену ризика, кроз одређивање функција припадности сваког од критеријума издвојеним класама ризика.

#### 6.4.1. Методологија за одређивање укупног ризика

Одређивање укупног ризика извршено је на основу методологије базиране на фази логици. Фази логика допушта опсег вредности између бинарних, односно искључивих тврдњи: „0“ или „1“, „да“ или „не“ или „истинито-не истинито“, приликом чега се припадност неког елемента скупу мери степеном припадности (Zimmermann 1996, Бајић 2015). Методологија примењене у предметним истраживањима се ослања на фази концепт, и у литератури се назива математичка теорија атрибута (енгл. *attribute mathematical theory*). Атрибут се у математици често употребљава као појам који описује одређене карактеристике или особине одређеног објекта, на основу којих се он може поредити и груписати са сличним објектима (Russell 2017). У предметном истраживању атрибути представљају издвојене факторе на основу којих је извршена карактеризација ризика. Примењена методологија за одређивање припадности напуштених рударских радова издвојеним класама ризика састоји се од три основна корака (Li et al. 2013):

1. анализа мере припадности појединачних фактора,
2. анализа мере припадности синтезног вишеструког индекса и
3. анализа припадности одређеној класи ризика

##### 6.4.1.1. Анализа мере припадности појединачних фактора

За сваки од четири предложена фактора одређена је функција припадности свакој од четири издвојене класе ризика. За сваки од фактора издвојене су четири категорије са граничним вредностима  $a_{jk}$  ( $j=1, 2, \dots, m$ ; и  $k=0, 1, 2, \dots, K$ ), где је  $m$  број фактора, а  $K$  број класа ризика. Граничне вредности морају да задовоље следеће услове:  $a_{j0} < a_{j1} < \dots < a_{jK}$  или  $a_{j0} > a_{j1} > \dots > a_{jK}$ . За потребе дефинисања

функције припадности  $\mu_{xjk}$  за сваки од фактора неопходно је израчунавање параметара  $b_{jk}$  и  $d_{jk}$  на основу следећих једначина (Li et al. 2013):

$$b_{jk} = \frac{a_{jk-1} + a_{jk}}{2} \quad [9]$$

$$d_{jk} = \min\{|b_{jk} - a_{jk}|, |b_{jk+1} - a_{jk}|\} \quad k = 1, 2, \dots, K-1 \quad [10]$$

За параметар  $d_{jk}$  се усваја мања од апсолутних вредности добијених на основу једначине (10). Ако претпоставимо да су  $a_{j0} < a_{j1} < \dots < a_{jK}$ , функција припадности фактора одређеној класи ризика  $\mu_{xjk}$  се израчунава на следећи начин (Li et al. 2013):

$$\mu_{xj1}(t) = \begin{cases} 1 & t < a_{j1} - d_j \\ \frac{a_{j1} + d_j - t}{2d_j} & a_{j1} - d_j \leq t \leq a_{j1} + d_j \\ 0 & t > a_{j1} + d_j \end{cases} \quad [11]$$

$$\mu_{xjk}(t) = \begin{cases} 0 & t < a_{jk-1} - d_j \\ \frac{t - a_{jk-1} + d_j}{2d_j} & a_{jk-1} - d_j \leq t \leq a_{jk-1} + d_j \\ 1 & a_{jk-1} + d_j < t < a_{jk} - d_j \\ \frac{a_{jk} + d_j - t}{2d_j} & a_{jk} - d_j \leq t \leq a_{jk} + d_j \\ 0 & t > a_{jk} + d_j \end{cases} \quad [12]$$

$$\mu_{xjp}(t) = \begin{cases} 0 & t < a_{jp-1} - d_j \\ \frac{t - a_{jp-1} + d_j}{2d_j} & a_{jp-1} - d_j \leq t \leq a_{jp-1} + d_j \\ 1 & t > a_{jp-1} + d_j \end{cases} \quad [13]$$

где је  $t$  вредност фактора;  $k = 1, 2, \dots, K-1$ ; и  $j = 1, 2, \dots, m$ . На овај начин одређене су функције припадности за факторе ризик од загађивања подземних и површинских

вода ( $Ri_{\text{под}}$  и  $Ri_{\text{пов}}$ ). У случају када је  $a_{j0} > a_{j1} > \dots > a_{jK}$ , Li et al. (2013) наводи да се функција припадности одређује на основу следећих једначина:

$$\mu_{x_{j1}}(t) = \begin{cases} 0 & t < a_{j1} - d_{j1} \\ \frac{t - a_{j1} + d_{j1}}{2d_{j1}} & a_{j1} - d_{j1} \leq t \leq a_{j1} + d_{j1} \\ 1 & t > a_{j1} + d_{j1} \end{cases} \quad [14]$$

$$\mu_{x_{jk}}(t) = \begin{cases} 0 & t < a_{jk} - d_{jk} \\ \frac{t - a_{jk} + d_{jk}}{2d_{jk}} & a_{jk} - d_{jk} \leq t \leq a_{jk} + d_{jk} \\ 1 & a_{jk} + d_{jk} < t < a_{jk-1} - d_{jk-1} \\ \frac{a_{jk} + d_{jk} - t}{2d_{jk-1}} & a_{jk-1} - d_{jk-1} \leq t \leq a_{jk-1} + d_{jk-1} \\ 0 & t > a_{jk-1} + d_{jk-1} \end{cases} \quad [15]$$

$$\mu_{x_{jk}}(t) = \begin{cases} 1 & t < a_{jk-1} - d_{jk-1} \\ \frac{t - a_{jk-1} + d_{jk-1}}{2d_{jk-1}} & a_{jk-1} - d_{jk-1} \leq t \leq a_{jk-1} + d_{jk-1} \\ 0 & t > a_{jk-1} + d_{jk-1} \end{cases} \quad [16]$$

где је  $t$  вредност фактора;  $k = 1, 2, \dots, K-1$ ; и  $j = 1, 2, \dots, m$ . Овај случај одговара факторима удаљеност до насеља и заштићеног подручја, с обзиром да се са повећањем удаљености смањује степен ризика.

Коришћењем наведених једначина одређене су мере припадности сваког од фактора предложеним класама ризика, за сваку од 80 испитиваних појава. Добијене функције припадности су графички приказане на слици 7-30 (поглавље о резултатима истраживања), док су резултати прорачуна за сваки од издвојених фактора дати као прилог.

#### 6.4.1.2. Анализа мере припадности синтезног вишеструког индекса

Мера припадности синтезног индекса  $\mu_{xk}$  свакој од издвојених класа ризика се израчунава на основу суме производа функције припадности за сваки од фактора и одговарајућег тежинског коефицијента, а према једначини (Li et al. 2013):

$$\mu_{xk} = \sum_{j=1}^m w_j \mu_{xjk} \quad [17]$$

где је  $w_j$  тежински коефицијент за сваки од издвојених фактора. Као и у случају процене степена хазарда, за прорачун тежинских коефицијената примењена је метода аналитичког хијерархијског процеса (АHP). Опис поступка прорачуна дат је у одговарајућем поглављу, док је у поглављу резултати истраживања, у табели 7-13 приказана матрица одлучивања, а у табели 7-14 нормализована матрица са прорачунатим тежинским коефицијентима.

За сваку од испитиваних појава прорачуната је вредност синтезног индекса према једначини [17] за сваку од четири класе ризика.

#### 6.4.1.3. Анализа припадности одређеној класи ризика

На основу мере припадности синтезног индекса  $\mu_{xk}$ , усвојен је критеријум поверења, на бази ког је одређена припадност сваког од анализираних рударских радова одређеној класи ризика. Вредности коефицијента поверења  $\lambda$  се налазе у опсегу  $0,5 < \lambda \leq 1$ , са уобичајеним вредностима од 0,6 до 0,7 (Li et al. 2013). У предметним испитивањима усвојена вредност коефицијента поверења износи  $\lambda = 0,6$ . Класа ризика испитиваних рударских радова  $C_{k0}$  одређује се на следећи начин:

- Уколико се ризик повећава са повећањем класе, онда се припадност класи ризика одређује преко следећег обрасца (Li et al. 2013):

$$k_0 = \min \left\{ k : \sum_{l=1}^k \mu_x(C_l) \geq \lambda, 1 \leq k \leq p \right\} \quad [18]$$

- У случају да се ризик смањује са смањењем класе, припадност одређеној класи ризика се одређује на следећи начин (Li et al. 2013):

$$\begin{aligned} k_0 &= \max \left\{ k : \sum_{l=k}^p \mu_x(C_l) \geq \lambda, 1 \leq k \leq p \right\} \\ &= p - \min \left\{ k : \sum_{l=0}^k \mu_x(C_{p-l}) \geq \lambda, 1 \leq k \leq p-1 \right\} \end{aligned} \quad [19]$$

где је  $k = 1, 2, \dots, K$ .

За разлику од критеријума базираног на принципу максималне припадности, применом описане методологије у одређивању припадности одређеној класи ризика допринос имају све вредности појединачног степена припадности свакој од издвојених класа.

\*\*\*

Након карактеризације напуштених рударских радова према степену ризика од загађивања водних ресурса, извршена је прелиминарна процена угрожености површинских и подземних вода на нивоу речних сливова. Карактеризација сливова у оквиру којих су идентификовани напуштени рударски радови изведена је применом квалитативне матрице ризика. За потребе процене вероватноће тј. изгледа да дође до загађивања коришћени су резултати категоризације напуштених рударских радова на основу ризика од загађивања површинских и подземних вода. Процена озбиљности последица базирана је на субјективној оцени могућности погоршања хемијског и еколошког статуса површинских вода и квалитативног статуса подземних вода у оквиру речног слива, као последица утицаја напуштених рударских радова.

**IV**

**РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА И**

**ДИСКУСИЈА**

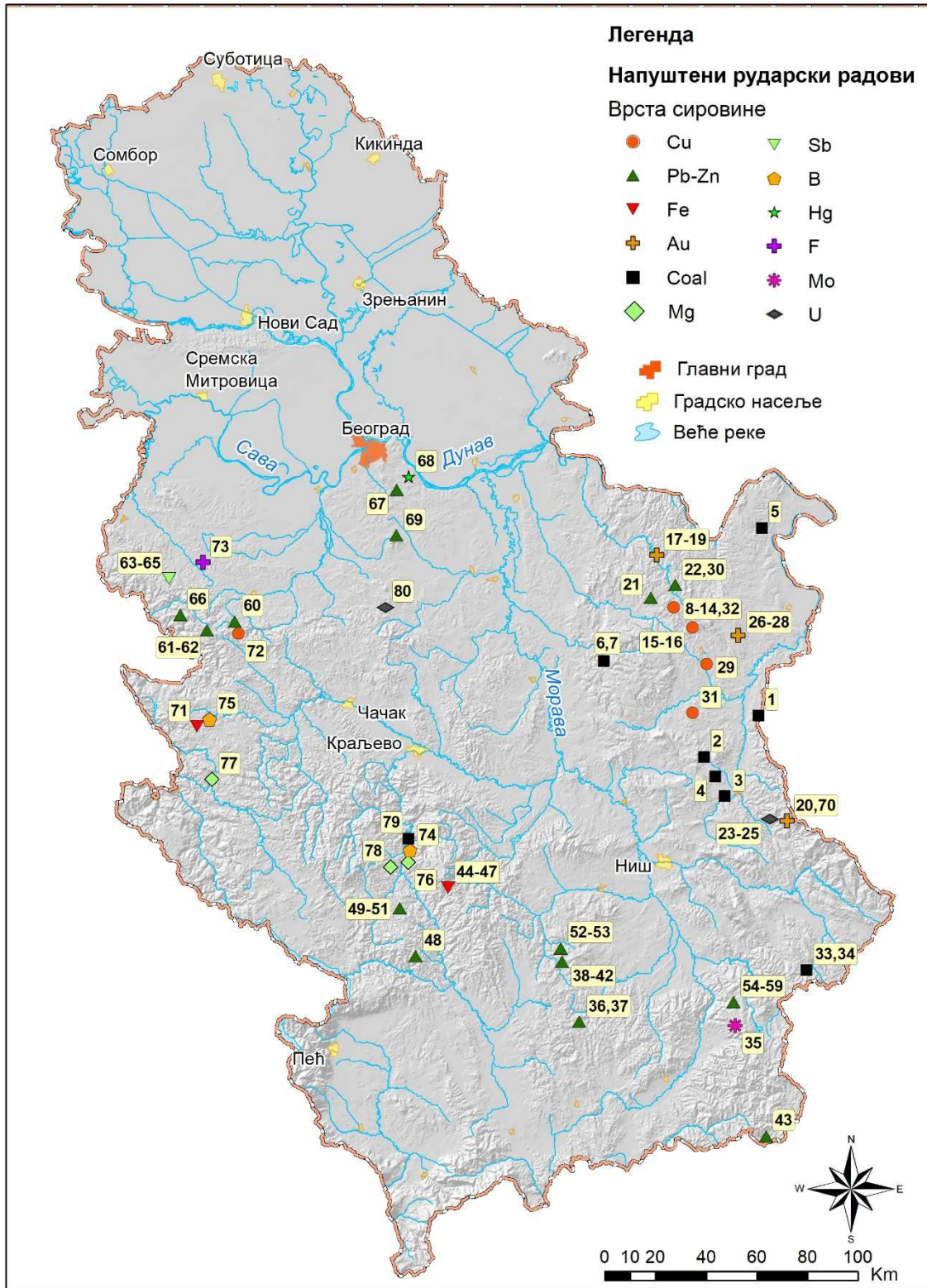
## 7. РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА

У даљем тексту приказани су резултати изведених истраживања на процени ризика од загађивања водних ресурса под утицајем напуштених рударских радова. Део резултата се односи на утврђивање хидрохемијских карактеристика рудничких вода с обзиром на значају улогу коју могу имати у погоршању квалитета водних ресурса. Такође, на бази предложене методологије извршена је карактеризација напуштених рударских радова. На крају, обједињавањем добијених резултата извршена је процена степена ризика од загађивања водних ресурса на нивоу сливова који су потенцијално угрожени од стране напуштених рударских радова.

### 7.1. Преглед напуштених рударских радова обухваћених истраживањима

У оквиру дисертације анализирано је 59 напуштених рударских радова са истицањем рудничких вода, идентификованих у оквиру пројекта утицаја отпадних рудничких вода на животну средину на простору Србије (РГФ 2009-2011). Истраживањима су обухваћени значајнији радови у оквиру лежишта бакра, злата, полиметалична (Pb-Zn, Cu, Sb, Hg), гвожђа, неметаличних минералних сировина (флуорита, магнезита, бора), угља и урана (слика 7-1).

У оквиру дисертације разматрани су напуштени рударски радови у оквиру следећих рудних поља и локалности:



Слика 7-1 Локације напуштених рударских радова укључених у анализу ризика



**Напуштени рударски радови у оквиру лежишта бакра**

- Лежишта бакра у сливу реке Липе
  - Површински коп и поткоп „Горња Липа“
  - Поткоп „Купиново“
  - Поткоп „Думитри Поток“
  - Поткоп „Чока Куруга“
- Лежишта бакра у сливу Церове реке
  - Површински коп „Церово – Цементација 1“
- Рудно поље Марков Камен-Савинац
  - Рудник „Марков Камен“
- Лежиште бакра у дијабаз-рожначкој формацији
  - Рудник „Ребељ“

**Напуштени рударски радови у оквиру лежишта злата**

- Лежишта злата у рудном пољу „Благојев Камен“
  - Рудник „Света Барбара“
  - Рудник „Грабова Река“
- Лежишта злата у сливу Трговишког Тимока
  - Поткоп „Илијин Гроб“
- Лежишта злата у оквиру рудног поља „Дели Јован“
  - Рудник „Латово“
  - Рудник „Русман“
  - Рудник „Гиндуша“

**Напуштени рударски радови у оквиру полиметаличних лежишта олова и цинка са примесама бакра, антимона, молибдена, бизмута, барита, сребра и живе**

- Лежишта олово-цинка и бакра у сливу Великог Пека
  - Поткоп „Чока Марин“
- Лежишта олово-цинка и бакра у сливу потока Јагњило
  - Поткоп „Ваља Сака“
- Лежиште Pb-Zn-Cu у локалности Брестовац
  - Поткоп „Брестовац“

- Лежишта олова и цинка у Лецком масиву
  - Рударски радови у лежишту „Кисељак“ (поткоп „Туларска Река“ и бушотине БТ-1 и БТ-3)
  - Напуштених рударских радова у лежишту олова, цинка и бакра „Ђавоља Варош“ (поткопи: „Ђавоља Вода“, „поткоп 1“, „поткоп 2“, „поткоп 3“ и бушотина Б-1)
  - Рудно поље „Бањска Река“, поткопи „Бањска Река 1“ и „Бањска Река 2“
- Рудно поље Караманица
  - Рудник олова и цинка „Подвирови“
- Рудно поље Рогозне
  - Поткоп „Каравансалија“
- Рудно поље Рашке
  - Површински коп „Кижевак“
  - Рудник „Саставци“
- Рудно поље Рупље
  - Црвени Брег (поткоп 1)
  - Црвени Брег (поткоп 2)
  - Црвени Брег (поткоп 3)
  - Поткоп „Мала река 1“
  - Поткоп „Мала Река 2“
- Рудно поље Мачкатице
  - Рудник молибдена „Мачкатица“
- Зона Подриња
  - Рудник „Тисовик“
  - Површински коп „Бобија“
- Борањско рудно поље
  - Рудник антимона „Столице“
  - Поткоп „Рујевац“
  - Ревир Зајаче, рудник антимона „Туринска јама“
  - Рудник олова и цинка „Велики Мајдан“
- Рудно поље Авале
  - Рудник „Црвени Брег“

- Рудник живе „Шупља стена“
- Рудно поље Космај
  - Рудник „Бабе“
- Стара Планина
  - Рудник бизмута, бакра и злата „Аљин Дол“

#### **Напуштени рударски радови у оквиру лежишта гвожђа и бакра**

- Рудно поље Копаоник
  - Лежиште Гвоздац-Сребренац (поткопи „Гвоздац 1“ и „Гвоздац 2“)
  - Рудник „Суво Рудиште“
  - Поткоп „Крчмар Вода“

#### **Напуштени рударски радови у оквиру лежишта никла и гвожђа**

- Рудно поље Мокре Горе
  - Поткоп „Постењски Поток“

#### **Напуштени рударски радови у оквиру лежишта неметаличних минералних сировина**

- Рудно поље Борање
  - Рудник флуорита „Равнаја“
- Јарандолски басен
  - Рудник бората „Побрђански поток“
  - Површински коп магнезита „Бела стена“
- Басен Кремне
  - Бушотина „Борна вода“
- Рејон Златибора
  - Рудник магнезита „Лиска“
- Рејон Рашке
  - Рудник магнезита „Брвеница“

#### **Напуштени рударски радови у оквиру лежишта угља**

- Лежишта угља у сливу Млаве
  - Рудник мрког угља „Стари Јасеновац“
- Лежишта мрког и каменог угља у сливу Сврљишког, Белог и Црног Тимока
  - Рудник „Аврамица-Вршка Чука“
  - Рудник „Влашко поље“

- Рудник „Подвис“
- Рудник „Добра Срећа“
- Лежишта угља у непосредном сливу Дунава
  - Рудник каменог угља „Аликсар“
- Лежишта мрког угља у Сењско-Ресавском угљеном басену
  - Северни поткоп
  - Јужни Поткоп
- Лежишта каменог угља у сливу Јерме
  - Рудник „Ракита“
  - Рудник „Козарнички поток“
- Јарандолски басен
  - Рудник „Јарандол“

#### **Напуштени рударски радови у оквиру лежишта урана**

- Лежишта урана Старе Планине
  - Рудник „Мездреја“
  - Рудник „Габровница“
- Букуљско-Брајевачко рудно поље
  - Поткоп „Паун Стена“
  - Поткоп „Претурица“

Табеларни приказ испитивани напуштених рударских радова и њихових карактеристика коришћених у процесу процене ризика дат је у прилогу 2. Поред наведених података, Јанковић (1990) даје више информација о геолошким карактеристикама и типу лежишта за већину испитиваних локација. Историјски развој рударства са описом рударских активности сумирани су у делу „Рударство на тлу Србије“ (Јовановић 2007-2008). Миладиновић (2015) у оквиру дисертације разматра хидрогеолошке услове експлоатације угља на простору Србије и даје детаљнији приказ рударских радова и начина експлоатације пре свега активних, али делом и напуштених рудника. У делу „Историја рударства у Србији“ такође је дат приказ појединих напуштених рудника са детаљима јамских радова и процеса прераде руде.

## 7.2. Физичке карактеристике напуштених рударских радова

Од физичких параметара релевантних за даљу процену ризика од загађивања водних ресурса, у оквиру дисертације анализирани су: површина рудног јаловишта, присуство флотацијског јаловишта, врста минералне сировине и геолошка средина у којој су формирано рударски радови. На бази ових параметара, заједно са хидрохемијским карактеристикама рудничких вода, према развијеној прорачунској шеми извршена је процена и карактеризација напуштених рударских радова на основу степена штетности.

### 7.2.1. Површина јаловишта

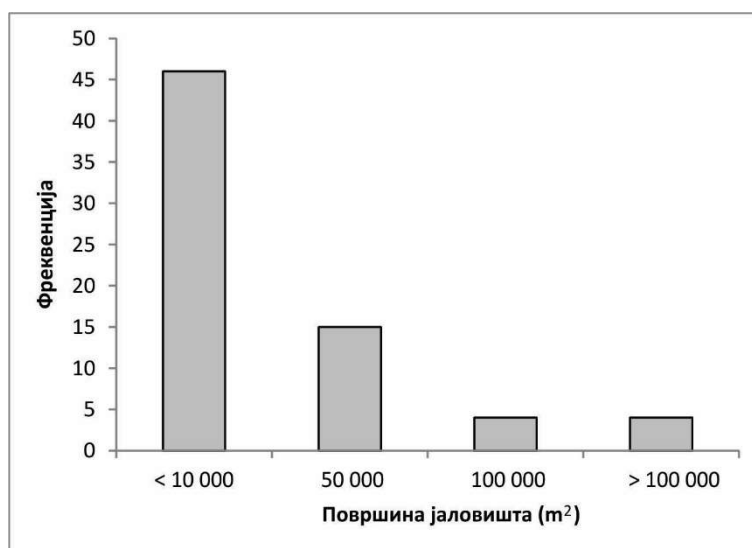
Површина рудног јаловишта процењена је у комбинацији теренских опажања и анализи сателитских и ортофото снимака. За наведене потребе коришћена је дигитална платформа *Геосрбија* у оквиру које су инкорпорирани ортофото снимци резолуције 10 cm, 20 cm и 40 cm, као и снимци типа *Landsat* доступни на порталу *Google Earth* (слика 7-2). Приликом анализе за поједине локације постајале су потешкоће у идентификацији јаловишта услед присуства вегетационог покривача. Оваква ситуација је најчешће забележена код старих напуштених рударских радова мањих размера, па је у таквим условима усвојена претпоставка да је одлагалиште рудне јаловине површине мање од 10000 m<sup>2</sup>.

Треба напоменути да површина јаловишта не мора у свим ситуацијама бити прецизан индикатор количине јаловине, али је овај параметар одабран с обзиром да подаци о количинама јаловине за већину напуштених рударских радова нису доступни. Такође, површина јаловишта, поред примењивости за регионалне анализе, утиче на количину воде која се формира на и у самом јаловишту на рачун атмосферских падавина, па је у хидролошком смислу значајна.

Хистограм са подацима за површине рудних јаловишта подељене у четири категорије приказан је на слици 7-3.



Слика 7-2. Поступак одређивања површине јаловишта помоћу апликације *геоСрбија*, на примеру напуштеног рудника каменог угља „Добра Срећа“



Слика 7-3. Хистограм површине рудних јаловишта за напуштене рударске радове обухваћене анализом

Резултати спроведене анализе указују да је већина рудних јаловишта (око 60 %) површине мање од 10000 m<sup>2</sup>. Такође, међу напуштеним рударским радовима обухваћеним истраживањима регистровано је пет одлагалишта рудне јаловине великих размера са површином преко 100000 m<sup>2</sup>. Просечна површина рудних јаловишта износи око 28500 m<sup>2</sup>, док је површина за јаловиште највећих размера процењена на око 440000 m<sup>2</sup>.

#### 7.2.2. Присуство флотацијског јаловишта и сепарације угља

Флотацијска јаловишта се одликују високим потенцијалом за изазивање еколошких акцидента великих размера. Негативни ефекти оваквих догађаја констатовани су и на значајним удаљеностима од самог места изливања јаловине. Из тог разлога присуство напуштеног одлагалишта флотацијске јаловине представља веома значајан параметар у сагледавању напуштених рударских радова као потенцијалних извора загађујућих супстанци. С обзиром на размеру истраживања и доступност података, анализом нису обухваћене карактеристике везане за количину и особине јаловине и стабилност бране, а на основу којих би се ближе проценили изгледи да дође до акцидента. За потребе прорачуна индекса ризика усвојен је конзервативан приступ према ком је присуство флотацијског јаловишта окарактерисано са високим потенцијалом за изазивање штетних последица.

Поред флотацијских јаловишта која су најчешће везана за процес прераде металних руда, постројења за прераду су такође присутна и код рудника угља. Ова постројења најчешће обухватају механичку сепарацију, али су заступљени и процеси мокре сепарације и флотирања угља, за које негативан утицај на животну средину може бити више изражен. Поред воде се у одређеним случајевима у процесу флотирања угља користе и поједине хемијске супстанце као што су лож уље, гликол или карбинол (Миладиновић 2015), које могу представљати загађујуће супстанце у површинским и подземним водама.

У зависности од гранулације и облика појављивања у руди, поред флотирања, за издвајање злата се примењују и поступци амалгамације и цијанизације. Иако је у

већини земаља употреба ових поступака ограничена због њиховог негативног утицаја на животну средину, ове технике нису у потпуности напуштене. С обзиром да су ове методе биле доминантне, у зони напуштених рудника злата често су присутни остаци ових процеса. Они нису везани искључиво за старе руднике, већ и за новија индустријска постројења. На могуће размере негативног утицаја указује акцидент који се догодио у Румунији 2000. године (*Baia Mare* акцидент). Том приликом дошло је до изливања великих количина муља са цијанидом преосталим од процеса издвајања злата, и до тешког угрожавања квалитета реке Тисе (Jordan et al. 2004).

Међу испитиваним напуштеним рударским радовима, за њих шест је везано присуство флотацијских јаловишта, укључујући и три постројења за сепарацију угља.

### 7.2.3. Геолошка средина

Под геолошком средином у контексту ових истраживања подразумева се група стена у оквиру којих је формирано лежиште. Значај овог параметра за даљу процену ризика од загађивања се огледа у томе што у саставу раскривке и рудне јаловине присутне у зони напуштених рудника преовлађују околорудне стене. Такође, хемијски састав подземних вода које долазе у контакт са рударским радовима је одређен минералним саставом стена које граде ширу околину лежишта. Наиме, околорудне стене често представљају извор калцита и других минерала значајних за процес неутрализације киселих рудничких вода. Овај процес се може одвијати кроз директан контакт воде и стена тј. минерала у самим радовима, или кроз мешање рудничких са подземним водама.

Лежишта минералних сировина су често формирана у сложеним геолошким условима, са присуством различитих литостратиграфских јединица. Како би се комплексност геолошке грађе прилагодила за потребе анализе ризика на регионалној размери, извршено је груписање литолошких јединица које учествују у грађи лежишта у три категорије или средине:



- карбонатна,
- карбонатно-силикатна и
- силикатна

Карбонатној геолошкој средини припадају лежишта у чијој грађи доминирају седиментне стене, пре свега: кречњаци, лапорци, пешчари и конгломерати, као и мермери. Иако у саставу конгломерата и пешчара могу да преовлађују силикатни минерали, јаловишта изграђена од ових стена најчешће нису подложна генерисању киселих рудничких вода. Такође, у грађи ових стена су присутни карбонатни минерали, било у виду уклопака од кречњака, у оквиру цементног материјала или калцитских жица, што им пружа капацитет за неутрализацију. Међу испитиваним напуштеним рударским радовима у карбонатну геолошку средину, сврстани су рудници угља и поједини рудници полиметаличних минералних сировина на простору западне Србије, у подручју распрострањена тријаских кречњака.

Силикатна геолошка средина је везана за лежишта формирана у оквиру магматских и метаморфних стена: андезита најчешће хидротермално измењених, гранита; габра, перидотита, серпентинита, и шкриљаца. Већина напуштених рударских радова у оквиру лежишта металичних минералних сировина сврстана је у силикатну геолошку средину.

Карбонатно-силикатна геолошка средина се одликује заједничким присуством кречњака и вулканских или интрузивних стена у зони лежишта. Такође, поједина лежишта угља у чијој геолошкој грађи учествују искључиво пешчари и конгломерати, без прослојака кречњака и лапораца сврстана су у прелазну карбонатно-силикатну геолошку средину.

### 7.3. Физичко-хемијске карактеристике рудничких вода

Испитивање физичко-хемијских карактеристика рудничких вода извршено је на 80 узорака везаних за 59 напуштених рударских радова. Локације узорковања рудничких вода приказане су на слици 7-1. У табели 7-1 приказани су основни статистички параметри за скуп хидрохемијских података за анализиране рудничке воде.

Испитивањима физичко-хемијских карактеристика утврђено је да на основу просечне вредности сувог остатка анализиране рудничке воде генерално припадају групи маломинерализованих вода. Вредност геометријске средине за индекс рН износи око 6, што указује на благо киселу средину. Испитиване рудничке воде се одликују повишеним концентрацијама сулфата и метала, пре свега гвожђа, мангана, цинка и бакра.

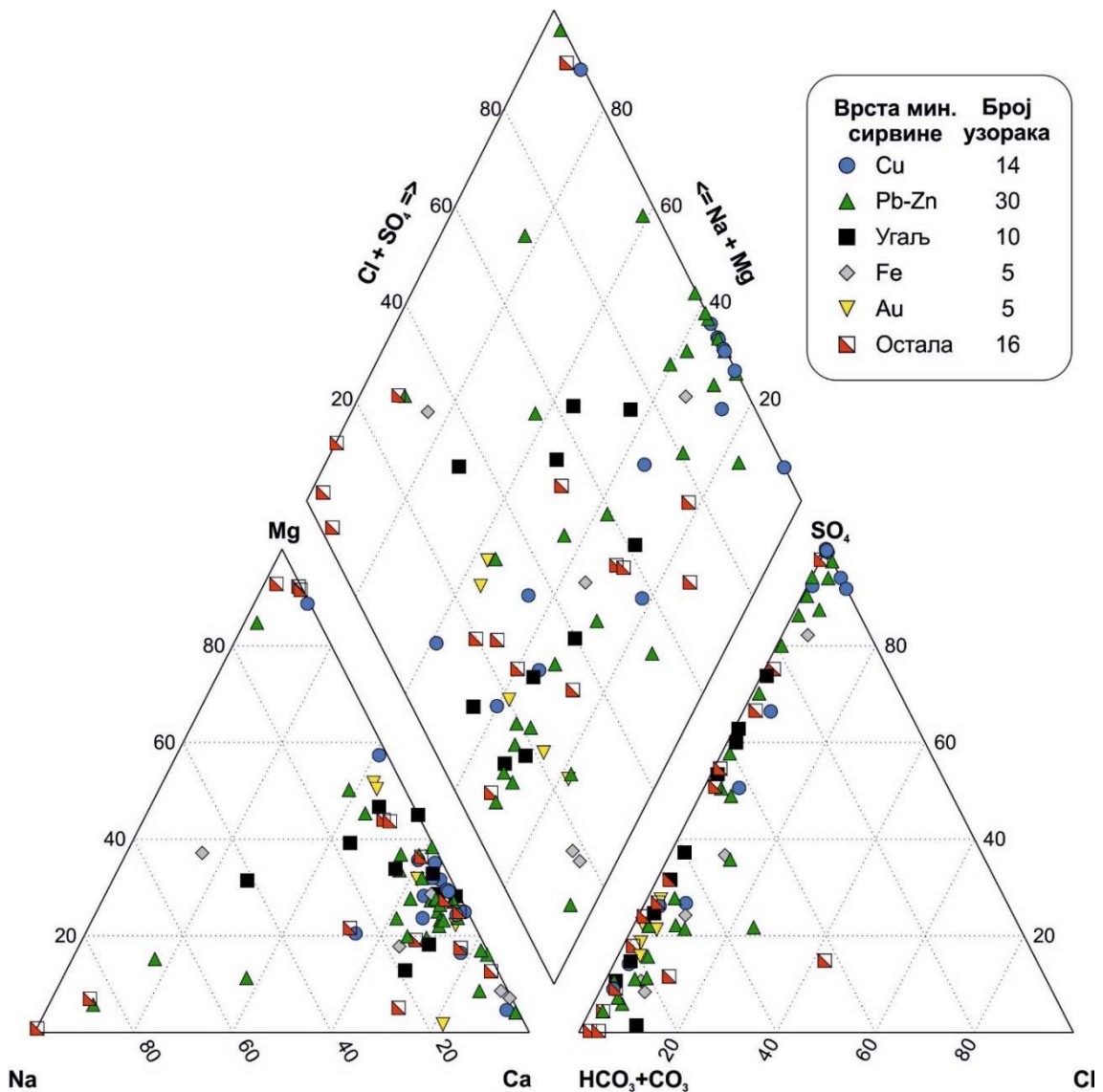
Анализирани параметри варирају у веома широком опсегу, са великим бројем резултата који одступају од средње вредности, на шта указују високе вредности стандардне девијације. Испитивање расподеле хидрохемијских података извршено је на основу разлике између аритметичке средине, геометријске средине и медијане, као и на основу коефицијента асиметрије. Наведени параметри указују на одступање од нормалне расподеле, што је и потврђено Колмогоров-Смирнов тестом.

Табела 7-1 Основни статистички параметри за узорке рудничких вода

Параметар	Средња вредност	Геом. средина	Минимум	Максимум	Опсег	Стандардна Девијација	Закривљеност	Број узорака
pH	6.31	6.02	1.95	9.00	7.05	1.634	-1.171	80
Ер ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	1561	900	100	15000	14900	2135	3.859	80
Минерализ. (mg/L)	1590	850	80	15000	14920	2315	3.422	77
Суви остатак (mg/L)	1381	663	70	16000	15930	2337	4.131	72
Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	154.0	87.7	0.40	730.0	729.6	148.5	1.510	80
Mg <sup>2+</sup> (mg/L)	77.19	27.2	0.80	1430	1429	217.8	5.878	80
Na <sup>+</sup> (mg/L)	66.38	12.1	0.20	1480	1479	218.6	5.331	79
K <sup>+</sup> (mg/L)	3.71	2.0	0.10	42.10	42.00	5.93	4.458	78
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	319.7	71.2	0.075	3180	3180	470.7	4.312	77
Cl <sup>-</sup> (mg/L)	17.41	9.2	1.00	227.0	226.0	36.23	4.857	72
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	885.3	162.0	0.75	13600	13599	2013	4.323	80
P (mg/L)	0.10	0.020	0.0038	2.00	2.00	0.275	5.271	75
SiO <sub>2</sub> (mg/L)	31.19	22.9	3.20	155	151.8	27.50	2.187	71
Fe ук. (mg/L)	77.13	0.79	0.0020	2000	2000	319.8	4.894	80
Mn ук. (mg/L)	2.56	0.18	0.0020	45	45.00	6.277	4.714	77
Zn ук. (mg/L)	5.98	0.053	0.0010	142	142	22.06	5.077	75
Cu ук. (mg/L)	21.30	0.011	0.0008	1120	1120	131.9	7.942	77
As ук. (mg/L)	0.14	0.005	0.0002	4.20	4.20	0.590	5.674	78

## 7.3.1. Хемијски састав испитиваних рудничких вода

Од макрокомпоненти у хемијском саставу испитиваних вода доминирају калцијум, сулфати и хидрокарбонати. За графички приказ основних хемијски типова рудничких вода коришћен је Пајперов дијаграм (слика 7-4).



Слика 7-4. Пајперов дијаграм 80 испитиваних узорка рудничких вода, класификованих на основу врсте лежишта минералних сировина

Са дијаграма се уочава расипање узорака, између оних у којима је доминантан сулфатни јон и оних у којима преовлађују хидрокарбонати. У оквиру катјонског састава, запажа се груписање тачака у зони доминантног садржаја калцијума. Ниске концентрације хлорида су карактеристичне за све узорке. Сумирајући наведене резултате може се закључити да су  $\text{Ca-SO}_4$  и  $\text{Ca-HCO}_3$  доминантни типови вода, без јасне диференцијације у односу на врсту минералне сировине. Изузетак представљају рудничке воде из напуштених рударских радова у лежиштима бакра, које већински припадају  $\text{Ca-SO}_4$  типу вода.

С обзиром на карактер хидрохемијских података, за испитивање међусобне зависности анализираних параметара хемијског састава рудничких вода, коришћен је Сперманов коефицијент корелације (табела 7-2).

Значајна корелација постоји између рН вредности и концентрација сулфата, хидрокарбоната, метала (Mn, Zn, Fe, Cu), минерализације и силицијума. Изражене позитивне корелације утврђене су између садржаја сулфата и  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , Fe, Mn, Zn, и Cu у рудничким водама. У односу на главне јоне, корелације су утврђене између концентрација  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ , и  $\text{Na}^+$ , као и између концентрација  $\text{Mg}^{2+}$  и  $\text{Ca}^{2+}$  и садржаја метала (Fe, Mn, Zn). Такође, са смањењем рН вредности расте садржај сулфата и гвожђа. Ова зависност је карактеристична за рудничке воде и индикативна је за оксидацију сулфидних минерала, која представља основни процес у формирању хемијског састава киселих рудничких вода.

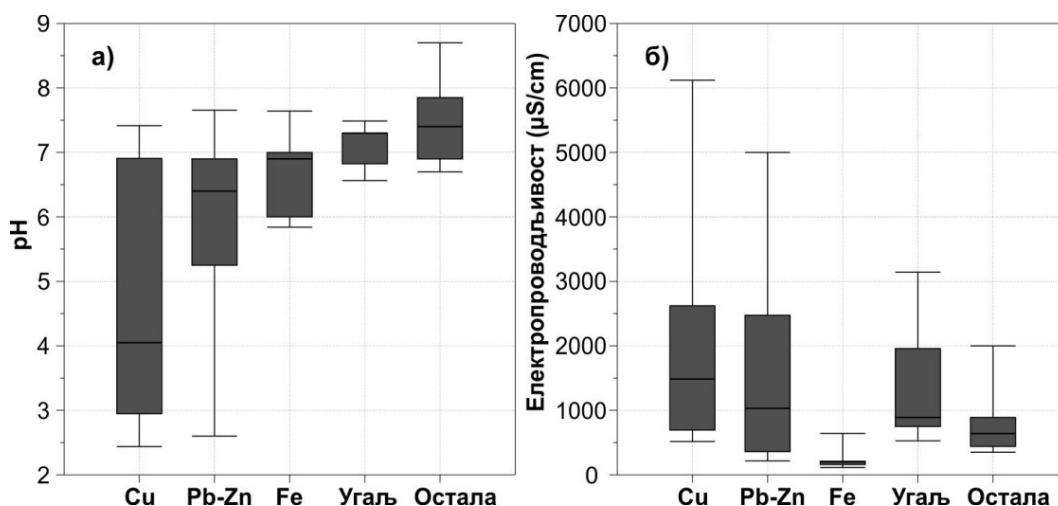
Табела 7-2. Сперманови коефицијенти корелације за 18 физичко-хемијских параметара рудничких вода

	pH	ЕС	Мин.	Су.ос.	Са <sup>2+</sup>	Мg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	К <sup>+</sup>	НСО <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Сl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Р	SiO <sub>2</sub>	Fe	Mn	Zn	Cu		
pH	1																		
ЕС	-0.38**	1																	
Мин.	-0.36**	0.98**	1																
Су.ос.	-0.38**	0.99**	0.99**	1															
Са <sup>2+</sup>	-0.35**	0.74**	0.74**	0.73**	1														
Мg <sup>2+</sup>	-0.28*	0.79**	0.80**	0.79**	0.66**	1													
Na <sup>+</sup>	0.06	0.56**	0.57**	0.63**	0.34**	0.39**	1												
К <sup>+</sup>	-0.23*	0.43**	0.47**	0.46**	0.35**	0.35**	0.57**	1											
НСО <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.66**	0.14	0.16	0.11	0.05	0.09	0.39**	0.13	1										
Сl <sup>-</sup>	0.13	0.40**	0.35**	0.38**	0.15	0.23	0.54**	0.39**	0.45**	1									
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	-0.57**	0.89**	0.87**	0.91**	0.77**	0.74**	0.42**	0.41**	-0.18	0.25*	1								
Р	0.08	0.23*	0.24*	0.16	0.23*	0.21	0.11	0.03	0.44**	0.42**	0.15	1							
SiO <sub>2</sub>	-0.46**	0.50**	0.53**	0.49**	0.31*	0.41**	0.37**	0.19	-0.25*	0.18	0.52**	0.06	1						
Fe	-0.69**	0.51**	0.50**	0.51**	0.45**	0.40**	0.04	0.28*	-0.55**	-0.07	0.67**	-0.06	0.49**	1					
Mn	-0.69**	0.44**	0.43**	0.47**	0.46**	0.35**	0.08	0.25*	-0.51**	-0.09	0.60**	-0.1	0.43**	0.87**	1				
Zn	-0.66**	0.39**	0.38**	0.36**	0.37**	0.31**	-0.04	0.05	-0.50**	-0.15	0.52**	0.02	0.35**	0.66**	0.72**	1			
Cu	-0.61**	0.35**	0.35**	0.32**	0.29*	0.23*	-0.04	0.03	-0.53**	-0.12	0.46**	0.01	0.53**	0.60**	0.68**	0.73**	1		
As	-0.13	-0.03	-0.02	-0.04	-0.01	-0.01	-0.19	-0.07	-0.15	-0.35**	0.03	0	-0.22	0.21	0.27*	0.38**	0.18		

\*\*корелације значајне за p&lt;0,01; \* корелације значајне за p&lt;0,05

### 7.3.2. Хемијски састав рудничких вода у односу на врсту минералне сировине

Као што је већ напоменуто, према садржају макрокомпоненти утврђена је значајна разноликост у односу на врсту минералне сировине, изузев рудничких вода из лежишта бакра, у оквиру којих преовлађују  $\text{Ca-SO}_4$  воде. Са друге стране, вредности индекса рН, за узорке везане за лежишта бакра налазе се у широком опсегу вредности, што се уочава на Бокс-плот (енгл. *Box and Whisker diagram*) дијаграму (слика 7-5).



Слика 7-5. Бокс-плот дијаграми за рН и електропроводљивост у односу на врсту минералне сировине за које су везане испитиване рудничке воде

С обзиром на претходно утврђене корелације, параметри рН и електропроводљивост одабрани су као индикативни за свеобухватније сагледавање хидрохемијских карактеристика рудничких вода у односу на врсту минералне сировине. Већина узорака карактеришу вредности рН између 3 и 7. Рудничке воде лежишта олова и цинка, у односу на вредности рН, припадају групи благо киселих до неутралних вода. Узорци из полиметаличних лежишта, у којима су доминантне остале минералне сировине (антимон, молибден, жива, бизмут, злато, бор, флуор и уран), као и узорци из напуштених рударских радова у оквиру лежишта гвожђа и угља, имају вредности индекса рН између 6 и 8.

Изузетак представљају алкалне рудничке воде из лежишта магнезита, које су генетски везане за ултрабазичне стене.

Анализирајући вредности за електропроводљивост, која је индикатор укупне концентрације растворених материја, констатовано је да се већина узорака вода из лежишта бакра, олова и цинка и угља карактерише вредностима блиским или већим од  $1000 \mu\text{S}/\text{cm}$ . Испитиване рудничке воде лежишта Fe, U, Sb, Mo, Bi, Au, V, F и Mg већином имају вредности испод  $1000 \mu\text{S}/\text{cm}$ .

Садржај сулфата и најзаступљенијих метала (гвожђа, цинка и бакра) у односу на врсту минералне сировине приказан је у табели 7-3.

У погледу садржаја сулфата, највише концентрације забележене су у рудничким водама из рударских радова у оквиру лежишта бакра, док су вредности геометријске средине за лежишта олова и цинка благо повишене. За већину преосталих лежишта концентрације сулфата су у границама природних вредности за подземне воде, изузев појединих лежишта угља, живе и антимона.

Концентрације укупног гвожђа у рудничким водама повишене су у већини испитиваних узорака, са највишим садржајима везаним за напуштене руднике бакра и полиметаличних, претежно Pb-Zn, руда.

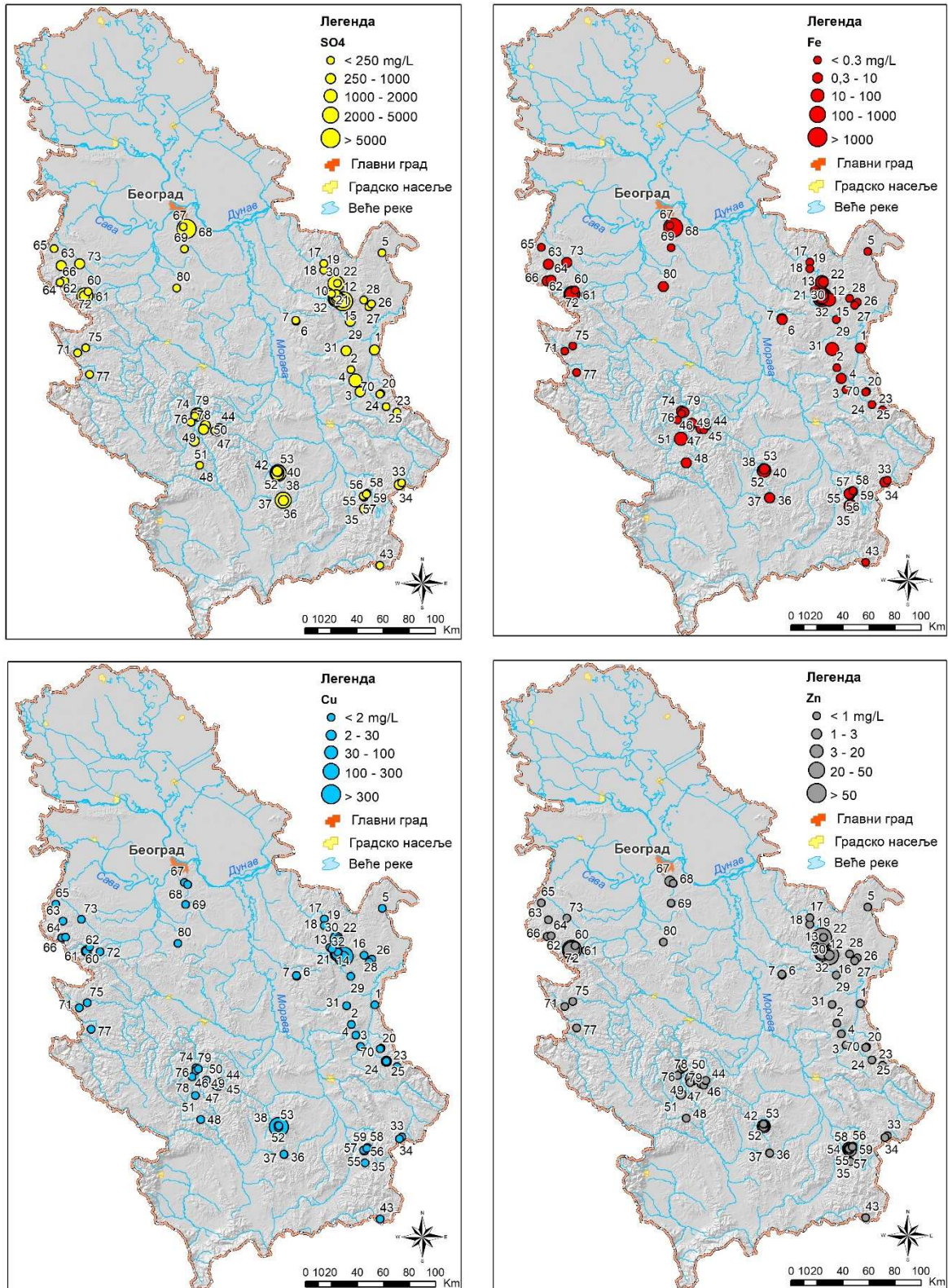
Од анализираних метала, истичу се повишене концентрације цинка, везане за рудничке воде олово-цинканих лежишта. Цинк је изразито мигративан и може угрозити квалитет површинских и подземних вода на значајној удаљености од самих напуштених рударских радова.



**Табела 7-3.** Основни статистички параметри за концентрације  $\text{SO}_4^{2-}$ , Cu, Fe, Zn у (mg/L) у испитиваним рудничким водама у односу на преовлађујућу врсту минералне сировине

Мин. сировина	Параметар	Макс.	Мин.	Геометријска средина	Аритметичка средина	Број узорака
Бакар	$\text{SO}_4$	13600	32	545.5	2015.2	15
	Cu	1120	0.001	0.423	87.2	14
	Fe	1650	0.01	3.205	206.3	15
	Zn	52.1	0.001	0.273	8.06	13
Олово-цинк	$\text{SO}_4$	4700	6.6	230.5	864.7	29
	Cu	302	0.001	0.0174	14.28	29
	Fe	780	0.02	2.36	34.4	29
	Zn	142	0.001	0.461	12.66	27
Угаљ	$\text{SO}_4$	1200	7	176.3	406.1	10
	Cu	0.004	0.00075	0.001145	0.00136	9
	Fe	6.7	0.004	0.4565	2.51	10
	Zn	0.004	0.001	0.001714	0.00189	9
Гвожђе	$\text{SO}_4$	105	6.6	23.33	42	5
	Cu	0.002	0.001	0.001149	0.0012	5
	Fe	0.8	0.01	0.0967	0.284	5
	Zn	0.8	0.001	0.00603	0.1626	5
Злато	$\text{SO}_4$	96	40	63.2	68	5
	Cu	0.00225	0.00075	0.00111	0.0012	5
	Fe	0.11	0.002	0.0112	0.028	5
	Zn	0.01	0.001	0.003086	0.0044	5
Остале	$\text{SO}_4$	8600	0.75	63.9	682	16
	Cu	5	0.00075	0.00325	0.338	15
	Fe	2000	0.01	0.305	128.2	16
	Zn	0.4	0.001	0.01194	0.0814	16

Просторни распоред концентрација сулфата, гвожђа, бакра и цинка у рудничким водама из старих радова на простору Србије приказан је на слици 7-6.



Слика 7-6. Карте дистрибуције сулфата, Fe, Cu и Zn у рудничким водама из напуштених рударских радова на простору Србије

На основу приказаних карата запажа се поклапање између високих концентрација сулфата и гвожђа. Високе концентрације цинка и бабра везане су за лежишта ових метала, па су тако највише вредности за бакар регистроване у рудничким водама у оквиру тимочког магматског комплекса (ТМК). Поред тога, високе концентрације цинка измерене су у рудничким водама из рудника „Бобија“ у западној Србији. Графичким приказивањем резултата хидрохемијских испитивања уочавају се значајне разлике у хемизму рудничких вода између појава које се налазе на блиском растојању, некад и у оквиру истог рудног поља па чак и лежишта. Овакви резултати указују на сложеност услова формирања хемијског састава рудничких вода у зонама напуштених рударских радова.

### 7.3.3. Процеси формирања хемијског састава испитиваних рудничких вода

Идентификација основних процеса формирања хемијског састава рудничких вода извршена је на бази интерпретације резултата хидрохемијских испитивања применом мултиваријантних статистичких метода, тачније факторне анализе, приликом чега је за одабир релевантних фактора примењена метода анализе главних компонената (PCA).

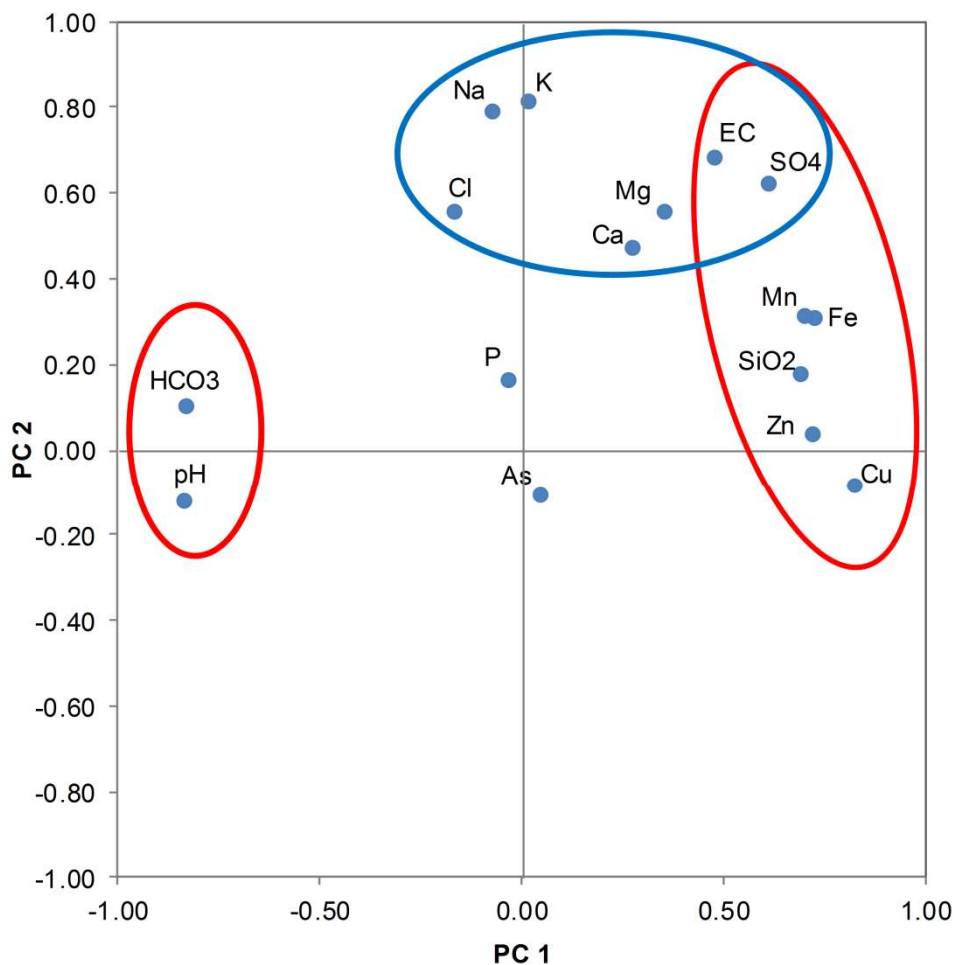
#### 7.3.3.1. Резултати факторне анализе

Примена факторне анализе на скуп од 16 хидрохемијских параметара (макро и микрокомпоненте, електропроводљивост и рН) одређених на 80 узорак рудничких вода, за резултат је имала издвајање четири главна фактора (PC1-PC4), који заједно објашњавају 72,4 % укупне варијансе испитиваних података (табела 7-4).

**Табела 7-4.** Факторски коефицијенти и проценат варијансе који објашњава сваки од издвојена четири фактора, уз примену варимакс ротације. Подвучени су факторски коефицијенти  $> |0,4|$  (Atanacković et al. 2013)

Параметар	PC 1	PC 2	PC 3	PC 4
pH	<u>-0.836</u>	-0.118	-0.159	0.090
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<u>-0.835</u>	0.107	0.096	0.245
Cu	<u>0.821</u>	-0.080	-0.014	0.359
Fe	<u>0.724</u>	0.309	<u>0.412</u>	-0.056
Zn	<u>0.720</u>	0.040	<u>0.416</u>	0.139
Mn	<u>0.697</u>	0.318	0.388	-0.133
SiO <sub>2</sub>	<u>0.691</u>	0.178	-0.337	0.266
K <sup>+</sup>	0.015	<u>0.816</u>	0.022	-0.142
Na <sup>+</sup>	-0.074	<u>0.792</u>	-0.302	0.142
EC	<u>0.478</u>	<u>0.686</u>	0.081	0.344
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	<u>0.610</u>	<u>0.624</u>	0.207	0.208
Mg <sup>2+</sup>	0.351	<u>0.557</u>	0.205	0.382
Cl <sup>-</sup>	-0.168	<u>0.557</u>	<u>-0.409</u>	0.334
Ca <sup>2+</sup>	0.275	<u>0.473</u>	0.388	0.229
As	0.046	-0.103	<u>0.808</u>	0.095
P	-0.035	0.168	0.073	<u>0.857</u>
% варијансе	30.7	20.6	11.3	9.8
кумулативни % варијансе	30.7	51.3	62.6	72.4

Највећи допринос фактору PC1, који објашњава 30,7 % укупне варијансе, дају параметри: pH, електропроводљивост, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, бакар, гвожђе, цинк, манган и силицијум. Фактор PC2 објашњава 20,6 % варијансе и у њему преовлађују: електропроводљивост, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> и Cl<sup>-</sup> (Слика 7-7), док код фактора PC3 (11,3 % варијансе) доминирају арсен, Fe, Zn и Cl<sup>-</sup>. Фактор PC4, у ком преовлађују фосфати, обухвата најмањи проценат укупне варијансе података (9,8 %).



**Слика 7-7.** Пројекција анализираних параметара у првој факторској равни. Црвеном бојом означени су параметри од значаја у оквиру фактора PC1, а плавом бојом параметри који су доминантни у оквиру фактора PC2 (Atanacković et al. 2013)

### 7.3.3.2. Интерпретација резултата факторне анализе и издвајање основних процеса формирања хемијског састава рудничких вода

Физичко-хемијски параметри груписани у оквиру фактора PC1, указују да је основни процес стварања хемијског састава испитиваних рудничких вода оксидација и растварање минерала из групе сулфида. Током оксидације пирита под дејством кисеоника и фери јона долази до ослобађања протона, а тиме и до снижења рН вредности рудничких вода (Singer and Stumm 1970). С обзиром да се поред

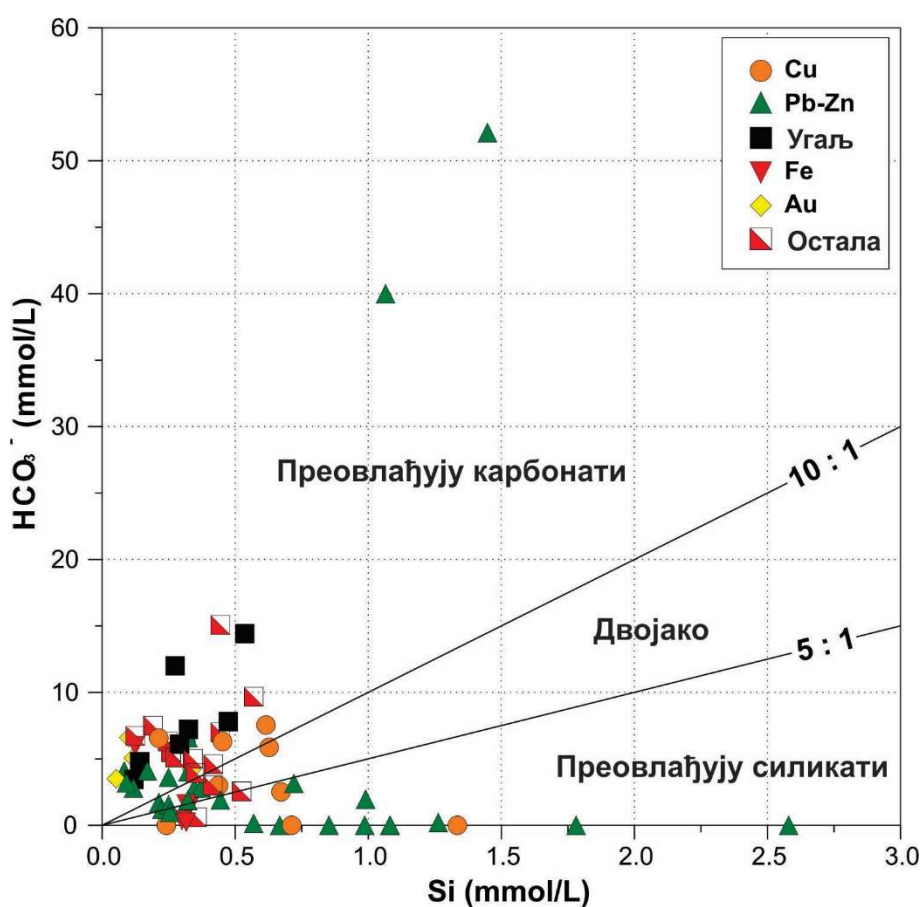
пирита, и други сулфидни минерали (галенит, сфалерит, арсенопирит, ковелин...) често јављају у парагенези у оквиру металичних лежишта, њиховим растварањем долази до повећања концентрације метала у рудничким водама, према реакцијама 6 и 7 (поглавље 2.2.1.1.). Сама лежишта металичних минералних сировина су најчешће генетски везана за магматске интрузије, вулканске стене и за хидротермалне растворе, који су пратилац ових активности. Киселе магматске стене, које не садрже карбонатне минерале, представљају повољну средину за формирање рудничких вода са ниским рН вредностима (Appelo and Postma 1993). У киселим срединама долази до растварања силикатних минерала који улазе у састав околорудних стена, приликом чега долази до повећања концентрације силицијума у рудничким водама.

Хидрокарбонати су такође издвојени као веома значајан параметар у оквиру фактора PC1. Негативни предзнак испред факторског коефицијента за  $\text{HCO}_3^-$ , указује да су хидрокарбонати обрнуто пропорционални у односу на остале параметре, изузев рН (слика 7-7). Наиме, током оксидације сулфидних минерала, протони ослобођени у процесу могу бити конзумирани од стране, пре свега карбонатних минерала, што доводи до повећања индекса рН и концентрације  $\text{HCO}_3^-$  у рудничким водама, а према реакцијама неутрализације 13 и 14 (поглавље 2.2.1.4.).

Поред процеса оксидације сулфидних минерала и неутрализације, хемијски параметри груписани у фактору PC2 указују на значајну улогу растварања околорудних стена, тачније минерала од којих су изграђене, првенствено карбоната и силиката. Испитивањем односа калцијума и магнезијума у рудничким водама, утврђено је да је за већину узорака моларни однос  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$  већи од 2. Дати однос указује да је порекло ових јона у води примарно везано за растварање силикатних минерала (Katz et al. 1998). Испитујући однос збира  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$  и суме катјона, утврђена је просечна вредност од 0,9. Преовлађујући садржај  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  у односу на јоне  $\text{Na}^+$  и  $\text{K}^+$ , у условима када су силикатни минерали доминантни, може бити последица растварања калцијумских плагиокласа, пироксена и амфибола (Subramani et al. 2009). Такође, овакав однос између главних катјона може бити

последича и реверсне јонске измене (Srinivasamoorthy et al. 2011), као и процеса неутрализације.

На бази релације између хидрокарбоната и садржаја силицијума (слика 7-8), приближно половина узорака рудничких вода се карактерише  $\text{HCO}_3^-/\text{SiO}_2$  односом већим од 10, на основу чега се може закључити да процеси растварања карбоната или мешања вода са подземним водама у којима преовлађује  $\text{HCO}_3^-$  јон, значајно утичу на хемизам рудничких вода (Hounslow 1995).



Слика 7-8 Однос између хидрокарбоната и силицијума на бази 80 узорака рудничких вода

Са дијаграма се уочава да у већини појава рудничких вода везаних за лежишта Рб-Zn и бакра преовлађује процес растварања силикатних минерала, док је код лежишта угља, злата и већине испитиваних лежишта неметаличних сировина израженији процес растварања карбоната.

Трећи фактор (PC3) дефинисан је на основу садржаја As, Fe, Zn и Cl<sup>-</sup> у рудничким водама. Арсен у рудничким водама најчешће води порекло од сулфидних минерала богатих овим елементом (Williams 2001), пре свега енаргита, који су чести пратиоци лежишта бакра. Највише концентрације арсена забележене су управо у рудничким водама у овим лежиштима. Анализирајући све појаве, утврђена је значајна негативна корелација између арсена и садржаја хлорида, као и позитивна корелација арсена са цинком у рудничким водама. Иако су за миграцију арсена и његов јонски облик у води од значаја рН/Еh услови, као и присуство гвожђа (Alvarez and Ordóñez 2006), нису утврђене значајне корелације између поменутих параметара. Могући узрок томе јесте разноликост у садржају арсена у испитиваним рудничким водама, које нису везане за лежишта бакра. Испитујући садржај цинка и гвожђа у рудничким водама, утврђена је значајна корелација између ова два елемента. Порекло цинка је пре свега везано за растварање сфалерита и других цинкових минерала. Цинк се у највећим садржајима јавља у оквиру олово-цинкових лежишта, а може бити и чест пратилац бакрових лежишта.

Четврти фактор (PC4) одређен је на основу садржаја фосфата. Овај фактор у малој мери доприноси укупној варијанси, па му се приписују процеси локалног карактера. Минерали из групе фосфата (хидратисани гвожђе и алуминијум фосфати) су тешко растворљиви у води у оксидационим условима (Robertson et al. 2005). Фосфати се такође могу јавити као примесе у минералима који чешће улазе у састав стена, као што су пироксени и амфиболи, одакле су највероватније мобилисани у рудничке воде у оквиру металичних лежишта.

Повишене концентрације фосфата карактеристичне су за рудничке воде из рудника угља. Наиме, у састав угља (поред угљеника, водоника, кисеоника и сумпора), улазе и азот и фосфор, па се у рудничким водама често јављају повишене концентрације амонијум јона и фосфата (Миладиновић 2015).



### 7.3.4. Резултати хијерархијске кластер анализе (HCA)

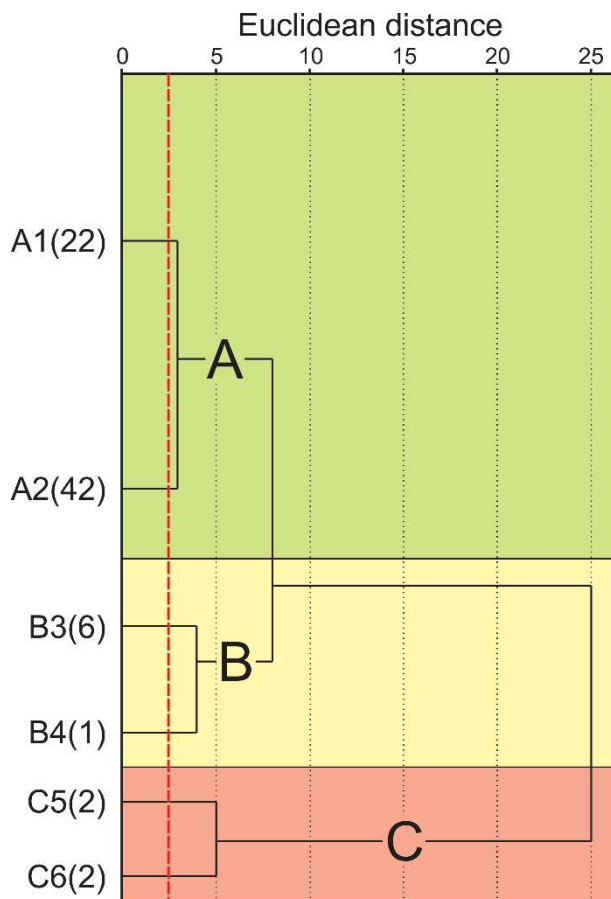
У предметном истраживању HCA је примењена у циљу груписања рудничких вода на основу појединих параметара хемијског састава, који могу бити индикатор процеса загађивања. Анализа је спроведена на бази следећих параметара: рН, минерализација,  $\text{SO}_4^{2-}$ , Fe и As. Наведени параметри су одабрани тако да указују на основне процесе формирања хемијског састава рудничких вода, а пре свега на процес сумпорно-киселинског растварања сулфидних минерала (AMD). Имајући у виду да су сулфати и гвожђе у значајној корелацији са осталим металима у рудничким водама, ова два параметра могу указивати и на повишен садржај других метала. С обзиром да је за арсен утврђена значајна корелација са цинком, уз високу токсичност и честу асоцијацију са златом, арсен је такође издвојен као репрезентативан параметар за груписање рудничких вода према потенцијалном степену штетности по животну средину.

#### 7.3.4.1. Груписање рудничких вода према физичко-хемијским карактеристикама

Резултати HCA анализе, спроведене на 80 узорака рудничких вода, приказани су у виду шематизованог дендограма на слици 7-9, док је комплетни дендограм са редним бројем узорака дат као прилог 3. Усвојена вредност за границу груписања у предметним истраживањима износи 2,5, и на основу ње је извршено груписање узорака рудничких вода у кластере и подкластере.

Визуелном инспекцијом дендограма, на бази усвојене границе груписања, узорци рудничких вода су сврстани у три главна кластера: кластер А, кластер В и кластер С. Додатно, ова три главна кластера су подељена на шест подкластера (А1, А2, В3, В4, С5 и С6). Као што је и назначено на слици 7-9, 64 узорка (84 %) рудничких вода сврстани су у кластер А, односно, његова два подкластера А1 и А2; кластеру В припада 7 појава, док су у кластер С сврстане 4 појаве рудничких вода. Пет појава

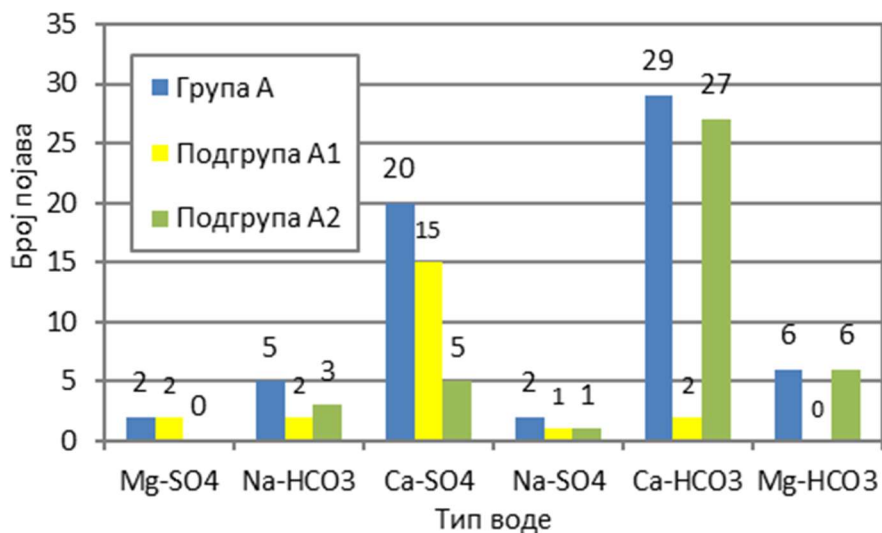
рудничких вода није сврстано у кластере, услед недостатка података о одабраним параметрима.



**Слика 7-9.** Шематски дендограм за узорке рудничких вода на основу рН, минерализације,  $\text{SO}_4^{2-}$ , Fe и As (Atanacković et al. 2013)

#### 7.3.4.2. Хидрохемијске карактеристике рудничких вода у односу на припадајући НСА кластер

Анализа физичко-хемијских карактеристика рудничких вода извршена је у односу на припадност одговарајућем кластеру, односно његовом подкластеру. У погледу основног типа вода, испитивањима је утврђено да већина узорака у подкластеру А1 припада Ca-SO<sub>4</sub> типу, док су рудничке воде из подкластера А2, Ca-HCO<sub>3</sub> типа (слика 7-10).



Слика 7-10. Расподела основних типова вода у односу на припадајуће подкластере у оквиру кластера А

У оквиру хемијског састава рудничких вода сврстаних у кластере В и С, од анјона највећи садржај имају  $\text{SO}_4^{2-}$  јони, док су од катјона најзаступљенији калцијум и магнезијум (табела 7-5).

Табела 7-5 Сумарна табела са вредностима геометријске средине одабраних параметара за рудничке воде разврстане по кластерима

Кластер	А		В		С	
Бр. узорака	64		7		4	
Подкластер	А1	А2	В3	В4	С5	С6
Бр. узорака	22	42	6	1	2	2
Тип воде	Ca-SO <sub>4</sub>	Ca-HCO <sub>3</sub>	Ca-SO <sub>4</sub>	Mg-SO <sub>4</sub>	Ca-SO <sub>4</sub>	Ca-Mg-SO <sub>4</sub>
pH	5.9	7.3	2.9	3.3	2.7	3.8
Минер. (mg/L)	1090	511	2542	3500	6504	11200
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	444	46.8	1830	13600	4450	6775
Fe ук. (mg/L)	2.41	0.14	38.6	15.8	930	1825
As ук. (mg/L)	0.003	0.005	0.003	0.0002	3.5	0.69

Рудничке воде у оквиру кластера В и С су према хемијском саставу киселе минерализоване воде, са изразито високим концентрацијама сулфата, гвожђа и арсена. Рудничке воде из подкластера А1 су претежно благо киселе, минерализоване, са повишеним концентрацијама сулфата, док воде сврстане у

подкластер А2 припадају неутралним, маломинерализованим водама са ниским садржајима гвожђа и сулфата.

У оквиру кластера А, подкластер А1 има највише узорака рудничких вода везаних за полиметалична Pb-Zn лежишта, као и рудничке воде из напуштених рудника каменог угља и бакра. У подкластер А2 сврстане су рудничке воде везане за лежишта злата, урана, магнезита, угља и поједине појаве из лежишта Pb-Zn и бакра. Кластер В чине рудничке воде из лежишта олова и цинка и бакра. Рудничке воде груписане у кластер С су везане за напуштене рударске радове у оквиру Cu, Pb-Zn и Hg лежишта.

Према генералном минералошком саставу, рудничке воде груписане у кластер В воде порекло из металичних лежишта, формираних у оквиру хидротермално измењених андезита. Рудничке воде у кластеру С такође су генетски везане за лежишта металичних минералних сировина формираних у оквиру хидротермално измењених магматских стена. Овакви геолошки услови репрезентативни су за већину испитиваних Cu и Pb-Zn напуштених рударских радова. Стене у којима значајан садржај имају карбонатни минерали најчешће се налазе у зони лежишта угља, злата и скарновских лежишта металичних минералних сировина. Већина рудничких вода из напуштених рударских радова у оквиру ових лежишта груписана је у кластер А.

Рудничке воде груписане у кластере В и С и подкластер А1 садрже повишене концентрације токсичних метала, металоида и сулфата, што напуштене рударске радове за које су везане сврстава у групу потенцијалних извора загађујућих супстанци. Рудничке воде сврстане у подкластер А2, везане за различите врсте минералних сировина, према хемијском саставу су сличне природним површинским и подземним водама одређеног подручја, па као такве не представљају потенцијалну опасност за погоршање квалитета водних ресурса.

Имајући у виду чињеницу да су истраживањима обухваћени напуштени рударски радови везани за различите врсте минералних сировина, формирану у разноврсним

геолошким и хидрогеолошким условима, присутне су велике варијације у хемијском саставу рудничких вода. У таквим условима, применом *НСА* извршено је разврставање појава рудничких вода у више група и подгрупа, на бази одабраних значајних физичко-хемијских параметара. Припадност одређеној групи (кластеру) у даљој анализи је коришћена као један од фактора за процену степена штетности напуштених рударских радова.

#### 7.4. Карактеризација напуштених рударских радова као потенцијалних извора загађујућих супстанци

Први корак у примени предложене методологије за карактеризацију рударских радова на бази ризика од загађивања водних ресурса представља њихова идентификација и карактеризација као извора загађујућих супстанци, односно потенцијалних хазарда. Карактеризација ових радова као потенцијалних загађивача и прорачун индекса хазарда извршена је на бази пет критеријума (*НСА* кластер, врста минералне сировине, геолошка средина, површина рудног јаловишта и постојање флотацијског јаловишта или сепарације угља) означених са *НС1* до *НС5*, а према поступку описаном у поглављу 6.2.1.

##### 7.4.1. Одређивање тежинских коефицијената

За сваки од издвојених критеријума прорачунати су тежински коефицијенти применом метода аналитичког хијерархијског процеса (Saaty 1980). Предложени критеријуми из табеле 6-1 су рангирани на основу Сатијеве скале на начин приказан у табели 7-6.

**Табела 7-6.** Матрица поређења са међусобним рангирањем критеријума према значају

Критеријум	НС1	НС2	НС3	НС4	НС5
НС1	1	2	4	2	1/2
НС2	1/2	1	3	1/2	1/3
НС3	1/4	1/3	1	1/4	1/5
НС4	1/2	2	4	1	1/2
НС5	2	3	5	2	1
Сума колоне	4.250	8.333	17.000	5.750	2.533

Након формирања матрице извршена је нормализација вредности и формирана је нормализована матрица према једначини [1], а потом су прорачунати тежинских коефицијената према једначини [2]. Вредности тежинских коефицијената ( $\omega$ ) за предложене факторе приказани су у табели 7-7.

**Табела 7-7.** Нормализована матрица са израчунатим вредностима тежинског фактора за сваки од критеријума

Критеријум	НС1	НС2	НС3	НС4	НС5	Тежински фактор ( $\omega$ )
НС1	0.235	0.240	0.235	0.348	0.197	<b>0.251</b>
НС2	0.118	0.120	0.176	0.087	0.132	<b>0.127</b>
НС3	0.059	0.040	0.059	0.043	0.079	<b>0.056</b>
НС4	0.118	0.240	0.235	0.174	0.197	<b>0.193</b>
НС5	0.471	0.360	0.294	0.348	0.395	<b>0.373</b>

Након израчунавања тежинских коефицијената проверена је валидност усвојених односа преко коефицијента конзистенције ( $CR$ ), који представља однос између индекса конзистенције ( $CI$ ) и насумичног индекса конзистенције ( $RI$ ).

Прорачун индекса конзистенције извршен је према једначини [3]. За потребе прорачуна индекса ( $CI$ ) израчунате су вредности за сумарни тежински коефицијент ( $\omega_s$ ) и приказане су у табели 7-8.

**Табела 7-8.** Сумарни тежински фактор ( $w_s$ )

Критеријум	НС1	НС2	НС3	НС4	НС5	Фактор ( $w_s$ )
НС1	0.251	0.253	0.224	0.386	0.187	1.301
НС2	0.126	0.127	0.168	0.096	0.124	0.641
НС3	0.063	0.042	0.056	0.048	0.075	0.284
НС4	0.126	0.253	0.224	0.193	0.187	0.982
НС5	0.502	0.380	0.280	0.386	0.373	1.921

На основу тежинских коефицијената прорачуната је сопствена вредност матрице  $\lambda_{\max}$ , која представља аритметичку средину количника  $\omega_s / \omega$  (табела 7-9).

Табела 7-9. Прорачун сопствене вредности матрице ( $\lambda_{\max}$ )

Фактор ( $w_s$ )	Тежински фактор ( $w$ )	$w_s / w$
1.301	0.251	5.179
0.641	0.127	5.066
0.284	0.056	5.068
0.982	0.193	5.094
1.921	0.373	5.144
<b>Аритметичка средина (<math>\lambda_{\max}</math>)</b>		<b>5.110</b>

На основу једначине [3] израчуната је вредност индекса конзистенције од **CI = 0,028**.

Вредност за насумични индекс конзистенције ( $RI$ ) преузета из табеле 6-3 износи 1.12. Коначно, на основу добијених вредности израчунат је коефицијент конзистенције ( $CR$ ) према једначини [4].

У оквиру предметних истраживања, за 5 предложених критеријума, а на основу спроведених прорачуна, утврђена је вредност коефицијента конзистенције **CR = 0,025**. Добијена вредност је нижа од 0,1, што указује да је модел постављен за прорачун тежинских фактора конзистентан. Прорачунате вредности тежинских фактора сумиране су у табели 7-10.

На основу тежинских фактора највећи значај за процену потенцијала који напуштени рударски радови имају као извори загађујућих супстанци има присуство флотацијског јаловишта или сепарације угља, а затим и хемијски састав рудничких вода изражен преко  $HSA$  кластера. Критеријуми врста минералне сировине и величина јаловишта су приближно једнаког значаја, док је најмањи значај у односу на остале придодат критеријуму геолошка средина.

**Табела 7-10.** Вредности тежинских фактора одређене према *АНР* методи за издвојене критеријуме за процену индекса хазарда

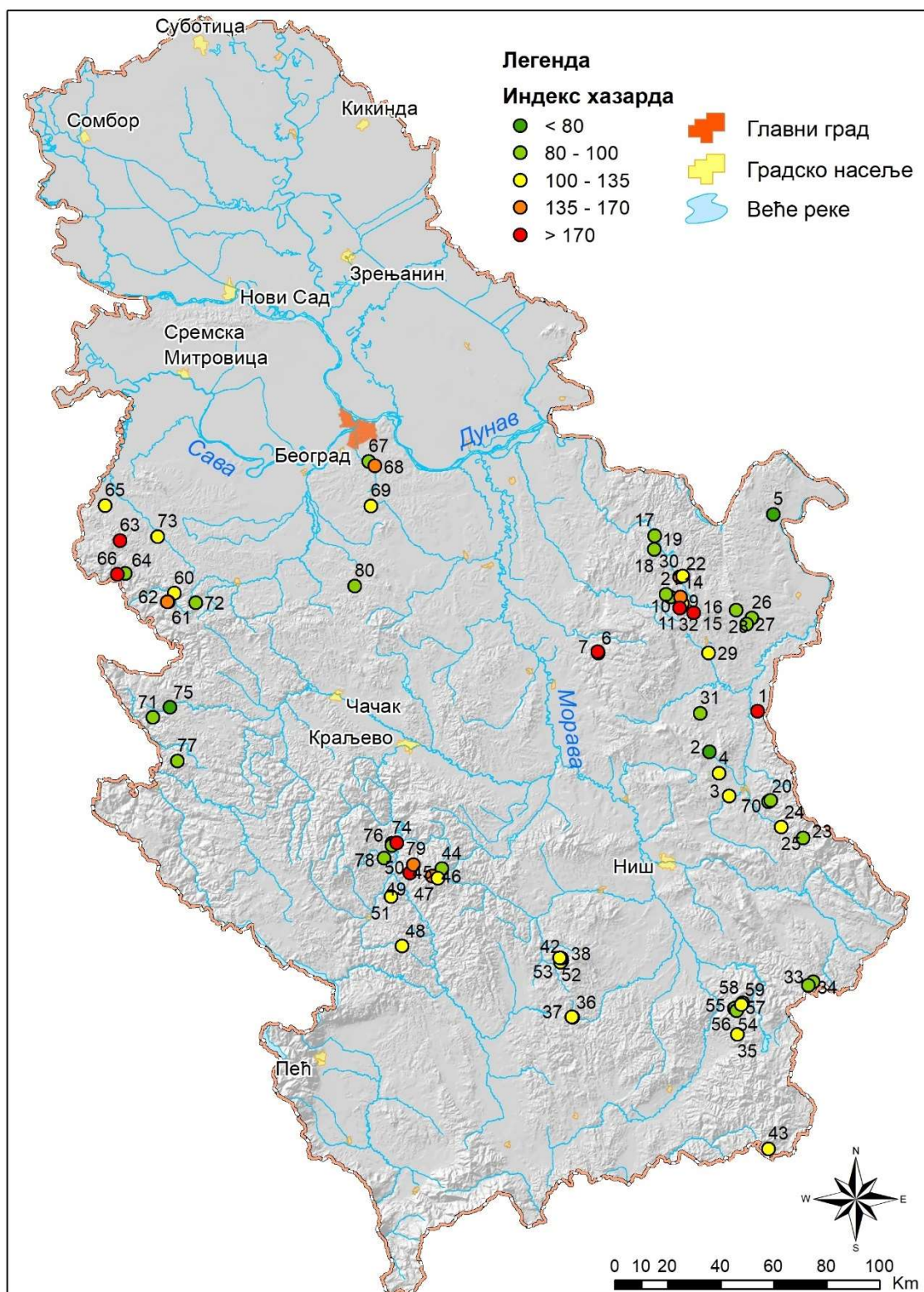
Критеријум	Ознака	Тежински фактор	Вредност
Физичко-хемијске карактеристике рудничких вода изражене преко припадности одређеном кластеру, издвојеном на основу <i>НСА</i> анализе	НС1	$\omega_1$	<b>0.251</b>
Врста минералне сировине	НС2	$\omega_2$	<b>0.127</b>
Геолошка средина тј. преовлађујућа група минерала који улазе у састав стена у оквиру којих је формирано лежиште	НС3	$\omega_3$	<b>0.056</b>
Величина рудног јаловишта изражена преко његове површине	НС4	$\omega_4$	<b>0.193</b>
Постојање флотацијског јаловишта или мокре сепарације угља у зони напуштених рудника	НС5	$\omega_5$	<b>0.373</b>

#### 7.4.2. Резултати прорачуна индекса хазарда

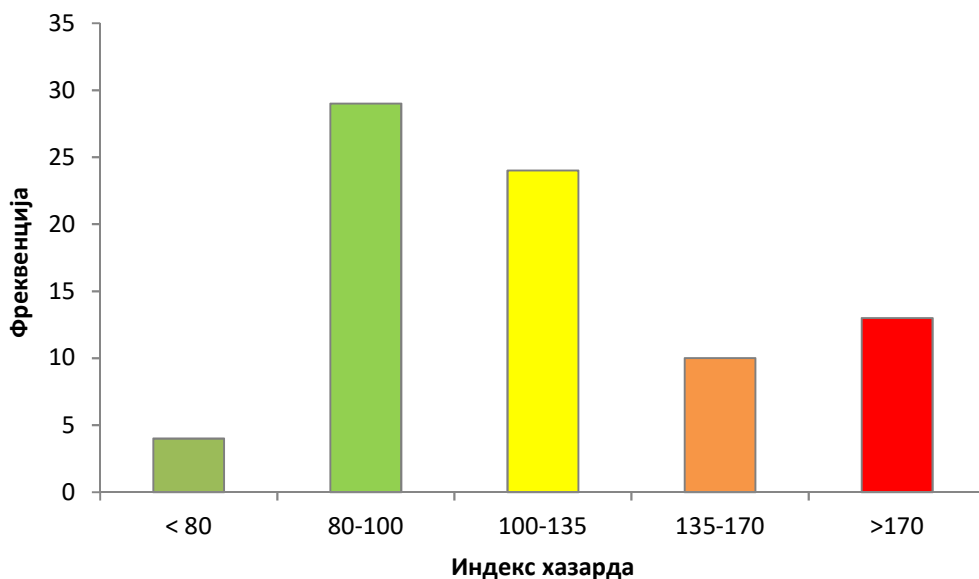
Индекс хазарда који напуштени рударски радови представљају за ресурсе површинских и подземних вода процењен је на основу прорачунске шеме за предложене факторе (НС1-НС5) из табеле 6-1 и израчунатих тежинских фактора ( $\omega$ ), а према једначини [5]. Просторни распоред напуштених рударских радова према степену хазарда приказан је на слици 7-11, а табеларни приказ резултата прорачуна дат је у прилогу 4.

На основу прорачунате вредности индекса хазарда напуштени рударски радови су сврстани у категорије хазарда. Дистрибуција напуштених рударских радова у оквиру издвојених категорија приказана је на слици 7-12.





Слика 7-11. Карактеризација напуштених рударских радова према индексу хазарда



**Слика 7-12.** Хистограм вредности индекса хазарда за напуштене рударске радове обухваћене анализом

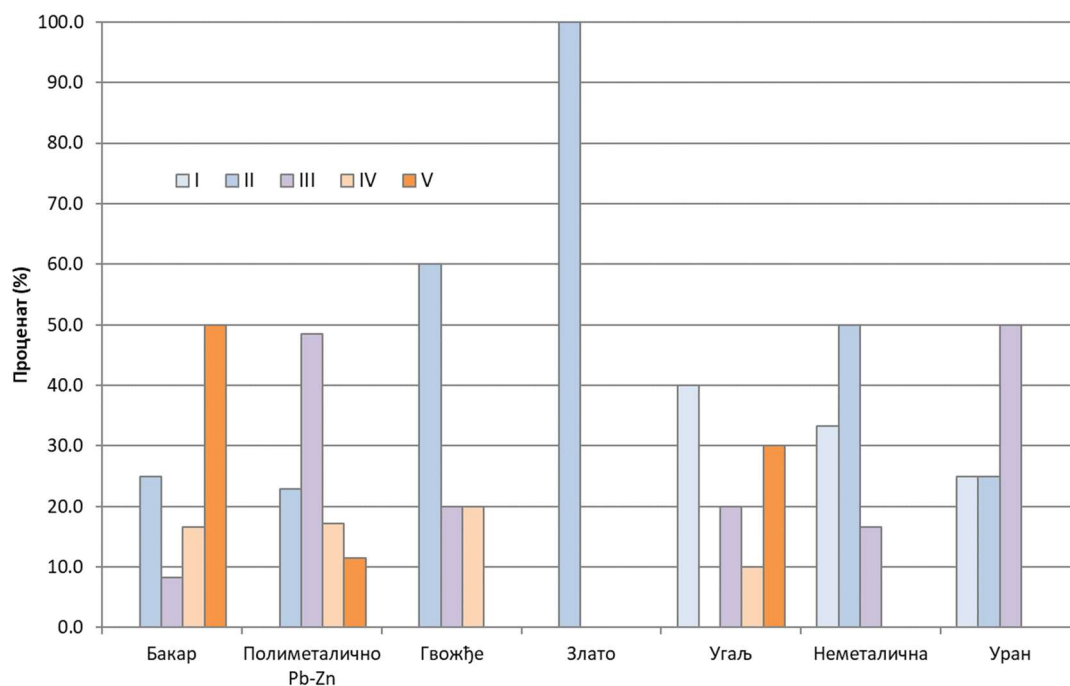
Око 20 % испитиваних појава припада екстремним категоријама, односно категорији веома низак и висок хазард. Највећи број напуштених рударских радова (36 %) сврстан је у ниску категорију хазарда, док 30 % испитиваних рударских радова припада средњој категорији хазарда. Вредност индекса хазарда, преко 170, одређена је за 16 % испитиваних напуштених рударских радова, који се одликују високим потенцијалом за загађивање водних ресурса и сврстани су у веома високу категорију хазарда.

У односу на врсту минералне сировине, у најизраженије хазарде сврстани су напуштени рудници каменог угља, бакра и олова и цинка. У највишу категорију према индексу хазарда претежно су сврстани напуштени рудници за које је везно присуство флотацијског јаловишта, с обзиром да је овом параметру додељена највиша вредност тежинског фактора. Високим вредностима индекса хазарда (135-170) одликују се радови у оквиру лежишта бакра, олово-цинка, и у мањој мери гвожђа (табела 7-11).

**Табела 7-11.** Број напуштених рударских радова у свакој од издвојених категорија хазарда у односу на врсту минералне сировине

Мин. сировина	Категорија хазарда					Збир
	I	II	III	IV	V	
Бакар	0	3	1	2	6	12
Злато	0	7	0	0	0	7
Неметалична	2	3	1	0	0	6
Полиметалично Pb-Zn	0	9	17	6	4	36
Угаљ	4	0	2	1	3	10
Уран	1	1	2	0	0	4
Гвожђе	0	3	1	1	0	5

Средњој категорији припадају највећим делом рудници олова и цинка и поједини напуштени рударски радови у оквиру лежишта угља, гвожђа и урана. Ниским вредностима индекса хазарда (испод 100) одликују се радови у лежиштима злата и неметаличних сировина (слика 7-13).



**Слика 7-13.** Процентуално учешће категорија хазарда у односу на врсту минералне сировине

На основу спроведене анализе, напуштени рударски радови у лежиштима урана сврстани су у ниску и средњу категорију према индексу хазарда. Ово је резултат примењене методологије, у оквиру које није разматрана повишена радиоактивност као један од фактора који негативно утиче на квалитет водних ресурса. Из тог разлога за напуштене рударске радове у оквиру лежишта урана могуће је увођење додатних поена како би се сврстали у вишу категорију хазарда.

### **7.5. Карактеризација напуштених рударских радова према степену ризика од загађивања водних ресурса**

Поред карактеризације и квантификације напуштених рударских радова као потенцијалних извора загађујућих супстанци или хазарда, у склопу анализе ризика неопходно је проценити и вероватноћу излагања, као и изгледе да напуштени рударски радови нанесу негативне последице рецептору, односно осетљивост рецептора. У оквиру предметних истраживања, под рецептором се подразумевају водни ресурси. У том контексту вероватноћа излагања хазарду за подземне воде процењена је на основу анализе природне рањивости подземних вода, односно степена заштитне улоге коју пружају седименти у надизданској зони. За процену изгледа за излагање хазарду површинских вода, примењен је поступак оцене угрожености на основу три параметра: удаљеност до површинског тока, протицај рудничких вода и ред најближег водотока.

#### **7.5.1. Процена ризика од загађивања подземних вода**

Карактеризација на бази ризика од непосредног загађивања подземних вода у самој зони напуштених радова, спроведена је на основу индекса хазарда и индекса рањивости подземних вода. За потребе анализе природне рањивости подземних вода примењена је *GOD* метода. Као што је већ напоменуто у претходним поглављима, с обзиром на размеру истраживања, као репрезентативна усвојена је највиша вредност *GOD* индекса у кругу од 1 km око локације напуштених рударских радова.

### 7.5.1.1. Резултати анализе рањивости подземних вода

Анализа рањивости подземних вода *GOD* методом спроведен је за територију Србије јужно од Саве и Дунава. Као основа за анализу рањивости коришћена је геолошка карта Србије размере 1 : 300 000 (група аутора 1970).

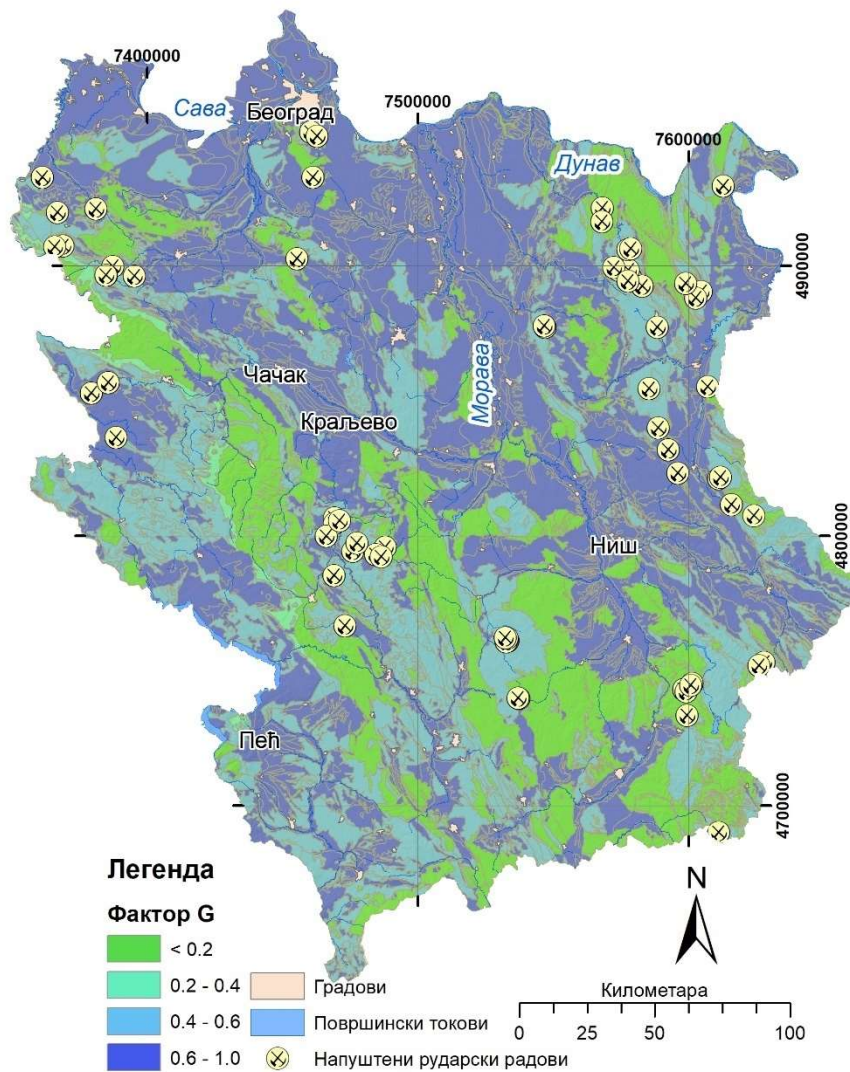
#### **Параметар *G***

Први корак у примени методе укључио је идентификацију хидродинамичких карактеристика издани изражених преко фактора *G*. Вредности параметра *G* налазе се у опсегу од 0 до 1 и додељиване су на основу модификоване шеме приказане на слици 5-5. Просторна дистрибуција вредности параметра *G* за подручје Србије јужно од Саве и Дунава приказана је на слици 7-14.

У делове терена у којима нису формиране значајније издани или су просторно веома ограничене, тзв. условно безводне делове сврстани су терени изграђени од ситнозрних неконсолидованих седимената (глина, алеврита) консолидованих стена (глинаца, лапораца), формације изграђене од смене ових седимената са пешчарима – флишне секвенце и метаморфне стене (шкриљци, гнајсеви и амфиболити). За терене сиромашне подземним водама додељена је вредност параметра *G* од 0,1.

Теренима изграђеним од седиментних стена, претежно пешчара, у смени са кречњацима, конгломератима и лапорцима, као и подручјима у којима доминантно распрострањене имају вулканске и интрузивне стене додељене су вредности параметра *G* у опсегу 0,3-0,5. Теренима изграђеним од седиментних стена представљених сменом кречњака, пешчара и глинаца, као и појединим кластичним формацијама неогене старости додељене су вредности за параметар *G* од 0,5. С обзиром да је анализа рањивости подземних вода спроведена за најплићи водоносни хоризонт, вредности параметар *G* од 0,6 (које се односе на присуство слободне издани делимично покривене повалтним слојем), додељене су деловима терена изграђеним од квартарних и неогених наслага представљеним кластичним

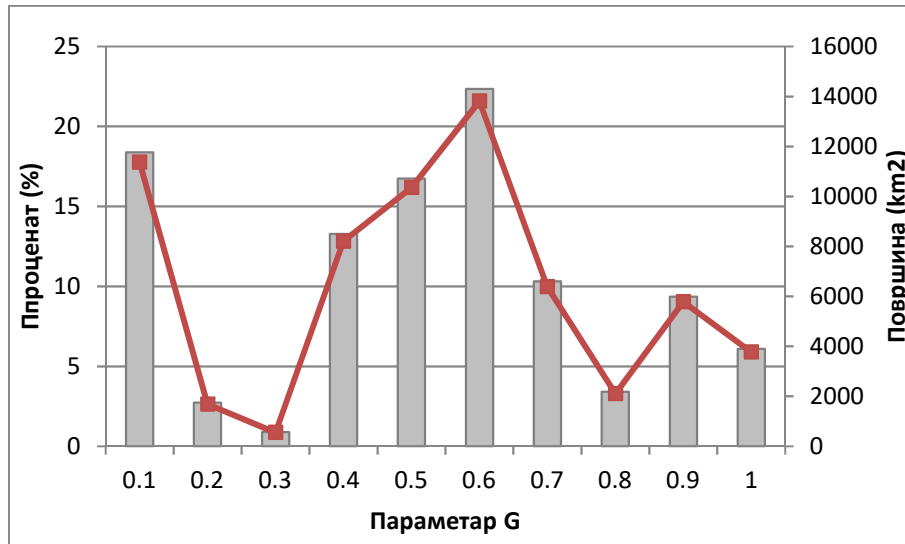
седиментима у оквиру којих су присутне глине, као и у зони распрострањена кредних кречњака са лапорцима. Вредности од 0,7 придружене су теренима изграђеним од: седиментних наслага у којима доминирају кречњаци, серпентинита, и неконсолидованих претежно песковитих квартарних седимената.



Слика 7-14. Просторни распоред вредности параметра G

Највишим вредностима за параметар G, између 0,8 и 1, одликују се терени у оквиру распрострањења карстне издани формиране у масивним и слојевитим кречњацима и доломитима, као и терасне и алувијалне насlage фације корита, са развијеном збијеном издани са слободним нивоом.

У односу на површину коју заузимају, вредност параметра  $G$  од 0,6 је најзаступљенија са око 21 % површине терена сврстаних у ову категорију (слика 7-15).

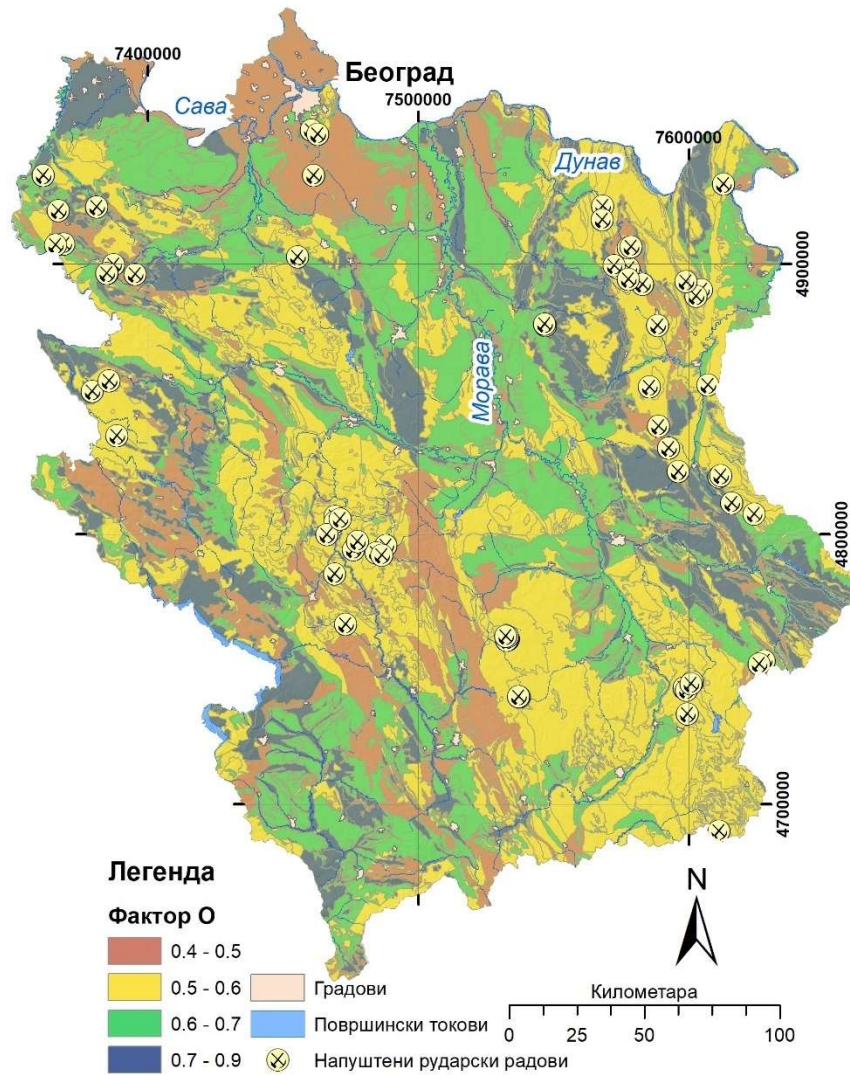


Слика 7-15. Расподела вредности параметра  $G$  у односу на површину терена

Терени у оквиру којих је развијена издан са слободним нивоом (карст и алувијони) који имају вредност параметра  $G$  између 0,8 и 1, заузимају близу 20 % испитиваног терена.

### Параметар $O$

Након идентификације хидродинамичких карактеристика спроведена је анализа литолошких карактеристика надизданске зоне. За заступљене литолошке чланове процењен је састав и степен консолидације или испуцалости надизданске зоне, на основу које је додељена вредност за параметар  $O$  у интервалу од 0,4 до 1 (слика 7-16).



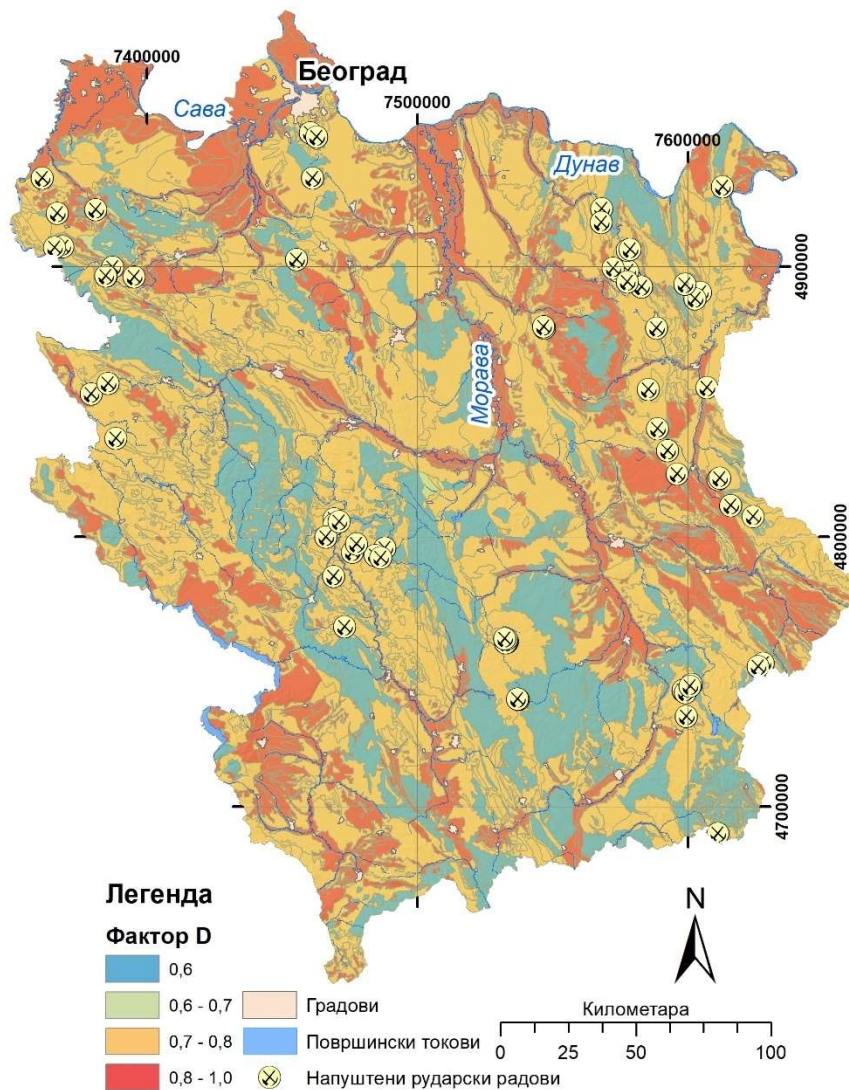
Слика 7-16. Просторни распоред вредности параметра О

Вредности од 0,4 придружене су теренима изграђеним од барских седимената и алевролита. Вредност параметра О од 0,5 додељене су теренима изграђеним од претежно ситнозрних-глиновитих седимената (глинци и алевролити). У теренима изграђеним од метаморфних, киселих интрузивних и вулканских стена, додељене су вредности параметра О од 0,6. Већини неогених и алувијалних наслага одређене су вредности од 0,7. Високе вредности за параметар О између 0,8 и 0,9 додељене су карстним теренима и алувијалним наслагама фације корита, које се одликују са високом степеном водопроводности надизданске зоне.



### Параметар D

Трећи корак у анализи природне рањивости подземних вода представља одређивање вредности параметра D. Код издани са слободним нивоом он се одређује на основу дубине до нивоа подземних вода, а на бази дубине до водоносног слоја, у условима издани под притиском. С обзиром да егзактни подаци о нивоима подземних вода нису доступни за широк простор обухваћен анализом, дубина до нивоа подземних вода процењена је на основу литолошких јединица, заступљених типова издани и морфологије терена (слика 7-17).



Слика 7-17. Просторни распоред вредности параметра D

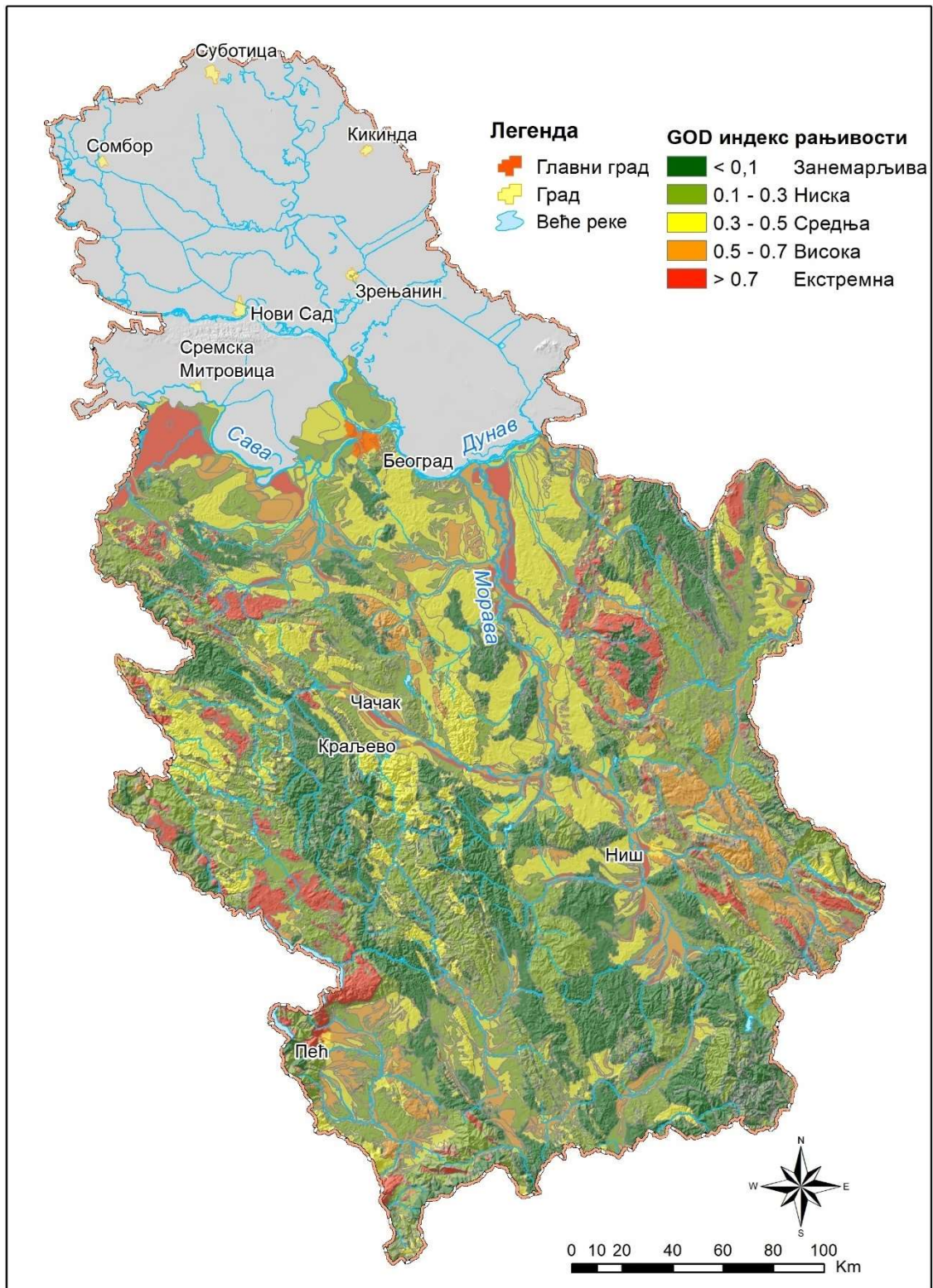
Најмања дубина до нивоа подземних вода претпостављена је за кварталне наслаге у долинама великих река. Уз алувијоне, највише вредности параметра  $D$  додељене су карстним теренима. У оквир неогених басена претпостављена је дубина до првог водоносног хоризонта од 20 до 50 m, уз вредност параметра  $D$  од 0,7.

### **Резултати прорачуна $GOD$ индекса**

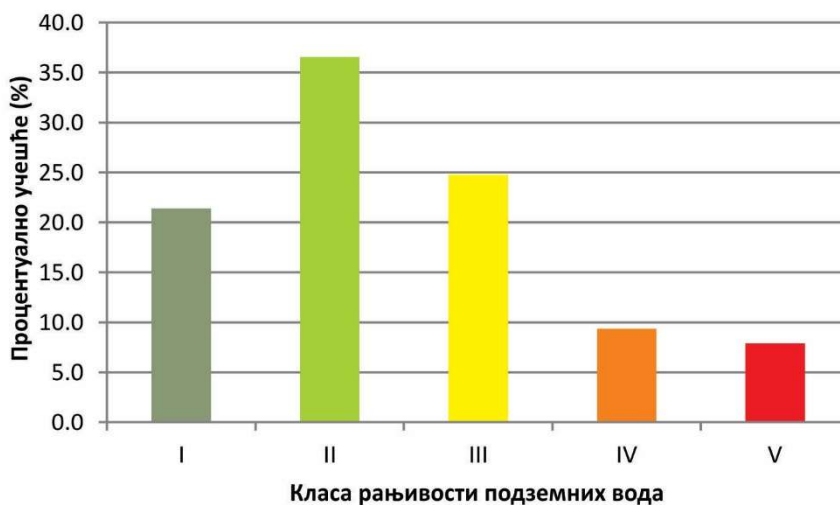
Просторно интеграција и сублимирање параметра  $G$ ,  $O$  и  $D$  спроведено је применом одговарајућих алатки (енгл. *union* и *field calculator*) у *GIS* окружењу. Финални  $GOD$  индекс рањивости подземних вода израчунат је множењем добијених вредности за појединачне параметре (слика 7-18).

Анализа просторне расподеле издвојених класа рањивости указује да нешто више од 50 % површине терена обухваћеног анализом припада категорији занемарљиве до ниске рањивости (слика 7-19). Приближно 25 % терене припада категорији умерене или средње рањивости, док је 20 % терена окарактерисано високом до екстремном рањивошћу подземних вода.

У односу на издвојена 153 водна тела подземних вода у Србији, њих 129 се налази у простору обухваћеном анализом. Напуштени рударски радови налазе се у границама 26 водних тела подземних вода. Спроведена анализа је показала да је вредност  $GOD$  индекса за већину водних тела везаних за напуштене рударске радове од 0,2 до 0,32. Код подземних водних тела на чијем простору нису регистровани напуштени рударски радови, вредности индекса рањивости покривају нешто већи опсег (0,2-0,45). Резултати анализе указују да у границама потенцијално угрожених водних тела подземних вода доминантно распрострањење имају терени који се одликују ниском рањивошћу.



Слика 7-18. Карта природне рањивости подземних вода добијена GOD методом за територију Србије јужно од Саве и Дунава



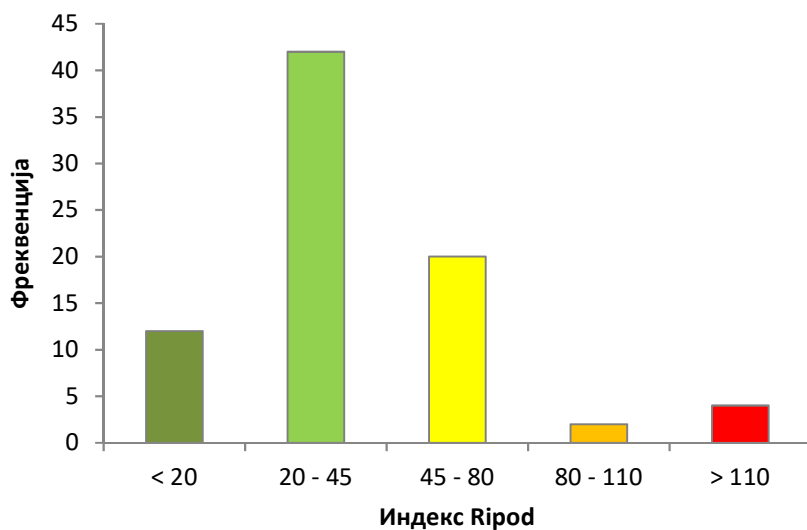
**Слика 7-19.** Процентуално учешће површине терена обухваћеног анализом издвојеним класама рањивости подземних вода

#### 7.5.1.2. Резултати прорачуна индекса ризика од загађивања подземних вода ( $Ri_{pod}$ )

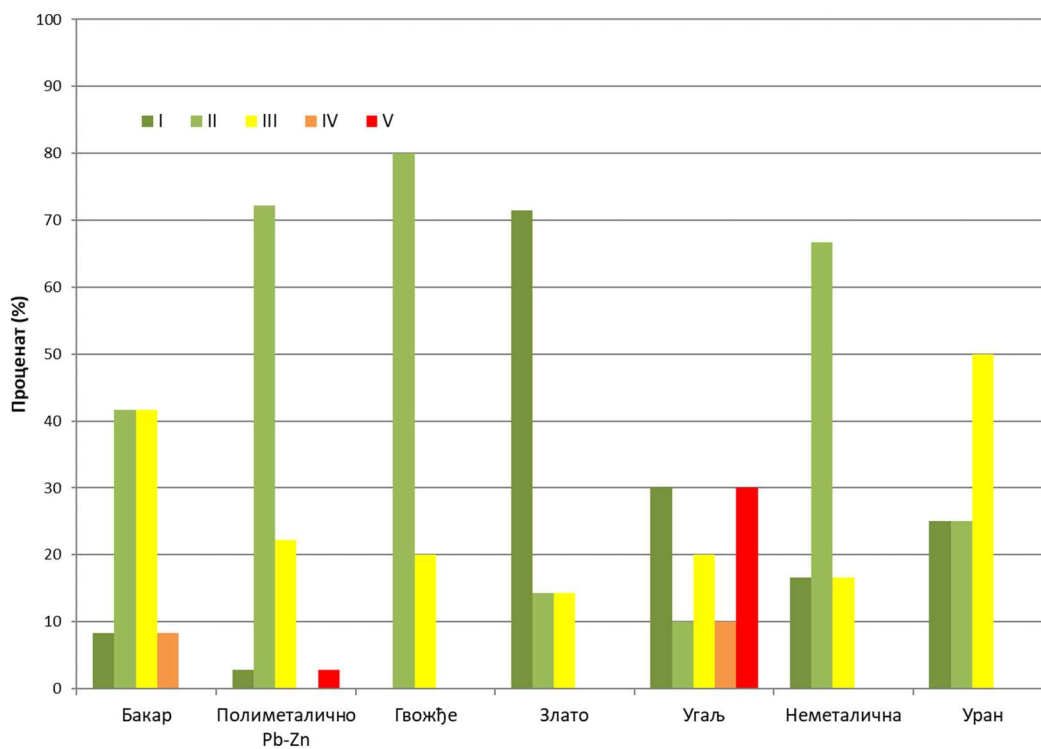
Прорачун индекса ризика од загађивања подземних вода за сваки од напуштених рударских радова извршен је множењем индекса хазарда ( $H_i$ ) и вредности  $GOD$  индекса (једначина [8]). Резултати прорачуна дати су табеларно у оквиру прилога 5, а дистрибуција вредности индекса  $Ri_{pod}$  према издвојеним класама ризика приказана је на слици 7-20.

Са дијаграма се уочава да већина испитиваних напуштених рударских радова (67 %) припада категорији са веома ниским и ниским ризиком од загађивања подземних вода. Приближно 25 % испитиваних појава се одликује средњим степеном ризика, док је у групу напуштених рударских радова са високим и веома високим ризиком од загађивања подземних вода сврстано 8 % од укупног броја испитиваних радова.

У односу на врсту минералне сировине заступљеност издвојених класа ризика приказана је на слици 7-21.



Слика 7-20. Хистограм вредности индекса ризика од загађивања подземних вода за напуштене рударске радове



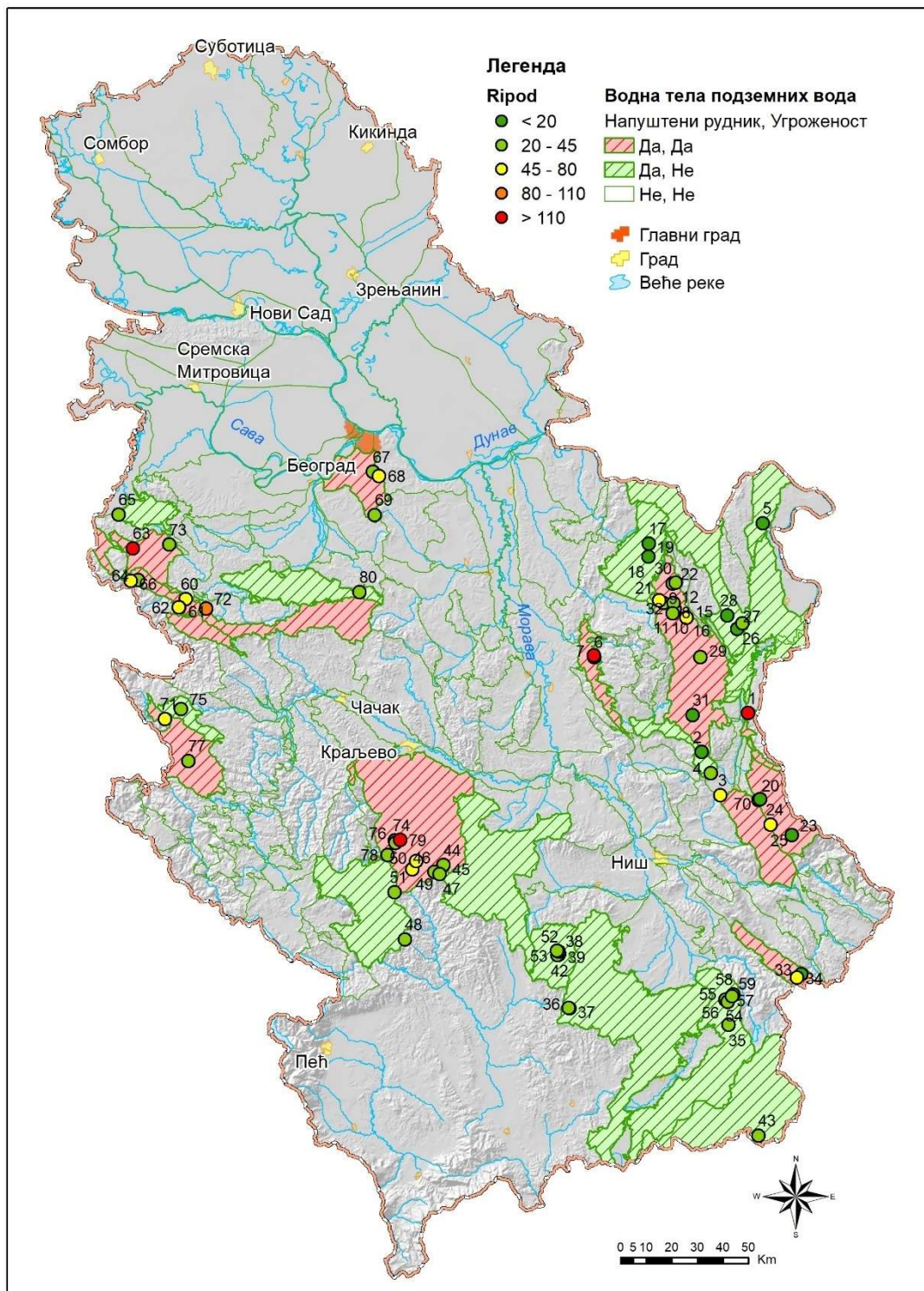
Слика 7-21. Процентуално учешће категорија ризика од загађивања подземних вода у односу на врсту минералне сировине за коју су везани испитивани напуштени рударски радови

Од испитиваних напуштених рудника угља, њих 40 % је сврстано у категорији са високим и веома високим ризиком по загађивање подземних вода. У високу категорију ризика сврстано је неколико рударских радова везаних за лежишта бакра и полиметалична претежно Pb-Zn лежишта. Средња категорија ризика заступљена је у оквиру свих испитиваних врста минералних сировина. Ниска и веома ниска категорија су процентуално најзаступљенији међу рудницима гвожђа, неметаличних сировина и злата.

Просторни распоред напуштених рударских радова класификованих прека категорији ризика од загађивања подземних вода приказан је на слици 7-22.

У односу на степен хазарда, карактеризацијом према степену ризика од загађивања подземних вода, мањи број напуштених рударских радова је сврстан у високу и веома високу категорију. Основни узрок оваквих резултата се налази у хидрогеолошким карактеристикама лежишта, односно у природно ниској рањивости подземних вода. Наиме, најизраженије разлике између индекса хазарда и индекса ризика, присутне су код напуштених рударских радова у лежиштима бакра. Већина испитиваних појава налази се у оквиру Тимочког магматског комплекса (ТМК), у чијој грађи доминирају вулканокластит, андезити, дацити и диорити. С обзиром на геолошку грађу и хидрогеолошке услове, простор ТМК-а је на основу анализе рањивости сврстан у категорију ниске природне рањивости подземних вода, са вредностима *GOD* индекса око 0,25. Наведене вредности значајно умањују степен ризика који напуштени рударски радови поседују као потенцијални загађивачи подземних вода.

Међутим, иако је процењен средњи степен ризика од директног загађивања подземних вода у самој зони напуштених рударских радова, присутна је опасност од посредног угрожавања квалитета подземних вода низводно од самих радова, путем инфилтрације загађених површинских вода у издан.



Слика 7-22. Просторни распоред напуштених рударских радова класификованих према ризику од загађивања подземних вода, са проценом угрожености водних тела подземних вода

Од укупно издвојених 153 водних тела подземних вода на територији Србије, напуштени рударски радови идентификовани су у границама 26 подземних водних тела. За њих 12 је процењено да су подземне воде директно угрожене од стране напуштених рударских радова. С обзиром на величину, оваква процена се не односи на целокупна водна тела, већ на њихове делове представљене хомогеним геолошким/хидрогеолошким карактеристикама, који се налазе у непосредној зони напуштених рударских радова.

#### 7.5.2. Процена ризика од загађивања површинских вода

Карактеризација напуштених рударских радова на бази ризика од загађивања површинских вода спроведена је на основу индекса хазарда за напуштене рударске радове и индекса угрожености површинских вода (*FT*). Индекс ризика од загађивања површинских вода за напуштене рударске радове одређене је као производ вредности индекса хазарда и индекса угрожености површинских вода.

##### 7.5.2.1. Резултати анализе угрожености површинских вода

Угроженост површинских вода тј. могућност транспорта загађујућих супстанци од напуштених рударских радова до најближег површинског тока, као и могућност ублажавања загађења процењена је на основу три фактора: удаљеност до најближег површинског тока (*T1*), протицај рудничких вода (*T2*) и ред најближег водотока (*T3*).

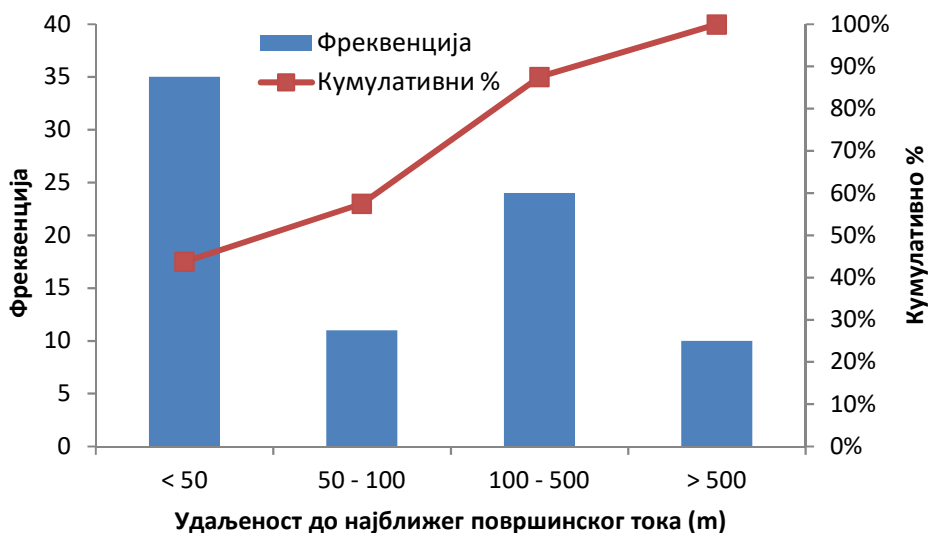
У склопу анализе сваком од издвојених фактора додељиване су вредности од 0,1 до 1, а према прорачунској шеми из табеле 6-4.

#### **Параметар *T1***

За сваки од напуштених рударских радова обухваћених истраживањима одређено је најкраће растојање до најближег површинског тока низводно од места истицања рудничких вода. Прелиминарне вредности удаљености одређене су употребом



алатке *nearset distance* из *Arc GIS toolbox*-а. Након тога вршена је мануелна провера добијених вредности. Неопходне корекције вршене су на бази сателитских снимака и ортофото снимака доступних у апликацијама *Google Earth* и *Geosrbija*. Основни показатељи за скуп добијених података приказани су на слици 7-23.



Слика 7-23. Хистограм вредности удаљености напуштених рударских радова до најближег површинског тока

Са дијаграма се види да око 57 % испитиваних напуштених рударских радова налази на растојању мањем од 100 m од површинског тока, а да је код чак 43 % удаљеност мања од 50 m. Један од разлога лоцирања рударских радова близу површинских токова може бити и у томе што су за истраживања и отварања лежишта путем поткопа, са техничког аспекта погодније локације које се налазе на долинским странама.

Рударским радовима на растојању мањем од 100 m додељена је вредност за параметар T1 од 0,5. На удаљености између 100 и 500 m налази се око 30 % радова, за које је додељена вредност параметра T1 од 0,3. На растојању од преко 500 m од најближег површинског тока налази се свега 13 % испитиваних напуштених рудника, и њима је додељена вредност за параметар T1 од 0,15.

## **Параметар T2**

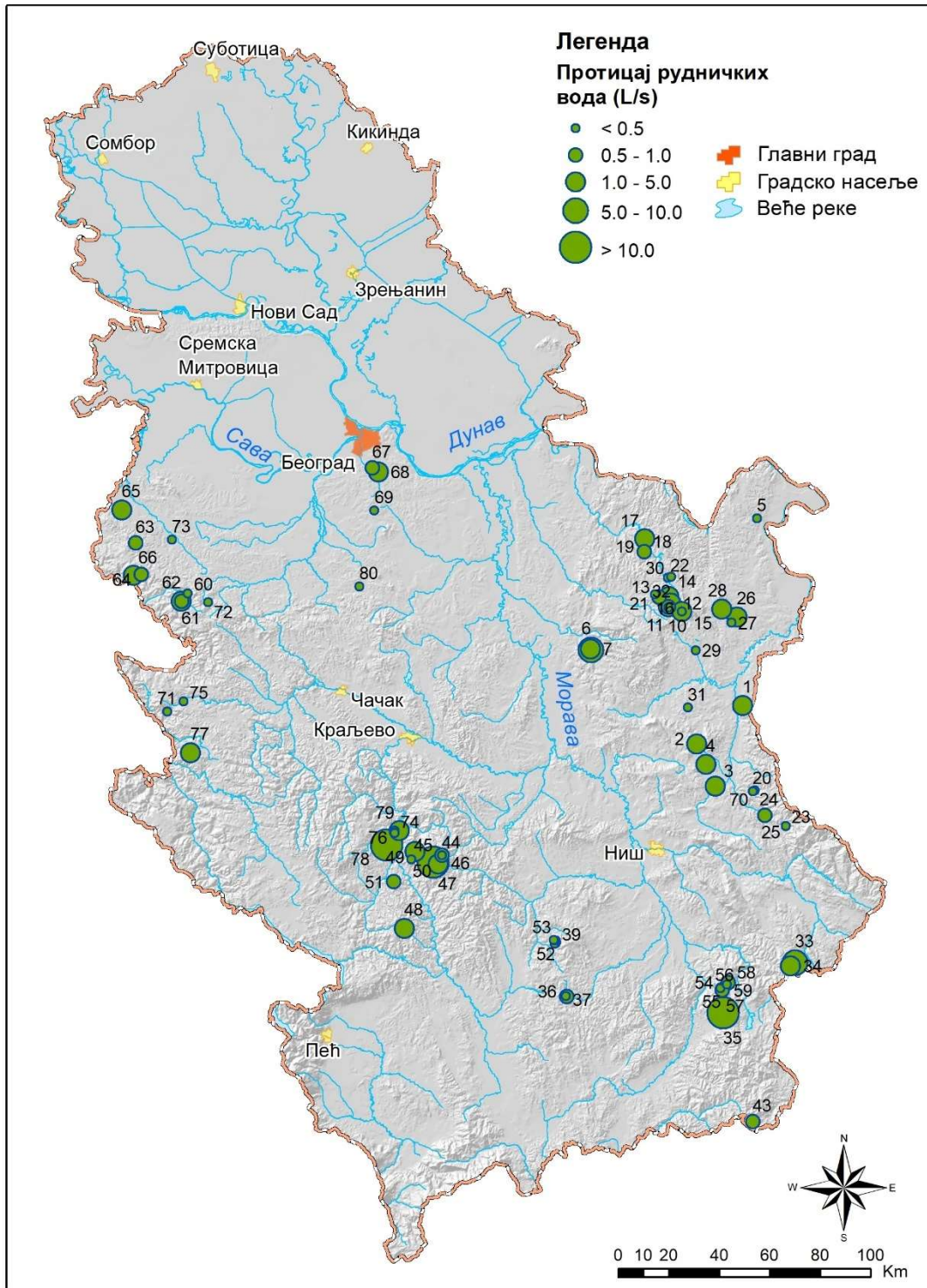
Протицај рудничких вода које истичу из површинских и подземних напуштених рударских радова мерен је (или процењиван уколико није било могуће извести мерење) у фази теренских истраживања. С обзиром да је тешко проценити количине које дифузно истичу, пре свега из јаловишта, за прорачун су коришћене количине рудничких вода које концентрисано истичу, најчешће из напуштених поткопа.

На слици 7-24 приказане су локације напуштених рударских радова класификоване према количини рудничких вода.

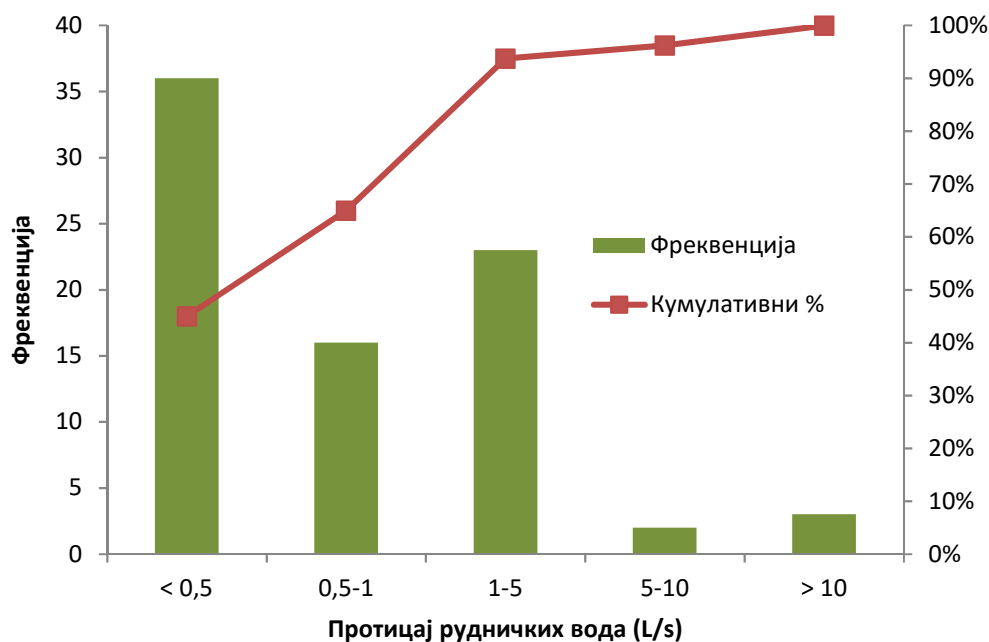
Количинама рудничких вода преко 10 L/s одликују се напуштени рударски радови у подручју Рашке (рудник магнезита „Брвеница“) који је у употреби за водоснабдевање, као и напуштени рудник гвожђа „Суво Рудиште“ на Копаонику, из чијег поткопа који се налази у непосредној зони ски-центра истиче 20 L/s рудничких вода. Значајне количине рудничких вода истичу и из рудника молибдена „Мачкатица“ за који се разматрају опције за отварање.

Иако су регистроване појаве истицања рудничких вода у количини преко 10 L/s, њихов број је релативно мали. Наиме, протицај рудничких вода од преко 5 L/s забележен је за нешто мање од 10 % испитиваних рударских радова (слика 7-25).

Протицаји мањи од 0,5 L/s карактеристични су за 45 % испитиваних радова. Категорији између 0,5 и 1 L/s припада 20 %, а протицаји рудничких вода између 1 и 5 L/s одређени су за близу 30 % напуштених рударских радова. Максимални регистровани протицај износи 30 L/s (рудник „Брвеница“), док медијана вредности протицаја износи 0,7 L/s. С обзиром да за напуштене рударске радове не постоји програм мониторинга, могућа су одступања и сезонске варијације у односу на приказане протицаје.



Слика 7-24. Просторна дистрибуција количине рудничких вода (L/s) које истичу из напуштених рударских радова



**Слика 7-25.** Хистограм протицаја (L/s) рудничких вода из напуштених рударских радова обухваћених испитивањима

У односу на напуштене, максимални протицаји код активних рударских радова на простору Србије су 2-3 пута виши. Од рудника угља са подземном експлоатацијом, максимални протицаји рудничких вода везани су за рудник „Штавал“ и износе око 100 L/s (Миладиновић 2015). Рудник олова и цинка „Грот се такође одликује количинама рудничких вода близу 50-80 L/s (Јлазић и др. 2014). Просечне количине рудничких вода за подземни рудник бакра „Борска Јама“ процењене су на око 70 L/s (Fidisco 2006). Такође значајне количине киселих рудничких вода формирају се и у зонама површинских копова у оквиру борских рудника бакра. Веће количине рудничких вода везане за активне рударске радове су и очекиване с обзиром на активне мере одводњавања рудника у експлоатацији.

На основу вредности протицаја рудничких вода, напуштеним рударским радовима додељене су вредности за параметар T2 од 0,15, 0,30 и 0,50 према табели 6-4.

### **Параметар T3**

Трећи корак у процени угрожености површинских вода базиран је на реду водотока за најближе површинске токове. Иницијално, ред водотока по Штрахлеру (Strahler 1952) одређен је помоћу алатке *stream order* у оквиру *ArcHydrology Toolbox*-а. У даљој анализи извршена је провера уз корекције на бази сателитских снимка и топографских карата размере 1 : 25 000. Ред водотока је изабран као индикативан параметар за посредну процену величине протицаја најближих површинских токова.

Резултати анализе указују да близу 50 % најближих водотока припада првом реду, 35 % другом реду; а трећем реду припада нешто мање од 10 % водотока. Напуштени рударски радови налазе се у близини водотока 5 и 6 реда у само 4 анализирана случаја. Спроведена анализа указује да се већина напуштених рударских радова налази у горњим, изворишним деловима површинских токова и да су протицаји ових токова релативно скромни, уз изражене сезонске осцилације. Оваква ситуација указује да и релативно мали протицаји рудничких вода (< 1 L/s) могу у значајној мери утицати на квалитет водотока у њиховој непосредној близини.

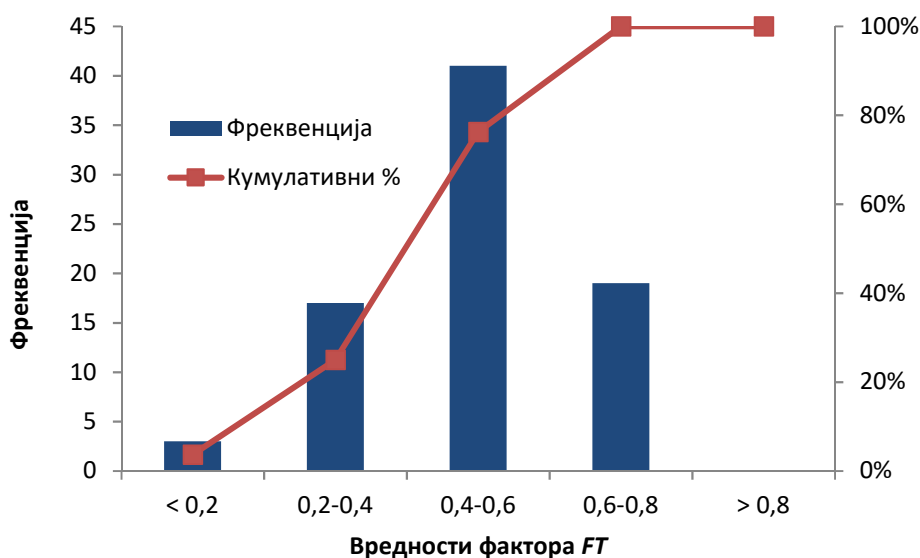
На основу резултата анализе додељене су одговарајуће вредности за параметар T3 од 1, 1,5 и 3 у зависности од реда најближег водоток, а према табели 6-4.

### **Резултати прорачуна фактора FT**

На крају, процена угрожености површинских токова извршена је интеграцијом параметара T1, T2 и T3 према једначини [6], на основу које је израчуната вредност фактора *FT* за најближе водотоке. У табели 7-12 и на слици 7-26 сумирани су резултати спроведене анализе угрожености површинских вода у зони напуштених рударских радова.

**Табела 7-12** Основни статистичке величине за параметре коришћене у анализи угрожености површинских вода

Параметар	Мин.	Макс.	Опсег	Просек	Гео. средина	Медијана
Удаљеност (m)	10	1140,2	1130,2	184,1	85,4	76,1
Протицај (L/s)	0,0	30,0	30,0	2,3	0,6	0,8
Ред водотока	1	6	5	-	-	2
<b>Фактор FT</b>	<b>0,20</b>	<b>0,80</b>	<b>0,60</b>	<b>0,50</b>	<b>0,47</b>	<b>0,45</b>

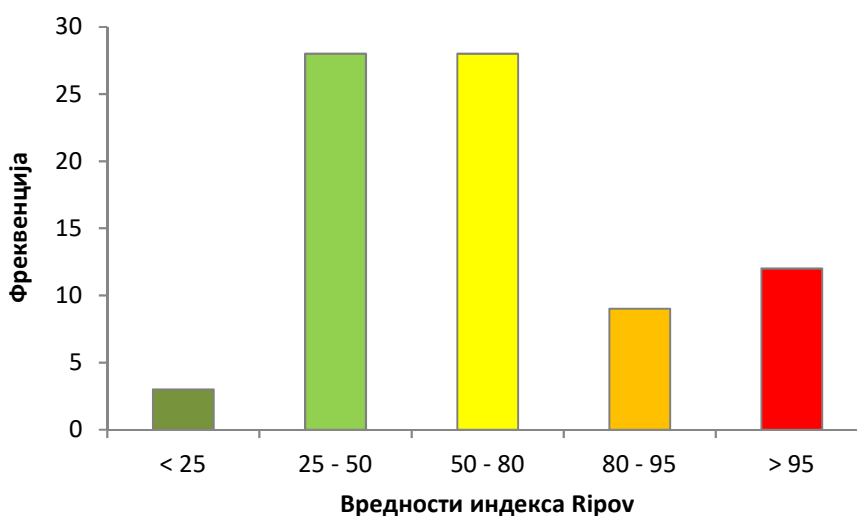


**Слика 7-26** Хистограм вредности фактора  $FT$

На основу приказаних података увиђа се да за већину површинских токова у непосредној близини напуштених рударских радова вредности фактора  $FT$  износе 0,5 и више. Резултати прорачуна указују да се око 75 % површинских токова у непосредној близини напуштених рудника могу сматрати средње до високо угроженим.

### 7.5.2.2. Резултати прорачуна индекса ризика од загађивања површинских вода ( $Ri_{пов}$ )

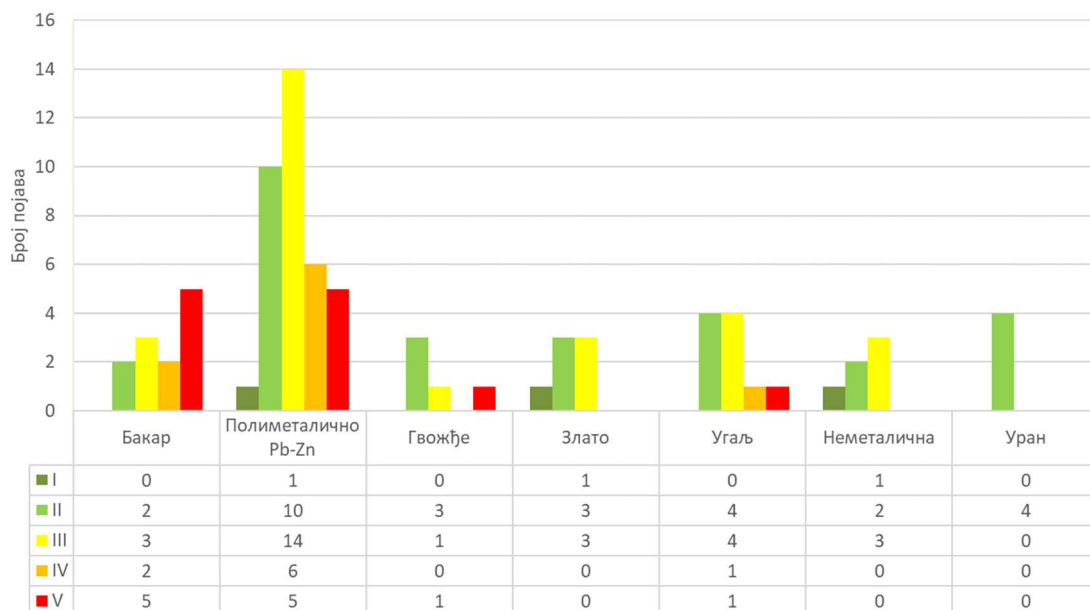
Индекс ризика од загађивања површинских вода за сваки од напуштених рударских радова одређене је као производ индекса хазарда ( $H_i$ ) и угрожености површинских вода (фактор  $FT$ ), према једначини [7]. Резултати прорачуна за сваки од испитиваних рударских радова дати су у оквиру прилога 6, а расподела вредности индекса  $Ri_{пов}$  према издвојеним класама ризика приказана је на слици 7-27.



**Слика 7-27.** Хистограм вредности индекса ризика од загађивања површинских вода за напуштене рударске радове

Међу испитиваним напуштеним рударским радовима близу 40 % припада категорији са веома ниским и ниским ризиком од загађивања површинских вода. Приближно 35 % испитиваних појава се одликује средњим степеном ризика, док је у групу са високим и веома високим ризиком сврстана 21 појава, односно 25 % од укупног броја испитиваних напуштених рударских радова. Велико процентуално учешће рударских радова у високој и веома високој категорији ризика последица је високе процењене угрожености површинских вода.

Расподела вредности индекса ризика у односу на врсту минералне сировине приказана је на слици 7-28.



**Слика 7-28.** Учешће напуштених рударских радова према категоријама ризика од загађивања површинских вода груписаних у односу на врсту минералне сировине

Готово сви напуштени рударски радови у оквиру лежишта урана, злата и неметаличних сировина сврстани су у три категорије ризика: веома ниска, ниска и средња. Овде треба напоменути да је за напуштене руднике урана могуће увођење додатних поена, с обзиром да у оквиру шеме за квантификацију хазарда није разматрана радиоактивност. Код напуштених рударских радова везаних за већину металичних сировина и угља идентификовани су напуштени радови који су сврстани у високу и веома високу категорију. Највећи број ових појава везан је за полиметалична лежишта олова и цинка, док је процентуално највише напуштених рударских радова сврстаних у високу категорију ризика везано за лежишта бабра.

Просторни распоред напуштених рударских радова класификованих у односу на припадност категорији ризика од загађивања површинских вода, заједно са потенцијално угроженим водотоцима приказани су на слици 7-29.





Највећи број појава сврстаних у високу и веома високу категорију налази се на простору Јужне Србије и у источној Србији у оквиру Тимочког магматског комплекса. На простору западне Србије, у веома високу категорију ризика сврстани су рудници „Велики Мајдан“ и „Столице“ за које је везано присуство флотацијских јаловишта. У руднику „Велики Мајдан“ је поново покренута експлоатација, али су поред активних, присутни и напуштени јамски радови. У склопу рада рудника, у задњих неколико година унапређено је и стање флотацијског јаловишта које је поново активирано.

Површински токови у чијем сливу се налазе испитивани рударски радови класификовани су као водотоци под директним утицајем напуштених радова. На овај начин издвојено је 54 водотока. Карактер утицаја, тачније да ли је ток под потенцијалним негативним утицајем, оцењен је на основу припадности напуштених радова класи ризика за површинске воде. Водотоци који су у зони директног утицаја рударских радова класификованих у средњу, високу и веома високу класу ризика, оцењени су као потенцијално угрожени. На овај начин у категорију потенцијално угрожених издвојено је 34 водотока или дела већег речног тока (слика 7-29).

Укупна дужина водотока који су под могућим утицајем напуштених радова процењена је на око 920 km. Од укупне дужине, око 410 km водотока је сврстано у категорију потенцијално угрожених од стране напуштених рударских радова.

### 7.5.3. Карактеризација укупног ризика

Након процене ризика који напуштени рударски радови представљају за површинске и подземне воде у њиховом непосредном окружењу, спроведена је карактеризација укупног ризика. У том циљу, поред природних и вештачких чинилаца који утичу на могућност загађивања површинских и подземних вода, процењен је и релативан значај ових ресурса, тачније губитак „вредности“ који може настати као последица погоршања квалитета. За те потребе, а имајући у виду регионални карактер истраживања, поред индекса ризика од загађивања

површинских ( $Ri_{пов}$ ) и подземних вода ( $Ri_{под}$ ), уведена су два критеријума: удаљеност до најближег насељеног места, мерено низводно од напуштеног рудника и удаљеност до најближег заштићеног подручја (национални парк, заштићено станиште, парк природе...).

На основу наведених фактора напуштени рударски радови су према укупном степеном ризика сврстани у четири категорије: низак (C1), средњи (C2), висок (C3) и веома висок (C4). Одређивање припадности одређеној класи ризика извршено је применом математичке теорије атрибута (Li et al. 2013). Опис поступка примене методе је приказан у поглављу 6.4., док су резултати карактеризације рударских радова на бази укупног ризика приказани у наредним поглављима.

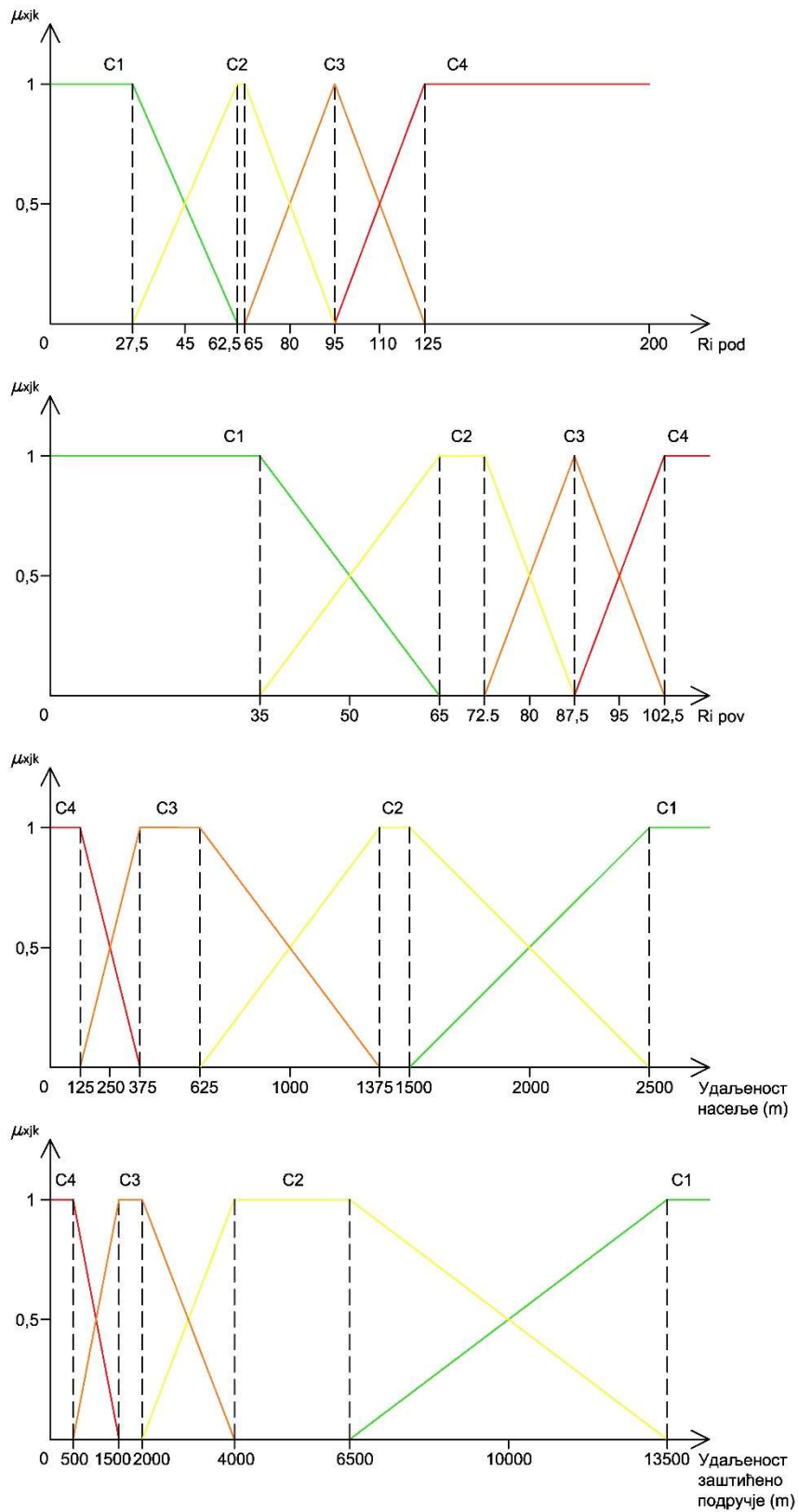
#### *7.5.3.1. Резултати процене укупног ризика*

У циљу одређивања припадности напуштених рударских радова издвојеним класама ризика примењена су три основна корака: анализа мере припадности појединачних фактора, анализа мере припадности синтезног вишеструког индекса, и на крају анализа припадности одређеној класи ризика (Li et al. 2013).

#### ***Одређивање функције припадности***

Анализа мере или степена припадности сваког од предложених фактора издвојеним класама ризика извршена је на бази одређивања функције припадности  $\mu_{xjk}$ . Најпре су израчунате вредности параметара  $b_{jk}$  и  $d_{jk}$  за сваки од фактора, на основу једначина [9] и [10]. За факторе  $Ri_{под}$  и  $Ri_{пов}$ , функције припадности одређене су применом једначина [11], [12] и [13]. С обзиром да се са повећањем удаљености рударских радова од насеља и заштићених подручја степен ризика умањује, функције припадности за ова два фактора одређене су применом једначина [14], [15] и [16].

Графичка интерпретација функција припадности издвојених фактора тј. атрибута предложеним класама ризика приказана је на слици 7-30.



Слика 7-30. Функције припадности  $\mu_{xjk}$  класама ризика (C1-C4) за сваки од издвојених фактора

Табеларни приказ резултата прорачуна мере припадности сваког од атрибута издвојеним класама ризика, за 80 испитиваних појава дати су у прилогу 7.

### Одређивање мере припадности синтезног индекса

Мера припадности синтезног индекса  $\mu_{xk}$  свакој од издвојених класа ризика израчуната је као сума производа мере припадности појединачних атрибута и припадајућих тежинских фактора, према једначини [17]. За потребе прорачуна тежинских фактора такође је примењена *AHP* метода, као и у случају одређивања тежинских фактора за прорачун индекса хазарда. С обзиром да је опис поступка примене методе приказан у поглављу 6.2.1.1., у табелама 7-13 и 7-14 приказани су главни резултати прорачуна тежинских коефицијената.

**Табела 7-13.** Матрица одлучивања са узајамним поређењем критеријума за процену ризика према значају

Критеријум	$Ri_{pod}$	$Ri_{pov}$	Удаљеност насеље	Удаљеност ЗП*
$Ri_{pod}$	1	1/2	1/2	2
$Ri_{pov}$	2	1	2	3
Удаљеност насеље	2	1/2	1	2
Удаљеност ЗП*	1/2	1/3	1/2	1
Сума колоне	5.500	2.333	4.000	8.000

\*ЗП-заштићено подручје

**Табела 7-14.** Нормализована матрица са израчунатим вредностима тежинског фактора за сваки од критеријума за процену укупног ризика ( $\lambda_{max} = 4.071$ ,  $CI = 0.024$ ,  $CR = 0.026$ )

Критеријум	$Ri_{pod}$	$Ri_{pov}$	Удаљеност т насеље	Удаљеност т ЗП*	Тежински фактор ( $w$ )
$Ri_{pod}$	0.182	0.214	0.125	0.250	<b>0.193</b>
$Ri_{pov}$	0.364	0.429	0.500	0.375	<b>0.417</b>
Удаљеност насеље	0.364	0.214	0.250	0.250	<b>0.269</b>
Удаљеност ЗП*	0.091	0.143	0.125	0.125	<b>0.121</b>

\*ЗП-заштићено подручје

Вредност коефицијента конзистенције је нижа од 0,1, што указује да је матрица за прорачун тежинских коефицијената конзистентна.

Вредности прорачунатих тежинских фактора упућују на преовлађујући значај вредности индекса од загађивања површинских вода ( $R_{i_{пов}}$ ). Разлог за наглашавање овог атрибута лежи у чињеници да је могућност транспорта загађујућих супстанци путем површинских токова веома изражена. Изливање рудничких вода у површинске токове може довести до погоршања квалитета површинских и подземних вода километрима низводно од самог места истицања.

Удаљеност до насељеног места низводно од напуштених рударских радова је издвојена као други критеријум по значају за процену укупног ризика. У конкретном случају није разматрана величина насељеног места тј. број људи, већ је усвојена начело да је право сваког човека да живи у здравом окружењу и да на располагању има воду доброг квалитета. Такође, мања насељена места сеоског типа, с обзиром да се становници ових насеља не ослањају на системе јавног водоснабдевања у мери у којој је то присутно у градским срединама, често су изложени негативним ефектима везаним за употребу воде лошег квалитета.

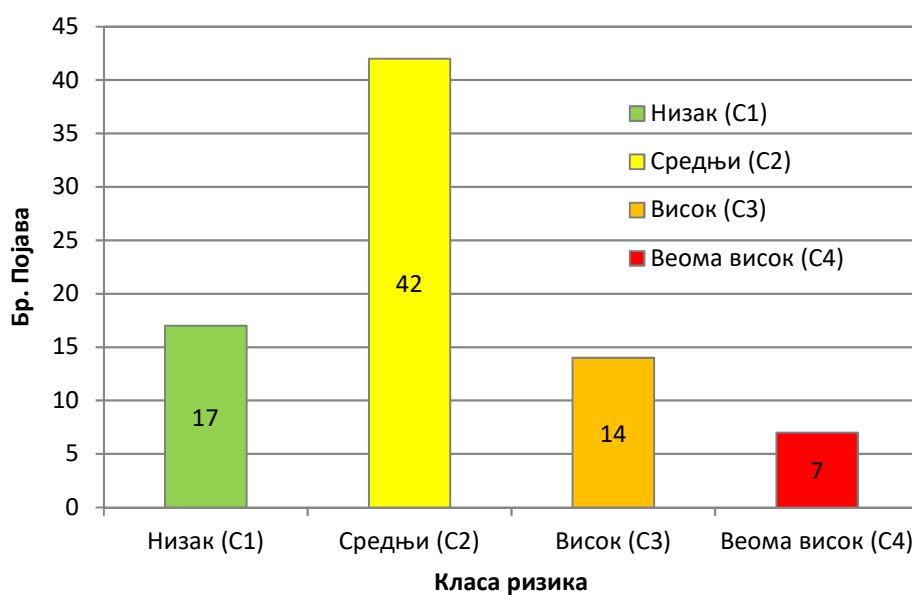
Трећи критеријум по значају је индекс ризика од загађивања подземних вода ( $R_{i_{под}}$ ), уз претпоставку да је загађење подземних вода као последица непосредног утицаја напуштених рударских радова најчешће локалног карактера. Критеријум удаљеност до заштићеног подручја је рангиран као последњи по значају у односу на преостала три критеријума.

Табеларни приказ резултата прорачуна синтезних индекса за сваку од испитиваних појава дат је у прилогу 8.

### Одређивање припадности одређеној класи ризика

Припадност одређеној класи ризика утврђена је на бази вредности синтезног индекса за сваки од критеријума и вредности коефицијента поверења  $\lambda$ . У предметним испитивањима усвојена вредност коефицијента поверења износи  $\lambda = 0,6$ .

С обзиром да се степен ризика повећава од класе С1 (низак) до класе С4 (веома висок), припадност сваког од напуштених рударских радова одређена је на бази израза [18]. На слици 7-31 приказана је расподела припадности анализираних напуштених рударских радова издвојеним класама укупног ризика, док је у прилогу 9 дат приказ резултата прорачуна.



Слика 7-31 Хистограм класа укупног ризика

У ниску класу укупног ризика сврстано је нешто више од 20 % испитиваних рударских радова, док средњој класи припада највећи број (42) или 53 %. У високу и веома високу класу укупног ризика категорисано је 27 % појава. У високу класу према укупном ризику сврстано је 14 напуштених рударских радова, од којих је два рудника угља, док су остали рударски радови у оквиру лежишта металичних

сировина (Cu и Pb-Zn). У веома високу класу сврстани су претежно напуштени рудници за која су везана флотацијска јаловишта, и поједини објекти већих размера, који се уједно налазе у близини насељених места и заштићених подручја. Од 7 напуштених рудника сврстаних у веома високу класу, у односу на врсту минералне сировине два су рудници угља, по један рудник бакара, гвожђа и антимона и два напуштена рудника олова и цинка.

Просторни распоред напуштених рударских радова класификованих на основу припадност класи укупног ризика приказан је на слици 7-32.

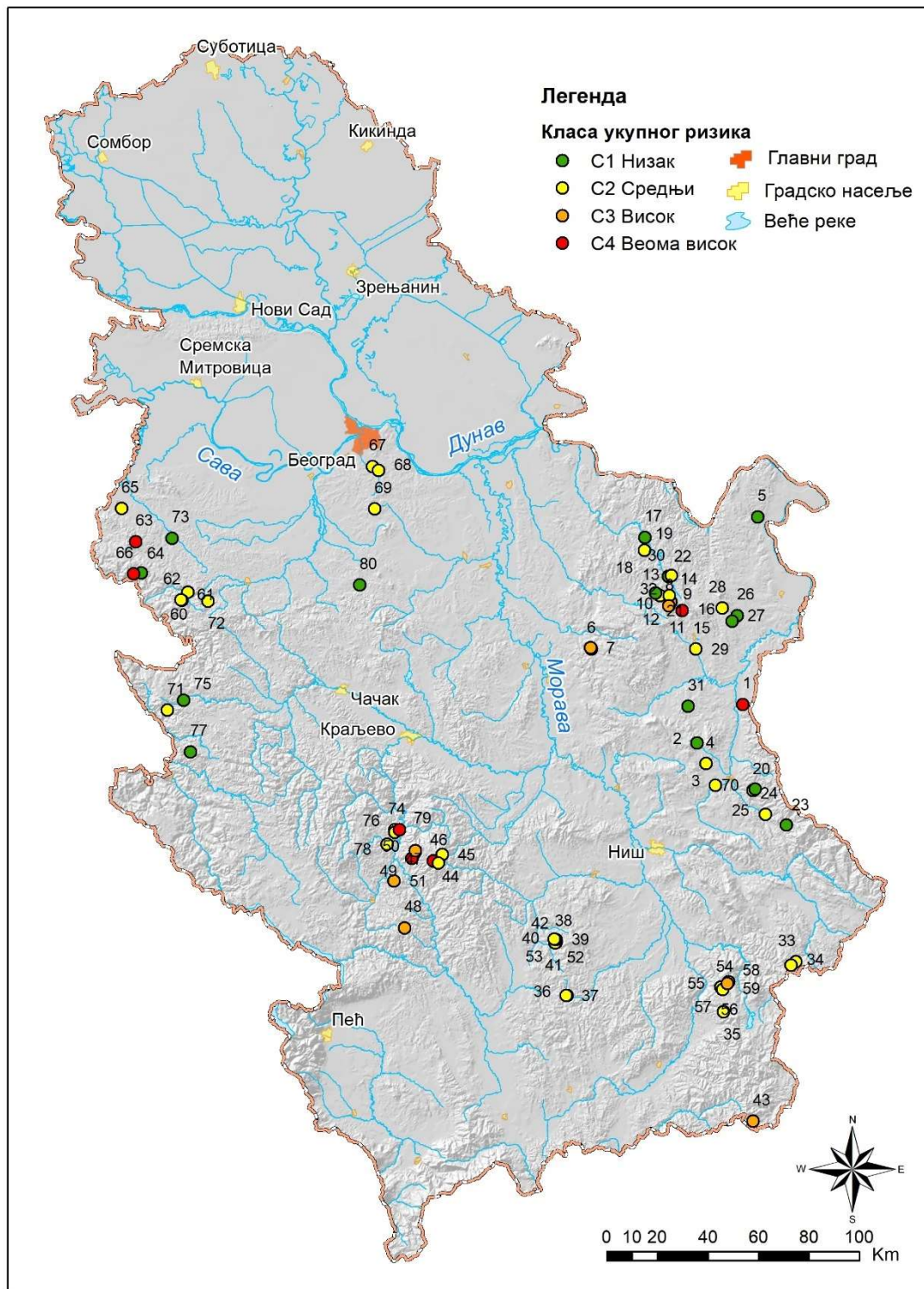
Поједини рударски радови који су груписани у високу и веома високу категорију према индексу ризика од загађивања површински и подземних вода, на основу укупног ризика сврстани су у ниже категорије, али је такође за поједине радове класа укупног ризика виша. Ове разлике су пре свега последица удаљености до насељених места. У табели 7-15 приказан је опсег вредности за удаљеност до најближег насеља низводно од рударских радова, као и удаљеност до заштићеног подручја.

**Табела 7-15** Основне статистичке величине за критеријуме удаљеност до најближег насељеног места низводно од напуштених рударских радова и удаљеност од заштићеног подручја

Параметар	Удаљеност до насељеног места (m)	Удаљеност до заштићеног подручја места (m)
Минимум	30.0	0.0
Максимум	11180.0	27500.0
Средња вредност	2182.0	7624.1
Медијана	1600.5	6350.0

Највећи број насељених места се налази на око 2 km низводно од анализираних рударских радова. Око 25 % испитиваних појава се практично налази у оквиру насељених места, тачније на растојању мањем од 500 m од насеља.





Слика 7-32 Карта напуштених рударских радова класификованих према припадности класи укупног ризика од загађивања водних ресурса

Према врсти, ова насеља су најчешће сеоског типа са малим бројем домаћинстава. Најчешћа удаљеност у односу на градска насеља је око 15 km, што указује да се напуштени рудници углавном налазе у слабо урбанизованим срединама.

Резултати анализе удаљености до заштићеног подручја указују да се 60 % појава налази на значајној удаљености (преко 5 km). Са друге стране напуштени рудници урана на Старој Планини, стари поткопи у зони Ђаволје Вароши, као и напуштени рудници гвожђа на Копаонику, налазе се у оквиру заштићених подручја.

Применом приказане методологије за карактеризацију напуштених рударских радова према степену ризика, издвојени су они за које су процењени високи изгледи да негативно утичу на водне ресурсе, и да тиме угрожавају здравље људи и зависне екосистеме. У табели 7-16 приказани су испитивани рударски радови који су сврстани у веома високу категорију према укупном ризику.

**Табела 7-16** Напуштени рударски радови сврстани у веома високу категорију (С4) према укупном ризику од загађивања водних ресурса

Редни број	Назив рудника	Y	X	Начин експлоатације	Минерална сировина
1	Свети Ђорђе	7607031	4855152	Подземно	Камени угаљ
16	Церово	7582946	4892420	Површински коп	Cu-Mo
46	Суво Рудиште	7484441	4793102	Површински коп и подземно	Fe-Cu
49	Кижевак	7475902	4794158	Површински коп	Pb-Zn
63	Столице	7366722	4919630	Подземно	Sb
66	Велики Мајдан	7365777	4906880	Подземно	Pb-Zn
79	Јарандол	7471049	4805576	Подземно	Камени угаљ

Објекти сврстани у веома високу категорију према укупном ризику представљају приоритетне локације на којима је неопходно извршити детаљна истраживања у циљу пројектовања и спровођења мера за ублажавање и спречавање даљег негативног утицаја на површинске и подземне воде.

Уз напуштене руднике највишег приоритета, објекти за које је процењен висок степен укупног ризика (прилог 9), такође представљају локације на којима је неопходно спровођење детаљних истраживања у циљу процене потенцијалних негативних ефеката на квалитет водних ресурса и животне средине. Напуштени рудници урана, иако према испитиваним параметрима хемијског састава рудничких вода не представу значајне изворе загађујућих супстанци, у погледу повишене радиоактивности представљају опасност по здравље људи и животну средину.

Средњој класи укупног ризика тј. напуштеним рударским радовима трећег приоритета припада највећи број испитиваних појава. За већину ових радова је процењено да се одликују прихватљивим степеном ризика. Ипак, посебну пажњу треба посветити напуштеним рудницима „Ресавица – Јужни поткоп“, „Бобија“ и „Мачкатица“.

Напуштени рударски радови сврстани у ниску класу одликују се занемарљивим ризиком по угрожавање водних ресурса.

Међу приоритетним локацијама делови рудника угља Ресавица и Јарандол и рудник Велики Мајдан су и даље у активној експлоатацији, док је део радова напуштен. Тренутно стање указује на велике изгледе да ће већина подземних рудника угља у саставу Ресавице и Ибарских рудника у наредних неколико година бити затворена. Са друге стране, за рудник бакра Церово, који се налази у оквиру РТБ Бор, постоје планови за поновно покретање експлоатације. Ово указује на значај правилног разумевања процеса који доводе до угрожавања квалитета животне средине у зони ових радова, како би се стечена искуства применила у процесу планског затварања рудника или смањења негативних ефеката у случају поновног покретања експлоатације.

## 7.6. Прелиминарна процена ризика од загађивања површинских и подземних вода на нивоу слива

Усвајањем Оквирне директиве о водама (WFD) почетком XXI века, у оквиру анализа утицаја на водне ресурсе, фокус је са карактеризације појединачних извора загађујућих супстанци померен на разматрање потенцијалних нежељених ефеката на нивоу сливова. Такође, интегрисано управљање водним ресурсима подразумева процену утицаја на водна тела како површинских тако и подземних вода, као и процену потенцијала за транспорт загађења низводно од самог извора загађујућих супстанци (Younger and Wolkersdorfer 2004). У том контексту, а на бази претходне категоризације напуштених рударских радова, извршена је прелиминарна процена ризика од загађивања површинских и подземних вода на нивоу речних сливова.

Ова процена базирана је на квалитативном приступу. Степен ризика на нивоу сливова процењене је на основу присуства напуштених рударских радова и њихове припадности одређеним категоријама ризика од загађивања површинских и подземних вода. Наиме, претпоставка је да уколико се у сливу налазе рударски радови сврстани у високу или веома високу категорију, постоје значајни изгледи да ће се негативне последице пренети и даље низводно дуж слива. С обзиром да је могућност миграције загађења у подземним водама нижа од могућности транспорта загађујућих супстанци површинским токовима, сливови у оквиру којих се налазе напуштени рударски радови сврстани у средњу и нижу класу према индексу  $Ri_{pod}$ , оцењени су ниским изгледима за појаву негативних последица.

Поред изгледа да дође до негативних последица, извршена је и субјективна процена озбиљности последица, тачније размере потенцијалних негативних утицаја на основу експертског мишљења.

За потребе прелиминарне процене степена ризика примењена је 3 x 3 матрица ризика (табела 7-17).

**Табела 7-17.** Матрица за прелиминарну процену ризика од загађивања на нивоу речних сливова, као последица утицаја напуштених рударских радова

Озбиљност последица	Изгледи да дође до Негативних последица	Рударски радови категорисани у средњу и нижу класу према $R_{i_{pod}}$ и веома ниску и ниску класу према $R_{i_{rov}}$ индексу	Један или више рударских радова сврстаних у средњу класу према $R_{i_{rov}}$ или високу класу према $R_{i_{pod}}$ индексу	Један или више рударских радова сврстаних у високу или веома високу класу према $R_{i_{rov}}$ , и веома високу према $R_{i_{pod}}$ индексу
		Ниски (I)	Средњи (II)	Високи (III)
Погоршање хемијског и еколошког статуса површинских и подземних вода на нивоу слива	Високе (A)	IA	IIA	IIIA
Погоршање хемијског и еколошког статуса површинских и подземних вода на нивоу подслива	Средње (B)	IB	II B	IIIB
Безначајан или веома низак утицај на хемијски и еколошки статуса површинских или подземних вода	Ниске (C)	IC	II C	IIIC

Интеграцијом изгледа да дође до негативних последица и процењене озбиљности последица, извршена је категоризација сливова у три класе према степену ризика (табела 7-18)

**Табела 7-18** Класификација ризика од загађивања водних ресурса на нивоу слива

Степен ризика	Класа ризика	Ознака
Низак	IB, IC, II C	
Средњи	IA, II B, IIIC	
Висок	IIA, IIIB, IIIC	

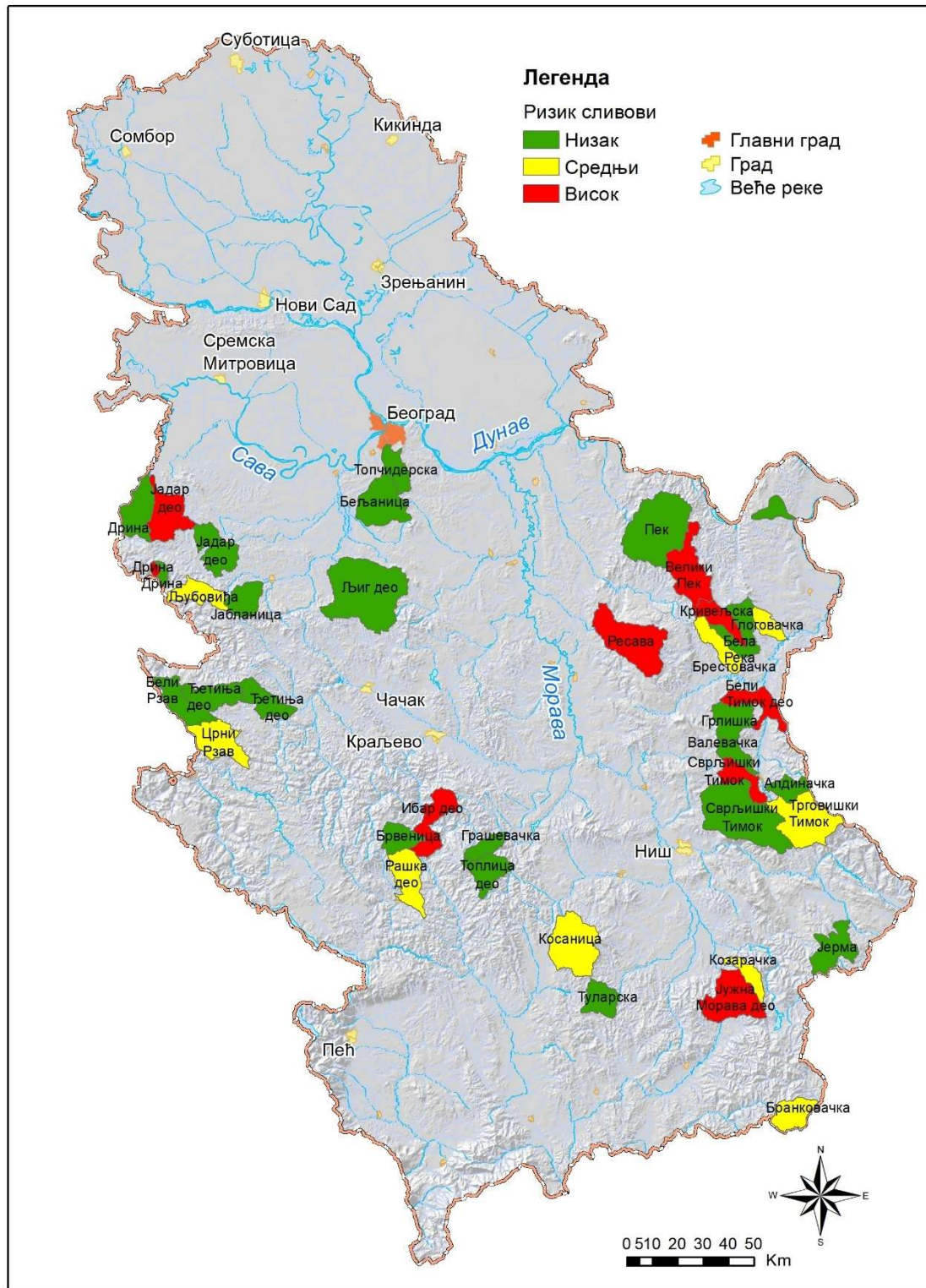
Резултати прелиминарне процене ризика у виду просторног распореда сливова класификованих према степену ризика од загађивања површинских и подземних вода под утицајем напуштених рударских радова приказани су на слици 7-33.

Резултати спроведене анализе указују да се релативно мали број сливова или делова сливова већих водотока сврстава у групу са високим ризиком по загађивање површинских и подземних вода. У категорију високог ризика сврстани су следећи сливови:

- Део слива реке Јадар (Коренита)
- Дрина (део код Великог Мајдана)
- Ресава део (Ресавица)
- Бели Тимок (део)
- Сврљишки Тимок (Винска река)
- Велики Пек
- Ибар (део)
- Јужна Морава (део)

За наведене сливове постоје велики изгледи да су површинске и подземне воде оптерећене присуством метала и сулфата изван природних граница, а као последица утицаја напуштених рударских радова. Сливови сврстани у средњу категорију ризика су вероватно под утицајем у локалним размерама, док за сливове сврстане у ниску категорију ризика постоје мали изгледи за погоршање квалитета водних ресурса. За сливове који нису категорисани тренутно не постоје подаци о присуству и потенцијалном утицају напуштених рударских радова.

На приказан начин спроведена категоризација може представљати основу за даље управљање водним ресурсима и планирање стратегија и планова за детаљна истраживања. Даља истраживања су неопходна у циљу пројектовања и спровођења мере за ублажавање негативног утицаја издвојених напуштених рударских радова на еколошке и хемијске карактеристике површинских и подземних вода, како у непосредној зони тако и низводно од самих радова.



Слика 7-33. Карта са прелиминарном проценом ризика од загађивања водних ресурса на нивоу речних сливова

## **8. ВЕРИФИКАЦИЈА ПРИМЕНЕ ПРЕДЛОЖЕНЕ МЕТОДОЛОГИЈЕ ЗА ПРОЦЕНУ РИЗИКА И ДИСКУСИЈА РЕЗУЛТАТА**

У склопу примене предложене методологије, карактеризација напуштених рударских радова на бази ризика од загађивања водних ресурса извршена је интеграцијом следећих параметара: индекса хазарда, рањивости подземних вода, угрожености површинских вода, као и удаљености до насеља низводно од напуштених рударских радова и удаљености од заштићеног подручја. На крају је, на бази карактеризације напуштених рударских радова, извршено издвајање потенцијално угрожених сливова. У циљу оцене адекватности примењене методе за процену ризика и добијених резултата извршена је њена верификација.

Верификација добијених резултата извршена је првенствено на основу података о физичко-хемијским карактеристикама површинских токова, прикупљених у оквиру пројекта процене утицаја отпадних рудничких вода на животну средину на простору Србије (РГФ 2009-2011). Поред ових, у мањој мери коришћени су и подаци других истраживања. Тако су првенствено за верификацију процењеног ризика од загађивања подземних вода, с обзиром да постоји знатно мање података, коришћене расположиве информације углавном добијене прикупљеним и прегледом фондовске и публиковане литературе.

### **8.1. Оцена квалитета површинских вода у зони напуштених рударских радова**

Скуп хидрохемијских података који је коришћен за сагледавање квалитета површинских вода садржи 48 анализа са 38 параметара физичко-хемијског састава површинских вода, од којих је услове за примену у статистичкој анализи задовољило 24 параметра. Анализом је обухваћено 35 површинских токова у које се уливају и/или процеђују рудничке воде из напуштених рударских радова. Од испитиваних површинских токова, на њих 6 вршена су испитивања физичко-хемијских карактеристика узводно и низводно од напуштених рударских радова, као би се директно проценио утицај који ови радови имају на квалитет водотока.



Основни статистички показатељи за анализиране површинске токове, који су обухватили узорке узводно и низводно од испитиваних радова приказани су у табели 8-1.

**Табела 8-1.** Табела са основним статистичким величинама за физичко-хемијске параметре површинских вода (концентрације изражене у mg/L)

Параметар	Просек	Гео. средина	Медијана	Мин.	Макс.	Опсег	Стан. дев.	N
T	13.7	13.2	13.8	8.0	20.2	12.2	3.6	44
pH	6.9	6.8	7.3	3.0	8.0	5.1	1.2	48
Ер (μS/cm)	745.7	543.1	520.0	110.0	3750	3640	688.4	47
Мин.	685.7	502.7	450.0	100.0	2800	2700	593.8	42
Суви ост.	583.5	423.7	360.0	75.0	2220	2145	509.5	43
Тврдоћа dH	21.5	14.8	14.3	2.9	101.4	98.5	21.3	43
KMnO <sub>4</sub>	11.8	8.1	7.9	1.7	117.0	115.3	17.2	44
Ca	106.4	75.2	72.1	13.1	422.0	408.9	95.2	48
Mg	28.4	16.4	15.5	2.5	180.6	178.1	35.7	48
Na	22.4	9.0	9.0	1.8	248.5	246.7	50.0	48
K	2.7	2.0	1.8	0.8	11.4	10.6	2.5	48
HCO <sub>3</sub>	159.5	68.1	153.0	0.1	585.0	584.9	130.2	47
Cl	10.1	7.3	7.0	0.8	45.2	44.5	8.9	46
SO <sub>4</sub>	274.0	120.6	113.0	6.0	1650	1644	388.2	48
NO <sub>3</sub>	2.3		2.0	0.0	15.8	15.8	2.4	48
P	0.04	0.02	0.02	0.01	0.40	0.40	0.07	43
Si	21.81	18.24	17.75	6.80	56.50	49.70	13.56	44
Fe	3.478	0.586	0.505	0.003	36.00	35.99	7.113	48
Mn	1.269	0.138	0.134	0.001	37.50	37.49	5.412	48
Sr	0.660	0.337	0.280	0.015	5.470	5.455	0.982	41
Li	0.039	0.020	0.018	0.004	0.370	0.366	0.066	41
Zn	2.298	0.028	0.020	0.001	92.0	91.99	14.01	43
Cu	0.409	0.013	0.002	0.001	5.00	4.99	1.139	47
As	0.097	0.005	0.005	0.000	3.20	3.20	0.469	47

На основу приказаних података анализиране површинске воде су мало-минерализоване, неутралне до слабо киселе, са благо повишеним садржајем метала. Максималне вредности испитиваних параметара указују на значајна одступања од просечних вредности код појединих површинских токова.

Директан утицај на квалитет површинских вода испитиван је у шест случајева. Основни статистички показатеља за групе узорака узводно и низводно од напуштених радова приказани су у табели 8-2.

**Табела 8-2.** Упоредна табела са основним статистичким величинама за физичко-хемијске параметре површинских вода у mg/L, груписаним у односу на локацију узорковања

Параметар		Просек	Медијана	Гео. Средина	Стан. дев.	Мин.	Макс.	N
pH	↑	7.35	7.45	7.34	0.432	6.70	7.80	6
	↓	6.43	7.05	6.26	1.464	3.70	7.50	6
E <sub>p</sub> μS/cm	↑	387.0	360.0	321.6	277.3	160.0	850.0	5
	↓	1133.7	600.0	764.0	1307.8	272.0	3750.0	6
Суви остат.	↑	363.6	260.0	304.0	238.2	120.0	730.0	5
	↓	736.0	490.0	573.5	544.5	360.0	1650.0	5
HCO <sub>3</sub>	↑	204.6	205.1	153.2	112.8	18.3	370.2	6
	↓	185.8	202.0	125.3	127.8	14.7	366.0	5
SO <sub>4</sub>	↑	112.1	65.7	69.9	138.2	26.9	388.2	6
	↓	403.5	196.0	197.0	614.6	34.2	1650.0	6
Fe	↑	0.258	0.040	0.050	0.384	0.003	0.916	6
	↓	11.47	6.19	3.66	14.22	0.42	36.00	6
Zn	↑	0.010	0.012	0.007	0.007	0.001	0.019	5
	↓	0.165	0.030	0.048	0.207	0.003	0.450	5
Cu	↑	0.0231	0.0015	0.0026	0.0533	0.0008	0.1318	6
	↓	1.553	0.158	0.054	2.308	0.001	5.000	6
As	↑	0.0420	0.0034	0.0038	0.0951	0.0005	0.2360	6
	↓	0.0102	0.0043	0.0027	0.0169	0.0003	0.0440	6

↑ - локација узорковања узводно; ↓ - локација узорковања низводно

Упоређивањем средњих вредности физичко-хемијских параметара изражених преко геометријске средине, утврђене су разлике у вредностима pH индекса, садржају хидрокарбоната и сулфата, као и метала (Fe, Mn, Zn и Cu). Према електропроводљивости и сувом остатку, може се констатовати да испитивани површински токови већински спадају у групу маломинерализованих вода. Са друге стране идентификовано су водотоци са вредностима електропроводљивости од преко 3000 μS/cm, и сувим остатком од 1650 mg/L, у делу тока низводно од

напуштених рударских радова. Према геометријској средини вредности индекса рН, површинске воде узводно од напуштених рудника спадају у групу неутралних, док су делови тока низводно од мешања са рудничким водама благо кисели. Вредности геометријске средине за концентрације гвожђа, мангана, цинка и бакра низводно су за ред величина веће у односу на вредности узводно од напуштених рудника.

Истраживањима директног утицаја на примеру 6 водотока, утврђено је погоршање квалитета површинских вода искључиво као последица утицаја напуштених рударских радова. На основу садржаја испитиваних параметара утврђено је повећање концентрације метала и сулфата изнад природних вредности карактеристичних за испитивана подручја.

## 8.2. Верификација резултата процене ризика

У циљу верификације процењеног степена ризика спроведено је упоређивање категорије ризика за напуштене рударске радове, са квалитетом површинских и подземних вода у непосредној зони и низводно од напуштених радова, процењеног на основу важећих правилника.

### 8.2.1. Површинске воде

Сумарни приказ података о квалитету површинских токова који су ушли у анализу индекса  $Ri_{пов}$ , у које истичу рудничке воде, заједно са прорачунатим вредностима индекса хазрда (НС), и индекса ризика  $Ri_{под}$  и  $Ri_{пов}$  дати су у табели 8-3.

Граничне вредност садржаја испитиваних параметара у површинским водама преузете су из *Уредбе о граничним вредностима загађујућих материја у површинским и подземним водама и седименту и роковима за њихово достизање* (“Сл. гласник РС”, бр. 50/2012) и *Уредбе о граничним вредностима приоритетних и приоритетних хазардних супстанци које загађују површинске воде и роковима за њихово достизање* (“Сл. гласник РС”, бр. 24/2014).

**Табела 8-3.** Упоредни приказ индекса хазарда, и индекса ризика за површинске и подземне воде, у односу на квалитет водотока

Површински ток (река/поток)	Параметри изнад МДК*	РБ рудника	НС	Ripod	Ripov
Бинска Река	Ер, М, Fe, Mn	4	120.6	31.8	<b>64.31</b>
Река Липа	pH, SO <sub>4</sub> , Fe, Mn, Zn, Cu	10	178.5	47.1	<b>95.17</b>
Церова река	Ер, SO <sub>4</sub> , Fe, Mn, Cu	16	188.1	49.7	<b>125.40</b>
Брестовачка река	SO <sub>4</sub>	29	124.4	23.9	<b>53.91</b>
Поток Чока Марин	SO <sub>4</sub> , Mn	30	124.4	23.9	<b>55.98</b>
Вучиделска река	As	33	81.0	18.1	<b>43.20</b>
Козарнички поток		34	81.0	65.6	<b>64.80</b>
Река Гараваница	Fe, Mn	35	128.3	30.8	<b>85.50</b>
Поток испод поткопа	pH, SO <sub>4</sub> , Fe, Mn, Cu, Pb	36	124.4	29.9	<b>53.91</b>
Туларска река	Ер, М, SO <sub>4</sub> , Fe, Mn	36	124.4	29.9	<b>53.91</b>
Ђавоља река	pH, Ер, М, SO <sub>4</sub> , Fe, Mn, Cu	39	149.5	35.9	<b>64.78</b>
Каравансалијска	pH, Fe, Cu, Pb	48	118.8	39.9	<b>95.04</b>
Радошићка река	As	49	240.2	57.6	<b>156.10</b>
Ораховски поток	pH, Ер, М, SO <sub>4</sub> , Mn, As	51	124.4	29.9	<b>99.52</b>
Бањска река	pH, Ер, SO <sub>4</sub> , Fe, Mn	52	124.4	29.9	<b>55.98</b>
Бањска река испод свих поткопа	pH, Ер, SO <sub>4</sub> , Fe, Mn	53	124.4	29.9	<b>80.86</b>
Црвени Брег- Горуњски поток	pH	55	99.3	23.8	<b>64.55</b>
Црвени Брег- Хајдучки поток		57	99.3	23.8	<b>44.69</b>
Рупље, Мала река		59	124.4	29.9	<b>80.86</b>
Рајновачки поток	SO <sub>4</sub> , Fe	61	182.5	54.8	<b>82.13</b>
Столице, река испод рудника	Ер, М, SO <sub>4</sub> , Fe, Mn, Cu, As, Ni, Sb	63	245.2	176.5	<b>110.33</b>
Велики Мајдан, река испод поткопа	Ер, SO <sub>4</sub> , Fe, Mn, Zn, Cu, Pb, As	66	220.1	61.6	<b>176.06</b>
Топчидерска река	SO <sub>4</sub> , Mn, As	68	143.9	48.4	<b>57.56</b>
Мала река испод поткопа		72	99.3	80.4	<b>44.69</b>
Река Равнајица	Ер, М, SO <sub>4</sub> , Mn	73	113.2	50.9	<b>50.94</b>
Река Букуља		80	99.3	33.4	<b>29.79</b>

\* Сл. гласник РС, бр. 50/2012; Сл. гласник РС, бр. 24/2014

За потребе валидације коришћене су граничне вредности из наведених уредби за оне параметре који су обухваћени испитивањима, а који најчешће представљају загађујуће супстанце везане за напуштене рударске радове. Верификацијом процењеног ризика од загађивања површинских вода обухваћено је нешто више од 30 % напуштених рударских радова.

У табели 8-3, за сваки од испитиваних водотока издвојени су параметри чији садржај у површинским водама прекорачује максимално дозвољене концентрације (МДК) за класу II водотока, која одговара добром еколошком статусу. Од 26 водотока који се налазе у непосредној близини напуштених рударских радова, за њих 5 нису утврђене концентрације испитиваних параметара изнад МДК, док је за већину водотока утврђено да не испуњавају стандарде квалитета за другу класу.

Међу 26 напуштених рударских радова који су издвојени као објекти који потенцијално утичу на испитиване површинске токове, применом предложене методологије седам је сврстано у веома високу, 4 у високу класу, 11 напуштених рударских радова сврстано је у средњу класу, док је само 4 сврстано у ниску и веома ниску класу према индексу  $Ri_{пов}$ .

За површинске токове у зони утицаја рударских радова сврстаних у веома високу категорију ризика констатовано је значајно нарушавање квалитета, и одступање од граничних вредности већег броја параметара хемијског састава. За површинске токове у близини напуштених радова сврстаних у високу класу, такође је потврђен негативни утицај на квалитет водотока, изузев у једном случају. Код рудника сврстаних у средњу категорију ризика забележена су одступања у квалитету површинских вода за већину појава. Површински токови, у зони радова сврстаних у ниску и веома ниску категорију, испуњавају захтеве за II класу према испитиваним параметрима. Потенцијални изузетак може представљати случају Вучиделске реке где је забележено незнатно прекорачење МДК за арсен од 0,001 mg/L, али је оно у граници грешке примењене методе.

Верификацијом добијених резултата утврђено је значајно поклапање између процењеног ризика од загађивања површинских вода и квалитета потенцијално угрожених површинских токова. За рударске радове сврстане у веома високу класу у свим испитиваним случајевима потврђено је погоршање квалитета најближих површинских токова.

### 8.2.2. Подземне воде

За верификацију процењеног ризика од загађивања подземних вода на располагању је било значајно мање података о њиховом квалитету у односу на површинске токове. У табели 8-4 приказани су подаци на основу којих је извршена верификација резултата процене ризика од загађивања за подземне воде.

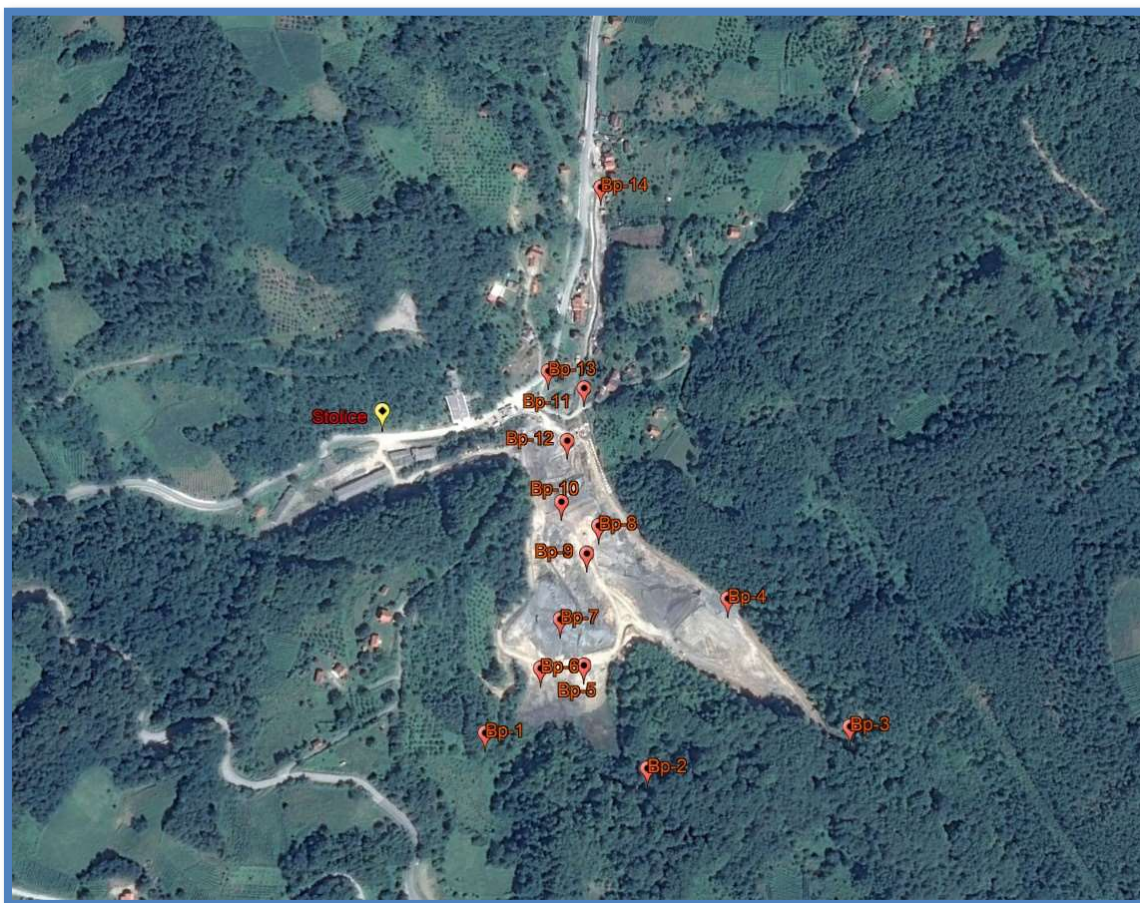
**Табела 8-4.** Упоредни приказ квалитета подземних вода и процењеног степена ризика израженог преко индекса  $Ri_{pod}$

Рудник	$Ri_{pod}$	Хидрогеолошка појава/објекат	Параметри изнад МДК за пиће (Сл. лист СРЈ, бр. 42/98 и 44/99)	Извор података
Јарандол	166,3	Бунар I	Ер, SO <sub>4</sub> , Са, Mg	Миладиновић, 2015
Столице	176,5	Вр-2	Ер, SO <sub>4</sub> , Са, Sb, Fe, Mn, As	ИЈЧ, 20156
		Вр-6	Ер, SO <sub>4</sub> , Са, Mg, Sb, Fe, Mn, Pb, Ni As	
		Вр-14	Са, Sb, As	
Церово	49,7	Бунар В-5	SO <sub>4</sub>	РГФ 2001
Шупља Стена	48,4	Извор	Ер	
Црвени Брег	31,5	Извор	Ер	
Чока Марин	31,5	Извор (Велика Лескова)	/	РГФ 2011

У односу на процењени степен ризика, напуштени рудник антимона „Столице“ и рудник мрког угља „Јарандол“ сврстани су у високу и веома високу класу.

У случају напуштеног рудника „Столице“, након пуцања бране и изливања флотацијске јаловине у пролеће 2014., констатовано је значајно погоршање

квалитета површинских и подземних вода у целом сливу реке Корените. Након овог акцидента, у сарадњи УНДП-а и Института за водопривреду „Јарослав Черни“ (ИЈЧ) реализован је пројекат заштите и реконструкције јаловишта у близини рудника. У склопу пројекта изведено је 14 пијезометара, дубине између 7 m и 25 m, од којих су три лоцирана у залеђу, осам у самој зони и три пијезометра низводно од флотацијског јаловишта (слика 8-1).



**Слика 8-1.** Сателитски снимак (*GoogleEarth*) флотацијског јаловишта рудника антимона „Столице“ са распоредом пијезометара

Испитивање хемијског састава подземних вода од стране лабораторије ИЈЦ-а извршено је у више наврата крајем 2015. и почетком 2016. године. Овим испитивањима утврђене су повишене концентрације сулфата (до 1500 mg/L) и екстремне концентрације антимона, цинка и арсена. Максималне концентрације антимона у подземним водама забележене у зони јаловишта износе 10520  $\mu\text{g/L}$ ,

цинка 2581  $\mu\text{g/L}$ , а за арсен достижу вредности до 28590  $\mu\text{g/L}$  (ИЈЧ 2015б). Узорковањем подземних вода на пијезометрима Вр-11, Вр-13 и Вр-14, који каптирају кречњаке низводно од јаловишта, констатоване су повишене вредности електропроводљивости, као и концентрације сулфата, калцијума, гвожђа, мангана, олова и арсена, изнад МДК према правилнику о хигијенској исправности воде за пиће ("Сл. лист СРЈ", бр. 42/98 и 44/99). Спроведеним истраживањима констатована је значајно погоршање квалитета подземних вода у целокупној зони око напуштеног рудника и јаловишта. Овакви резултати су у сагласности са веома високим степеном ризика од загађивања подземних вода процењених за овај рудник.

Испитивањем подземних вода из бунара у подручју рудника „Јарандол“ констатовано је погоршање квалитета алувијалне издани реке Ибар у зони рударских радова. Вредности изнад МДК за воду за пиће утврђене су за електропроводљивост, сулфате, калцијум и магнезијум (Миладиновић 2015). Постојећим подацима потврђено је погоршање квалитета подземних вода у зони напуштених рудника сврстаних у високу и веома високу класу ризика.

Од напуштених рудника сврстаних у средњу класу ризика, подаци за верификацију доступни су за рудник Церово. У близини копа налази се бунар у ком су забележене концентрације сулфата изнад МДК за пиће (РГФ 2001).

У циљу испитивања утицаја напуштених рудника олово-цинка и живе на Авали, извршено је узорковање подземних вода са извора у непосредној близини рударских радова. Испитивањем хемијског састава подземних вода у близини старог рудника живе „Шупља Стена“, сврстаног у средњу класу ризика, одступања од МДК утврђена су за електропроводљивост. Код извора у близини школског рудника „Цевни Брег“, такође су забележене вредности овог параметра изнад граница дозвољених за воду за пиће. Уз електропроводљивост, у овом случају констатоване су и повишене концентрације хлорида и натријума, што посредно указује на могући утицај посипања соли, с обзиром да се извор налази у близини саобраћајница и да је узорковање вршено у зимском периоду. Спроведеним



испитивањима делимично је потврђен процењени степен ризика. У случају рудника „Шупља Стена“, за очекивати је да постоји израженији негативни утицај на подземне воде, с обзиром да су код извора коришћеног за верификацију забележена блага одступања од МДК, иако дренира супротну (јужну) страну потока у односу на рудник.

Испитивањем квалитета подземних вода на извору у близини напуштених рудника „Чока Марин“ сврстаног у ниску класу ризика; нису детектована прекорачења у МДК за испитиване параметре.

За јасно издвајање и квантификацију утицаја на подземне воде неопходна су наменска детаљна истраживања и режимска осматрања. Посебан изазов представљају подземне воде у зони распрострањења хидротермално измењених вулканских стена, у оквиру којих се у деловима издани изнад локалног ерозионог базиса процеси оксидације сулфида могу одвијати и у природним условима.

Поред непосредног утицаја, до погоршања квалитета подземних вода може доћи и на значајним удаљеностима од напуштених рудника, кроз процес инфилтрације површинских вода са повишеним садржајем загађујућих супстанци у издан.

### 8.2.3. Процена ризика на нивоу слива

Анализом ризика од загађивања површинских и подземних вода, под утицајем напуштених рударских радова идентификовано је 34 водотока или дела већег водотока, у укупној дужини од 410 km. Слична дужина водотока (432 km) документована је у Шкотској, али искључиво за површинске воде под утицајем напуштених рудника угља (ЕА 2008), док је на простору САД процењено да је истицањем киселих рудничких вода угрожено 20000 km водотока (Димитријевић и Милић 2017).

На основу протицаја и хемијског састава рудничких вода процењен је принос метала и металоида из напуштених рударских радова у површинске токове. Спроведеним истраживањима процењено је да се на основу концентрисаног истицања рудничких вода, у животну средину на годишњем нивоу уносе следеће количине метала: гвожђа – 168 t/год; мангана – 7 t/год; цинка – 7,7 t/год; бакра – 4,6 t/год; арсена – 0,16 t/год; никла – 0,89 t/год и олова – 0,15 t/год. Укупне количине метала и металоида су вероватно веће, с обзиром да истраживањима нису обухваћени сви напуштени рударски радови, као и да су изнете процене базиране искључиво на количинама рудничких вода које концентрисано истичу из напуштених радова. Истицање рудничких вода из јаловишта није укључено у прорачун.

Уз површинске токове, истраживањима је идентификовано 12 водних тела подземних вода потенцијално угрожених директним утицајем напуштених рударских радова. С обзиром на хетероген састав и на знатну величину издвојених водних тела, значајни утицај може се очекивати само на уском простору у самој зони напуштених радова. Такође, изгледи за негативан утицај постоје и низводно у сливу, где се може очекивати погоршање квалитета подземних вода као последица посредног утицаја загађених површинских токова.

У датим условима извршена је квалитативна прелиминарна процена ризика од загађивања површинских и подземних вода на нивоу слива. Примењеним поступком издвојено је 8 сливова или делова сливова већих водотока, који су окарактерисани високим степеном ризика. Сличним истраживањима на простору Енглеске и Велса идентификовано је 226 сливова угрожених утицајем рудничких вода из напуштених рудника металичних сировина (ЕА 2012). Значајна разлика у броју издвојених сливова је очекивана с обзиром на број напуштених рударских радова на простору Велике Британије, који се процењује на близу 100000 (ISRM 2008).

У циљу верификације резултата процене степена ризика у оквиру издвојених сливова, коришћени су подаци наменских испитивања површинских вода у сливу

Пека, као и резултати испитивања квалитета површинских вода од стране Агенције за заштиту животне средине. Подаци мониторинга физичко-хемијског састава површинских вода доступни су за око 90 станица на простору Србије. У односу на локације напуштених рударских радова и потенцијално угрожене сливове, као репрезентативне за верификацију резултата оцењене су само 4 станице (Нересница, Подвис, Ребељ и Куршумлија\_1) из званичне мреже станица.

У табели 8-5 дат је упоредни приказ параметара који су изван МДК за класу II водотока, статус водног тела површинских вода, назив слива, припадајући напуштени рударски радови и процењени степен ризика.

Слив реке Пек, уз слив Тимока укључујући и мање водотоке и под сливове, представљају речне токове који су под највећим утицајем од стране рударских активности.

Слив Великог Пека се убраја у просторе који су значајно оптерећени напуштеним рударским радовима. На основу категорије ризика за идентификоване појаве, за слив Великог Пека процењен је висок степен ризика. У оквиру овог слива налази се река Липа, која је издвојена као један од најизраженијих примера негативног утицаја ових радова на квалитет површинских токова на простору Србије. Испитивањима хемијског састава реке Липе пре спајања са Божином реком, као и Великог Пека у зони села Јасиково, утврђене су концентracије параметара индикативних за *AMD* процесе ( $SO_4$ , Fe, Mn, Cu) изнад МДК за класу II водотока. На овај начин потврђена је процена високог степена ризика за слив Великог Пека. Испитивањем хемијског састава Малог Пека и реке Пек након спајања, утврђено је додатно погоршање квалитета Пека под утицајем активних површинских копова у зони Мајданпека.

У горњем делу слива реке Пек, после спајања Великог и Малог Пека, идентификовани су напуштени рударски радови у оквиру лежишта злата. На основу њих, за разматрани део слива процењен је низак степен ризика. Са друге стране, испитивањем хемијског састава утврђене су повишене концентracије

гвожђа, мангана, сулфата, као и минерализације, што указује на кумулативни негативан утицај напуштених рударских радова у сливу Великог Пека и активних рудника бакра у сливу Малог Пека.

**Табела 8-5.** Квалитет површинских вода у односу на процењени ризик од загађивања на нивоу сливова

Слив	Напуштени рударски радови	Параметри изнад МДК*	Еколошки Статус**	Степен Ризика	Извор података
Липа	Липа, Купиново, Чока Куруга, Думитри Поток	SO <sub>4</sub> , Fe, Mn, Cu, Pb	Није одређен	Висок	РГФ (2009-2011)
Велики Пек	Липа, Купиново, Чока Куруга, Думитри Поток, Ваља Сака и Чока Марин	SO <sub>4</sub> , Fe, Mn, Cu	Није одређен	Висок	РГФ (2009-2011)
Пек	Липа, Купиново, Чока Куруга, Думитри Поток, Ваља Сака, и Чока Марин	Ер, М, SO <sub>4</sub> , Fe, Mn	Није одређен	Висок	РГФ (2009-2011)
Пек	Грабова Река и Света Барбара	SO <sub>4</sub> , Fe, Mn	Умерен	Низак	АЗЖС (2014)
Сврљишки Тимок	Подвис	рН	Лош	Низак	АЗЖС (2014)
Јабланица	Ребељ	рН	Умерен	Средњи	АЗЖС (2014)
Косаница	Ђавоља варош 1, 2, 4 бушотина Б-1, Бањска Река – 1 и Бањска Река - 2	Mn, As	Умерен	Средњи	АЗЖС (2014)

\* Сл. гласник РС, бр. 24/2014 и Сл. гласник РС, бр. 50/12

\*\*На основу документа АЗЖС (2013)

У склопу припремних радова на повећању експлоатације на површинском копу „Јужни ревер“ у оквиру рудника бакра Мајданпек, почевши од 2014. године врши се непрекидно испумпавање рудничких вода из језера формираног на дну копа. Испуштање рудничких вода у реку Мали Пек без претходног третмана, довело је до погоршања квалитета воде у реци у већем делу тока. Инфилтрацијом речних вода у алувијалну издан дошло је до угрожавања изворишта „Млака“ које се користи за водоснабдевање Кучева. Током 2017. године вршено је испитивање концентracије сулфата у реци и у подземним водама. Том приликом констатоване су концентracије од 716 mg/L у реци након спајања Великог и Малог Пека, а у делу тока у зони изворишта, које се налази 30-ак километара низводно, регистроване су концентracије од 473 mg/L. У подземним водама из алувијалне издани изворишта констатоване су концентracије од 460 mg/L у збирној води, док је у бунару В-1 утврђена концентracија сулфата од 513 mg/L, што указује да су садржају у реци били и већи од измерених. Ове вредности су изнад МДК за воду за пиће, чиме је угрожено водоснабдевање читавог града и даље функционисање изворишта.

Разлике у процењеном степену ризика и еколошком статусу Пека у средњем делу тока, указују на потребу спровођења детаљних истраживања у циљу квантификације утицаја различитих група загађивача, у овом случају активних и напуштених рудника. С обзиром да је за део слива под утицајем напуштених рудника злата процењен низак степен ризика, овакав податак може бити од користи приликом лоцирања извора загађујућих супстанци, у ситуацијама када је дошло до загађења.

Испитивањем површинских вода Сврљишког Тимока у зони напуштеног рудника угља Подвис утврђене су концентracије метала и сулфата у границама МДК за класу II. Одступања су забележена у индекса рН, за који су утврђене вредности изнад 8,5, које нису последица утицаја рудника. Овакви резултати потврђују процењен низак степен ризика, иако је према осталим параметрима део тока до спајања са Трговишким Тимоком оцењен лошим статусом, вероватно као последица урбанизације.

Сливови река Јабланица и Косаница сврстани су у средњу класу ризика, и за њих је констатован умерен еколошки статус, док се од параметара индикативних за утицај рударских радова изнад МДК за другу класу налазе рН, Мп и Аs. Израженији негативни утицај констатован је за реку Косаницу, као последица кумулативног утицаја више напуштених рударских радова у локалности Ђавоља Варош и Бањска Река.

### 8.3. Критички осврт на примењену методологију и добијене резултате

Категоризација напуштених рударских радова према степену ризика од загађивања површинских и подземних вода изведена је на регионалној размери. За потребе категоризације развијена је параметарска метода која се базира на интеграцији карактеристика напуштених рударских радова и природних одлика потенцијално угрожених површинских и подземних вода. Приликом одабира релевантних фактора констатован је значајан недостатак неопходних података. Током истраживања идентификовани се су следеће категорије за које је оцењено да недостају подаци или су они ограничени:

- недостатак или слаба доступност техничке документације о размерама и карактеристикама напуштених рударских радова,
- непостојање јединственог катастра или базе података са локацијама напуштених рударских радова,
- слаба до никаква покривеност мониторингом напуштених рударских радова већих размера,
- слаба покривеност националном мрежом станица за мониторинг површинских вода сливова потенцијално угрожених напуштеним рударским радовима, и
- значајан недостатак података о нивоима и квалитету подземних вода на великом простору Србије, услед веома скромне осматрачке мреже подземних вода.

Доступност и квалитет податка у великој мери су одредили и одабир параметара на основу којих је спроведена анализа ризика.

Од параметара коришћених приликом процене индекса хазарда, површина јаловишта представља параметар за који је везана највећа несигурност приликом процене. Такође, у оквиру испитивања хемијског састава рудничких вода могуће су одређене грешке приликом лабораторијских испитивања. Ипак, аналитичке грешке не би имале значајније последице, с обзиром на јако широк опсег вредности појединих параметара и високе концентracије елемената карактеристичних за рудничке воде. Евентуална мала одступања не би суштински утицала на припадност одређеној групи рудничких вода. Са друге стране, вредности параметара хемијског састава површинских вода се налазе у мањем опсегу, па евентуалне аналитичке грешке могу значајније утицати на процену квалитета површинских вода у односу на граничне вредности. Повољна околност са овог аспекта је та, да се за већину испитиваних водотока под утицајем напуштених радова више параметара налази изван максимално дозвољених концентрација.

Приликом процене природне рањивости подземних вода, услед недостатка података о нивоима подземних вода, параметар D је одређен на основу субјективне процене и искуства. Такође, размера геолошких подлога коришћених у анализи није омогућила разматрање услова рањивости у детаљу, али са обзиром на регионални карактер истраживања, спроведена анализа је оцењена као адекватна.

У односу на саму структуру предложене методологије, значајан извор неодређености налази се у посматрању напуштених рударских радова као тачкастих ентитета. За већину испитиваних радова оваква апроксимација, која је резултат размере испитивања, је прихватљива. Анализиране локације најчешће представљају старе поткопе из којих концентрисано истичу рудничке воде, са остацима јаловишта у непосредној близини рударских радова.

Насупрот томе, локације флотацијских јаловишта могу да буду и више километара удаљене од самих рударских радова, па се могу налазити и у другачијим условима

природне рањивости и угрожености површинских и подземних вода. Иако је оваква ситуација везана за веома мали број појава, присуство флотацијског јаловишта је наглашено као параметар од највећег значаја. Овим је избегнута могућност додељивања нижег степена ризика услед евентуалних разлика у степену угрожености површинских и подземних вода.

Предложеном методологијом разматрани су негативни ефекти на квалитет водних ресурса настали као последица уношења загађујућих супстанци (најчешће метала и сулфата), као и промене основних физичко-хемијских параметара. Оваквом поставком нису обухваћени нежељени ефекти који се односе на повишену радиоактивност или на повећање температуре површинских вода. Како би се адекватно сагледали потенцијални притисци на водне ресурсе, за напуштене руднике урана предвиђена је могућност увођења додатних поена, с обзиром на изгледе за повећање радиоактивности површинских и подземних вода изнад прихватљивих граница.

Применом семи-квантитативног приступа омогућено је упоређивање и рангирање испитиваних рударских радова према вредности индекса ризика. Међутим, њихово сврставање у категорије ризика спроведено је на основу јасно утврђених граничних вредности. Овакав поступак, иако широко распрострањен у многим областима, као ману има могућност категоризације појава са међусобно сличним вредностима индекса које су блиске граничним, у различите категорије ризика. У циљу превазилажења овог проблема, за процену укупног ризика примењен је поступак базиран на фази приступа, који укључује одређивање степена припадности свакој од класа ризика, а затим је на основу тих вредности извршена финална класификација.

Сагледавањем резултата спроведене процене ризика у односу на податке који су послужили за њихову валидацију, утврђено је високо поклапање процењеног степена ризика и постојећих негативних ефеката на квалитет водних ресурса. Веома добри резултати постигнути су за процену ризика од загађивања површинских вода, осим за напуштени рудник каменог угља „Добра Срећа“. За овај



рудник је процењена средња вредност ризика, а теренским испитивањима је констатовано значајно погоршање квалитета воде Винске реке. Код резултата процене ризика од загађивања подземних вода постоје значајне неизвесности. Оне произилазе из природне комплексност хидрогеолошког система, недостатка података о просторним карактеристика и геометрији напуштених радова, као и малом броју података за верификацију резултата.

Међу примењеним поступцима за процену ризика највећа субјективност везана је за процену ризика од загађивања водних ресурса на нивоу сливова. Ово је последица квалитативног приступа, у оквиру ког је извршена субјективна оцена озбиљности последица. Из тог разлога процена ризика за сливоде оцењена је као прелиминарна, са циљем идентификације потенцијално угрожених сливова у оквиру којих је неопходно спровести даља истраживања.

Поред наведених, извор значајне неодређености лежи у чињеници да се поједини рударски радови одликују сезонским осцилацијама у протицају и хемијско саставу рудничких вода, у мери која може имати утицај на прорачун индекса ризика. С обзиром на значајна материјална средства неопходна за утврђивање унутар годишњих осцилација вредности релевантних параметара, узорковање рудничких вода већим делом је вршено у летњим и раним јесењим месецима, у периоду ниског водостаја када је способност разблажења загађења најмања.

## 9. ЗАКЉУЧАК

Тежиште дисертације представља сагледавање негативног утицаја напуштених рударских радова на ресурсе површинских и подземних вода, кроз примену концепта анализе ризика. За те потребе развијена је методологија за процену ризика на регионалном нивоу, базирана на природним чиниоцима средине и карактеристикама разматраних рударских радова. Примењена методологија делом представља адаптацију концепта мапирања ризика од загађивања подземних вода, и као таква такође се базира на семи-квантитативном приступу. Предложена методологија за процену ризика од загађивања водних ресурса обухвата пет основних корака:

- прорачун индекса хазарда,
- процена рањивости површинских и подземних вода у зони напуштених радова,
- прорачун индекса ризика од загађивања површинских и индекса ризика од загађивања подземних вода и категоризација рударских радова према степену ризика,
- карактеризација укупног ризика и сврставање напуштених радова у класе према укупном ризику од загађивања водних ресурса, и
- прелиминарна процена степена ризика од загађивања водних тела површинских и подземних вода и процена ризика од загађивања на нивоу потенцијално угрожених сливова.

Разматрање начина транспорта и могућност излагања површинских и подземних вода загађујућим супстанцама, кроз анализу концептуалних модела, утицало је на избор релевантних параметара за процену ризика. Фактори предложени за регионалну класификацију напуштених рударских радова као потенцијалних загађивача, односно хазарда, су следећи:

- физичко-хемијске карактеристике рудничких вода изражене преко припадности одређеном кластеру издвојеном на основу *HCA* анализе,
- врста минералне сировине која је експлоатисана,
- геолошка средина тј. преовлађујућа група минерала који улазе у састав стена у оквиру којих је формирано лежиште,
- величина рудног јаловишта изражена преко његове површине и
- постојање флотацијског јаловишта или постројења за мокру сепарацију угља у зони напуштених рударских радова

Међу набројаним критеријумима, као они који имају највећи утицај на степен ризика од загађивања водних ресурса, издвојени су: присуства флотацијског јаловишта и физичко-хемијске карактеристике рудничких вода изражене преко припадности *HCA* кластеру.

Од испитиваних напуштених рударских радова, за три је везано присуство одлагалишта флотацијске јаловине, као и три постројења за мокру сепарацију угља. Разматрањем одлагалишта стенског материјала, регистровано је пет рудних јаловишта површине преко 100000 m<sup>2</sup>, док је за 60 % локација процењена површина јаловишта мања од 10000 m<sup>2</sup>. Иако је овај параметар оцењен са високим степеном неизвесности, резултати указују на то да је већина напуштених рударских радова на простору Србије мањих размера, и да су то углавном стари рудници са подземном експлоатацијом или истражни поткопи.

Физичко-хемијске карактеристике рудничких вода издвојене су као фактор од високог значаја, који умногоме доприноси негативном утицају рударских радова на водне ресурсе. Хидрохемијским испитивањима утврђене су значајне варијације у вредностима минерализације, индекса рН, и макро и микрокомпонената. Испитивањем услова формирања хемијског састава рудничких вода, применом факторне анализе, утврђено је да су оксидација сулфида и пратећи сумпорно-киселински процеси доминанти у формирању хемијског састава испитиваних вода. На 12 испитиваних локација на простору Србије констатовано је изражено присуство *AMD* процеса, док је за 8 напуштених рудника констатовано истицање

неутралних, минерализованих рудничких вода. Уз растварање сулфидних минерала, значајан утицај на хемизам рудничких вода има процеса неутрализације, било као последица директног контакта воде са карбонатима минералима или путем мешања са  $\text{HCO}_3^-$  подземним водама.

Утврђене корелационе зависности, уз резултате факторне анализе, определиле су издвајање индекса рН, минерализације, и концентрације сулфата, гвожђа и арсена као репрезентативних параметара рудничких вода, у контексту процене утицаја на животну средину. Применом хијерархијске кластер анализе са издвојеним параметрима, извршено је сврставање испитиваних појава у групе, које су даље коришћене у процени ризика. Приказани приступ груписању података могуће је применити и у другим истраживањима, првенствено у сфери анализе утицаја рудничких вода на различите чиниоце животне средине.

Према индексу ризика од загађивања подземних вода, утврђено је да већина испитиваних напуштених рударских радова припада категорији са веома ниским и ниским ризиком, а свега 8 % категорији високог и веома високог ризика. Ови задњи (високог ризика) претежно су везани за руднике угља и полиметалична лежишта у тријаским кречњацима западне Србије. У односу на подземне воде, на основу индекса ризика од загађивања површинских вода већи број радова (25 %), сврстан је у групу са високим и веома високим интензитетом ризика. Ови резултати су у сагласности са природним одликама терена у којима су лоцирани. Наиме, већина напуштених рудника се налази у изворишним деловима сливова, на растојању мањем од 100 m од површинских токова првог или другог реда. Овакви терени се најчешће одликују присуством пукотинске издани, израженом морфологијом и ограниченим присуством алувијалних наслага, што погодује интензивном површинском отицају и брзом транспорту загађујућих супстанци до површинских токова.

Карактеризација према укупном степену ризика извршена је на бази интензитета ризика, као и осетљивости ресурса, за чију квантификацију су коришћени следећи критеријума или атрибути:

- индекса ризика од загађивања површинских вода ( $Ri_{пов}$ ),
- индекса ризика од загађивања подземних вода ( $Ri_{под}$ ),
- удаљеност до најближег насељеног места, мерено низводно од напуштеног рудника и
- удаљеност до најближег заштићеног подручја (национални парк, заштићено станиште, парк природе...).

У циљу сврставања рударских радова у класе ризика примењена је математичка теорија атрибута. У веома високу класу према укупном ризику сврстано је 7 напуштених рударских радова, од којих су два рудника угља, док су остали рударски радови у оквиру лежишта металичних сировина (Cu и Pb-Zn).

Од издвојених 153 водна тела подземних вода на простору Србије, за њих 12 је процењено да су подземне воде у одређеним деловима директно угрожене од стране напуштених рударских радова.

Квалитативном проценом ризика од загађивања на нивоу сливова, у категорију високог ризика сврстани су сливови или делови сливова следећих водотока: Јадра, Ресавице и Великог Пека, и делови сливова Дрине, Ибра, Јужне Мораве и Великог Тимока.

Напуштени рударски радови оцењени високим степеном ризика представљају локације на којима је неопходно спровести детаљна истраживања на процени утицаја и припреми и имплементацији мера за рекултивацију и ремедијацију рударских радова и деградираних простора. Методологију развијену у оквиру предметних истраживања, могуће је применити и на другим локацијама, за карактеризацију како напуштених, тако и активних рудника. Издвајање потенцијално угрожених сливова представља основу за даље управљање водним ресурсима и планирање и успостављање мониторинга како површинских, тако и подземних вода у оквиру издвојених сливова.

Верификацијом добијених резултата утврђено је значајно поклапање између процењеног ризика од загађивања површинских вода и квалитета потенцијално угрожених површинских токова. На примеру слива реке Пек, утврђен је значај кумулативног утицаја активних и напуштених рударских радова на квалитет водних ресурса. Такође, потврђена је могућност посредног утицаја рударских активности на значајним удаљеностима од самих рудника, кроз погоршање квалитета подземних вода као последица инфилтрације загађених површинских токова. Овим је истакнута потреба за сагледавањем проблематике напуштених рударских радова на нивоу сливова, с обзиром да се загађујуће супстанце могу транспортовати површинским токовима километрима низводно од напуштених рудника.

На крају, спроведеним истраживањима и верификацијом добијених резултата констатована је могућност примене предложене методологије за процену ризика од загађивања водних ресурса под утицајем напуштених рударских радова. Развојем и применом методологије дат је допринос концепту просторне анализе ризика од загађивања подземних вода. Кроз примењене модификације, омогућена је шира примена овог концепта у оквиру проблематике везане за утицаја рударских активности на ресурсе површинских и подземних вода.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Alpers C.N., Blowes D.W., Nordstrom D.K., Jambor J.L. (1994a)** *Secondary minerals and acid-mine water chemistry*. Short course handbook on environmental geochemistry of sulfide mine wastes. Mineralogical Assoc of Canada, Waterloo.
2. **Alpers C.N., Nordstrom K.D., and Thompson M.J. (1994b)** *Seasonal Variations of Zn/Cu Ratios in Acid Mine Water from Iron Mountain, California*. in Alpers CN, Blowes DW (eds): Environmental geochemistry of sulfide oxidation. American Chemical Society, Washington DC (Symposium Series 550), Chapter 22, pp 324–344.
3. **Alvarez R., Ordóñez A., Loredó J. (2006)** *Geochemical assessment of an arsenic mine adjacent to a water reservoir (León, Spain)*. Environ Geol 50:873–884. doi 10.1007/s00254-006-0259-4
4. **Amos R.T., Blowes D.W., Bailey B.L., Segó D.C., Smith L., Ritchie A.I.M. (2014)** *Waste-rock hydrogeology and geochemistry*. Applied Geochemistry (57): 140-156. doi 10.1016/j.apgeochem.2014.06.020
5. **Appelo C.A.J., Postma D. (1993)** *Geochemistry, groundwater and pollution*. A.A Balkema, Rotterdam.
6. **Aswathanarayana U. (2003)** *Mineral Resources Management and the Environment*. A.A. Balkema Publishers.
7. **Atanacković N., Dragišić V., Stojković J., Papić P., Živanović V. (2013)** *Hydrochemical characteristics of mine waters from abandoned mining sites in Serbia and their impact on surface water quality*. Environmental Science and Pollution Research, vol 20, No 11, pp. 7615-7626, doi 10.1007/s11356-013-1959-4
8. Atanacković, N., Dragišić, V., Živanović, V. et al. Environ Earth Sci (2016) 75: 1152. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5983-9>
9. **AŽЖС (2015a)** *Статус површинских вода Србије - Анализе и елементи за пројектовање мониторинга*. Министарство пољопривреде и заштите животне средине, Агенција за заштиту животне средине, Београд.
10. **AŽЖС (2015b)** *Воде Србије – У времену прилагођавања на климатске промене*. Министарство пољопривреде и заштите животне средине, Агенција за заштиту животне средине, Београд.
11. **Bailey A.D. and Hansford G.S. (1993)** *Factors affecting bio-oxidation of sulfide minerals at high concentrations of solids: A review*. Biotechnol. Bioeng., 42: 1164–1174. doi 10.1002/bit.260421006
12. **Belzile N., Chen Y.W., Cai M.F., Li Y. (2004)** *A review on pyrrhotite oxidation*. Journal of Geochemical Exploration 84(2): 65-76. doi 10.1016/j.gexplo.2004.03.003

13. **Bowell R. (2003)** *Pit Lake Systematics: A Special Issue*. Mine Water and the Environment 22(4) 167–169. doi 10.1007/s10230-003-0019-6
14. **Bowell R.J., Barta J., Mansanares W. and Parshley J. (1998)** *Geological controls on pit lake chemistry: Implications for the assessment of water quality in inactive open pits*. In: Proceedings of the International Mine Water Association Symposium on “Mine Water and Environmental Impacts”, Johannesburg, South Africa, 7–13th September 1998. (Volume II), 375–386.
15. **BRGM (2001)** *Management of mining, quarrying and ore-processing waste in the European Union*, 79 p., 7 Figs., 17 Tables, 7 annexes, 1 CD-ROM (Collected data).
16. **Broadhurst J.L. & Petrie J.G. (2010)** *Ranking and scoring potential environmental risks from solid mineral wastes*. Minerals Engineering (23) 182–191. doi 10.1016/j.mineng.2009.09.008
17. **Butler B. (1998)** *Risk Management of Groundwater Pollution*. Докторска дисертација. Loughborough University.
18. **Бајић Д. (2015)** *Фази оптимизација у хидродинамичкој анализи за потребе пројектовања система одбране од подземних вода*. Докторска дисертација, Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет, Београд.
19. **Башић А. (2017)** *Развој и примена методологије за процену и смањење ризика при коришћењу радио опреме*. Докторска дисертација, Универзитет Сингидуниум.
20. **Carlson C., Critto A., Marcomini A., Nathanail P. (2001)** *Risk based characterisation of contaminated industrial site using multivariate and geostatistical tools*. Environmental Pollution 111 (2001) 417-427.
21. **Cattell R.B. (1966)** *The scree test for the number of factors*. Multivariate Behavioral Research 1, Pp. 245-276.
22. **Chambon J.C., Binning P.J., Jørgensen P.R., Bjerg P.L. (2011)** *A risk assessment tool for contaminated sites in low-permeability fractured media*. Journal of Contaminant Hydrology (124) 82–98. doi 10.1016/j.jconhyd.2011.03.001
23. **Church S.E., Von Guerard P., and Finger S.E., eds., (2007)** *Integrated investigations of environmental effects of historical mining in the Animas River watershed*, San Juan County, Colorado: U.S. Geological Survey Professional Paper 1651, 1,096 p.
24. **Cloutier V., Lefebvre R., Therrien R., Savard M.M. (2008)** *Multivariate statistical analysis of geochemical data as indicative of the hydrogeochemical evolution of groundwater in a sedimentary rock aquifer system*. J Hydrology 353: 294–313. doi 10.1016/j.jhydrol.2008.02.015
25. **Covello V.T. & Merkhoher M.W. (1993)** *Risk Assessment Methods - Approaches for Assessing Health and Environmental Risks*. Springer US. doi 10.1007/978-1-4899-1216-9



26. **Da Silva D.F. (2003)** *Abandoned mines in Portugal – A programme of rehabilitation*. In: Puura E. et al. (Eds), 52 Proc, Workshop on Mine and Quarry Waste, Orta, May 27-28, 2002, EU Joint Research Centre, p 69-72.
27. **Davis A. (2003)** *A Screening-Level Laboratory Method to Estimate Pit Lake Chemistry*. *Mine Water and the Environment* 22: 194–205. doi 10.1007/s10230-003-0022-y
28. **Davis A. and Eary L.E. (1997)** *Pit lake water quality in the Western U.S.: An analysis of chemogenetic trends*. *Mining Eng* 6: 98-102
29. **DEFRA (2011)** *Guidelines for Environmental Risk Assessment and Management - Green Leaves III*. The Department for Environment, Food and Rural Affairs (DEFRA), Cranfield University, UK.
30. **Dimitriou E., Karaouzas I., Sarantakos K., Zacharias I., Bogdanos K., Diapoulis A. (2008)** *Groundwater risk assessment at a heavily industrialised catchment and the associated impacts on a peri-urban wetland*. *Journal of Environmental Management* (88) 526–538. doi 10.1016/j.jenvman.2007.03.019
31. **Dold B., Fontbote L. (2001)** *Element cycling and secondary mineralogy in porphyry copper tailings as a function of climate, primary mineralogy, and mineral processing*. *J Geochem Explor* 74:3–55.
32. **Dragišić V., Miladinović B., Milenić D. (1997)** *Pollution of groundwaters on Donji Milanovac*. In Chilton et al. (eds) *Groundwater in the Urban Environment: Problems, Processes and Management*. A.A. Balkema, Rotterdam.
33. **Dragišić V., Milentijević G., Živanović V., Atanacković N., Nešković D. (2012)** *Mine waters from abandoned mines and environment in Serbia*. In. *Proceeding of XIV Serbian Hydrogeology Symposium, Zlatibor, 14:265-269* (in Serbian).
34. **Димитријевић М. (2013)** *Оксидација пирита и киселе рудничке воде*. Универзитет у Београду, Технички факултет у Бору, Бор.
35. **Димитријевић М. и Милић С. (2017)** *Сулфидни рударски отпад – Карактеристике, утицај на животну средину и третман*. Универзитет у Београду, Технички факултет у Бору, Бор.
36. **Драгишић В. (1995)** Један пример загађивања површинских вода под утицајем отпадних рудничких вода. *Заштита вода „95“*, 130-134, Тара.
37. **Драгишић В. (2005)** *Хидрогеологија лежишта минералних сировина*. Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет, Београд.
38. **Драгишић В. и Поломчић Д. (2009)** *Хидрогеолошки речник*. Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет, Београд.
39. **EA (2008)** *Abandoned mines and the water environment*. Science Project Number: SC030136/SR41. Environment Agency, Bristol, UK.
40. **EA (2012)** *Prioritisation of abandoned non-coal mine impacts on the environment*. SC030136/R13 Hazards and risk management at abandoned non-coal mine sites. Environment Agency, Bristol, UK.

41. **EC (2009)** *Reference Document on Best Available Techniques for Management of Tailings and Waste-Rock in Mining Activities*. EUROPEAN COMMISSION.
42. **Edraki M., Golding S., Baublys K., Lawrence M. (2005)** *Hydrochemistry, mineralogy and sulfur isotope geochemistry of acid mine drainage at the Mt. Morgan mine environment, Queensland, Australia*. *Applied Geochemistry* 20: 789–805.
43. **Edwards J.K., Bond L.P., Druschel K.G., McGuire M.M. (2000)** *Geochemical and biological aspects of sulfide mineral dissolution: lessons from Iron Mountain, California*. *Chemical Geology* (169) 383–397.
44. **EEA (2001)** *Late lessons from early warnings: the precautionary principle 1896-2000*. European Environment Agency (EEA), Environmental issue report number 22. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities.
45. **EEA (2004)** *Review and analysis of existing methodologies for preliminary risk assessment*. Towards an EEA Europe-wide assessment of areas under risk for soil contamination, Volume II. European Environment Agency.
46. **EEA (2008)** *Introduction to Risk Assessment Concepts*. European Environment Agency. Copenhagen, Denmark.
47. **Elberling B., Schippers A., Sand W. (2000)** *Bacterial and chemical oxidation of pyritic mine tailings at low temperatures*. *Journal of Contaminant Hydrology* 41(3-4): 225-238. doi 10.1016/S0169-7722(99)00085-6
48. **Ellis D.V. & Robertson J.D. (1999)** *Underwater placement of mine tailings: case examples and principles*. In Azcue J.M. (ed.), *Environmental Impacts of Mining Activities*, Chap. 9: p. 123–140. Berlin: Springer-Verlag.
49. **Environment Agency (2012)** *Prioritisation of abandoned non-coal mine impacts on the environment*. Project SC030136/R13 Hazards and risk management at abandoned non-coal mine sites, Environment Agency, Bristol.
50. **EPA Ireland (2009)** *Historic Mine Sites-Inventory and Risk Classification*. Volume 1. 170 p. Environmental Protection Agency of Ireland, Wexford.
51. **European Communities (2010)** *Guidance on risk assessment and the use of conceptual models for groundwater*. Guidance Document No. 26. European Communities, Luxembourg. doi 10.2779/53333
52. **EEA (2005)** *PRA.MS: scoring model and algorithm*. Towards an EEA Europe-wide assessment of areas under risk for soil contamination, Volume III. European Environment Agency.
53. **Falagán C., Sánchez-España J., Yusta I., Johnson D. B. (2016)** *New insights into the microbiology of meromictic acidic pit lakes in the Iberian Pyrite Belt (Spain)*. – In: Drebenstedt C. & Paul M.: *IMWA 2016 – Mining Meets Water – Conflicts and Solutions*. – p. 192 – 198; Freiberg/Germany (TU Bergakademie Freiberg).
54. **Fideco (2006)** *Analiza stanja životne sredine od šteta nastalih kao posledica prethodnog rada RTB Bor -Finalni izveštaj*. Fideco d.o.o., Beograd.

55. **Foster S. (1987)** *Fundamental Concepts in Aquifer Vulnerability, Pollution Risk and Protection Strategy*, In: Van Duijvenboden W. and Van Waegeningh H.G. [eds.]: *Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants*, TNO Committee on Hydrogeological Research, Proceedings and Information, 38: 69-86, The Hague.
56. **Foster S., Hirata R., Gomes D., D'Elia M., Paris M. (2002)** *Groundwater quality protection, a guide for water utilities, municipal authorities, and environment agencies*. The International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank, Washington.
57. **Franks D.M., Boger D.V., Côte C.M., Mulligan D.R. (2011)** *Sustainable development principles for the disposal of mining and mineral processing wastes*. *Resource Policy* 36(2): 114-122. doi 10.1016/j.resourpol.2010.12.001
58. **Giubilato E., Zabeo A., Critto A., Giove S., Bierkens J., Den Hond E., Marcomini A. (2014)** *A risk-based methodology for ranking environmental chemical stressors at the regional scale*. *Environment International* (65) 41–53. doi 10.1016/j.envint.2013.12.013
59. **Grande J. A., Santisteban M., De la Torre M. L., Valente T., Perez-Ostale E. (2013)** *Characterisation of AMD Pollution in the Reservoirs of the Iberian Pyrite Belt*. *Mine Water Environ* 32(4):321-330. doi 10.1007/s10230-013-0236-6
60. **Güler C., Thyne G.D., McCray J.E. and Turner A.K. (2002)** *Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data*, *Hydrogeology Journal* 10, Pp. 455-474.
61. **Gzyl G. & Banks D. (2007)** *Verification of the “first flush” phenomenon in mine water from coal mines in the Upper Silesian Coal Basin, Poland*. *J Contam Hydrol*. 92(1-2):66-86. doi 10.1016/j.jconhyd.2006.12.001
62. **Гемовић Б. (2011)** *Управљање ризицима као елемент интегрисаног система менаџмента предузећа*. Докторска дисертација, Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, Нови Сад.
63. **Група аутора (1970)** *Геолошка карта СФРЈ I : 300 000*, Савезни геолошки завод, Београд.
64. **Hajkovicz S. & Collins K. (2007)** *A Review of Multiple Criteria Analysis for Water Resource Planning and Management*. *Water Resour Manage* (21):1553–1566. doi 10.1007/s11269-006-9112-5
65. **Hakkou R., Benzaazoua M. and Bussiere B. (2008)** *Acid Mine Drainage at the Abandoned Kettara Mine (Morocco): 1. Environmental Characterization*. *Mine Water Environ* 27: 145–159. doi 10.1007/s10230-008-0036-6
66. **Harmin H. (1997)** *Guide to underground mining methods and applications*. Atlas Copco, Stocholm.
67. **Helena B.A., Vega M., Barrado E., Pardo R. and Fernandez L. (1999)** *A case of hydrochemical characterization of an alluvial aquifer influenced by human activities*. *Water, Air and Soil Pollution* 112, Pp. 365-387.

68. Hounslow A.W. (1995) *Water quality data—analysis and interpretation*. CRC Press LLC, Boca Raton.
69. Huang B.I., Keisler J., Linkov I. (2011) *Multi-criteria decision analysis in environmental sciences: Ten years of applications and trends*. Science of The Total Environment 409(19): 3578-3594. doi 10.1016/j.scitotenv.2011.06.022
70. Hudson-Edwards K.A., Macklin M.G., Brewer P.A. and Dennis I.A. (2008) *Assessment of Metal Mining-Contaminated River Sediments in England and Wales*. Science Report: SC030136/SR4. Environment Agency, Bristol.
71. Hutcheson G. and Sofroniou N. (1999) *The multivariate social scientist*. London: SAGE Publications Ltd.
72. ICPDR (2000) *Regional Inventory of Potential Accidental Risk Spots in the Tisa catchment area of Romania, Hungary, Ukraine & Slovakia*. Prepared by the Permanent Secretariat of the ICPDR and Zinke Environment Consulting for Central and Eastern Europe, Vienna, Austria.
73. IGME (2016) *Simplified guide for closed/abandoned mining waste facilities risk assessment*. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, Spain.
74. ИЕД (2002) *Mining for the Future – Appendix C: Abandoned Mines Working Paper*. Mining, Minerals and Sustainable Development, 28: C-1–C-20, 3 tab.;; International Institute for Environment and Development, London.
75. INAP (2009) *Global Acid Rock Drainage Guide (GARD Guide)*. The International Network for Acid Prevention. <http://www.gardguide.com>.
76. IPCS (2004) *IPCS Risk Assessment Terminology*. World Health Organization, Geneva.
77. IRGC (2005) *Risk Governance Towards an Integrative Approach*. International Risk Governance Council, Geneva, Switzerland.
78. ISRM (2008) *Mine closure and post-mining management international state-of-the-art*. International Society for Rock Mechanics.
79. ИЈЧ (2015а) *Стратегија управљања водама на територији републике Србије*. Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Београд.
80. ИЈЧ (2015б) *Пројекта заштите и реконструкције јаловишта у близини рудника “Столице” у Крупњу*. Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Београд.
81. Janova V., Vrana K. (2004) *Mining, mining waste and related environmental issues in Slovakia*. In: Jordan G. and D'Alessandro M. (Eds), *Mining, mining waste and related environmental issues: problems and solutions in Central and Eastern European Candidate Countries*, EU Joint Research Centre, p 139-153.
82. Jarvis A.P., Younger P.L. (2000) *Broadening the scope of mine water environmental impact assessment: a UK perspective*. Env Impact Assessment Rev 20: 85-96.
83. Johnson D.B. and Hallberg K. (2005) *Acid mine drainage remediation options: a review*. Science of The Total Environment 338 (1-2) 3-14. doi 10.1016/j.scitotenv.2004.09.002

84. **Jordan G. & Abdaal A.**, Environ Monit Assess (2013) 185: 7809.  
<https://doi.org/10.1007/s10661-013-3137-z>
85. **Jordan G. and D'Alessandro M. (eds) (2004)** *Mining, mining waste and related environmental issues: problems and solutions in Central and Eastern European Candidate Countries*. Joint Research Centre of the European Commission, Ispra, EUR 20868 EN, 208 p.
86. **Juahir H., Zain S.M., Yusoff M.K., Hanidza T.I., Armi A.S., Toriman M.E., Mokhtar M. (2011)** *Spatial water quality assessment of Langat River Basin (Malaysia) using environmetric techniques*. Environ Monit Assess 173:625–641. doi 10.1007/s10661-010-1411-x
87. **Јанковић С. (1990)** *Рудна лежишта Србије: Регионални металогенетски положај, средине стварања и типови лежишта*. Републички друштвени фонд за геолошка истраживања, Рударско-геолошки факултет, Београд.
88. **Kaiser H.F. (1960)** *The Application of electronic computers to factor analysis*. Educational and Psychological Measurement 20, Pp. 141-151.
89. **Katz B.G., Gopalan T.B., Bullen T.D., Davis J.H. (1998)** *Use of chemical and isotopic tracers to characterize the interaction between groundwater and surface water in mantled karst*. Groundwater J 35:1014–1028. doi 10.1111/j.1745-6584.1997.tb00174.x
90. **Kelly D.P. and Wood A.P. (2000)** *Reclassification of some species of Thiobacillus to the newly designated genera Acidithiobacillus gen. nov., Halothiobacillus gen. nov. and Thermithiobacillus gen. nov.* Int. J. Syst. Evol. Microbiol. 50: 511–516
91. **Kossoff D., Dubbin W.E., Alfredsson M., Edwards S.J., Macklin M.G., Hudson-Edwards K.A. (2014)** *Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation*. Applied Geochemistry (51): 229–245. doi 10.1016/j.apgeochem.2014.09.010
92. **Kumpulainen S., Carlson L., Räsänen M.L. (2007)** *Seasonal variations of ochreous precipitates in mine effluents in Finland*. Applied Geochemistry 22(4): 760-777.
93. **Кнежевић Д., Торбица С., Рајковић З., Недић М. (2014)** *Одлагање индустријског отпада*. Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет, Београд.
94. **Li S., Zhou Z., Li L., Xu Z., Zhang Q., Shi S. (2013)** *Risk assessment of water inrush in karst tunnels based on attribute synthetic evaluation system*. Tunnelling and Underground Space Technology (38) 50-58. doi 10.1016/j.tust.2013.05.001
95. **Li, G., Meng, Z., Wang, X. et al. (2017)** 36: 78.  
<https://doi.org/10.1007/s10230-016-0405-5>
96. **Linkov I., Loney D., Cormier S., Satterstrom F.K., and Bridges T. (2009)** *Weight-of-evidence evaluation in environmental assessment: Review of*

- qualitative and quantitative approaches*. Science of The Total Environment, 407(19): 5199–5205. doi 10.1016/j.scitotenv.2009.05.004
97. **Linkov I., Satterstrom K.F., Kiker G., Batchelor C., Bridges T., Ferguson E. (2006)** *From comparative risk assessment to multi-criteria decision analysis and adaptive management: Recent developments and applications*. Environment International 32: 1072–1093. doi 10.1016/j.envint.2006.06.013
98. **Liu H.C., Liu L., Liu N. (2013)** *Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: A literature review*. Expert Systems with Applications 40(2) 828–838. doi 10.1016/j.eswa.2012.08.010
99. **Lottermoser B. (2007)** *Mine Wastes Characterization, Treatment, Environmental Impact*, second edition. Springer, New York.
100. **Лазић М., Петровић М., Кљајић Ж. и Миковић Н. (2014)** *Оводњеност лежишта олова и цинка „Кула“ рудник „Грот“ А.Д. Крива Феја*. Зборник радова XVI Конгрес геолога Србије, Доњи Милановац.
101. **Markowski A.S. & Mannanb M.S. (2008)** *Fuzzy risk matrix*. Journal of Hazardous Materials 159: 152–157. doi 10.1016/j.jhazmat.2008.03.055
102. **Massart D.L. and Kaufman L. (1983)** *The Interpretation of Analytical Chemical Data by the Use of Cluster Analysis*. New York: Wiley.
103. **Mayes W.M., Johnston D., Potter H.A.B., Jarvis A.P. (2009)** *A national strategy for identification, prioritisation and management of pollution from abandoned non-coal mine sites in England and Wales. I. Methodology development and initial results*. Science of the Total Environment (407) 5435–5447. doi 10.1016/j.scitotenv.2009.06.019
104. **Mendoza J. A., Dahlin T., Barmen G. (2005)** *Hydrogeological and hydrochemical features of an area polluted by heavy metals in central Nicaragua*. Hydrogeology Journal 14: 777–784. doi 10.1007/s10040-005-0462-5
105. **Milanović S., Dragišić V., Radulović M.M. and Stevanović Z. (2015)** *Prevent Leakage and Mixture of Karst Groundwater*. In: Stevanović Z. (ed.), *Karst Aquifers – Characterization and Engineering, Professional Practice in Earth Sciences*, Springer International Publishing Switzerland. doi 10.1007/978-3-319-12850-4\_16, pp 531-600
106. **Миладиновић Б. (2015)** *Хидрогеолошки услови експлоатације камених и мрких угљева Србије*. Докторска дисертација, Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет, Београд.
107. **Nelson E., Mendoza G., Regetz J., Polasky S., Tallis H., Cameron D. R., ... Shaw M. R. (2009)** *Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales*. Frontiers in Ecology and the Environment, 7(1), 4-11. doi 10.1890/080023
108. **Ni H., Chen A. and Chen N. (2010)** *Some extensions on risk matrix approach*. Safety Science 48: 1269–1278. doi 10.1016/j.ssci.2010.04.005

109. **Nordstrom D.K. (1982)** *Aqueous Pyrite Oxidation and the Consequent Formation of Secondary Iron Minerals*. In: Kittrick J.A., Fanning D.S., Hossner L.R., editors, *Acid Sulfate Weathering*, SSSA Spec. Publ. 10. SSSA, Madison, WI. p. 37-56. doi 10.2136/sssaspecpub10.c3
110. **Nordstrom D.K. and Southam G. (1997)** *Geomicrobiology of sulfide mineral oxidation*. In: *Reviews in Mineralogy*, Vol. 35, pp. 361–390. Mineralogical Society of America, Washington D.C.
111. **NRC (2002)** *2 Scientific Assumptions and Premises Underpinning the Regulation and Oversight of Environmental Risks of Transgenic Plants*. National Research Council. *Environmental Effects of Transgenic Plants: The Scope and Adequacy of Regulation*. Washington, DC: The National Academies Press. doi 10.17226/10258
112. **OECD (2011)** *The OECD Environmental Risk Assessment Toolkit: Steps in Environmental Risk Assessment and Available OECD Products*, The Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). Интернет страница:  
[http://www.oecd.org/document/46/0,3746,en\\_2649\\_34373\\_44915438\\_1\\_1\\_1\\_1\\_00.html](http://www.oecd.org/document/46/0,3746,en_2649_34373_44915438_1_1_1_1_00.html) [Пристапљено: 21.09.2014.].
113. **Oliás M., Nieto J.M., Sarmiento A.M., Cerón J.C., Cánovas C.R. (2004)** *Seasonal water quality variations in a river affected by acid mine drainage: the Odiel River (South West Spain)*. *Science of The Total Environment*, Vol 333, Issues 1–3, pp 267-281. doi 10.1016/j.scitotenv.2004.05.012
114. **Overheu N.D., Tuxen N., Flyvbjerg J., Aabling J., Andersen J.A., Pedersen J.K., Thyregod T., Binning P.J., Bjerg P.L. (2014)** *Risk-based prioritization of ground water threatening point sources at catchment and regional scales*. *Science of the Total Environment* (485-486) 769–775. doi 10.1016/j.scitotenv.2014.03.083
115. **Oyebog S.A., Ako A.A., Nkeng G.E. and Suh E.C. (2012)** *Hydrogeochemical characteristics of some Cameroon bottled waters, investigated by multivariate statistical analyses*. *Journal of Geochemical Exploration* 112, Pp. 118-130.
116. Pandey, B., Agrawal, M. & Singh, S. *J Soils Sediments* (2016) 16: 159.  
<https://doi.org/10.1007/s11368-015-1173-8>
117. **Pastorok A.R. et al., eds (2002)** *Ecological Modeling in Risk Assessment: Chemical Effects on Populations, Ecosystems, and Landscapes*. Lewis Publishers
118. **Pastorok A.R., Resit Akçakaya H., Regan H., Ferson S. and M. Bartell S. (2003)** *Role of Ecological Modeling in Risk Assessment*. *Human and Ecological Risk Assessment* 9(4) 939-972. doi 10.1080/713610017
119. **Pinto M. M. S. C., Silva M. M. V. G. and Neiva A. M. R. (2004)** *Pollution of Water and Stream Sediments Associated with the Vale De Abrutiga Uranium Mine, Central Portugal*. *Mine Water and the Environment* 23: 66–75.

120. **Pizzol L., Critto A., Agostini P., Marcomini A. (2011)** *Regional risk assessment for contaminated sites part 2: ranking of potentially contaminated sites*. *Environ Int* 37(8): 1307–1320. doi 10.1016/j.envint.2011.05.010
121. **Pizzol L., Zabeo A., Critto A., Giubilato E., Marcomini A. (2015)** *Risk-based prioritization methodology for the classification of groundwater pollution sources*. *Science of the Total Environment* 506–507. doi 10.1016/j.scitotenv.2014.11.014
122. **Power B.A., Tinholt M.J., Hill R.A., Fikart A., Wilson R.M., Stewart G.G., Sinnett G.D. and Runnells J.L. (2009)** *A Risk-Ranking Methodology for Prioritizing Historic, Potentially Contaminated Mine Sites in British Columbia*. *Integrated Environmental Assessment and Management* — Volume 6, Number 1—pp. 145–154.
123. **Puura E. and D’Alessandro M. (2005)** *A Classification System for Environmental Pressures Related to Mine Water Discharges*. *Mine Water and the Environment* (24): 43–52.
124. **Rees J.A. (2002)** *Risk and integrated water management*. Global Water Partnership (GWP), Stockholm, Sweden.
125. **Refsgaard J.C., van der Sluijs J.P., Højberg A.L., Vanrolleghem P.A. (2007)** *Uncertainty in the environmental modelling process: A framework and guidance*. *Environmental Modelling & Software* (22) 1543-1556. doi 10.1016/j.envsoft.2007.02.004
126. **Reichmann F. (Ed) (1992)** *Impact of Mining on the Environment of the Czech Republic: Map, Explanatory Text and Legend*. Cesky geologicky ustav ve spolupraci s Kartografii, Praha.
127. **Ritchie A.I.M. (1994)** *The waste-rock environment*. In: Jambor J.L., Blowes D.W. (eds) *Environmental geochemistry of sulfide mine-wastes*. Mineralogical Association of Canada, Nepean (Short course handbook, vol 22, pp 133–161).
128. **Robertson W.D., Schiff S.L., Ptacek C.J. (2005)** *Review of phosphate mobility and persistence in 10 septic system plumes*. *Groundwater* 36(6):1000–1010.
129. **Romesburg C. (2004)** *Cluster Analysis for Researchers*. Lulu Press, North Carolina.
130. **Royal Society (1983)** *Risk Assessment*. Report of a Royal Society Study Group. The Royal Society, London.
131. **Royal Society (1992)** *Risk: Analysis, Perception and Management*, Report of a Royal Society Study Group. The Royal Society, London.
132. **Rude T. (2004)** *Natural acid drainage laboratory: lessons from the Rotlbach (Zillertal Alps/Austria)*. – In: Jarvis A. P., Dudgeon B. A. & Younger P. L.: *mine water 2004 – Proceedings International Mine Water Association Symposium 1*. – p. 219–224, 3 fig., 1 tab.; Newcastle upon Tyne (University of Newcastle).
133. Russell, Deb. "Attributes in Mathematics." ThoughtCo, Jul. 31, 2017, [thoughtco.com/definition-of-attribute-2312363](http://thoughtco.com/definition-of-attribute-2312363).



134. **РГФ (2001)** *Хидрогеолошка студија лежишта бакра у подручју „Церова (примарно) – Краку кирицијаску“*. Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет, Београд.
135. **РГФ (2009-2011)** *Утицај отпадних рудничких вода на животну средину на простору Србије*. Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет, Београд.
136. **РГФ (2014)** *Израда базе података катастар напуштених копова на територији АП Војводине*, Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет, Београд.
137. **Saaty R. (2003)** *The Analytic Hierarchy Process (AHP) for Decision Making*. Pittsburgh: Creative Decisions Foundation.
138. **Saaty T.L. (1980)** *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill International Book Company, New York.
139. **Saaty T.L. (1994)** *Highlights and critical points in the theory and application of the analytic hierarchy process*. European Journal of Operational Research 74 (3), 426–447.
140. **Saaty T.L. (2008)** *Decision making with the analytic hierarchy process*. Int. J. Services Sciences 1(1) 83-98.
141. Sahoo, P.K., Tripathy, S., Panigrahi, M.K. et al. Bull Eng Geol Environ (2017) 76: 537. <https://doi.org/10.1007/s10064-016-0975-2>
142. **Shevenell L. (2000)** *Analytical method for predicting filling rates of mining pit lakes: example from the Getchell Mine, Nevada*. Mining Engineering, 52(3): 53–60.
143. **Singer and Stumm (1970)** *Acid mine drainage: the rate limiting step*. Science, 167, 1121–1123.
144. Singh, E.J.K., Gupta, A. & Singh, N.R. Environ Sci Pollut Res (2013) 20: 2421. <https://doi.org/10.1007/s11356-012-1127-2>
145. Skousen J., Zipper C.E., Rose A. et al. Mine Water Environ (2017) 36: 133. <https://doi.org/10.1007/s10230-016-0417-1>
146. **Smith L., and Beckie R. (2003)** *Hydrologic and Geochemical Transport Processes in Mine Waste Rock*. In: Jambor J.L., Blowes D.W. and Ritchie A.I.M., Environmental Aspects of Mine Wastes, Short Course Series Vol 31, Mineralogical Association of Canada, 51-72.
147. **Sneath P.H.A. and Sokal R.R. (1973)** *Numerical taxonomy- the principles and practice of numerical classification*. San Francisco: Freeman, W.H.
148. **Sol V.M., Peters S.W.M., Aiking H. (1999)** *Toxic waste storage sites in EU countries*. Vrije Univ Amsterdam, Inst for Environmental Studies. IVM Report R-99/04.
149. **Srinivasamoorthy K., Nanthakumar C., Vasanthavigar M., Vijayaraghavan K., Rajivgandhi R., Chidambaram S., Anandhan P., Manivannan R., Vasudevan S. (2011)** *Groundwater quality assessment from a hard rock terrain,*

- Salem district of Tamilnadu, India. Arab J Geosci* 4:91–102. doi 10.1007/s12517-009-0076-7
150. **Stanley G., Jordan G., Hamor T., Sponar M. (2011)** *Guidance document for a risk-based selection protocol for the inventory of closed waste facilities as required by Article 20 of Directive 2006/21/EC.*  
[http://www.geofond.cz/rroum/dokument/2011\\_GUIDANCE\\_DOCUMENT\\_P\\_R\\_E\\_SELECTION.pdf](http://www.geofond.cz/rroum/dokument/2011_GUIDANCE_DOCUMENT_P_R_E_SELECTION.pdf).
151. **Stiles J.M., Donovan J.D., Dzombak D.A., Cook L. (2004)** *Geochemical cluster analysis of mine water quality within the Monongahela Basin.* In: Proceedings of the American Society of Mining and Reclamation, 2004, Vol. 21, ASMR, Lexington.
152. **Strahler A. N. (1952)** *Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topology.* Geological Society of America Bulletin 63 (11): 1117–1142.
153. **Subramani T., Rajmohan N., Elango L. (2009)** *Groundwater geochemistry and identification of hydrogeochemical processes in a hard rock region, Southern India.* Environ Monit Assess 162:123–137. doi 10.1007/s10661-009-0781-4
154. **Suter G. W. II (1996)** *Guide for Developing Conceptual Models for Ecological Risk Assessments.* U.S. Department of Energy's Oak Ridge National Laboratory, ES/ER/TM-186, Oak Ridge, Tennessee.
155. **Swedish Environmental Protection Agency (2002)** *Methods for inventories of contaminated sites: environmental quality criteria, guidance for data collection.* ARALIA, 136 pp.
156. **Станковић С. (2016)** *Микробиолошки диверзитет киселог језера Робуле и утицај језерске воде на оксидацију сулфидних минерала.* Докторска дисертација, Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет, Београд.
157. **Стевановић З. (2011)** *Менаџмент подземних водних ресурса.* Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет, Београд.
158. **Стојковић Ј. (2013)** *Хидрогеохемијска валоризација есенцијалних микроелемената минералних вода Србије.* докторска дисертација, Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет.
159. **Tabakov V. (2002)** *Inventory and environmental impacts of uranium mines.* In: Puura E et al. (Eds), Proc, Workshop on Mine and Quarry Waste, Orta, May 27-28, 2002, EU Joint Research Centre, p 39-41.
160. **Taoufik, G., Khouni, I. & Ghrabi, A. Arab J Geosci (2017) 10: 181.**  
<https://doi.org/10.1007/s12517-017-2898-z>
161. **Troldborg M. (2010)** *Risk assessment models and uncertainty estimation of groundwater contamination from point sources,* Doctorial dissertation, Department of Environmental Engineering, Technical University of Denmark.
162. **Troldborg M., Lemming G., Binning J.P., Tuxen N., Bjerg L.P. (2008)** *Risk assessment and prioritisation of contaminated sites on the catchment scale.*

- Journal of Contaminant Hydrology (101) 14–28. doi 10.1016/j.jconhyd.2008.07.006
163. **Turner A.J.M., Braungardt Ch. and Potter H. (2011)** *Risk-Based Prioritisation of Closed Mine Waste Facilities Using GIS*. In: Rüde, Freund and Wolkersdorfer (Eds.). Proceedings from the IMWA 2011: Mine Water- Managing the Challenges. Aachen Germany, pp. 667-672.
  164. **UNEP (1991)** *Tech. Rept. No. 5, Environmental aspects of selected non-ferrous metals ore mining*. United Nations Environment Programme.
  165. **UNEP (2001)** *Abandoned mines - Problems, issues and policy challenges for decision makers – Summary report*. United Nations Environment Programme.
  166. **UNESCO (2004)** *Groundwater Resources of the World and Their Use*. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Paris.
  167. **URS (2014)** *Metal Mine Water Treatment Review*. 47068625/MARP001rev4, URS Infrastructure & Environment UK Ltd. Manchester, UK.
  168. **US EPA (1984)** *Risk Assessment and Management: Framework for Decision-Making*. U.S. Environmental Protection Agency.
  169. **US EPA (1992b)** *Hazard Ranking System Guidance Manual*. Hazardous Site Evaluation Division, U.S. Environmental Protection Agency, EPA 540-R-92-026, Washington DC.
  170. **US EPA (1992a)** *Framework for Ecological Risk Assessment*. Washington, DC: Risk Assessment Forum, U.S. Environmental Protection Agency. EPA/630/R-92/001.
  171. **US EPA (1998)** *Guidelines for Ecological Risk Assessment*. U.S. Environmental Protection Agency, EPA/630/R-95/002F.
  172. **US EPA (2000a)** *Risk Characterization Handbook*. Science Policy Council. U.S. Environmental Protection Agency, EPA 100-B-00-002, Washington DC.
  173. **US EPA (2000b)** *Abandoned Mine Site Characterization and Cleanup Handbook*. U.S. Environmental Protection Agency, EPA 910-B-00-001, Washington DC.
  174. **US EPA (2007)** *Application of watershed ecological risk assessment methods to watershed management*. U.S. Environmental Protection Agency, National Center for Environmental Assessment, Washington, DC; EPA/600/R-06/037F. Available from National Technical Information Service, Springfield, VA, and online at <http://www.epa.gov/ncea>.
  175. **US EPA (2009)** *Guidance on the Development, Evaluation, and Application of Environmental Models*. US Environmental Protection Agency, EPA/100/K-99.
  176. **US EPA (2017a)** <https://www.epa.gov/superfund/abandoned-mine-lands>. U.S. Environmental Protection Agency, July 2017.
  177. **US EPA (2017b)**: Интернет страница: <https://www.epa.gov/risk> [Приступљено: 14.10.2017.].
  178. **Venkateswarlu K., Nirola R., Kuppusamy S., Thavamani P., Naidu R., Megharaj M. (2016)** *Abandoned metalliferous mines: ecological impacts and*

- potential approaches for reclamation*. Rev Environ Sci Biotechnol (15) 327–354. doi 10.1007/s11157-016-9398-6
179. **Vera M., Schippers A. & Sand W. (2013)** *Progress in bioleaching: fundamentals and mechanisms of bacterial metal sulfide oxidation—part A*. Appl Microbiol Biotechnol 97: 7529–7541. doi 10.1007/s00253-013-4954-2
180. **Vrba J., Zoporozec A. (eds) (1994)** *Guidebook on mapping groundwater vulnerability*, vol 16. Hannover, International Contributions to Hydrogeology (IAH), p 131.
181. **Walker W.E., Harremoës P., Rotmans J., van der Sluijs J.P., Van Asselt M.B.A., Janssen P., Kreyer von Krauss M.P., (2003)** *Defining uncertainty. A conceptual basis for uncertainty management in model-based decision support*. Integrated Assessment 4[1] 5-17.
182. **Ward J.H. (1963)** *Hierarchical grouping to optimize an objective function*. J Am Stat Assoc, 69, 236–244.
183. **Williams M. (2001)** *Arsenic in mine waters: an international study*. Environ Geol 40:267–278. doi 10.1007/s002540000162
184. **WMO (2012)** *International Glossary of Hydrology*. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.
185. **Wolkersdorfer C. (2008)** *Water Management at Abandoned Flooded Underground Mines*. Springer, Leipzig.
186. **Wolkersdorfer C., Shongwe L., Schmidt C. (2016)** *Can natural Stratification prevent Pollution by Acid Mine Drainage?*. In: Drebenstedt C. & Paul M.: IMWA 2016 – Mining Meets Water – Conflicts and Solutions. – p. 115 – 121; Freiberg/Germany (TU Bergakademie Freiberg).
187. **Wolkersdorfer Ch., Younger P. L. & Bowell R. (2004)** *PADRE – Partnership for Acid Drainage Remediation in Europe*. Mine Water Env., 23 (4): 181–182; Berlin.
188. **Xu L. and Liu G. (2009)** *The study of a method of regional environmental risk assessment*. Journal of Environmental Management (90) 3290–3296. doi 10.1016/j.jenvman.2009.05.011
189. **Younger L.P. (2000)** *Predicting temporal changes in total iron concentrations in groundwaters flowing from abandoned deep mines: a first approximation*. Journal of Contaminant Hydrology (44) 47–69.
190. **Younger P.L. and Wolkersdorfer C.H. (2004)** *Mining Impacts on the Fresh Water Environment: Technical and Managerial Guidelines for Catchment Scale Management*. (The ERMITE Guidelines). Mine Water and the Environment, 23: S1 - S80.
191. **Younger P.L., Banwart S.A. & Hedin R.S. (2002)** *Mine Water – Hydrology, Pollution, Remediation*. Dordrecht-London: Kluwer Academic Publishing.
192. **Zimmermann H.J. (2001)** *Fuzzy sets teory and its applications*. 514 pp. Boston-Dordrecht-London: Kluwer Academic Publishing.

193. **Zwahlen F. (ed) (2004)** *Vulnerability and Risk Mapping for the Protection of Carbonate (Karstic) Aquifers*. Final report COST action 620. European Commission, Directorate-General for Research, Brüssel.
194. **Živanović V., Dragišić V., Atanacković N., Ninković S., Magazinović S. (2015)** *Izrada karte rizika od zagađivanja podzemnih voda na primeru nacionalnog parka Đerdap*. Zapisnici srpskog geološkog društva za 2015. godinu, str. 59-77. Srpsko Geološko društvo, Beograd.
195. **Ђуричић М., Бојковић Р., Ђуричић Р., Скоруп С. (2010)** *Менаџмент ризикум пројекта*. Међународна научна конференција - Менаџмент 2010, Крушевац, Србија.
196. **Живановић В. (2009)** *Методе за оцену рањивости подземних вода*. Семинарски рад, Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет, Београд.
197. **Живановић В. (2011)** *Оцена рањивости подземних вода од загађења на примерима карста Србије*. Магистарски рад, Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет, Београд.
198. **Живановић В. (2016)** *Развој методологије заштите изворишта подземних вода применом карата рањивости*. Докторска дисертација, Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет, Београд.
199. **Љешевић М. (2000)** *Животна средина – теорија и методологија истраживања*. Универзитет у Београду, Географски факултет, Београд.

## **ПРИЛОЗИ**

## ПРИЛОГ 1a

Међународни и регионални приступи у анализи утицаја активних и напуштених рударских радова на животну средину и здравље људи (модификовано према Puura and D'Alessandro 2005)

Приступ/Пројекат	Обим	Опис	Резултат	Референца
<i>The Phare Programme</i> – концепти ремедијације за руднике урана на простору централне и источне Европе	124 рудника уранијума у 9 источноевропских држава	Израда катастра рудника и тренутног стања; имплементација пилот пројеката	Систематичан приступ за класификацију и приоритизацију рудника на основу специјално развијеног индексног система	Tabakov (2002)
Прелиминарна карактеризација ризика за одлагалишта токсичног отпада у земљама ЕУ	Рудници металних мин. сировина и флотацијска јаловишта на простору ЕУ	Идентификација заштићених мочварних подручја подложних загађивању рударским активностима	Предлаже се индивидуални приступ на нивоу држава, као и употреба даљинске детекције	Sol et al. (1999)
Управљање рударским и отпадом насталим у процесу прераде руде у ЕУ	Квантитативна процена рударског отпада у државама ЕУ	Попуњавање припремљених упитника у комбинацији са проценама базираним на просечним количинама отпада у зависности од типа сировине	Процена количине рударског отпада у ЕУ државама; преглед хидрогеолошких услова у зони флотацијских јаловишта	BRGM (2001)
Регионална идентификација ризика од потенцијално акцидентних локација у сливу Тисе	Локације са највишим степеном ризика од акцидента у сливу Тисе у Румунији, Мађарској, Украјини и Словачкој	На основу достављених информација, локације су класификоване у три категорије ризика према изгледима за акцидентни догађај	16 флотацијских јаловишта и 3 рудника у Румунији, 1 рудник у Словачкој, и одлагалишта металног муља у Мађарској су процењена као високо ризична	ICPDR (2000)

## ПРИЛОГ 1a

Међународни и регионални приступи у анализи утицаја активних и напуштених рударских радова на животну средину и здравље људи (модификовано према Puura and D'Alessandro 2005) - Наставак

<p>EU MWD <i>Pre-selection Protocol</i> Процедура за прелиминарну процену ризика</p>	<p>Катастар одлагалишта рударског отпада са прелиминарном проценом ризика</p>	<p>Израда протокола за прелиминарну процену одлагалишта рударског отпада на бази ризика</p>	<p>Протокол за прелиминарну процену ризика у форми упитника. Класификација одлагалишта на она за која су потребна и за која нису потребна даља истраживања</p>	<p>Stanley et al. (2011)</p>
<p>РЕСОМИНЕС Рударство, рударски отпад и њихов утицај на животну средину</p>	<p>Идентификација потенцијално ризичних рудника и рударског отпада на територији централне и источне Европе (10 земаља кандидата)</p>	<p>Идентификација „<i>hot spot</i>“ локација на основу упитника и 4 основна критеријума</p>	<p>Издавање 37 локација у 10 земаља које представљају високу опасност по животну средину. Рангирање земаља у 3 групе према степену проблема везаним за рударске радове</p>	<p>Jordan and D'Alessandro (eds) 2004</p>
<p>Класификациони систем за еколошке притиске везане за истицање рудничких вода</p>	<p>Рударски радови са истицањем рудничких вода. На бази резултата РЕСОМИНЕС пројекта</p>	<p>Универзална шема за рангирање рударских радова према количини рудничких вода које истичу и величине прекорачења МДК</p>	<p>Дијаграм за рангирање рударских радова према степену притиска израженог преко количине рудничких вода и прекорачења МДК</p>	<p>Puura and D'Alessandro (2005)</p>
<p>Рангирање потенцијалног еколошког ризика од отпада из индустрије минералних сировина</p>	<p>Одлагалишта чврстог рударског отпада (јаловишта стенског материјала) и пепелишта</p>	<p>Рангирање према систему предвиђања и поређења са мереним концентрацијама, у 4 корака: хазард потенцијал, фактор доступности, потенцијални ризик, поређење предвиђених и мерених параметара</p>	<p>Метода за индексирање и рангирање чврстог отпада из индустрије минералних сировина, примењена на примеру сулфидног флотацијског јаловишта</p>	<p>Broadhurst &amp; Petrie (2010)</p>



## ПРИЛОГ 16

Национални приступи у анализи утицаја рударских радова на животну средину  
(модификовано према Puura and D'Alessandro 2005)

Приступ/Пројекат	Обим	Опис	Резултат	Референца
Утицај рударства на животну средину на простору Чешке	Рударски радови на простору Чешке на бази геолошке крате 1:500 000	На основу геолошке карте издвојене су локације за које је процењен степен утицаја у 13 категорија	Фактори утицаја су процењени као висок, низак или без ризика на основу експертског мишљења; студија је обухватила 169 локација; није примењена квантитативна анализа	Reichmann (1992)
Напуштени рудници у Португалији	Програм за анализу и идентификацију свих напуштених рудника у Португалији	Рангирање напуштених рудника према безбедности и утицају на животну средину, уз додељивање различитих тежинских фактора	Рудници су ранжирани у 4 категорије према степену хазарда: висок, средњи, низак и занемарљив	Da Silva (2003)
Рударство, рударски отпад и утицај на животну средину на простоту Словачке	Сви активни и напуштени рударски радови у Словачкој	Идентификација и процена 266 активних и 17260 напуштених рударских радова, са проценом утицаја на животну средину и предлогом за мониторинг и ремедијацију	Категоризација локација на основу тежинских фактора у три категорије: I захтева ремедијацију, II није критично, III низак или занемарљив утицај	Janova & Vrana (2004)
Методe за идентификацију контаминираних локација у Шведској	Смернице за прикупљање података о контаминираним локацијама у Шведској	Процена контаминираних локација на основу процене хазарда, нивоа загађења, потенцијала за миграцију и осетљивости рецептора	Упутство за прикупљање података и карактеризацију контаминираних локација према степену ризика у 4 класе (веома висок, висок, средњи и низак)	Swedish Environmental Protection Agency (2002)

## ПРИЛОГ 16

Национални приступи у анализи утицаја рударских радова на животну средину  
(модификовано према Puura and D'Alessandro 2005) - наставак

Процена утицаја рудничких вода из напуштених рудника на животну средину	Идентификација утицаја напуштених рударских радова на простору Велике Британије	Категоризовани утицај на животну средину према физичко-хемијским и биолошким параметрима површинских вода	Напуштени рудници угља и метала су узрок деградирања 400 и 200 km речних токова у Великој Британији	Jarvis and Younger (2000)
Национална стратегија за идентификацију, приоритизацију и управљање загађењем из напуштених рударских радова у Енглеској и Велсу	Напуштени металични рударски радови у Енглеској и Велсу и припадајући сливови	Процедура у три главне фазе: I – идентификација загађења, II – приоритизација и верификација утицаја, III – идентификација напуштених рудника и приоритизација	Идентификовано 224 водна тела под утицајем, 4908 напуштених рудника је анализирано и рангирано додељивањем индекса, и издвојено је 30 приоритетних водних тела	Mayes et al. (2009)
Напуштени рудници – катастар и параметарски систем за класификацију ризика	Напуштени рударски радови на простору Ирске	Параметарски систем за процену ризика у 5 корака. Базиран на три фактора: хазард, изгледи за испуштање загађујућих супстанци и рецептор	82 напуштених рудника је сврстано у 27 дистрикта. Рудници су класификовани у 5 класа према степену ризика	EPA Ireland (2009)
Приоритизација напуштених одлагалишта на бази ризика у GIS окружењу	Одлагалишта рударског отпада у Енглеској	Параметарска метода за приоритизацију на основу три фактора: удаљеност до водног тела, површина одлагалишта и нагиб	АНР приступ је коришћен за одређивање тежинског коефицијента, са којим је множењем добијен индекс укупног ризика на основу ког је извршено рангирање	Turner et al. (2011)

## ПРИЛОГ 16

Национални приступи у анализи утицаја рударских радова на животну средину

(модификовано према Puura and D'Alessandro 2005) - наставак

Катастар напуштених копова на територији АП Војводине	Напуштени копови на простору АП Војводине	Параметарска метода за рангирање на основу АНР приступа, на бази 16 критеријума подељених у 4 основне групе: заштита животне средине, социолошки, геолошки и техничко-технолошки	База напуштених копова са софтверским решењем инкорпорирана у инфромациони систем републике Србије	РГФ (2015)
Методологија за приоритизацију напуштених рудника на бази рангирања ризика	Напуштени рудници на територији Британске Колумбије (Канада)	Метода се састоји од три корака: 1. прелиминарна теренска истраживања 2. компилација и анализа података 3. Састанак експерата и менаџера	Рангирање локација на бази процене еколошко и ризика по здравље људи. на основу рангирања ризика предложене су 4 мере за ублажавање ризика	Power et al. (2009)
Упутство за процену ризика за напуштена одлагалишта рударског отпада	Затворена и напуштена одлагалишта рударског отпада на простору Шпаније	Параметарска метода за рангирање на основу процене сценарија загађивања, изгледа да дође до загађивања и процене озбиљности последица	За финалну карактеризацију користи се матрица ризика на основу које се процењује сваки од фактора и на основу које се добија процена степена ризика	IGME (2016)

## ПРИЛОГ 2

### Основни параметри испитиваних рударских радова

РБ	Локација	Сировина	Назив	Y	X	НСА Кластер	Врста минералне сировине	Геолошка средина	Процењена површина јаловишта (m <sup>2</sup> )	Флотацијско јаловиште или сепарација
1	Вршка Чука	Камени угаљ	Свети Ђорђе	4855152	7607031	A1	Угаљ	Карбонати	50000	Мокра сепарација угља
2	Тупижница	Камени угаљ	Влашко поље	4839930	7588884	A2	Угаљ	Карбонати	< 10000	Не
3	Сврљишки Тимок	Камени угаљ	Подвис	4823152	7596150	A1	Угаљ	Карбонати	25500	Не
4	Вина	Камени угаљ	Добра Срећа	4831731	7592484	A1	Угаљ	Силикати- карбонати	41500	Не
5	Нова Брза Паланка	Камени угаљ	Аликсар	4929428	7612833	A2	Угаљ	Карбонати	< 10000	Не
6	Ресавица	Мрки угаљ	Јужни поткоп	4877120	7546974	A2	Угаљ	Карбонати	26000	Мокра сепарација угља
7	Ресавица	Мрки угаљ	Северни поткоп	4877664	7546730	A2	Угаљ	Силикати	35500	Мокра сепарација угља
8	Црни Врх	Cu-As	Липа	4894199	7577675	C6	Металичне	Силикати	100000	Не
9	Црни Врх	Cu-As	Липа	4894199	7577675	C5	Металичне	Силикати	100000	Не
10	Црни Врх	Cu-As	Липа	4894395	7577705	B3	Металичне	Силикати	100000	Не
11	Црни Врх	Cu-As	Липа	4894395	7577705	B3	Металичне	Силикати	100000	Не
12	Црни Врх	Cu	Купиново	4895766	7578501	A1	Металичне	Силикати	< 10000	Не
13	Црни Врх	Cu	Думитри поток	4898242	7574044	A2	Металичне	Силикати	< 10000	Не
14	Црни Врх	Cu	Чока Куруга	4898290	7577840	A1	Металичне	Силикати	10500	Не

15	Бор	Cu-Mo	Церова - цементација 1	4892420	7582946	A1	Металичне	Силикати	440000	Не
16	Бор	Cu-Mo	Церова - цементација 1	4892420	7582946	B4	Металичне	Силикати	440000	Не
17	Мајданпек	Au-Bi	Света барбара	4921356	7568240	A2	Металичне	Силикати	< 10000	Не
18	Мајданпек	Au-Bi	Грабова река	4916261	7568053	A2	Металичне	Силикати	< 10000	Не
19	Мајданпек	Au-Bi	Грабова река	4916261	7568053	A2	Металичне	Силикати	< 10000	Не
20	Стара Планина - Аљин До	Au-Bi	Илијин Гроб	4821148	7611079	A2	Металичне	Силикати	< 10000	Не
21	Загубица	Pb-Zn-Cu	Ваља Сака	4899273	7572421	A2	Металичне	Силикати- карбонати	< 10000	Не
22	Мајданпек	Pb-Zn-Cu	Чока Марин	4905880	7577570	B3	Металичне	Силикати	13200	Не
23	Стара Планина	U	Мездреја	4807430	7624138	A2	Радиоактивне	Силикати	5000	Не
24	Стара Планина	U	Габровница	4811536	7615921	A2	Радиоактивне	Силикати	10500	Не
25	Стара Планина	U	Габровница	4811536	7615921	A2	Радиоактивне	Силикати	10500	Не
26	Дели Јован	Cu-Au	Латово	4890326	7604792	A2	Металичне	Силикати	< 10000	Не
27	Дели Јован	Cu-Au	Русман	4888032	7602745	A2	Металичне	Силикати	3000	Не
28	Дели Јован	Au	Гиндуша	4893332	7598887	A2	Металичне	Силикати	3700	Не
29	Брестовац	Cu-Pb-Zn	Брестовац	4877102	7588426	A1	Металичне	Силикати	600	Не
30	Мајданпек	Pb-Zn-Cu	Чока Марин	4906195	7578712	A1	Металичне	Силикати	< 10000	Не
31	Бољевац	Cu	Марков Камен	4854390	7585349	A2	Металичне	Силикати	7800	Не
32	Црни Врх	Cu-As	Липа	4894214	7577616	B3	Металичне	Силикати	100000	Не
33	Јерма- Пирот	Камени ugalj	Ракита	4753156	7627885	A2	Угаљ	Силикати- карбонати	3000	Не
34	Јерма- Пирот	Камени ugalj	Козарнички поток	4751860	7626099	A2	Угаљ	Силикати- карбонати	< 10000	Не
35	Сурдулица	Mo	Мачкатица	4733368	7599397	A2	Металичне	Силикати	80000	Не

36	Леце-Туларе	Pb-Zn-Cu	БТ-1	4739776	7537348	A1	Металичне	Силикати	< 10000	Не
37	Леце-Туларе	Pb-Zn-Cu	БТ-3	4739909	7537042	A1	Металичне	Силикати	< 10000	Не
38	Ђавоља Варош	Pb-Zn-Cu	Ђавоља вода	4761137	7533222	B3	Металичне	Силикати	< 10000	Не
39	Ђавоља Варош	Pb-Zn-Cu	Б-1	4760816	7533055	B3	Металичне	Силикати	< 10000	Не
40	Ђавоља Варош	Pb-Zn-Cu	Ђавоља Варош 1	4760690	7532702	A1	Металичне	Силикати	< 0.02	Не
41	Ђавоља Варош	Pb-Zn-Cu	Ђавоља Варош 2	4760649	7532693	A1	Металичне	Силикати	< 0.03	Не
42	Ђавоља Варош	Pb-Zn-Cu	Ђавоља Варош 4	4760611	7532643	A1	Металичне	Силикати	< 0.04	Не
43	Босилеград	Pb-Zn	Подвирови	4690109	7611090	A2	Металичне	Силикати	10500	Не
44	Копаоник-Метође	Fe-Cu	Гвоздац-1	4795698	7487963	A2	Металичне	Силикати-карбонати	< 10000	Не
45	Копаоник-Метође	Fe-Cu	Гвоздац-2	4795776	7488013	A2	Металичне	Силикати-карбонати	< 10000	Не
46	Копаоник	Fe-Cu	Суво Рудиште	4793102	7484441	A1	Металичне	Силикати-карбонати	78250	Не
47	Копаоник	Fe-Cu	Крчмар вода	4792236	7486484	A1	Металичне	Силикати-карбонати	< 10000	Не
48	Рогозна	Pb-Zn	Каравасанлија	4766654	7473029	A1	Металичне	Силикати-карбонати	< 10000	Не
49	Рашка	Pb-Zn	Кижевак	4794158	7475902	A2	Металичне	Силикати	55000	Флотацијско јаловиште
50	Рашка	Pb-Zn	Саставци	4797308	7477374	A1	Металичне	Силикати	28000	Не
51	Рашка	Pb-Zn	Липница	4785230	7468912	A1	Металичне	Силикати	< 10000	Не
52	Куршумлија	Pb-Zn-Cu	Бањска Река-1	4762032	7533040	A1	Металичне	Силикати	< 10000	Не
53	Куршумлија	Pb-Zn-Cu	Бањска Река-2	4762234	7532354	A1	Металичне	Силикати	< 10000	Не
54	Предејане	Pb-Zn	Црвени Брег 1	4742999	7598279	A2	Металичне	Силикати	< 10000	Не
55	Предејане	Pb-Zn	Црвени Брег 2	4743080	7598319	A2	Металичне	Силикати	< 10000	Не

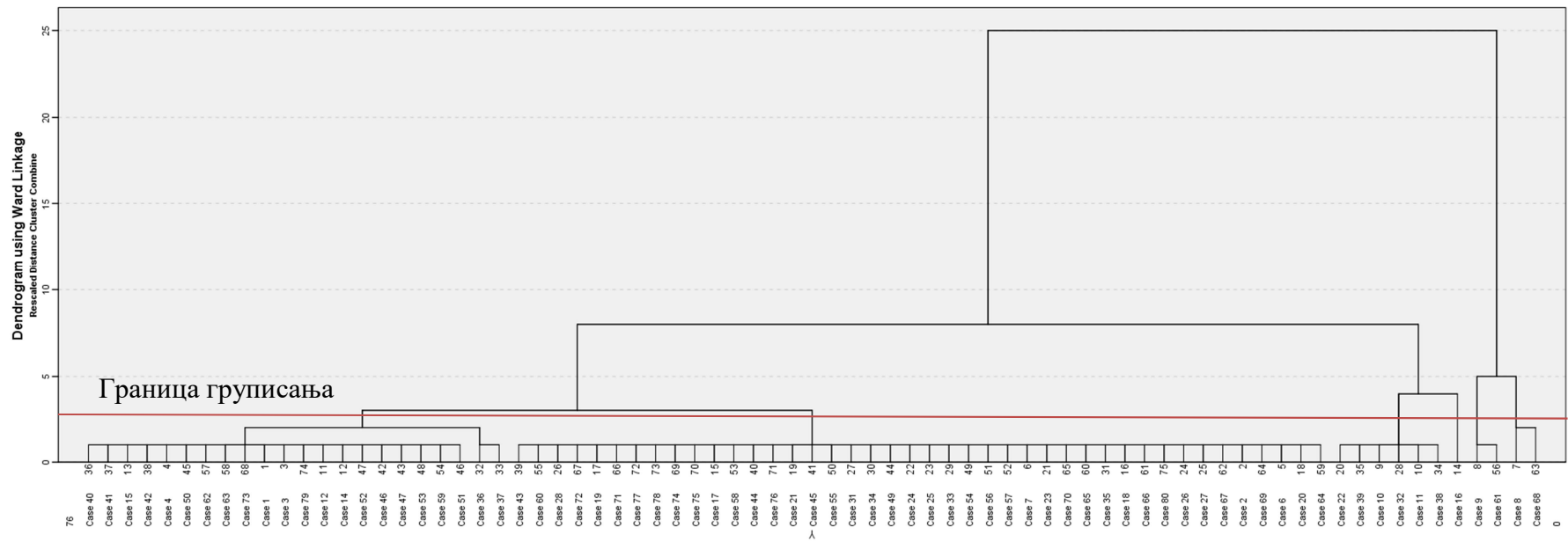
56	Предејане	Pb-Zn	Црвени Брег 3	4743163	7598297	A2	Металичне	Силикати	< 10000	Не
57	Предејане	Pb-Zn	Пиште	4742258	7599065	A2	Металичне	Силикати	< 10000	Не
58	Рупље	Pb-Zn	Мала река 1	4745268	7601290	A2	Металичне	Силикати	< 10000	Не
59	Рупље	Pb-Zn	Мала река 2	4744561	7600857	A1	Металичне	Силикати	< 10000	Не
60	Љубовија	Pb-Zn-Sb	Тисовик	4899692	7387305	A2	Металичне	Карбонати	10500	Не
61	Љубовија	Pb-Zn-Sb	Бобија	4896446	7384857	C5	Металичне	Силикати-карбонати	131000	Не
62	Љубовија	Pb-Zn-Sb	Бобија	4896515	7384661	A1	Металичне	Силикати-карбонати	131000	Не
63	Крупањ	Sb	Столице	4919630	7366722	A1	Металичне	Силикати-карбонати	37000	Флотацијско јаловиште
64	Крупањ	Sb	Рујевац	4907189	7368792	A2	Металичне	Силикати-карбонати	4000	Не
65	Зајача	Sb	Туринска јама	4932725	7361122	A2	Металичне	Силикати-карбонати	< 10000	Не
66	Љубовија	Pb-Zn	Велики Мајдан	4906880	7365777	A2	Металичне	Силикати-карбонати	17150	Флотацијско јаловиште
67	Авала	Pb-Zn+Hg	Црвени Брег	4949430	7460402	A2	Металичне	Силикати-карбонати	< 10000	Не
68	Авала	Hg	Шупља Стена	4947824	7462784	C6	Металичне	Силикати-карбонати	< 10000	Не
69	Космај	Pb-Zn	Бабе	4932588	7461221	A2	Металичне	Силикати-карбонати	25000	Не
70	Стара Планина	Bi	Аљин Дол	4821587	7611859	A2	Металичне	Силикати	< 10000	Не
71	Мокра Гора	Fe-Ni	Постењски поток	4852847	7379199	A2	Металичне	Силикати-карбонати	< 10000	Не
72	Ваљево	Cu	Ребељ	4896093	7395245	A2	Металичне	Силикати	< 10000	Не
73	Крупањ	F	Равнаја	4921005	7380962	A1	Металичне	Карбонати	6500	Не
74	Баљевац	B	Побрђе	4805498	7469150	A2	Неметаличне	Силикати-карбонати	2800	Не
75	Кремна	B	Борна вода	4856732	7385538	A2	Неметаличне	Силикати	< 10000	Не

76	Бањевац	Mg	Бела Стена	4804524	7469211	A2	Неметаличне	Силикати-карбонати	28000	Не
77	Златибор	Mg	Лиска	4836392	7388391	A2	Неметаличне	Силикати	48000	Не
78	Рашка	Mg	Брвеница	4799785	7466181	A2	Неметаличне	Силикати	10100	Не
79	Бањевац	Камени угаљ	Јарандол	4805576	7471049	A1	Угаљ	Силикати-карбонати	180000	Мокра сепарација угља
80	Букуља	U	Претурица	4902473	7455250	A2	Радиоактивне	Силикати	< 10000	Не



### ПРИЛОГ 3

Графички приказ резултата хијерархијске кластер анализе у виду дендограма,  
за 80 испитиваних појава рудничких вода



## ПРИЛОГ 4

Резултати прорачуна индекса хазарда *НС*

РБ	Назив	НС1	НС2	НС3	НС4	НС5	НС
1	Свети Ђорђе	50,2	25,4	5,6	33,8	74,6	189,6
2	Влашко Поље	25,1	25,4	5,6	19,3	0	75,4
3	Подвис	50,2	25,4	5,6	33,8	0	115,0
4	Добра Срећа	50,2	25,4	11,2	33,8	0	120,6
5	Аликсар	25,1	25,4	5,6	19,3	0	75,4
6	Јужни поткоп	25,1	25,4	5,6	33,8	74,6	164,5
7	Северни поткоп	25,1	25,4	16,8	33,8	74,6	175,7
8	Липа	75,3	38,1	16,8	48,3	0	178,5
9	Липа	75,3	38,1	16,8	48,3	0	178,5
10	Липа	75,3	38,1	16,8	48,3	0	178,5
11	Липа	75,3	38,1	16,8	48,3	0	178,5
12	Купиново	50,2	38,1	16,8	19,3	0	124,4
13	Думитри поток	25,1	38,1	16,8	19,3	0	99,3
14	Чока Куруга	50,2	38,1	16,8	33,8	0	138,9
15	Церова – цементација 1	50,2	38,1	16,8	57,9	0	163,0
16	Церова – цементација 1	75,3	38,1	16,8	57,9	0	188,1
17	Света барбара	25,1	38,1	16,8	19,3	0	99,3
18	Грабова река	25,1	38,1	16,8	19,3	0	99,3
19	Грабова река	25,1	38,1	16,8	19,3	0	99,3
20	Илијин Гроб	25,1	38,1	16,8	19,3	0	99,3
21	Ваља Сака	25,1	38,1	11,2	19,3	0	93,7
22	Чока Марин	75,3	38,1	16,8	33,8	0	164,0
23	Мездреја	25,1	38,1	16,8	19,3	0	99,3
24	Габровница	25,1	38,1	16,8	33,8	0	113,8
25	Габровница	25,1	38,1	16,8	33,8	0	113,8
26	Латово	25,1	38,1	16,8	19,3	0	99,3
27	Русман	25,1	38,1	16,8	19,3	0	99,3
28	Гиндуша	25,1	38,1	16,8	19,3	0	99,3
29	Брестовац	50,2	38,1	16,8	19,3	0	124,4
30	Чока Марин	50,2	38,1	16,8	19,3	0	124,4
31	Марков Камен	25,1	38,1	16,8	19,3	0	99,3
32	Липа	75,3	38,1	16,8	48,3	0	178,5
33	Ракита	25,1	25,4	11,2	19,3	0	81,0
34	Козарнички поток	25,1	25,4	11,2	19,3	0	81,0
35	Мачкатица	25,1	38,1	16,8	48,3	0	128,3
36	БТ-1	50,2	38,1	16,8	19,3	0	124,4
37	БТ-3	50,2	38,1	16,8	19,3	0	124,4
38	Ђавоља вода	75,3	38,1	16,8	19,3	0	149,5
39	Б-1	75,3	38,1	16,8	19,3	0	149,5
40	Ђавоља Варош 1	50,2	38,1	16,8	19,3	0	124,4
41	Ђавоља Варош 2	50,2	38,1	16,8	19,3	0	124,4

<b>42</b>	Ђавоља Варош 4	50,2	38,1	16,8	19,3	0	<b>124,4</b>
<b>43</b>	Подвирови	25,1	38,1	16,8	33,8	0	<b>113,8</b>
<b>44</b>	Гвоздац-1	25,1	38,1	11,2	19,3	0	<b>93,7</b>
<b>45</b>	Гвоздац-2	25,1	38,1	11,2	19,3	0	<b>93,7</b>
<b>46</b>	Суво Рудиште	50,2	38,1	11,2	48,3	0	<b>147,8</b>
<b>47</b>	Крчмар вода	50,2	38,1	11,2	19,3	0	<b>118,8</b>
<b>48</b>	Каравасанлија	50,2	38,1	11,2	19,3	0	<b>118,8</b>
<b>49</b>	Кижевак	25,1	38,1	16,8	48,3	111,9	<b>240,2</b>
<b>50</b>	Саставци	50,2	38,1	16,8	33,8	0	<b>138,9</b>
<b>51</b>	Липница	50,2	38,1	16,8	19,3	0	<b>124,4</b>
<b>52</b>	Бањска Река-1	50,2	38,1	16,8	19,3	0	<b>124,4</b>
<b>53</b>	Бањска Река-2	50,2	38,1	16,8	19,3	0	<b>124,4</b>
<b>54</b>	Црвени Брег 1	25,1	38,1	16,8	19,3	0	<b>99,3</b>
<b>55</b>	Црвени Брег 2	25,1	38,1	16,8	19,3	0	<b>99,3</b>
<b>56</b>	Црвени Брег 3	25,1	38,1	16,8	19,3	0	<b>99,3</b>
<b>57</b>	Пиште	25,1	38,1	16,8	19,3	0	<b>99,3</b>
<b>58</b>	Мала река 1	25,1	38,1	16,8	19,3	0	<b>99,3</b>
<b>59</b>	Мала река 2	50,2	38,1	16,8	19,3	0	<b>124,4</b>
<b>60</b>	Тисовик	25,1	38,1	5,6	33,8	0	<b>102,6</b>
<b>61</b>	Бобија	75,3	38,1	11,2	57,9	0	<b>182,5</b>
<b>62</b>	Бобија	50,2	38,1	11,2	57,9	0	<b>157,4</b>
<b>63</b>	Столице	50,2	38,1	11,2	33,8	111,9	<b>245,2</b>
<b>64</b>	Рујевац	25,1	38,1	11,2	19,3	0	<b>93,7</b>
<b>65</b>	Туринаска јама	25,1	38,1	11,2	33,8	0	<b>108,2</b>
<b>66</b>	Велики Мајдан	25,1	38,1	11,2	33,8	111,9	<b>220,1</b>
<b>67</b>	Црвени Брег	25,1	38,1	11,2	19,3	0	<b>93,7</b>
<b>68</b>	Шупља Стена	75,3	38,1	11,2	19,3	0	<b>143,9</b>
<b>69</b>	Бабе	25,1	38,1	11,2	33,8	0	<b>108,2</b>
<b>70</b>	Аљин Дол	25,1	38,1	16,8	19,3	0	<b>99,3</b>
<b>71</b>	Постењски поток	25,1	38,1	11,2	19,3	0	<b>93,7</b>
<b>72</b>	Ребељ	25,1	38,1	16,8	19,3	0	<b>99,3</b>
<b>73</b>	Равнаја	50,2	38,1	5,6	19,3	0	<b>113,2</b>
<b>74</b>	Побрђе	25,1	12,7	11,2	19,3	0	<b>68,3</b>
<b>75</b>	Борна вода	25,1	12,7	16,8	19,3	0	<b>73,9</b>
<b>76</b>	Бела Стена	25,1	12,7	11,2	33,8	0	<b>82,8</b>
<b>77</b>	Лиска	25,1	12,7	16,8	33,8	0	<b>88,4</b>
<b>78</b>	Брвеница	25,1	12,7	16,8	33,8	0	<b>88,4</b>
<b>79</b>	Јарандол	50,2	25,4	11,2	57,9	74,6	<b>219,3</b>
<b>80</b>	Претурица	25,1	38,1	16,8	19,3	0	<b>99,3</b>

## ПРИЛОГ 5

Резултати прорачуна индекса ризика од загађивања подземних вода ( $R_{ipod}$ )

РБ	Назив	НС	Фактор G	Фактор O	Фактор D	GOD	$R_{ipod}$
1	Свети Ђорђе	189,6	0,90	0,90	1,00	0,81	153,6
2	Влашко Поље	75,4	0,60	0,50	0,80	0,24	18,1
3	Подвис	115,0	0,70	0,90	1,00	0,63	72,4
4	Добра Срећа	120,6	0,60	0,55	0,80	0,26	31,8
5	Аликсар	75,4	0,60	0,55	0,80	0,26	19,9
6	Јужни поткоп	164,5	0,70	0,90	1,00	0,63	103,6
7	Северни поткоп	175,7	0,70	0,90	1,00	0,63	110,7
8	Липа	178,5	0,55	0,60	0,80	0,26	47,1
9	Липа	178,5	0,55	0,60	0,80	0,26	47,1
10	Липа	178,5	0,55	0,60	0,80	0,26	47,1
11	Липа	178,5	0,55	0,60	0,80	0,26	47,1
12	Купиново	124,4	0,55	0,60	0,80	0,26	32,8
13	Думитри поток	99,3	0,55	0,60	0,80	0,26	26,2
14	Чока Куруга	138,9	0,55	0,60	0,80	0,26	36,7
15	Церова – цементација 1	163,0	0,55	0,60	0,80	0,26	43,0
16	Церова – цементација 1	188,1	0,55	0,60	0,80	0,26	49,7
17	Света барбара	99,3	0,10	0,60	0,80	0,04	4,0
18	Грабова река	99,3	0,10	0,60	0,80	0,04	4,0
19	Грабова река	99,3	0,10	0,60	0,80	0,04	4,0
20	Илијин Гроб	99,3	0,70	0,90	1,00	0,63	62,6
21	Ваља Сака	93,7	0,90	0,90	1,00	0,81	75,9
22	Чока Марин	164,0	0,40	0,60	0,80	0,19	31,5
23	Мездреја	99,3	0,40	0,60	0,80	0,19	19,1
24	Габровница	113,8	0,70	0,90	1,00	0,63	71,7
25	Габровница	113,8	0,70	0,90	1,00	0,63	71,7
26	Латово	99,3	0,60	0,60	0,80	0,29	28,6
27	Русман	99,3	0,40	0,60	0,80	0,19	19,1
28	Гиндуша	99,3	0,40	0,60	0,80	0,19	19,1
29	Брестовац	124,4	0,40	0,60	0,80	0,19	23,9
30	Чока Марин	124,4	0,40	0,60	0,80	0,19	23,9
31	Марков Камен	99,3	0,40	0,60	0,80	0,19	19,1
32	Липа	178,5	0,40	0,60	0,80	0,19	34,3
33	Ракита	81,0	0,40	0,70	0,80	0,22	18,1
34	Козарнички поток	81,0	0,90	0,90	1,00	0,81	65,6
35	Мачкатица	128,3	0,50	0,60	0,80	0,24	30,8
36	БТ-1	124,4	0,50	0,60	0,80	0,24	29,9
37	БТ-3	124,4	0,50	0,60	0,80	0,24	29,9

38	Ђавоља вода	149,5	0,50	0,60	0,80	0,24	35,9
39	Б-1	149,5	0,50	0,60	0,80	0,24	35,9
40	Ђавоља Варош 1	124,4	0,50	0,60	0,80	0,24	29,9
41	Ђавоља Варош 2	124,4	0,50	0,60	0,80	0,24	29,9
42	Ђавоља Варош 4	124,4	0,50	0,60	0,80	0,24	29,9
43	Подвирови	113,8	0,50	0,60	0,80	0,24	27,3
44	Гвоздац-1	93,7	0,50	0,65	0,80	0,26	24,4
45	Гвоздац-2	93,7	0,50	0,65	0,80	0,26	24,4
46	Суво Рудиште	147,8	0,40	0,60	0,80	0,19	28,4
47	Крчмар вода	118,8	0,70	0,60	0,80	0,34	39,9
48	Каравасанлија	118,8	0,70	0,60	0,80	0,34	39,9
49	Кижевак	240,2	0,50	0,60	0,80	0,24	57,6
50	Саставци	138,9	0,70	0,60	0,80	0,34	46,7
51	Липница	124,4	0,50	0,60	0,80	0,24	29,9
52	Бањска Река-1	124,4	0,50	0,60	0,80	0,24	29,9
53	Бањска Река-2	124,4	0,50	0,60	0,80	0,24	29,9
54	Црвени Брег 1	99,3	0,50	0,60	0,80	0,24	23,8
55	Црвени Брег 2	99,3	0,50	0,60	0,80	0,24	23,8
56	Црвени Брег 3	99,3	0,50	0,60	0,80	0,24	23,8
57	Пиште	99,3	0,50	0,60	0,80	0,24	23,8
58	Мала река 1	99,3	0,50	0,60	0,80	0,24	23,8
59	Мала река 2	124,4	0,50	0,60	0,80	0,24	29,9
60	Тисовик	102,6	0,80	0,90	1,00	0,72	73,9
61	Бобија	182,5	0,50	0,75	0,80	0,30	54,8
62	Бобија	157,4	0,50	0,75	0,80	0,30	47,2
63	Столице	245,2	0,80	0,90	1,00	0,72	176,5
64	Рујевац	93,7	0,50	0,70	0,80	0,28	26,2
65	Туринаска јама	108,2	0,60	0,60	0,80	0,29	31,2
66	Велики Мајдан	220,1	0,50	0,70	0,80	0,28	61,6
67	Црвени Брег	93,7	0,60	0,70	0,80	0,34	31,5
68	Шупља Стена	143,9	0,70	0,60	0,80	0,34	48,4
69	Бабе	108,2	0,60	0,70	0,80	0,34	36,3
70	Аљин Дол	99,3	0,40	0,60	0,80	0,19	19,1
71	Постењски поток	93,7	0,90	0,90	1,00	0,81	75,9
72	Ребељ	99,3	0,90	0,90	1,00	0,81	80,4
73	Равнаја	113,2	0,50	0,90	1,00	0,45	50,9
74	Побрђе	68,3	0,60	0,55	0,80	0,26	18,0
75	Борна вода	73,9	0,70	0,60	0,80	0,34	24,8
76	Бела Стена	82,8	0,60	0,55	0,80	0,26	21,9
77	Лиска	88,4	0,70	0,60	0,80	0,34	29,7
78	Брвеница	88,4	0,70	0,60	0,80	0,34	29,7
79	Јарандол	219,3	0,90	0,80	0,90	0,65	142,1
80	Претурица	99,3	0,60	0,70	0,80	0,34	33,4

## ПРИЛОГ 6

Резултати прорачуна индекса ризика од загађивања површинских вода ( $R_{i\text{пов}}$ )

РБ	Назив	НС	T1	T2	T3	FT	$R_{i\text{пов}}$
1	Свети Ђорђе	189,6	0,50	0,30	1,50	0,53	101,1
2	Влашко Поље	75,4	0,30	0,30	1,00	0,60	45,2
3	Подвис	115,0	0,50	0,30	3,00	0,27	30,7
4	Добра Срећа	120,6	0,50	0,30	1,50	0,53	64,3
5	Аликсар	75,4	0,50	0,15	1,50	0,43	32,7
6	Јужни поткоп	164,5	0,50	0,30	1,50	0,53	87,7
7	Северни поткоп	175,7	0,30	0,30	1,50	0,40	70,3
8	Липа	178,5	0,50	0,15	1,50	0,43	77,3
9	Липа	178,5	0,50	0,15	1,50	0,43	77,3
10	Липа	178,5	0,50	0,30	1,50	0,53	95,2
11	Липа	178,5	0,50	0,30	1,50	0,53	95,2
12	Купиново	124,4	0,50	0,30	1,00	0,80	99,5
13	Думитри поток	99,3	0,50	0,30	1,00	0,80	79,4
14	Чока Куруга	138,9	0,30	0,30	1,00	0,60	83,3
15	Церова – цементација 1	163,0	0,50	0,30	1,50	0,53	86,9
16	Церова – цементација 1	188,1	0,50	0,50	1,50	0,67	125,4
17	Света барбара	99,3	0,30	0,30	3,00	0,20	19,9
18	Грабова река	99,3	0,50	0,15	1,50	0,43	43,0
19	Грабова река	99,3	0,50	0,15	1,00	0,65	64,5
20	Илијин Гроб	99,3	0,30	0,15	1,50	0,30	29,8
21	Ваља Сака	93,7	0,30	0,15	1,00	0,45	42,2
22	Чока Марин	164,0	0,15	0,15	1,50	0,20	32,8
23	Мездреја	99,3	0,50	0,15	1,50	0,43	43,0
24	Габровница	113,8	0,30	0,30	1,50	0,40	45,5
25	Габровница	113,8	0,30	0,30	1,50	0,40	45,5
26	Латово	99,3	0,30	0,30	1,00	0,60	59,6
27	Русман	99,3	0,15	0,15	1,00	0,30	29,8
28	Гиндуша	99,3	0,50	0,30	1,00	0,80	79,4
29	Брестовац	124,4	0,50	0,15	1,50	0,43	53,9
30	Чока Марин	124,4	0,30	0,15	1,00	0,45	56,0
31	Марков Камен	99,3	0,30	0,15	1,00	0,45	44,7
32	Липа	178,5	0,50	0,30	1,50	0,53	95,2
33	Ракита	81,0	0,50	0,30	1,50	0,53	43,2
34	Козарнички поток	81,0	0,50	0,30	1,00	0,80	64,8
35	Мачкатица	128,3	0,50	0,50	1,50	0,67	85,5
36	БТ-1	124,4	0,50	0,15	1,50	0,43	53,9
37	БТ-3	124,4	0,50	0,15	1,50	0,43	53,9
38	Ђавоља вода	149,5	0,30	0,15	1,50	0,30	44,9
39	Б-1	149,5	0,50	0,15	1,50	0,43	64,8
40	Ђавоља Варош 1	124,4	0,50	0,15	1,50	0,43	53,9
41	Ђавоља Варош 2	124,4	0,50	0,15	1,50	0,43	53,9

42	Ђавоља Варош 4	124,4	0,50	0,15	1,50	0,43	<b>53,9</b>
43	Подвирови	113,8	0,50	0,30	1,00	0,80	<b>91,0</b>
44	Гвоздац-1	93,7	0,50	0,15	1,50	0,43	<b>40,6</b>
45	Гвоздац-2	93,7	0,50	0,30	1,50	0,53	<b>50,0</b>
46	Суво Рудиште	147,8	0,15	0,50	1,00	0,65	<b>96,0</b>
47	Крчмар вода	118,8	0,15	0,30	1,00	0,45	<b>53,5</b>
48	Каравасанлија	118,8	0,50	0,30	1,00	0,80	<b>95,0</b>
49	Кижевак	240,2	0,50	0,15	1,00	0,65	<b>156,1</b>
50	Саставци	138,9	0,30	0,30	1,00	0,60	<b>83,3</b>
51	Липница	124,4	0,50	0,30	1,00	0,80	<b>99,5</b>
52	Бањска Река-1	124,4	0,30	0,15	1,00	0,45	<b>56,0</b>
53	Бањска Река-2	124,4	0,50	0,15	1,00	0,65	<b>80,9</b>
54	Црвени Брег 1	99,3	0,30	0,15	1,00	0,45	<b>44,7</b>
55	Црвени Брег 2	99,3	0,50	0,15	1,00	0,65	<b>64,5</b>
56	Црвени Брег 3	99,3	0,50	0,15	1,00	0,65	<b>64,5</b>
57	Пиште	99,3	0,30	0,15	1,00	0,45	<b>44,7</b>
58	Мала река 1	99,3	0,50	0,15	1,00	0,65	<b>64,5</b>
59	Мала река 2	124,4	0,50	0,15	1,00	0,65	<b>80,9</b>
60	Тисовик	102,6	0,30	0,15	1,00	0,45	<b>46,2</b>
61	Бобија	182,5	0,30	0,15	1,00	0,45	<b>82,1</b>
62	Бобија	157,4	0,15	0,30	1,00	0,45	<b>70,8</b>
63	Столице	245,2	0,30	0,15	1,00	0,45	<b>110,3</b>
64	Рујевац	93,7	0,50	0,15	1,50	0,43	<b>40,6</b>
65	Туринска јама	108,2	0,15	0,30	1,50	0,30	<b>32,5</b>
66	Велики Мајдан	220,1	0,50	0,30	1,00	0,80	<b>176,1</b>
67	Црвени Брег	93,7	0,15	0,15	1,00	0,30	<b>28,1</b>
68	Шупља Стена	143,9	0,30	0,30	1,50	0,40	<b>57,6</b>
69	Бабе	108,2	0,30	0,15	1,50	0,30	<b>32,5</b>
70	Аљин Дол	99,3	0,15	0,15	1,50	0,20	<b>19,9</b>
71	Постењски поток	93,7	0,50	0,15	1,50	0,43	<b>40,6</b>
72	Ребељ	99,3	0,30	0,15	1,00	0,45	<b>44,7</b>
73	Равнаја	113,2	0,30	0,15	1,00	0,45	<b>50,9</b>
74	Побрђе	68,3	0,50	0,15	1,00	0,65	<b>44,4</b>
75	Борна вода	73,9	0,30	0,15	1,50	0,30	<b>22,2</b>
76	Бела Стена	82,8	0,50	0,15	1,00	0,65	<b>53,8</b>
77	Лиска	88,4	0,30	0,30	1,00	0,60	<b>53,0</b>
78	Брвеница	88,4	0,50	0,50	3,00	0,33	<b>29,5</b>
79	Јарандол	219,3	0,50	0,30	3,00	0,27	<b>58,5</b>
80	Претурица	99,3	0,15	0,15	1,00	0,30	<b>29,8</b>

## ПРИЛОГ 7а

Мере припадности параметра ризика од загађивања подземних вода

РБ	Ri <sub>под</sub>	μ11			C11	μ12					C12	μ13					C13	μ14			C14
1	153,6	-	-	0,000	0,000	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	1,000	1,000
2	18,1	1,000	-	-	1,000	0,000	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	0,000
3	72,4	-	-	0,000	0,000	-	-	-	0,752	-	0,752	-	0,248	-	-	-	0,248	0,000	-	-	0,000
4	31,8	-	0,876	-	0,876	-	0,124	-	-	-	0,124	0,000	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	0,000
5	19,9	1,000	-	-	1,000	0,000	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	0,000
6	103,6	-	-	0,000	0,000	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	-	0,713	-	0,713	-	0,287	-	0,287
7	110,7	-	-	0,000	0,000	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	-	0,477	-	0,477	-	0,523	-	0,523
8	47,1	-	0,440	-	0,440	-	0,560	-	-	-	0,560	0,000	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	0,000
9	47,1	-	0,440	-	0,440	-	0,560	-	-	-	0,560	0,000	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	0,000
10	47,1	-	0,440	-	0,440	-	0,560	-	-	-	0,560	0,000	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	0,000
11	47,1	-	0,440	-	0,440	-	0,560	-	-	-	0,560	0,000	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	0,000
12	32,8	-	0,847	-	0,847	-	0,153	-	-	-	0,153	0,000	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	0,000
13	26,2	1,000	-	-	1,000	0,000	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	0,000
14	36,7	-	0,738	-	0,738	-	0,262	-	-	-	0,262	0,000	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	0,000
15	43,0	-	0,556	-	0,556	-	0,444	-	-	-	0,444	0,000	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	0,000
16	49,7	-	0,367	-	0,367	-	0,633	-	-	-	0,633	0,000	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	0,000
17	4,0	1,000	-	-	1,000	0,000	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	0,000
18	4,0	1,000	-	-	1,000	0,000	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	0,000
19	4,0	1,000	-	-	1,000	0,000	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	0,000
20	62,6	-	-	0,000	0,000	-	-	1,000	-	-	1,000	0,000	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	0,000
21	75,9	-	-	0,000	0,000	-	-	-	0,637	-	0,637	-	0,363	-	-	-	0,363	0,000	-	-	0,000
22	31,5	-	0,886	-	0,886	-	0,114	-	-	-	0,114	0,000	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	0,000
23	19,1	1,000	-	-	1,000	0,000	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	0,000
24	71,7	-	-	0,000	0,000	-	-	-	0,777	-	0,777	-	0,223	-	-	-	0,223	0,000	-	-	0,000
25	71,7	-	-	0,000	0,000	-	-	-	0,777	-	0,777	-	0,223	-	-	-	0,223	0,000	-	-	0,000
26	28,6	-	0,969	-	0,969	-	0,031	-	-	-	0,031	0,000	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	0,000
27	19,1	1,000	-	-	1,000	0,000	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	0,000
28	19,1	1,000	-	-	1,000	0,000	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	0,000
29	23,9	1,000	-	-	1,000	0,000	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	0,000
30	23,9	1,000	-	-	1,000	0,000	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	0,000
31	19,1	1,000	-	-	1,000	0,000	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	0,000



32	34,3	-	0,807	-	<b>0,807</b>	-	0,193	-	-	-	<b>0,193</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
33	18,1	1,000	-	-	<b>1,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
34	65,6	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	0,980	-	<b>0,980</b>	-	0,020	-	-	-	<b>0,020</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
35	30,8	-	0,906	-	<b>0,906</b>	-	0,094	-	-	-	<b>0,094</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
36	29,9	-	0,933	-	<b>0,933</b>	-	0,067	-	-	-	<b>0,067</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
37	29,9	-	0,933	-	<b>0,933</b>	-	0,067	-	-	-	<b>0,067</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
38	35,9	-	0,761	-	<b>0,761</b>	-	0,239	-	-	-	<b>0,239</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
39	35,9	-	0,761	-	<b>0,761</b>	-	0,239	-	-	-	<b>0,239</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
40	29,9	-	0,933	-	<b>0,933</b>	-	0,067	-	-	-	<b>0,067</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
41	29,9	-	0,933	-	<b>0,933</b>	-	0,067	-	-	-	<b>0,067</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
42	29,9	-	0,933	-	<b>0,933</b>	-	0,067	-	-	-	<b>0,067</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
43	27,3	1,000	-	-	<b>1,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
44	24,4	1,000	-	-	<b>1,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
45	24,4	1,000	-	-	<b>1,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
46	28,4	-	0,975	-	<b>0,975</b>	-	0,025	-	-	-	<b>0,025</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
47	39,9	-	0,645	-	<b>0,645</b>	-	0,355	-	-	-	<b>0,355</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
48	39,9	-	0,645	-	<b>0,645</b>	-	0,355	-	-	-	<b>0,355</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
49	57,6	-	0,139	-	<b>0,139</b>	-	0,861	-	-	-	<b>0,861</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
50	46,7	-	0,453	-	<b>0,453</b>	-	0,547	-	-	-	<b>0,547</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
51	29,9	-	0,933	-	<b>0,933</b>	-	0,067	-	-	-	<b>0,067</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
52	29,9	-	0,933	-	<b>0,933</b>	-	0,067	-	-	-	<b>0,067</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
53	29,9	-	0,933	-	<b>0,933</b>	-	0,067	-	-	-	<b>0,067</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
54	23,8	1,000	-	-	<b>1,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
55	23,8	1,000	-	-	<b>1,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
56	23,8	1,000	-	-	<b>1,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
57	23,8	1,000	-	-	<b>1,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
58	23,8	1,000	-	-	<b>1,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
59	29,9	-	0,933	-	<b>0,933</b>	-	0,067	-	-	-	<b>0,067</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
60	73,9	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	0,705	-	<b>0,705</b>	-	0,295	-	-	-	<b>0,295</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
61	54,8	-	0,221	-	<b>0,221</b>	-	0,779	-	-	-	<b>0,779</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
62	47,2	-	0,437	-	<b>0,437</b>	-	0,563	-	-	-	<b>0,563</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
63	176,5	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	1,000	<b>1,000</b>
64	26,2	1,000	-	-	<b>1,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
65	31,2	-	0,896	-	<b>0,896</b>	-	0,104	-	-	-	<b>0,104</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
66	61,6	-	0,025	-	<b>0,025</b>	-	0,975	-	-	-	<b>0,975</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>

67	31,5	-	0,886	-	<b>0,886</b>	-	0,114	-	-	-	<b>0,114</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
68	48,4	-	0,404	-	<b>0,404</b>	-	0,596	-	-	-	<b>0,596</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
69	36,3	-	0,747	-	<b>0,747</b>	-	0,253	-	-	-	<b>0,253</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
70	19,1	1,000	-	-	<b>1,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
71	75,9	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	0,637	-	<b>0,637</b>	-	0,363	-	-	-	<b>0,363</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
72	80,4	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	0,486	-	<b>0,486</b>	-	0,514	-	-	-	<b>0,514</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
73	50,9	-	0,330	-	<b>0,330</b>	-	0,670	-	-	-	<b>0,670</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
74	18,0	1,000	-	-	<b>1,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
75	24,8	1,000	-	-	<b>1,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
76	21,9	1,000	-	-	<b>1,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
77	29,7	-	0,937	-	<b>0,937</b>	-	0,063	-	-	-	<b>0,063</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
78	29,7	-	0,937	-	<b>0,937</b>	-	0,063	-	-	-	<b>0,063</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
79	142,1	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	1,000	<b>1,000</b>
80	33,4	-	0,832	-	<b>0,832</b>	-	0,168	-	-	-	<b>0,168</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>

## ПРИЛОГ 76

Мере припадности параметра ризика од загађивања површинских вода

РБ	R <sub>пов</sub>	μ21			C21	μ22					C22	μ23				C23	μ24			C24	
1	101,1	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	0,093	-	<b>0,093</b>	-	0,907	-	<b>0,907</b>
2	45,2	-	0,659	-	<b>0,659</b>	-	0,341	-	-	-	<b>0,341</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
3	30,7	1,000	-	-	<b>1,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
4	64,3	-	0,023	-	<b>0,023</b>	-	0,977	-	-	-	<b>0,977</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
5	32,7	1,000	-	-	<b>1,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
6	87,7	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	0,985	-	<b>0,985</b>	-	0,015	-	<b>0,015</b>
7	70,3	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	1,000	-	-	<b>1,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
8	77,3	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	0,678	-	<b>0,678</b>	-	0,322	-	-	-	<b>0,322</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
9	77,3	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	0,678	-	<b>0,678</b>	-	0,322	-	-	-	<b>0,322</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
10	95,2	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	0,488	-	<b>0,488</b>	-	0,512	-	<b>0,512</b>
11	95,2	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	0,488	-	<b>0,488</b>	-	0,512	-	<b>0,512</b>
12	99,5	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	0,199	-	<b>0,199</b>	-	0,801	-	<b>0,801</b>
13	79,4	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	0,537	-	<b>0,537</b>	-	0,463	-	-	-	<b>0,463</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
14	83,3	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	0,278	-	<b>0,278</b>	-	0,722	-	-	-	<b>0,722</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
15	86,9	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	0,038	-	<b>0,038</b>	-	0,962	-	-	-	<b>0,962</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
16	125,4	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	1,000	<b>1,000</b>
17	19,9	1,000	-	-	<b>1,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
18	43,0	-	0,732	-	<b>0,732</b>	-	0,268	-	-	-	<b>0,268</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
19	64,5	-	0,015	-	<b>0,015</b>	-	0,985	-	-	-	<b>0,985</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
20	29,8	1,000	-	-	<b>1,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
21	42,2	-	0,761	-	<b>0,761</b>	-	0,239	-	-	-	<b>0,239</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
22	32,8	1,000	-	-	<b>1,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
23	43,0	-	0,732	-	<b>0,732</b>	-	0,268	-	-	-	<b>0,268</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
24	45,5	-	0,650	-	<b>0,650</b>	-	0,350	-	-	-	<b>0,350</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
25	45,5	-	0,650	-	<b>0,650</b>	-	0,350	-	-	-	<b>0,350</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
26	59,6	-	0,181	-	<b>0,181</b>	-	0,819	-	-	-	<b>0,819</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
27	29,8	1,000	-	-	<b>1,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
28	79,4	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	0,537	-	<b>0,537</b>	-	0,463	-	-	-	<b>0,463</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
29	53,9	-	0,370	-	<b>0,370</b>	-	0,630	-	-	-	<b>0,630</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
30	56,0	-	0,301	-	<b>0,301</b>	-	0,699	-	-	-	<b>0,699</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
31	44,7	-	0,677	-	<b>0,677</b>	-	0,323	-	-	-	<b>0,323</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
32	95,2	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	0,488	-	<b>0,488</b>	-	0,512	-	<b>0,512</b>
33	43,2	-	0,727	-	<b>0,727</b>	-	0,273	-	-	-	<b>0,273</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
34	64,8	-	0,007	-	<b>0,007</b>	-	0,993	-	-	-	<b>0,993</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>

35	85,5	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	0,133	-	<b>0,133</b>	-	0,867	-	-	-	<b>0,867</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
36	53,9	-	0,370	-	<b>0,370</b>	-	0,630	-	-	-	<b>0,630</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
37	53,9	-	0,370	-	<b>0,370</b>	-	0,630	-	-	-	<b>0,630</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
38	44,9	-	0,672	-	<b>0,672</b>	-	0,328	-	-	-	<b>0,328</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
39	64,8	-	0,007	-	<b>0,007</b>	-	0,993	-	-	-	<b>0,993</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
40	53,9	-	0,370	-	<b>0,370</b>	-	0,630	-	-	-	<b>0,630</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
41	53,9	-	0,370	-	<b>0,370</b>	-	0,630	-	-	-	<b>0,630</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
42	53,9	-	0,370	-	<b>0,370</b>	-	0,630	-	-	-	<b>0,630</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
43	91,0	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	-	0,765	<b>0,765</b>	-	0,235	-	<b>0,235</b>
44	40,6	-	0,813	-	<b>0,813</b>	-	0,187	-	-	-	<b>0,187</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
45	50,0	-	0,501	-	<b>0,501</b>	-	0,499	-	-	-	<b>0,499</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
46	96,0	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	0,431	-	<b>0,431</b>	-	0,569	-	<b>0,569</b>
47	53,5	-	0,385	-	<b>0,385</b>	-	0,615	-	-	-	<b>0,615</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
48	95,0	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	0,497	-	<b>0,497</b>	-	0,503	-	<b>0,503</b>
49	156,1	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	1,000	<b>1,000</b>
50	83,3	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	0,278	-	<b>0,278</b>	-	0,722	-	-	-	<b>0,722</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
51	99,5	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	0,199	-	<b>0,199</b>	-	0,801	-	<b>0,801</b>
52	56,0	-	0,301	-	<b>0,301</b>	-	0,699	-	-	-	<b>0,699</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
53	80,9	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	0,443	-	<b>0,443</b>	-	0,557	-	-	-	<b>0,557</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
54	44,7	-	0,677	-	<b>0,677</b>	-	0,323	-	-	-	<b>0,323</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
55	64,5	-	0,015	-	<b>0,015</b>	-	0,985	-	-	-	<b>0,985</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
56	64,5	-	0,015	-	<b>0,015</b>	-	0,985	-	-	-	<b>0,985</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
57	44,7	-	0,677	-	<b>0,677</b>	-	0,323	-	-	-	<b>0,323</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
58	64,5	-	0,015	-	<b>0,015</b>	-	0,985	-	-	-	<b>0,985</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
59	80,9	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	0,443	-	<b>0,443</b>	-	0,557	-	-	-	<b>0,557</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
60	46,2	-	0,628	-	<b>0,628</b>	-	0,372	-	-	-	<b>0,372</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
61	82,1	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	0,358	-	<b>0,358</b>	-	0,642	-	-	-	<b>0,642</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
62	70,8	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	1,000	-	-	<b>1,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
63	110,3	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	1,000	<b>1,000</b>
64	40,6	-	0,813	-	<b>0,813</b>	-	0,187	-	-	-	<b>0,187</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
65	32,5	1,000	-	-	<b>1,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
66	176,1	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	1,000	<b>1,000</b>
67	28,1	1,000	-	-	<b>1,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
68	57,6	-	0,248	-	<b>0,248</b>	-	0,752	-	-	-	<b>0,752</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
69	32,5	1,000	-	-	<b>1,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
70	19,9	1,000	-	-	<b>1,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
71	40,6	-	0,813	-	<b>0,813</b>	-	0,187	-	-	-	<b>0,187</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
72	44,7	-	0,677	-	<b>0,677</b>	-	0,323	-	-	-	<b>0,323</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
73	50,9	-	0,469	-	<b>0,469</b>	-	0,531	-	-	-	<b>0,531</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>

74	44,4	-	0,687	-	<b>0,687</b>	-	0,313	-	-	-	<b>0,313</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
75	22,2	1,000	-	-	<b>1,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
76	53,8	-	0,373	-	<b>0,373</b>	-	0,627	-	-	-	<b>0,627</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
77	53,0	-	0,399	-	<b>0,399</b>	-	0,601	-	-	-	<b>0,601</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
78	29,5	1,000	-	-	<b>1,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
79	58,5	-	0,217	-	<b>0,217</b>	-	0,783	-	-	-	<b>0,783</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>
80	29,8	1,000	-	-	<b>1,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>

## ПРИЛОГ 7в

Мере припадности параметра ризика удаљеност до насеља

РБ	Удаљеност Насеље (m)	μ31			С31	μ32					С32	μ33					С33	μ34			С34
1	920	0,000	-	-	<b>0,000</b>	-	0,393	-	-	-	<b>0,393</b>	-	-	-	0,607	-	<b>0,607</b>	-	-	0,000	<b>0,000</b>
2	2800	-	-	1,000	<b>1,000</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	0,000	<b>0,000</b>
3	90	0,000	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	1,000	-	-	<b>1,000</b>
4	350	0,000	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	-	0,900	-	-	-	<b>0,900</b>	-	0,100	-	<b>0,100</b>
5	1574	-	0,074	-	<b>0,074</b>	-	-	-	0,926	-	<b>0,926</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	0,000	<b>0,000</b>
6	50	0,000	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	1,000	-	-	<b>1,000</b>
7	250	0,000	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	-	0,500	-	-	-	<b>0,500</b>	-	0,500	-	<b>0,500</b>
8	4040	-	-	1,000	<b>1,000</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	0,000	<b>0,000</b>
9	4040	-	-	1,000	<b>1,000</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	0,000	<b>0,000</b>
10	3869	-	-	1,000	<b>1,000</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	0,000	<b>0,000</b>
11	3869	-	-	1,000	<b>1,000</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	0,000	<b>0,000</b>
12	3178	-	-	1,000	<b>1,000</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	0,000	<b>0,000</b>
13	2027	-	0,527	-	<b>0,527</b>	-	-	-	0,473	-	<b>0,473</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	0,000	<b>0,000</b>
14	1671	-	0,171	-	<b>0,171</b>	-	-	-	0,829	-	<b>0,829</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	0,000	<b>0,000</b>
15	2534	-	-	1,000	<b>1,000</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	0,000	<b>0,000</b>
16	2534	-	-	1,000	<b>1,000</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	0,000	<b>0,000</b>
17	6303	-	-	1,000	<b>1,000</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	0,000	<b>0,000</b>
18	11180	-	-	1,000	<b>1,000</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	0,000	<b>0,000</b>
19	11180	-	-	1,000	<b>1,000</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	0,000	<b>0,000</b>
20	607	0,000	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	-	-	1,000	-	-	<b>1,000</b>	-	-	0,000	<b>0,000</b>
21	6850	-	-	1,000	<b>1,000</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	0,000	<b>0,000</b>
22	2640	-	-	1,000	<b>1,000</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	0,000	<b>0,000</b>
23	3000	-	-	1,000	<b>1,000</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	0,000	<b>0,000</b>
24	225	0,000	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	-	0,400	-	-	-	<b>0,400</b>	-	0,600	-	<b>0,600</b>
25	225	0,000	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	-	0,400	-	-	-	<b>0,400</b>	-	0,600	-	<b>0,600</b>
26	2841	-	-	1,000	<b>1,000</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	0,000	<b>0,000</b>
27	715	0,000	-	-	<b>0,000</b>	-	0,120	-	-	-	<b>0,120</b>	-	-	-	0,880	-	<b>0,880</b>	-	-	0,000	<b>0,000</b>
28	3815	-	-	1,000	<b>1,000</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	0,000	<b>0,000</b>
29	50	0,000	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	1,000	-	-	<b>1,000</b>
30	3122	-	-	1,000	<b>1,000</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	0,000	<b>0,000</b>
31	3000	-	-	1,000	<b>1,000</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	0,000	<b>0,000</b>
32	4004	-	-	1,000	<b>1,000</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	0,000	<b>0,000</b>

33	30	0,000	-	-	0,000	0,000	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	-	-	0,000	1,000	-	-	1,000
34	1550	-	0,050	-	0,050	-	-	-	0,950	-	0,950	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	0,000	0,000
35	10500	-	-	1,000	1,000	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	0,000	0,000
36	963	0,000	-	-	0,000	-	0,451	-	-	-	0,451	-	-	-	0,549	-	0,549	-	-	0,000	0,000
37	1270	0,000	-	-	0,000	-	0,860	-	-	-	0,860	-	-	-	0,140	-	0,140	-	-	0,000	0,000
38	2970	-	-	1,000	1,000	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	0,000	0,000
39	2680	-	-	1,000	1,000	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	0,000	0,000
40	2270	-	0,770	-	0,770	-	-	-	0,230	-	0,230	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	0,000	0,000
41	2270	-	0,770	-	0,770	-	-	-	0,230	-	0,230	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	0,000	0,000
42	2270	-	0,770	-	0,770	-	-	-	0,230	-	0,230	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	0,000	0,000
43	1811	-	0,311	-	0,311	-	-	-	0,689	-	0,689	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	0,000	0,000
44	2120	-	0,620	-	0,620	-	-	-	0,380	-	0,380	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	0,000	0,000
45	2110	-	0,610	-	0,610	-	-	-	0,390	-	0,390	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	0,000	0,000
46	100	0,000	-	-	0,000	0,000	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	-	-	0,000	1,000	-	-	1,000
47	4689	-	-	1,000	1,000	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	0,000	0,000
48	1811	-	0,311	-	0,311	-	-	-	0,689	-	0,689	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	0,000	0,000
49	430	0,000	-	-	0,000	0,000	-	-	-	-	0,000	-	-	1,000	-	-	1,000	-	-	0,000	0,000
50	1340	0,000	-	-	0,000	-	0,953	-	-	-	0,953	-	-	-	0,047	-	0,047	-	-	0,000	0,000
51	1627	-	0,127	-	0,127	-	-	-	0,873	-	0,873	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	0,000	0,000
52	4400	-	-	1,000	1,000	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	0,000	0,000
53	3900	-	-	1,000	1,000	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	0,000	0,000
54	516	0,000	-	-	0,000	0,000	-	-	-	-	0,000	-	-	1,000	-	-	1,000	-	-	0,000	0,000
55	595	0,000	-	-	0,000	0,000	-	-	-	-	0,000	-	-	1,000	-	-	1,000	-	-	0,000	0,000
56	679	0,000	-	-	0,000	-	0,072	-	-	-	0,072	-	-	-	0,928	-	0,928	-	-	0,000	0,000
57	773	0,000	-	-	0,000	-	0,197	-	-	-	0,197	-	-	-	0,803	-	0,803	-	-	0,000	0,000
58	907	0,000	-	-	0,000	-	0,376	-	-	-	0,376	-	-	-	0,624	-	0,624	-	-	0,000	0,000
59	100	0,000	-	-	0,000	0,000	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	-	-	0,000	1,000	-	-	1,000
60	1725	-	0,225	-	0,225	-	-	-	0,775	-	0,775	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	0,000	0,000
61	2115	-	0,615	-	0,615	-	-	-	0,385	-	0,385	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	0,000	0,000
62	1974	-	0,474	-	0,474	-	-	-	0,526	-	0,526	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	0,000	0,000
63	200	0,000	-	-	0,000	0,000	-	-	-	-	0,000	-	0,300	-	-	-	0,300	-	0,700	-	0,700
64	4700	-	-	1,000	1,000	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	0,000	0,000
65	1328	0,000	-	-	0,000	-	0,937	-	-	-	0,937	-	-	-	0,063	-	0,063	-	-	0,000	0,000
66	1444	0,000	-	-	0,000	-	-	1,000	-	-	1,000	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	0,000	0,000
67	1019	0,000	-	-	0,000	-	0,525	-	-	-	0,525	-	-	-	0,475	-	0,475	-	-	0,000	0,000
68	680	0,000	-	-	0,000	-	0,073	-	-	-	0,073	-	-	-	0,927	-	0,927	-	-	0,000	0,000
69	934	0,000	-	-	0,000	-	0,412	-	-	-	0,412	-	-	-	0,588	-	0,588	-	-	0,000	0,000
70	1502	-	0,002	-	0,002	-	-	-	0,998	-	0,998	-	-	-	-	0,000	0,000	-	-	0,000	0,000
71	895	0,000	-	-	0,000	-	0,360	-	-	-	0,360	-	-	-	0,640	-	0,640	-	-	0,000	0,000

72	<b>1135</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>	-	0,680	-	-	-	<b>0,680</b>	-	-	-	0,320	-	<b>0,320</b>	-	-	0,000	<b>0,000</b>
73	<b>300</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	-	0,700	-	-	-	<b>0,700</b>	-	0,300	-	<b>0,300</b>
74	<b>683</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>	-	0,077	-	-	-	<b>0,077</b>	-	-	-	0,923	-	<b>0,923</b>	-	-	0,000	<b>0,000</b>
75	<b>725</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>	-	0,133	-	-	-	<b>0,133</b>	-	-	-	0,867	-	<b>0,867</b>	-	-	0,000	<b>0,000</b>
76	<b>620</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	-	-	1,000	-	-	<b>1,000</b>	-	-	0,000	<b>0,000</b>
77	<b>2519</b>	-	-	1,000	<b>1,000</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	-	-	0,000	<b>0,000</b>	-	-	0,000	<b>0,000</b>
78	<b>1230</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>	-	0,807	-	-	-	<b>0,807</b>	-	-	-	0,193	-	<b>0,193</b>	-	-	0,000	<b>0,000</b>
79	<b>50</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	1,000	-	-	<b>1,000</b>
80	<b>350</b>	0,000	-	-	<b>0,000</b>	0,000	-	-	-	-	<b>0,000</b>	-	0,900	-	-	-	<b>0,900</b>	-	0,100	-	<b>0,100</b>



**ПРИЛОГ 7г**

Мере припадности параметра ризика удаљеност до заштићеног подручја

РБ	Удаљеност Заштићено подручје (m)	μ41			C41	μ42					C42	μ43					C43	μ44			C44
1	2800	0	-	-	0,000	-	0,4	-	-	-	0,400	-	-	-	0,6	-	0,600	-	-	0	0,000
2	12400	-	0,843	-	0,843	-	-	-	0,157	-	0,157	-	-	-	-	0	0,000	-	-	0	0,000
3	14000	-	-	1	1,000	-	-	-	-	0	0,000	-	-	-	-	0	0,000	-	-	0	0,000
4	19000	-	-	1	1,000	-	-	-	-	0	0,000	-	-	-	-	0	0,000	-	-	0	0,000
5	11000	-	0,643	-	0,643	-	-	-	0,357	-	0,357	-	-	-	-	0	0,000	-	-	0	0,000
6	5300	0	-	-	0,000	-	-	1	-	-	1,000	-	-	-	-	0	0,000	-	-	0	0,000
7	5300	0	-	-	0,000	-	-	1	-	-	1,000	-	-	-	-	0	0,000	-	-	0	0,000
8	14300	-	-	1	1,000	-	-	-	-	0	0,000	-	-	-	-	0	0,000	-	-	0	0,000
9	14300	-	-	1	1,000	-	-	-	-	0	0,000	-	-	-	-	0	0,000	-	-	0	0,000
10	14300	-	-	1	1,000	-	-	-	-	0	0,000	-	-	-	-	0	0,000	-	-	0	0,000
11	14300	-	-	1	1,000	-	-	-	-	0	0,000	-	-	-	-	0	0,000	-	-	0	0,000
12	15300	-	-	1	1,000	-	-	-	-	0	0,000	-	-	-	-	0	0,000	-	-	0	0,000
13	10450	-	0,564	-	0,564	-	-	-	0,436	-	0,436	-	-	-	-	0	0,000	-	-	0	0,000
14	13900	-	-	1	1,000	-	-	-	-	0	0,000	-	-	-	-	0	0,000	-	-	0	0,000
15	16000	-	-	1	1,000	-	-	-	-	0	0,000	-	-	-	-	0	0,000	-	-	0	0,000
16	16000	-	-	1	1,000	-	-	-	-	0	0,000	-	-	-	-	0	0,000	-	-	0	0,000
17	7850	-	0,193	-	0,193	-	-	-	0,807	-	0,807	-	-	-	-	0	0,000	-	-	0	0,000
18	11700	-	0,743	-	0,743	-	-	-	0,257	-	0,257	-	-	-	-	0	0,000	-	-	0	0,000
19	11700	-	0,743	-	0,743	-	-	-	0,257	-	0,257	-	-	-	-	0	0,000	-	-	0	0,000
20	670	0	-	-	0,000	0	-	-	-	-	0,000	0	0,17	-	-	-	0,170	-	0,83	-	0,830
21	8750	-	0,321	-	0,321	-	-	-	0,679	-	0,679	-	-	-	-	0	0,000	-	-	0	0,000
22	7000	-	0,071	-	0,071	-	-	-	0,929	-	0,929	-	-	-	-	0	0,000	-	-	0	0,000
23	0	0	-	-	0,000	0	-	-	-	-	0,000	0	-	-	-	-	0,000	1	-	-	1,000
24	0	0	-	-	0,000	0	-	-	-	-	0,000	0	-	-	-	-	0,000	1	-	-	1,000
25	0	0	-	-	0,000	0	-	-	-	-	0,000	0	-	-	-	-	0,000	1	-	-	1,000
26	16700	-	-	1	1,000	-	-	-	-	0	0,000	-	-	-	-	0	0,000	-	-	0	0,000
27	18700	-	-	1	1,000	-	-	-	-	0	0,000	-	-	-	-	0	0,000	-	-	0	0,000
28	13700	-	-	1	1,000	-	-	-	-	0	0,000	-	-	-	-	0	0,000	-	-	0	0,000
29	10000	-	0,5	-	0,500	-	-	-	0,5	-	0,500	-	-	-	-	0	0,000	-	-	0	0,000
30	6130	0	-	-	0,000	-	-	1	-	-	1,000	-	-	-	-	0	0,000	-	-	0	0,000
31	12500	-	0,857	-	0,857	-	-	-	0,143	-	0,143	-	-	-	-	0	0,000	-	-	0	0,000
32	14300	-	-	1	1,000	-	-	-	-	0	0,000	-	-	-	-	0	0,000	-	-	0	0,000

33	3140	0	-	-	0,000	-	0,57	-	-	-	0,570	-	-	-	0,43	-	0,430	-	-	0	0,000
34	5250	0	-	-	0,000	-	-	1	-	-	1,000	-	-	-	-	0	0,000	-	-	0	0,000
35	4100	0	-	-	0,000	-	-	1	-	-	1,000	-	-	-	-	0	0,000	-	-	0	0,000
36	21000	-	-	1	1,000	-	-	-	-	0	0,000	-	-	-	-	0	0,000	-	-	0	0,000
37	21000	-	-	1	1,000	-	-	-	-	0	0,000	-	-	-	-	0	0,000	-	-	0	0,000
38	0	0	-	-	0,000	0	-	-	-	-	0,000	0	-	-	-	-	0,000	1	-	-	1,000
39	0	0	-	-	0,000	0	-	-	-	-	0,000	0	-	-	-	-	0,000	1	-	-	1,000
40	25	0	-	-	0,000	0	-	-	-	-	0,000	0	-	-	-	-	0,000	1	-	-	1,000
41	20	0	-	-	0,000	0	-	-	-	-	0,000	0	-	-	-	-	0,000	1	-	-	1,000
42	80	0	-	-	0,000	0	-	-	-	-	0,000	0	-	-	-	-	0,000	1	-	-	1,000
43	6900	-	0,057	-	0,057	-	-	-	0,943	-	0,943	-	-	-	-	0	0,000	-	-	0	0,000
44	0	0	-	-	0,000	0	-	-	-	-	0,000	0	-	-	-	-	0,000	1	-	-	1,000
45	0	0	-	-	0,000	0	-	-	-	-	0,000	0	-	-	-	-	0,000	1	-	-	1,000
46	0	0	-	-	0,000	0	-	-	-	-	0,000	0	-	-	-	-	0,000	1	-	-	1,000
47	0	0	-	-	0,000	0	-	-	-	-	0,000	0	-	-	-	-	0,000	1	-	-	1,000
48	27500	-	-	1	1,000	-	-	-	-	0	0,000	-	-	-	-	0	0,000	-	-	0	0,000
49	3360	0	-	-	0,000	-	0,68	-	-	-	0,680	-	-	-	0,32	-	0,320	-	-	0	0,000
50	1640	0	-	-	0,000	0	-	-	-	-	0,000	-	-	1	-	-	1,000	-	-	0	0,000
51	13600	-	-	1	1,000	-	-	-	-	0	0,000	-	-	-	-	0	0,000	-	-	0	0,000
52	375	0	-	-	0,000	0	-	-	-	-	0,000	0	-	-	-	-	0,000	1	-	-	1,000
53	930	0	-	-	0,000	0	-	-	-	-	0,000	-	0,43	-	-	-	0,430	-	0,57	-	0,570
54	6800	-	0,043	-	0,043	-	-	-	0,957	-	0,957	-	-	-	-	0	0,000	-	-	0	0,000
55	6800	-	0,043	-	0,043	-	-	-	0,957	-	0,957	-	-	-	-	0	0,000	-	-	0	0,000
56	6800	-	0,043	-	0,043	-	-	-	0,957	-	0,957	-	-	-	-	0	0,000	-	-	0	0,000
57	7500	-	0,143	-	0,143	-	-	-	0,857	-	0,857	-	-	-	-	0	0,000	-	-	0	0,000
58	4380	0	-	-	0,000	-	-	1	-	-	1,000	-	-	-	-	0	0,000	-	-	0	0,000
59	5000	0	-	-	0,000	-	-	1	-	-	1,000	-	-	-	-	0	0,000	-	-	0	0,000
60	9000	-	0,357	-	0,357	-	-	-	0,643	-	0,643	-	-	-	-	0	0,000	-	-	0	0,000
61	5150	0	-	-	0,000	-	-	1	-	-	1,000	-	-	-	-	0	0,000	-	-	0	0,000
62	5100	0	-	-	0,000	-	-	1	-	-	1,000	-	-	-	-	0	0,000	-	-	0	0,000
63	4900	0	-	-	0,000	-	-	1	-	-	1,000	-	-	-	-	0	0,000	-	-	0	0,000
64	5600	0	-	-	0,000	-	-	1	-	-	1,000	-	-	-	-	0	0,000	-	-	0	0,000
65	5000	0	-	-	0,000	-	-	1	-	-	1,000	-	-	-	-	0	0,000	-	-	0	0,000
66	4130	0	-	-	0,000	-	-	1	-	-	1,000	-	-	-	-	0	0,000	-	-	0	0,000
67	5000	0	-	-	0,000	-	-	1	-	-	1,000	-	-	-	-	0	0,000	-	-	0	0,000
68	1300	0	-	-	0,000	0	-	-	-	-	0,000	-	0,8	-	-	-	0,800	-	0,2	-	0,200
69	7420	-	0,131	-	0,131	-	-	-	0,869	-	0,869	-	-	-	-	0	0,000	-	-	0	0,000
70	890	0	-	-	0,000	0	-	-	-	-	0,000	-	0,39	-	-	-	0,390	-	0,61	-	0,610
71	0	0	-	-	0,000	0	-	-	-	-	0,000	0	-	-	-	-	0,000	1	-	-	1,000

72	7000	-	0,071	-	0,071	-	-	-	0,929	-	0,929	-	-	-	-	0	0,000	-	-	0	0,000
73	16370	-	-	1	1,000	-	-	-	-	0	0,000	-	-	-	-	0	0,000	-	-	0	0,000
74	4700	0	-	-	0,000	-	-	1	-	-	1,000	-	-	-	-	0	0,000	-	-	0	0,000
75	2700	0	-	-	0,000	-	0,35	-	-	-	0,350	-	-	-	0,65	-	0,650	-	-	0	0,000
76	5000	0	-	-	0,000	-	-	1	-	-	1,000	-	-	-	-	0	0,000	-	-	0	0,000
77	18000	-	-	1	1,000	-	-	-	-	0	0,000	-	-	-	-	0	0,000	-	-	0	0,000
78	950	0	-	-	0,000	0	-	-	-	-	0,000	-	0,45	-	-	-	0,450	-	0,55	-	0,550
79	6570	-	0,01	-	0,010	-	-	-	0,99	-	0,990	-	-	-	-	0	0,000	-	-	0	0,000
80	10600	-	0,586	-	0,586	-	-	-	0,414	-	0,414	-	-	-	-	0	0,000	-	-	0	0,000

## ПРИЛОГ 8

Мере припадности синтезног индекса извојеним класама ризика

РБ	C11	C21	C31	C41	C1	C12	C22	C32	C42	C2	C13	C23	C33	C43	C3	C14	C24	C34	C44	C4
1	0	0	0	0	<b>0</b>	0	0	0,393	0,4	<b>0,154</b>	0	0,093	0,607	0,6	<b>0,275</b>	1	0,907	0	0	<b>0,571</b>
2	1	0,659	1	0,843	<b>0,839</b>	0	0,341	0	0,157	<b>0,161</b>	0	0	0	0	<b>0</b>	0	0	0	0	<b>0</b>
3	0	1	0	1	<b>0,538</b>	0,752	0	0	0	<b>0,145</b>	0,248	0	0	0	<b>0,048</b>	0	0	1	0	<b>0,269</b>
4	0,876	0,023	0	1	<b>0,300</b>	0,124	0,977	0	0	<b>0,431</b>	0	0	0,9	0	<b>0,242</b>	0	0	0,1	0	<b>0,027</b>
5	1	1	0,074	0,643	<b>0,708</b>	0	0	0,926	0,357	<b>0,292</b>	0	0	0	0	<b>0</b>	0	0	0	0	<b>0</b>
6	0	0	0	0	<b>0</b>	0	0	0	1	<b>0,121</b>	0,713	0,985	0	0	<b>0,548</b>	0,287	0,015	1	0	<b>0,331</b>
7	0	0	0	0	<b>0</b>	0	1	0	1	<b>0,538</b>	0,477	0	0,5	0	<b>0,227</b>	0,523	0	0,5	0	<b>0,235</b>
8	0,440	0	1	1	<b>0,475</b>	0,56	0,678	0	0	<b>0,391</b>	0	0,322	0	0	<b>0,134</b>	0	0	0	0	<b>0</b>
9	0,440	0	1	1	<b>0,475</b>	0,56	0,678	0	0	<b>0,391</b>	0	0,322	0	0	<b>0,134</b>	0	0	0	0	<b>0</b>
10	0,440	0	1	1	<b>0,475</b>	0,56	0	0	0	<b>0,108</b>	0	0,488	0	0	<b>0,204</b>	0	0,512	0	0	<b>0,213</b>
11	0,440	0	1	1	<b>0,475</b>	0,56	0	0	0	<b>0,108</b>	0	0,488	0	0	<b>0,204</b>	0	0,512	0	0	<b>0,213</b>
12	0,847	0	1	1	<b>0,554</b>	0,153	0	0	0	<b>0,029</b>	0	0,199	0	0	<b>0,083</b>	0	0,801	0	0	<b>0,334</b>
13	1	0	0,527	0,564	<b>0,403</b>	0	0,537	0,473	0,436	<b>0,404</b>	0	0,463	0	0	<b>0,193</b>	0	0	0	0	<b>0</b>
14	0,738	0	0,171	1	<b>0,309</b>	0,262	0,278	0,829	0	<b>0,39</b>	0	0,722	0	0	<b>0,301</b>	0	0	0	0	<b>0</b>
15	0,556	0	1	1	<b>0,497</b>	0,444	0,038	0	0	<b>0,101</b>	0	0,962	0	0	<b>0,401</b>	0	0	0	0	<b>0</b>
16	0,367	0	1	1	<b>0,461</b>	0,633	0	0	0	<b>0,122</b>	0	0	0	0	<b>0</b>	0	1	0	0	<b>0,417</b>
17	1	1	1	0,193	<b>0,902</b>	0	0	0	0,807	<b>0,098</b>	0	0	0	0	<b>0</b>	0	0	0	0	<b>0</b>
18	1	0,732	1	0,743	<b>0,857</b>	0	0,268	0	0,257	<b>0,143</b>	0	0	0	0	<b>0</b>	0	0	0	0	<b>0</b>
19	1	0,015	1	0,743	<b>0,558</b>	0	0,985	0	0,257	<b>0,442</b>	0	0	0	0	<b>0</b>	0	0	0	0	<b>0</b>
20	0	1	0	0	<b>0,417</b>	1	0	0	0	<b>0,193</b>	0	0	1	0,17	<b>0,29</b>	0	0	0	0,83	<b>0,1</b>
21	0	0,761	1	0,321	<b>0,625</b>	0,637	0,239	0	0,679	<b>0,305</b>	0,363	0	0	0	<b>0,07</b>	0	0	0	0	<b>0</b>
22	0,886	1	1	0,071	<b>0,866</b>	0,114	0	0	0,929	<b>0,134</b>	0	0	0	0	<b>0</b>	0	0	0	0	<b>0</b>
23	1	0,732	1	0	<b>0,767</b>	0	0,268	0	0	<b>0,112</b>	0	0	0	0	<b>0</b>	0	0	0	1	<b>0,121</b>
24	0	0,65	0	0	<b>0,271</b>	0,777	0,35	0	0	<b>0,296</b>	0,223	0	0,4	0	<b>0,151</b>	0	0	0,6	1	<b>0,282</b>

25	0	0,65	0	0	<b>0,271</b>	0,777	0,35	0	0	<b>0,296</b>	0,223	0	0,4	0	<b>0,151</b>	0	0	0,6	1	<b>0,282</b>
26	0,969	0,181	1	1	<b>0,652</b>	0,031	0,819	0	0	<b>0,348</b>	0	0	0	0	<b>0</b>	0	0	0	0	<b>0</b>
27	1	1	0	1	<b>0,731</b>	0	0	0,12	0	<b>0,032</b>	0	0	0,88	0	<b>0,237</b>	0	0	0	0	<b>0</b>
28	1	0	1	1	<b>0,583</b>	0	0,537	0	0	<b>0,224</b>	0	0,463	0	0	<b>0,193</b>	0	0	0	0	<b>0</b>
29	1	0,37	0	0,5	<b>0,408</b>	0	0,63	0	0,5	<b>0,323</b>	0	0	0	0	<b>0</b>	0	0	1	0	<b>0,269</b>
30	1	0,301	1	0	<b>0,587</b>	0	0,699	0	1	<b>0,413</b>	0	0	0	0	<b>0</b>	0	0	0	0	<b>0</b>
31	1	0,677	1	0,857	<b>0,848</b>	0	0,323	0	0,143	<b>0,152</b>	0	0	0	0	<b>0</b>	0	0	0	0	<b>0</b>
32	0,807	0	1	1	<b>0,546</b>	0,193	0	0	0	<b>0,037</b>	0	0,488	0	0	<b>0,204</b>	0	0,512	0	0	<b>0,213</b>
33	1	0,727	0	0	<b>0,496</b>	0	0,273	0	0,57	<b>0,183</b>	0	0	0	0,43	<b>0,052</b>	0	0	1	0	<b>0,269</b>
34	0	0,007	0,05	0	<b>0,016</b>	0,98	0,993	0,95	1	<b>0,98</b>	0,020	0	0	0	<b>0,004</b>	0	0	0	0	<b>0</b>
35	0,906	0	1	0	<b>0,444</b>	0,094	0,133	0	1	<b>0,195</b>	0	0,867	0	0	<b>0,361</b>	0	0	0	0	<b>0</b>
36	0,933	0,37	0	1	<b>0,455</b>	0,067	0,63	0,451	0	<b>0,397</b>	0	0	0,549	0	<b>0,148</b>	0	0	0	0	<b>0</b>
37	0,933	0,37	0	1	<b>0,455</b>	0,067	0,63	0,86	0	<b>0,507</b>	0	0	0,14	0	<b>0,038</b>	0	0	0	0	<b>0</b>
38	0,761	0,672	1	0	<b>0,696</b>	0,239	0,328	0	0	<b>0,183</b>	0	0	0	0	<b>0</b>	0	0	0	1	<b>0,121</b>
39	0,761	0,007	1	0	<b>0,419</b>	0,239	0,993	0	0	<b>0,46</b>	0	0	0	0	<b>0</b>	0	0	0	1	<b>0,121</b>
40	0,933	0,37	0,77	0	<b>0,541</b>	0,067	0,63	0,23	0	<b>0,338</b>	0	0	0	0	<b>0</b>	0	0	0	1	<b>0,121</b>
41	0,933	0,37	0,77	0	<b>0,541</b>	0,067	0,63	0,23	0	<b>0,338</b>	0	0	0	0	<b>0</b>	0	0	0	1	<b>0,121</b>
42	0,933	0,37	0,77	0	<b>0,541</b>	0,067	0,63	0,23	0	<b>0,338</b>	0	0	0	0	<b>0</b>	0	0	0	1	<b>0,121</b>
43	1	0	0,311	0,057	<b>0,284</b>	0	0	0,689	0,943	<b>0,299</b>	0	0,765	0	0	<b>0,319</b>	0	0,235	0	0	<b>0,098</b>
44	1	0,813	0,62	0	<b>0,699</b>	0	0,187	0,38	0	<b>0,18</b>	0	0	0	0	<b>0</b>	0	0	0	1	<b>0,121</b>
45	1	0,501	0,61	0	<b>0,566</b>	0	0,499	0,39	0	<b>0,313</b>	0	0	0	0	<b>0</b>	0	0	0	1	<b>0,121</b>
46	0,975	0	0	0	<b>0,188</b>	0,025	0	0	0	<b>0,005</b>	0	0,431	0	0	<b>0,18</b>	0	0,569	1	1	<b>0,627</b>
47	0,645	0,385	1	0	<b>0,554</b>	0,355	0,615	0	0	<b>0,325</b>	0	0	0	0	<b>0</b>	0	0	0	1	<b>0,121</b>
48	0,645	0	0,311	1	<b>0,329</b>	0,355	0	0,689	0	<b>0,254</b>	0	0,497	0	0	<b>0,207</b>	0	0,503	0	0	<b>0,21</b>
49	0,139	0	0	0	<b>0,027</b>	0,861	0	0	0,68	<b>0,248</b>	0	0	1	0,32	<b>0,308</b>	0	1	0	0	<b>0,417</b>
50	0,453	0	0	0	<b>0,087</b>	0,547	0,278	0,953	0	<b>0,478</b>	0	0,722	0,047	1	<b>0,434</b>	0	0	0	0	<b>0</b>
51	0,933	0	0,127	1	<b>0,335</b>	0,067	0	0,873	0	<b>0,248</b>	0	0,199	0	0	<b>0,083</b>	0	0,801	0	0	<b>0,334</b>
52	0,933	0,301	1	0	<b>0,574</b>	0,067	0,699	0	0	<b>0,305</b>	0	0	0	0	<b>0</b>	0	0	0	1	<b>0,121</b>

53	0,933	0	1	0	<b>0,449</b>	0,067	0,443	0	0	<b>0,198</b>	0	0,557	0	0,43	<b>0,284</b>	0	0	0	0,57	<b>0,069</b>
54	1	0,677	0	0,043	<b>0,481</b>	0	0,323	0	0,957	<b>0,25</b>	0	0	1	0	<b>0,269</b>	0	0	0	0	<b>0</b>
55	1	0,015	0	0,043	<b>0,205</b>	0	0,985	0	0,957	<b>0,526</b>	0	0	1	0	<b>0,269</b>	0	0	0	0	<b>0</b>
56	1	0,015	0	0,043	<b>0,205</b>	0	0,985	0,072	0,957	<b>0,546</b>	0	0	0,928	0	<b>0,25</b>	0	0	0	0	<b>0</b>
57	1	0,677	0	0,143	<b>0,493</b>	0	0,323	0,197	0,857	<b>0,291</b>	0	0	0,803	0	<b>0,216</b>	0	0	0	0	<b>0</b>
58	1	0,015	0	0	<b>0,199</b>	0	0,985	0,376	1	<b>0,633</b>	0	0	0,624	0	<b>0,168</b>	0	0	0	0	<b>0</b>
59	0,933	0	0	0	<b>0,180</b>	0,067	0,443	0	1	<b>0,319</b>	0	0,557	0	0	<b>0,232</b>	0	0	1	0	<b>0,269</b>
60	0	0,628	0,225	0,357	<b>0,366</b>	0,705	0,372	0,775	0,643	<b>0,577</b>	0,295	0	0	0	<b>0,057</b>	0	0	0	0	<b>0</b>
61	0,221	0	0,615	0	<b>0,208</b>	0,779	0,358	0,385	1	<b>0,524</b>	0	0,642	0	0	<b>0,268</b>	0	0	0	0	<b>0</b>
62	0,437	0	0,474	0	<b>0,212</b>	0,563	1	0,526	1	<b>0,788</b>	0	0	0	0	<b>0</b>	0	0	0	0	<b>0</b>
63	0	0	0	0	<b>0</b>	0	0	0	1	<b>0,121</b>	0	0	0,3	0	<b>0,081</b>	1	1	0,7	0	<b>0,798</b>
64	1	0,813	1	0	<b>0,801</b>	0	0,187	0	1	<b>0,199</b>	0	0	0	0	<b>0</b>	0	0	0	0	<b>0</b>
65	0,896	1	0	0	<b>0,590</b>	0,104	0	0,937	1	<b>0,393</b>	0	0	0,063	0	<b>0,017</b>	0	0	0	0	<b>0</b>
66	0,025	0	0	0	<b>0,005</b>	0,975	0	1	1	<b>0,578</b>	0	0	0	0	<b>0</b>	0	1	0	0	<b>0,417</b>
67	0,886	1	0	0	<b>0,588</b>	0,114	0	0,525	1	<b>0,284</b>	0	0	0,475	0	<b>0,128</b>	0	0	0	0	<b>0</b>
68	0,404	0,248	0	0	<b>0,181</b>	0,596	0,752	0,073	0	<b>0,448</b>	0	0	0,927	0,8	<b>0,346</b>	0	0	0	0,2	<b>0,024</b>
69	0,747	1	0	0,131	<b>0,577</b>	0,253	0	0,412	0,869	<b>0,265</b>	0	0	0,588	0	<b>0,158</b>	0	0	0	0	<b>0</b>
70	1	1	0,002	0	<b>0,611</b>	0	0	0,998	0	<b>0,268</b>	0	0	0	0,39	<b>0,047</b>	0	0	0	0,61	<b>0,074</b>
71	0	0,813	0	0	<b>0,339</b>	0,637	0,187	0,36	0	<b>0,298</b>	0,363	0	0,64	0	<b>0,242</b>	0	0	0	1	<b>0,121</b>
72	0	0,677	0	0,071	<b>0,291</b>	0,486	0,323	0,68	0,929	<b>0,524</b>	0,514	0	0,32	0	<b>0,185</b>	0	0	0	0	<b>0</b>
73	0,330	0,469	0	1	<b>0,380</b>	0,67	0,531	0	0	<b>0,351</b>	0	0	0,7	0	<b>0,188</b>	0	0	0,3	0	<b>0,081</b>
74	1	0,687	0	0	<b>0,479</b>	0	0,313	0,077	1	<b>0,272</b>	0	0	0,923	0	<b>0,248</b>	0	0	0	0	<b>0</b>
75	1	1	0	0	<b>0,610</b>	0	0	0,133	0,35	<b>0,078</b>	0	0	0,867	0,65	<b>0,312</b>	0	0	0	0	<b>0</b>
76	1	0,373	0	0	<b>0,349</b>	0	0,627	0	1	<b>0,382</b>	0	0	1	0	<b>0,269</b>	0	0	0	0	<b>0</b>
77	0,937	0,399	1	1	<b>0,737</b>	0,063	0,601	0	0	<b>0,263</b>	0	0	0	0	<b>0</b>	0	0	0	0	<b>0</b>
78	0,937	1	0	0	<b>0,598</b>	0,063	0	0,807	0	<b>0,229</b>	0	0	0,193	0,45	<b>0,106</b>	0	0	0	0,55	<b>0,067</b>
79	0	0,217	0	0,01	<b>0,092</b>	0	0,783	0	0,99	<b>0,446</b>	0	0	0	0	<b>0</b>	1	0	1	0	<b>0,462</b>
80	0,8324	1	0	0,586	<b>0,649</b>	0,168	0	0	0,414	<b>0,082</b>	0	0	0,9	0	<b>0,242</b>	0	0	0,1	0	<b>0,027</b>

## ПРИЛОГ 9

Класе укупног ризика (интервал поверења 0,6)

РБ	Назив	С1	С2	С3	С4	Класа ризика	РБ	Назив	С1	С2	С3	С4	Класа ризика
1	Свети Ђорђе	0	0,154	0,275	0,571	4	41	Ђавоља Варош 2	0,541	0,338	0	0,121	2
2	Влашко Поље	0,839	0,161	0	0	1	42	Ђавоља Варош 4	0,541	0,338	0	0,121	2
3	Подвис	0,538	0,145	0,048	0,269	2	43	Подвирови	0,284	0,299	0,319	0,098	3
4	Добра Срећа	0,300	0,431	0,242	0,027	2	44	Гвоздац-1	0,699	0,180	0	0,121	1
5	Аликсар	0,708	0,292	0	0	1	45	Гвоздац-2	0,566	0,313	0	0,121	2
6	Јужни поткоп	0	0,121	0,548	0,331	3	46	Суво Рудиште	0,188	0,005	0,180	0,627	4
7	Северни поткоп	0	0,538	0,227	0,235	3	47	Крчмар вода	0,554	0,325	0	0,121	2
8	Липа	0,475	0,391	0,134	0	2	48	Каравасанлија	0,329	0,254	0,207	0,210	3
9	Липа	0,475	0,391	0,134	0	2	49	Кижевак	0,027	0,248	0,308	0,417	4
10	Липа	0,475	0,108	0,204	0,213	3	50	Саставци	0,087	0,478	0,434	0	3
11	Липа	0,475	0,108	0,204	0,213	3	51	Липница	0,335	0,248	0,083	0,334	3
12	Купиново	0,554	0,029	0,083	0,334	3	52	Бањска Река-1	0,574	0,305	0	0,121	2
13	Думитри поток	0,403	0,404	0,193	0	2	53	Бањска Река-2	0,449	0,198	0,284	0,069	2
14	Чока Куруга	0,309	0,390	0,301	0	2	54	Црвени Брег 1	0,481	0,250	0,269	0	2
15	Церова – цементација 1	0,497	0,101	0,401	0	3	55	Црвени Брег 2	0,205	0,526	0,269	0	2
16	Церова – цементација 1	0,461	0,122	0	0,417	4	56	Црвени Брег 3	0,205	0,546	0,250	0	2
17	Света барбара	0,902	0,098	0	0	1	57	Пиште	0,493	0,291	0,216	0	2

18	Грабова река	0,857	0,143	0	0	1	58	Мала река 1	0,199	0,633	0,168	0	2
19	Грабова река	0,558	0,442	0	0	2	59	Мала река 2	0,180	0,319	0,232	0,269	3
20	Илијин Гроб	0,417	0,193	0,290	0,100	2	60	Тисовик	0,366	0,577	0,057	0	2
21	Ваља Сака	0,625	0,305	0,070	0	1	61	Бобија	0,208	0,524	0,268	0	2
22	Чока Марин	0,866	0,134	0	0	1	62	Бобија	0,212	0,788	0	0	2
23	Мездреја	0,767	0,112	0	0,121	1	63	Столице	0	0,121	0,081	0,798	4
24	Габровница	0,271	0,296	0,151	0,282	3	64	Рујевац	0,801	0,199	0	0	1
25	Габровница	0,271	0,296	0,151	0,282	3	65	Туринаска јама	0,590	0,393	0,017	0	2
26	Латово	0,652	0,348	0	0	1	66	Велики Мајдан	0,005	0,578	0	0,417	4
27	Русман	0,731	0,032	0,237	0	1	67	Црвени Брег	0,588	0,284	0,128	0	2
28	Гиндуша	0,583	0,224	0,193	0	2	68	Шупља Стена	0,181	0,448	0,346	0,024	2
29	Брестовац	0,408	0,323	0	0,269	2	69	Бабе	0,577	0,265	0,158	0	2
30	Чока Марин	0,587	0,413	0	0	2	70	Аљин Дол	0,611	0,268	0,047	0,074	1
31	Марков Камен	0,848	0,152	0	0	1	71	Постењски поток	0,339	0,298	0,242	0,121	2
32	Липа	0,546	0,037	0,204	0,213	3	72	Ребељ	0,291	0,524	0,185	0	2
33	Ракита	0,496	0,183	0,052	0,269	2	73	Равнаја	0,380	0,351	0,188	0,081	2
34	Козарнички поток	0,016	0,980	0,004	0	2	74	Побрђе	0,479	0,272	0,248	0	2
35	Мачкатица	0,444	0,195	0,361	0	2	75	Борна вода	0,610	0,078	0,312	0	1
36	БТ-1	0,455	0,397	0,148	0	2	76	Бела Стена	0,349	0,382	0,269	0	2
37	БТ-3	0,455	0,507	0,038	0	2	77	Лиска	0,737	0,263	0	0	1
38	Ђавоља вода	0,696	0,183	0	0,121	1	78	Брвеница	0,598	0,229	0,106	0,067	2
39	Б-1	0,419	0,460	0	0,121	2	79	Јарандол	0,092	0,446	0	0,462	4
40	Ђавоља Варош 1	0,541	0,338	0	0,121	2	80	Претурица	0,649	0,082	0,242	0,027	1



## БИОГРАФИЈА АУТОРА

Небојша Атанацковић рођен је 15. 10. 1983. године у Београду, у коме и завршава V београдску гимназију, природно-математички смер. Рударско-геолошки факултет, Универзитета у Београду уписује 2002. године. Смер за Хидрогеологију и основне студије завршава 2008. године са просечном оценом 8,13 и оценом 10 на дипломском испиту. Докторске студије на Рударско-геолошком факултету, Универзитета у Београду, уписује 2010. године. У склопу похађања докторских студија испуњава све обавезе предвиђене програмом студијског програма Хидрогеологија, чиме стиче услова за израду докторске дисертације.

Радну каријеру започиње након основних студија као стручни сарадник на Департману за Хидрогеологију, Рударско-геолошког факултета, Универзитета у Београду, где и данас ради. Научно звање истраживач-сарадник стиче марта 2012. године. Упоредо са научно-истраживачким радом, кандидат учествује у изради и имплементацији више значајнијих пројеката и студија из области хидрогеологије лежиште минералних сировина, стичући неопходна искуства у раду према највишим светским стандардима у оквиру рударске индустрије.

Аутор је и коаутор више научних радова објављених у домаћим и иностраним часописима, од којих је четири са СЦИ листе. Међу овим радовима два обрађују проблематику из предмета докторске дисертације.

Небојша Атанацковић је члан следећих струковних организација: Међународне асоцијације хидрогеолога (ИАХ); Међународне асоцијације за рудничке воде (ИМВА); Српског геолошког друштва (СГД) и Инжењерске коморе Србије (ИКС).

## Изјава о ауторству

Име и презиме аутора Небојша Атанацковић

Број индекса Г804/2010

### Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

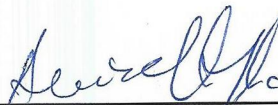
ПРОЦЕНА РИЗИКА ОД ЗАГАЂИВАЊА ВОДНИХ РЕСУРСА ПОД УТИЦАЈЕМ

НАПУШТЕНИХ РУДАРСКИХ РАДОВА НА ПРОСТОРУ СРБИЈЕ

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

Потпис аутора

У Београду, 02.03.2018.



## Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора \_\_\_Небојша Атанацковић\_\_\_\_\_

Број индекса \_\_\_Г804/2010\_\_\_\_\_

Студијски програм \_\_\_Хидрогеологија\_\_\_\_\_

Наслов рада \_Процена ризика од загађивања водних ресурса под утицајем  
напуштених рударских радова на простору Србије\_\_\_\_\_

Ментор \_др Веселин Драгишић, редовни професор\_\_\_\_\_

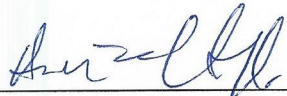
Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањена у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

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

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

**Потпис аутора**

У Београду, 02.03.2018.

  
\_\_\_\_\_

## Изјава о коришћењу

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

ПРОЦЕНА РИЗИКА ОД ЗАГАЂИВАЊА ВОДНИХ РЕСУРСА ПОД УТИЦАЈЕМ

НАПУШТЕНИХ РУДАРСКИХ РАДОВА НА ПРОСТОРУ СРБИЈЕ

која је моје ауторско дело.

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

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

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

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

Потпис аутора

У Београду, 02.03.2018.



1. **Ауторство.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. **Ауторство – некомерцијално – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. **Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. **Ауторство – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. **Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.