

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
ТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ У БОРУ

Ивица П. Николић

**МОДЕЛОВАЊЕ УТИЦАЈНИХ ПАРАМЕТАРА
ЗА РАНГИРАЊЕ ТЕХНОЛОШКИХ ПРОЦЕСА
ПИРОМЕТАЛУРШКЕ ЕКСТРАКЦИЈЕ БАКРА
ПРИМЕНОМ МЕТОДА
ВИШЕКРИТЕРИЈУМСКЕ АНАЛИЗЕ**

докторска дисертација

Бор, 2019

UNIVERSITY OF BELGRADE
TECHNICAL FACULTY IN BOR

Ivica P. Nikolić

**MODELING OF THE INFLUENTIAL
PARAMETERS FOR THE RANKING OF THE
TECHNOLOGICAL PROCESSES OF
PYROMETALURGICAL COPPER EXTRACTION BY
USING MULTIPLE-CRITERIA ANALYSIS**

Doctoral Dissertation

Bor, 2019

Комисија за преглед и одбрану:

Ментор: Проф. др Исидора Милошевић, ванредни професор
Универзитет у Београду, Технички факултет у Бору

Чланови Комисије: Проф. др Весна Спасојевић Бркић, редовни професор
Универзитет у Београду, Машински факултет

Проф. др. Иван Михајловић, редовни професор
Универзитет у Београду, Технички факултет у Бору

Датум одбране:

Изјаве захвалности

Неизмерну захвалност за одрађену докторску дисертацију дугујем својој менторки проф. др Исидори Милошевић, која ме је током израде ове докторске дисертације свакодневно подржавала и мотивисала, а такође својом стручношћу допринела њеном квалитету.

Тakoђе, подједнаку захвалност дугујем и изванредном професору др Ивану Михајловићу који ме је од првог дана мога ангажмана на Техничком факултету у Бору, својим саветима, идејама, предлозима, и несебичним ангажовањем усмеравао, подржавао и мотивисао како у реализацији саме докторске дисертације тако и за све резултате које сам до сада постигао.

Захвалност дугујем и свим својим професорима и колегама који су ми помагали током израде докторске дисертације.

На крају, али ништа мање важна и заслужна за мој успех је и моја породица којој дугујем огромну захвалност зато што је веровала у мене.

Моделовање утицајних параметара за рангирање технолошких процеса пирометалуршке екстракције бакра применом метода вишекритеријумске анализе

Извод

Ова докторска дисертација има за циљ формирање нумеричког модела за рангирање и селекцију комплексних технолошких процеса на основу њихових утицајних параметара. У полазним поглављима ове дисертације дата је анализа најзначајнијих литературних извора који су имали највећи утицај приликом њене израде, а такође се дефинише предмет и циљеви истраживања. Следећа поглавља се баве анализом теоријског значаја нумеричког моделовања као и применом код технолошких система. У наредном делу овог рада стављен је фокус на анализу и примену метода вишекритеријумског одлучивања где се кроз одговарајући литературни преглед сагледава примена ових метода на различите технолошке системе. Посебна пажња усмерена је на моделовање технолошких процеса за пирометалуршку екстракцију бакра и кроз посебно поглавље дат је опис најзначајнијих технолошких процеса као и карактеристика утицајних параметара. Након тога, применом методе вишекритеријумског одлучивања, засновано на PROMETHEE II методи, извршено је рангирање и селекција технолошких процеса за пирометалуршку екстракцију бакра, док је коришћењем АНР-TOPSIS методе извршена верификација добијеног модела. У завршном делу рада дата је примена овог модела на конкретним топионицама где су добијени конкретни закључци.

Резултат ове дисертације јесте развој вишекритеријумског модела којим се унапређује процес одлучивања у технолошким системима. Овај модел омогућава доносиоцима одлука да донесу информативне одлуке и постигну оптималне резултате у комплексним условима. Стога, овај модел пружа могућност одабира не најбољег технолошког процеса, већ оног који ће се најбоље применити у датим условима.

Кључне речи: Нумеричко моделовање, технолошки процеси, вишекритеријумско одлучивање

УДК: 519.8:669.3.053(043.3)

Ужа научна област: Инжењерски менаџмент

Modeling of the the influential parameters for the ranking of the technological processes of pyrometallurgical copper extraction by using multiple-criteria analysis

Abstract

This doctoral dissertation aims to form a numerical model for the ranking and selection of the complex technological processes based on their influential parameters. The main chapters of this dissertation provide an analysis of the most important literary sources that have had the greatest influence in its development, and define the subject and the objectives of the research. The following chapters deal with the analysis of the theoretical significance of numerical modeling, and the application of technological systems. In the next part of this paper, the focus was placed on the analysis and application of multicriterial decision-making methods, where the application of these methods to different technological systems is considered by means of the appropriate literature review. Particular attention is paid to the modeling of technological processes for pyrometallurgical copper extraction, where a special chapter provides a description of the most important technological processes, as well as of the characteristics of the influential parameters. Subsequently, by using the multi-criteria decision method based on the PROMETHEE II method, the ranking and the selection of the technological processes for pyrometallurgical copper extraction was carried out, and the verification of the obtained model was then performed using the AHP-TOPSIS method. In the final part of this paper, the application of this model was carried out in the particular smeltery, and specific conclusions were obtained.

The result of this disertation is the development of a multi-criteria model that improves the decision-making process in technological systems. This model allows the decision makers to make informative decisions and achieve optimum results in compex conditions. Therefore, this model offers the ability to choose not the best technological process, but the one that will be best applied in the given conditions.

Keywords: Numerical modeling, technological processes, multiple-criteria decision making

UDK: 519.8:669.3.053(043.3)

Narrow scientific field: Engineering management

САДРЖАЈ

1. УВОД	1
2. ЛИТЕРАТУРНИ ПРЕГЛЕД	5
3. ПРЕДМЕТ И ОПСЕГ ИСТРАЖИВАЊА	11
3.1. Предмет истраживања	11
3.2. Циљеви истраживања	12
3.3. Полазне хипотезе	12
4. НУМЕРИЧКА АНАЛИЗА И МОДЕЛОВАЊЕ	14
4.1. Нумеричка анализа	14
4.2. Моделовање	18
4.2.1. Нумеричко моделовање	19
4.2.2. Моделовање технолошких процеса	21
5. АНАЛИЗА И ПРИМЕНА МОДЕЛА ВИШЕКРИТЕРИЈУМСКЕ АНАЛИЗЕ У ОДЛУЧИВАЊУ	26
5.1. Примери примене модела вишекритеријумског одлучивања код технолошких система и процеса	31
6. ТЕХНОЛОШКИ ПОСТУПЦИ ПИРОМЕТАЛУРШКЕ ЕКСТРАКЦИЈЕ БАКРА И ЊИХОВИ ОСНОВНИ ПАРАМЕТРИ	34
6.1. Преглед разматраних технолошких процеса пирометалуршке екстракције бакра	37
6.1.1. Outokumpu flash smelting (Outotec)	38
6.1.2. Inco Flash	44
6.1.3. Noranda	46
6.1.4. Mitsubishi	49
6.1.5. El Teniente	51
6.1.6. Vanyukov (ру. Ванюкова)	54
6.1.7. Ausmelt/Isasmelt lance	56
6.1.8. Пламена пећ (Reverberatory furnace)	59
6.2. Разматрани параметри пирометалуршких процеса екстракције бакра	60
6.2.1. Годишња производња бакра	61
6.2.2. Садржај бакра у концентрату	62
6.2.3. Век трајања облоге (Campaign Life)	63

6.2.4. Продукти топљења (анализа бакренца, шљаке и гасова)	64
6.2.5. Производња бакра по запосленом (Cu production/Employees)	67
7. РАЗВОЈ И ПРИМЕНА PROMETHEE/GAIA МОДЕЛА ЗА РАНГИРАЊЕ ПИРОМЕТАЛУРШКИХ ПОСТУПАКА ЕКСТРАКЦИЈЕ БАКРА	68
7.1. Прикупљање и анализа података	69
7.2. Вишекритеријумска анализа технологија за добијање бакра	70
7.3. Дискусија добијених резултата	78
7.4. Закључна разматрања спроведеног истраживања	81
8. ВАЛИДАЦИЈА ДОБИЈЕНИХ РЕЗУЛТАТА У ФАЗИ ОКРУЖЕЊУ ПРИМЕНОМ АНР-TOPSIS МЕТОДЕ	84
8.1. Фази АНР (Fuzzy АНР)	84
8.2. Фази TOPSIS (Fuzzy TOPSIS)	88
8.3. Резултати и дискусија	91
8.4. Закључна разматрања спроведеног истраживања	106
9. РЕЗУЛТАТИ РАНГИРАЊА ПРИМЕНОМ PROMETHEE/GAIA МЕТОДОЛОГИЈЕ НА КОНКРЕТНИМ ВРЕДНОСТИМА ИЗ ПРАКСЕ	107
9.1. Методологија за анализу података	108
9.2. Резултати и дискусија	111
9.3. Закључна разматрања спроведеног истраживања	117
10. ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА И НАУЧНИ ДОПРИНОСИ	119
11. ЛИТЕРАТУРА	124
12. БИОГРАФИЈА	139

1. УВОД

Улога и значај модела у природним, друштвеним и техничким наукама је велика. И поред бројне литературе која се бави моделовањем сложених технолошких система и процеса, не може се још увек тврдити да су сви аспекти и процедуре моделовања у потпуности познате. Ово је нарочито изражено у области моделовања процедура за селекцију и одабир одговарајућих технолошких процеса, који би дали адекватне резултате у датим ситуацијама и окружењима. У савременој литератури веома често се јавља тежња да се изврши унификација постојећих типова моделовања са циљем стварања јединствене процедуре моделовања без обзира на тип и структуру технолошког система или процеса који се моделује, искључујући утицај фактора из окружења који се веома често мењају. Иако општа теорија система има за циљ проналажење јединствених законитости којима је могуће описивати и проучавати све системе, без обзира на њихову форму и начин настанка, адекватан начин за сам процес моделовања у великој мери зависи од карактера величина које улазе и излазе из посматраног система моделовања. Такође, у зависности да ли су улазне и излазне величине система добијене посматрањем реалног система у редовном режиму рада или су генерисане експериментом који је унапред планиран и плански спроведен, постојаће разлика и у самој процедури моделовања (Mihajlović et al., 2007; Straussfogel & von Schilling, 2009; Hofkirchner & Schafranek, 2011; Mihajlović, 2014).

Полазна поглавља докторске дисертације полако уводе у предмет и циљ спроведеног истраживања на основу анализе најутицајније литературе коришћене приликом њене израде. Детаљнија анализа литературе која је имала значајан допринос у изради докторске дисертације представљена је кроз друго поглавље. Кроз ово поглавље анализорани су радови: Davenport et al. (2002), Kapusta (2004), Schlesinger et al. (2011), и други, чија литература има значајан утицај на разумевање самих технолошких процеса пирометалуршке екстракције бакра, а такође је била незаменљива у прикупљању почетних података приликом израде нумеричких модела. Друго поглавље такође даје анализу доприноса литератури: Liu et al. (2009), Nikolic et al. (2009), Promentilla et al. (2018) из области вишекритеријумске анализе и нумеричког моделовања у циљу изградње што веродостојнијег модела за

селекцију и рангирање технолошких процеса. У **трећем поглављу** дефинисан је предмет и циљ истраживања, а такође су дате и почетне истраживачке хипотезе.

У **четвртом поглављу** докторске дисертације описана је нумеричка анализа и моделовање. Развој информационаих технологија и опште теорије система довело је до стварања великог броја рачунарских апликација за моделовање. То је довело и до развоја бројних софтверских апликација које се употребљавају у различитим специјализованим научним дисциплинама (Mobility Testbed, Auto Cast, DWSIM, FreeMat, Minsk, CircuitLogix, SimProcess), али и велики број општих софтверских апликација које се примењују без обзира од научне области за коју се модел развија (Mathematica, LISREL, MATLAB). Све ове апликације, нуде кориснику интерактивно окружење које омогућава сагледавање структуре модела, омогућује покретање модела као симулације и процену њихових предвиђања. На основу тога може се рећи да научна заједница има велике користи од развоја информационаих технологија које спајају савремене методе за анализу ради формирања комплексних модела посматраних технолошких система и процеса. Истраживачима се омогућава да прецизно изврше прогнозирање понашања технолошког система и процеса на основу претходно формираног нумеричког модела. Такође, добија се могућност доношења адекватних одлука које би оптимизовале дати систем и процес, у складу са жељама и могућностима самог доносиоца одлука, као и ограничењима која постављају систем и процес.

И поред развоја бројних процедура моделовања и развоја великог броја модела, који се могу применити у моделовању технолошких процеса, још увек не постоји јасан вишекритеријумски модел за селекцију одговарајућег технолошког процеса, нарочито када говоримо о технолошким процесима екстракције бакра. Стога, у **петом поглављу ове дисертације** вршена је анализа и примена модела вишекритеријумског одлучивања. Присутна литература из области металургије и области менаџмента углавном се бави оптимизацијом технолошких процеса, као и њиховим побољшањима у погледу капацитета и квалитета добијеног бакра. Веома је мало радова, који се баве селекцијом одговарајућег технолошког процеса топљења концентрата бакра, на један систематски начин. На основу широког литературног прегледа, дошло се до закључка да у доступној литератури не постоји истраживање, које анализира на систематски начин еколошке, економске,

друштвене и техничке параметре, већ је то најчешће рађено кроз анализу појединачног утицаја бројних фактора. Одлучивање које се врши без укључивања свих претходо наведених параметара, може дати за резултат погрешну одлуку чију промену не можемо лако спровести, а такође утицаји овакве одлуке су веома велики на само окружење и друштво.

У *шестом поглављу* докторске дисертације, обрађени су технолошки поступци пирометалуршке екстракције бакра и њихових основних параметара. Треба узети у обзир да бакар представља једну од најважнијих сировина 21. века, стога потражња и његова производња из годину у годину стално расте. Због тога је константно присутна потреба за развојем бољих научних алата и нових технологија за екстракцију, које би омогућиле да се сачува лепота природе и њена разноликост, а истовремено и повећање производње и потрошње бакра од стране становништва. (Sievers, 2003; Požega et al., 2010). Из тих разлога је у последњих 50 година забележен еволуциони развој технолошких процеса у екстракцији обојених метала, поготово у области екстракције бакра. На тај начин повећавали су се производни капацитети, а такође побољшавао се квалитет и негативан утицај на окружење (Herrerros et al., 1998; King, 2007; Nikolic et al., 2009).

У истраживању које је спровео Vishal Chandr Jaunky (2013), анализиран је утицај потрошње бакра на сам економски развој 16 земаља. На основу овог, а и других истраживања присутних у литератури, може се закључити да је потрошња бакра, као и његова производња, један од елемената дугорочног економског развоја сваке земље (Tilton, 1989; Roberts, 1990; Ghosh, 2006; Huh, 2011; Jaunky, 2012). Разлог томе јесте што ова постројења запошљавају велики број радника и производе велике количине бакра којим доприносе бољој економској ситуацији сваке земље. Изградњом оваквих индустријских постројења доприноси се смањењу увоза ове данас веома битне сировине, а такође се побољшава животни стандард средине у којој постројење егзистира. Имајући у виду значајност изградње оваквих постројења и њихов утицај на економију окружења, као и укупни утицај на економију једне земље, потребно је приликом доношења одлуке о изградњи новог постројења приступити са већом пажњом. Иако се производња бакра врши више векова, значајнији техничко-техолошки напредак овог процеса постигнут је у последњих сто година. Међутим и даље се трага за најоптималнијим

процесом његове производње. Наиме, тенденција је да се развије процес који ће дати бакар високог квалитета са ниским трошковима пословања, и на тај начин резултовати најбољим економским ефектима, уз што мањи негативан утицај на животну средину. Поред бројних технолошких процеса за пирометалуршку екстракцију бакра, у овој дисертацији одабрана су осам најактуелнија поступка, уз консултацију експерата, као и на основу учесталости примене ових посупака. (Davenport et al., 2002; Moskalyk & Alfantazi, 2003; Kapusta, 2004; Schlesinger et al., 2011; Najdenov et. al, 2012; Najdenov, 2013).

У последњим деценијама, поред економског сагледавања одређеног технолошког процеса, тежи се и ка сагледавању утицаја датог технолошког процеса на животну средину. Негативни утицаји одређене технологије могу у каснијем периоду много више коштати у погледу отклањања тих утицаја, него почетна улагања у квалитетну селекцију најоптималнијег технолошког процеса, који ће узети у обзир и ове утицаје. Из тих разлога, селекцију треба подржати савременим алатима, као на пример применом вишекритеријумске анализе, што је детаљно описано у *седмом, осмом и деветом поглављу*.

У овој дисертацији, циљ је да се развије вишекритеријумски модел који може бити од користи бројним доносиоцима одлука (инвеститорима, менаџерима, стејкхолдерима, академској заједници, владама итд.). Овако добијени резултати, имаће велики научни значај, али истовремено и практичну примену од стране дониосиоца одлука, који ће имати могућност да одаберу не најбољи технолошки процес, већ онај који ће се најбоље применити у датим условима и дати најбоље резултате у таквој ситуацији, што је дато у закључним *разматрањима у десетом поглављу*.

2. ЛИТЕРАТУРНИ ПРЕГЛЕД

Доступна литература из области оперативног менаџмента различитих технолошких процеса, па тако и процеса из области металургије, углавном се бави оптимизацијом самих процеса као и њиховим побољшањима у погледу капацитета и квалитета добијеног финалног производа. Имајући у виду тему ове дисертације, може се истаћи да је веома мало радова који се баве селекцијом одговарајућег технолошког процеса топљења концентрата бакра на један систематски начин. На основу широког литературног прегледа дошло се до закључка да у доступној литератури не постоји истраживање које анализира на систематски начин еколошке, економске, друштвене и техничке параметре екстракције бакра, већ је то најчешће вршено кроз анализу појединачног утицаја бројних фактора (Nikolic et al., 2009; Ishizaka, 2011; Ruisheng, 2014). Одлучивање које се врши без укључивања свих претходо наведених параметара може дати за резултат погрешну одлуку чију промену није лако спровести, а такође утицаји овакве одлуке су веома велики на само окружење и друштво. Самим тим, намеће се потреба за спровођење оваквог једног истраживања како би употпунило ову истраживачку празнину. Треба истаћи да се економски аспект овог рада огледа кроз интеграцију са технолошким и еколошким параметрима и тиме се веродостојност модела побољшава у односу када би он био заснован на засебном посматрању појединачних утицајних параметара. Литература која је коришћена у овој дисертацији допринела је, са једне стране анализи и разумевању самих технолошких процеса пирометалуршке екстракције бакра, док са друге стране самој фази прикупљања релевантних података. Такође, њен значај огледа се и у развоју модела који је основни допринос ове докторске дисертације. Анализом релевантне литературе из ове истраживачке области може се навести следећа литература која је имала највећи допринос у изради ове докторске дисертације:

Davenport, W. G., King, M., Schlesinger, M. and Biswas, A., 2002. Extractive Metallurgy of Copper, 4th ed. Elsevier, Amsterdam, Nederland

Како би се упознали са технолошким процесима производње бакра и њиховим карактеристикама један од најбољих прегеда даје дело групе аутора Davenport et al., из 2002 године. Ово је једно од најпознатијих дела које се бави екстрактивном металургијом бакра, с обзиром да су аутори Davenport, W. G., King, M., Schlesinger, M. i Biswas, A., препознатљиви светски стручњаци из области металиургије бакра. Књига која садржи преко четири стотине страна кроз 23 поглавља детаљно води кроз скоро све познате и широко коришћене технолошке процесе екстракције бакра из бакарних концентрата, а такође се бави и осталим карактеристикама које су битне за саму производњу „црвеног метала“. Екстракција бакра из бакарних руда може се вршити коришћењем два основна поступка и то пирометалуршким и хидрометалуршким поступком. Прегледом литературе може се закључити да су хидрометалуршки процеси еколошки прихватљивији од пирометалуршких процеса, међутим, пирометалуршки поступци добијања бакра још увек су знатно заступљенији од употребе хидрометалуршких поступака. Из тих разлога, у овом делу обрађена су оба поступка, са већим нагласком на пирометалуршке поступке, који су били значајнији приликом израде ове докторске дисертације. Технолошки процеси који су детаљно обрађени су следећи: Flash Smelting – Outokumpu, Inco Flash Smelting, Noranda, Teniente, Ausmelt/Isasmelt Matt Smelting, Mitsubishi, Vanyukov. Такође, у знатној мери су обрађени и хидрометалуршки процеси. Поред доприноса у разумевању технолошких процеса и њихових карактеристика за ову докторску дисертацију велики значај имају и информације о производњи и употреби бакра, као и о локацијским лежиштима руда, цени коштања бакра на тржишту, локацијском распореду топионица и друго.

Schlesinger, M., King, M., Sole, K. and Davenport, W., 2011. Extractive Metallurgy of Copper, 5th ed. Elsevier, Amsterdam, Nederland

Као наставак четвртог издања књиге „Екстрактивна металургија бакра“, 2011 године изашло је ново пето издање под истим називом. У овом издању уведене су промене које су настале за девет година развоја металургије бакра. Најважније промене које су настале поред скока цене бакра у том периоду, јесу у погледу самих технолошких процеса као и у проширењу њихове примене. Све је то довело

до проширења индустрије бакра, као и до промене листе рудника и осталих производних капацитета у односу на претходно издање. Поред промена у садржини ово издање доноси измену и у погледу групе аутора где се групи придружује др Kathryn C. Sole из Јужне Африке који је водећи експерт из области хидрометалургије и чији су доприноси значајни развоју те области. Самим тим, ово дело се обогаћује у области хидрометалургије уз комбинацију развоја пирометалургије у чему су заслужна претходна три аутора овог дела. Такође, ово издање у односу на претходно садржи много више информација и података из саме индустрије производње бакра, што у многоме доприноси изради ове дисертације. Сва наведена побољшања су уведена у изради ове дисертације кроз актуелизацију вредности посматраних параметра који су били од утицаја за сам процес моделовања.

Moskalyk, R. & Alfantazi, A., 2003. Review of copper pyrometallurgical practice: today and tomorrow. Minerals Engineering, 16 (10), 893–919.

Допринос ове референце је поред илустрације самих технолошких процеса такође и у погледу повећања релевантности и тачности података коришћених у овој докторској дисертацији. Кроз овај рад даје се и компаративна анализа пирометалуршких процеса екстракције бакра, али и будући трендови развоја ових технологија, као и њихов значај за привреду и развој светске економије.

Kapusta, J., 2004. JOM World Nonferrous Smelters Survey, Part I: Copper. The journal of the Minerals, Metals & Materials Society, 56 (7), 21-27.

Рад који даје најбогатији преглед конкретних података везаних за одређене заједничке параметре различитих технолошких процеса, примењених у преко педесет топионица, јесте рад Ј. Каруст-е из 2004. године. Подаци који су коришћени у раду сакупљени су у току 2003. године и могу се сматрати и данас актуелним. Параметри који су праћени у овом раду, и који су послужили као део улазних података коришћених у изради ове докторске дисертације, јесу годишња производња бакра, номинални капацитет, број запослених, садржај бакра у

концентрату, саржај бакра и гвожђа у шљаци, као и време замене облога, у случајевима реалних производних услова у великом броју топионица широм света.

Vračar, R., 2010. Teorija i praksa dobijanja obojenih metala. Savez inženjera metalurgije Srbije, Beograd, Srbija

Поред страних аутора, не треба занемарити и домаће ауторе који имају значајан допринос развоју пирометалуршких процеса екстракције бакра. У овом делу Рајко Врачар се бави значајном анализом технолошких процеса екстракције не само бакра, већ и осталих обојених метала, као што су: алуминијум, магнезијум, олово, цинк, никл, кадмијум, антимонон, злато, сребро и платина. За израду дисертације од посебног значаја јесте глава III – металургија бакра која даје такође детаљан опис анализираних технолошких процеса екстракције бакра који су коришћени у формирању истраживачког модела. У овој литератури сажето је домаће и међународно знање и искуство добијања обојених метала, и то оних за чију екстракцију постоји сировинска база и друге елементарне претпоставке. На тај начин ово дело обогаћује литературу из области металургије писану на српском језику.

Liu, D., Yuan, Y., Liao, S., 2009. Artificial neural network vs. nonlinear regression for gold content estimation in pyrometallurgy. Expert Systems with Applications, 36 (7), 10397-10400.

Последњих година врше се бројна истраживања моделовања различитих комплексних технолошких процеса, па тако и процеса у пирометалургији племенитих и обојених метала. Циљ ових истраживања јесте дефинисање адекватних модела који омогућавају прогнозу исхода проучаваних процеса. Најчешће су у употреби линеарни и нелинеарни модели за дефинисање математичке зависности исхода технолошког процеса од инпута у реалним условима одвијања процеса.

Поред ове групе модела где се тежи оптимизацији технолошких процеса, у литератури се јављају последњих година и модели одлучивања. Циљ ових модела јесте адекватна селекција одређених елементата самог технолошког процеса, нпр. улазне сировине како би се побољшао квалитет одређеног излазног производа, или се применом одговарајућег модела одлучивања врши селекција оптималне технологије за дате услове.

Nikolic D., Jovanovic I., Mihajlovic I., Zivan Z., 2009. Multi-criteria ranking of copper concentrates according to their quality – An element of environmental management in the vicinity of copper – Smelting complex in Bor, Serbia Journal of Environmental Management, 91, 509–515.

Домаћи аутори у овом раду примењују алате вишекритеријумског одлучивања за селекцију одговарајућег квалитета концентрата бакра на основу њиховог садржаја штетних и корисних компоненти бакра као и осталих улазних параметара разматраних процеса. На тај начин, адекватном селекцијом улазне сировине датог технолошког процеса остварују се постављени циљеви производње. Конкретно у овом раду је примењена PROMETHEE/GAIA методологија уз додатну примену посебне PROMETHEE V методе, користећи стандардна ограничења садржаја тешких метала у концентрату. Овакав начин примене ове методологије даје могућност да се изврши оптимизација улазне шарже за екстракцију бакра са два аспекта. Први аспект сагледава користи од садржаја корисних метала у шаржи. Други аспект посматрања бави се заштитом животне средине, с обзиром да је познато да шаржа садржи штетне компоненте. Коришћењем претходне методологије у циљу рангирања квалитета концентрата бакра који улазе у шаржај шарже за његову екстракцију може се сматрати доприносом формирања тржишне цене овог производа. Аутори овог рада верују да тржишна цена концентрата бакра треба да се формира поред тренутног односа понуде и потражње такође и под утицајем такозваних „бонуса“ и „пенала“. Кроз „бонус“ треба сагледати садржај корисних компоненти мислећи у првом реду на садржај бакра и племенитих метала у концентрату, док кроз „пенале“ треба сагледати садржај штетних компоненти као што су арсен, олово, жива итд. Овакав приступ одлучивања је актуелан у

развијеним земљама које заштиту животне средине и стављау испред економских интереса производње.

Promentilla, M.A.B., Janairo, J.I.B., Yu, D.E.C., Pausta, C.M.J., Beltran, A.B., Huelgas-Orbecido, A.P., Tapia, J.F.D., Aviso, K.B., Tan, R.R., 2018. A stochastic fuzzy multi-criteria decision-making model for optimal selection of clean technologies, Journal of Cleaner Production, 183, 1289-1299.

Последњих година се поред повећања производње и квалитета самих производа акценат ставља и на еколошке последице које примењена технологија ствара. Адекватан одабир пре изградње одређеног технолошко-техничког постројења је од суштинске значајности. Након изградње и пуштања у рад технолошко-техничког постројења последице могу имати широк домен утицаја. Брза поромена изграђене технологије је немогућа, јер се најчешће ради о великим инвестиционим улагањима. Кроз рад Promentilla et al., из 2018. године даје се модел који даје могућност одабира чистије технологије. С обзиром да оваква примена алата вишекритеријумског одлучивања није у великој мери заступљена у пирометалургији, нарочито када је реч о избору одговарајућег технолошког процеса топљења концентрата бакра, дата је могућност за додатни научни допринос ове дисертације.

3. ПРЕДМЕТ И ОПСЕГ ИСТРАЖИВАЊА

3.1. Предмет истраживања

У свету тренутно постоји више од 120 топиница које се активно баве производњом бакра. У зависности од периода изградње, земље у којој се врши екстракција, законских регулатива и других услова, топионице за екстракцију бакра користе различите технолошке процесе. Најчешће коришћени технолошки процеси су Outokumpu, Noranda, Isasmelt, Mitsubishi, Teiniente, Vanyukov, Inco Flash, Reverberatory furnace (Пламена пећ) и други. Поред тога што наведене топионице користе различите технолошке процесе, одређени параметри су карактеристични за већину примењених процеса и говоре о квалитету, оптималности и економичности сваког од технолошког процеса у оквиру саме топионице бакра, као и о утицају технолошког процеса на животну средину. Из тих разлога, неопходно је истовремено анализирати утицајне параметре сваког технолошког процеса како би се на основу њих извршило адекватно рангирање и селекција оптималне технологије за примену у карактеристичним условима одређене топионице.

У овој дисертацији идентификоваће се одговарајући технолошки параметри у оквиру постојећих технологија. Применом адекватних статистичких алата, који су подржани од стране савремених софтверских пакета, биће развијен вишекритеријумски модел за избор оптималног технолошког процеса у комплексним условима.

Полазна основа истраживања је претпоставка да оптималне производне резултате не остварује најбоља технологија, већ она која је оптимална за примену у датим условима индустријског окружења. Стога, овај модел пружиће могућност избора, не најбоље технологије, већ оне која ће се најбоље примењивати у датим условима

У овој дисертацији, план је да се развије вишекритеријумски модел који може бити од користи бројним доносиоцима одлука (инвеститорима, менаџерима, стејхолдерима итд.). Овако добијени резултати, имаће велики научни значај, али истовремено и практичну примену од стране дониосиоца одлука, који ће имати

могућност да одаберу не најбољи технолошки процес, већ онај који ће се најбоље применити у датим условима и дати најбоље резултате у таквој ситуацији.

3.2. Циљеви истраживања

Циљеви овог истраживања су:

(1) Систематско праћење и препознавање еколошких, економских, друштвених и техничких фактора који су од значаја приликом доношења одлуке о изградњи или промени оваквих постројења.

(2) Анализа утицајних параметара као и јачина њиховог утицаја за доносиоца одлуке приликом селекције одговарајућег технолошког процеса.

(3) Развој вишекритеријумског модела који даје могућност одабира технолошког процеса са највећим степеном практичне примене уз задовољење свих претходно постављених услова битних за стејхолдере.

3.3. Полазне хипотезе

На основу наведеног предмета и циљева истраживања утицајних параметара за рангирање технолошких процеса пирометалуршке екстракције бакра, могу се дефинисати следеће полазне хипотезе, које представљају основни оквир за истраживање у овом раду:

H_0 – Могуће је развити вишекритеријумски модел одлучивања у циљу одређивања оптималног технолошког процеса екстракције бакра у комплексним условима.

H_1 – Аутогени пирометалуршки процеси дају у већини случаја боље резултате од оних који нису аутогени.

H_2 – Могуће је формирати модел вишекритеријумском одлучивања у циљу одређивања оптималног технолошког процеса укључивањем најважнијих стејхолдера у процесу групног одлучивања.

H₃ – Применом PROMETHEE/GAIA методе може се поуздано извршити приоритизација технолошких процеса екстракције бакра.

H₄ – Одабир технолошког процеса који ће бити имплементиран има мањи утицаја на саме перформансе топионица од утицаја других инжењерских и економских фактора, као и организационих знања вођења самог технолошког процеса, располагања одређеним ресурсима и кадровским решењима.

H₅ – Применом модела АHP-TOPSIS у фази окружењу може се поуздано извршити валидација модела којим је извршена приоритизација технолошких процеса екстракције бакра.

H₆ – Развијена PROMETHEE/GAIA метода, може се успешно применити и на селекцију и рангирање конкретних постројења за пирометалуршку екстракцију бакра.

4. НУМЕРИЧКА АНАЛИЗА И МОДЕЛОВАЊЕ

Нумеричка анализа представља део математике, односно конкретније нумеричке математике. Иако не постоји једна опште прихваћена дефиниција нумеричке анализе, може се посматрати као област нумеричке математике где се за разлику од теорије бројева која се бави особинама бројева, она своју пажњу посвећује на проналажењу алгоритама за нумеричко решавање математичких проблема.

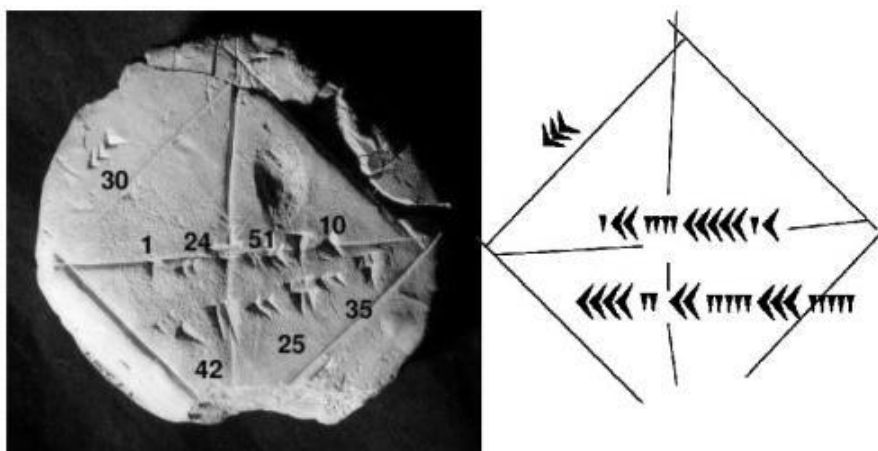
4.1. Нумеричка анализа

Према „Енциклопедија Британика“ нумеричка анализа је област математике и рачунарства која ствара, анализира и примењује алгоритме за добијање нумеричких решења проблема који укључују континуиране променљиве. На основу тога, закључује се да је њена примена проширена поред природних и на друштвене науке, а и на проблеме из области инжењерства, медицине, пословања итд. (Encyclopædia Britannica). Потреба за нумеричком анализом је вишеструка где су проистекле многе области њене примене. Као примере примене може се навести апроксимација функција (случај у коме треба дату одређену функцију заменити неком другом), интерполација, нумеричка диференцијација и интеграција, итерација, оптимизација, метода Runge–Kutta, Гаусова метода, решавање интегралних једначина и многе друге области у којима без примене нумеричке анализе не би могли да дођемо до решења проблема. Такође, нумеричка анализа има широку примену у статистици чији се алати нашироко примењују у инжењерском менаџменту и другим областима управљања и пословања (Stoer & Bulirsch, 1976; Deturc & Wilf, 2002; Gautschi, 2011; Hong et al., 2018; Piqueras et al., 2018).

Практични ефекти примене нумеричке анализе нарочито долазе до изражаја ако се посматра примена у области решавања математичких проблема који би предуго трајали ако би се користили стандардни методи решавања. Међутим, значајан ефекат примене може се сагледати и у апроксимационим рачунима, где се одређеном апроксимацијом замењује стварна вредност функције до које је

немогуће или сувише тешко доћи. Просто речено, циљ нумеричке анализе јесте практична математичка калкулација. Она не тражи тачан одговор односно решење проблема, јер се и у пракси веома често не могу дати тачни одговори на одређене проблеме. Уместо тога, велики број нумеричких анализа бави се добијањем приближних решења проблема, уз одржавање разумних граница грешака.

Иако се данас нумеричка анализа не може замислити без употребе савремених рачунара и софтвера који су знатно убрзали њен развој и примену у практичне сврхе, сам историјат развоја нумеричке анализе почиње отприлике четири миленијума раније. Почетак развоја може се повезати са Вавилонском глиненом плочицом, за коју се сматра да је настала и била коришћена у периоду од 1800. до 1600. г. п.н.е. Вавилонски математичари тог периода нису знали за ирационалне бројеве и сам појам ирационалног броја. Међутим у пракси су се веома често сусретали са проблемима који су захтевали познавање ирационалних бројева. Како би дошли до решења они су уместо ирационалних бројева користили рационалне бројеве и њихове приближне вредности. Пронађена глинена плочица у Вавилону је садржала уклесан квадрат са дијагоналама и приближним вредностима корена броја 2 у шездесетичном систему, односно са четири шездесетине цифре. Ова стара Вавилонска глинена плочица позната је под ознаком YBC - 7289 (акроним YBC потиче од Yale Babylonian Collection) и приказана је на слици 4.1 (Dreyer, 1953; Fowler & Robson, 1998).



Слика 4.1. Вавилонска глинена плочица - YBC - 7289 (Bibinum)

Многа унапређења нумеричкој анализи дали су и древни грчки математичари. У првом реду треба споменути Eudoxus of Cnidus (400.-350. г. п.н.е.) грчког математичара и астронома, један од Платонових ученика који је унапредио теорију пропорције, допринео је индетификацији сазвежђа и тиме развио посматрање астрономије. Поред Eudoxus-a, један од највећих научника свог а и овог времена јесте Архимед (287. – 212. г. п.н.е.) који је проучаоаво односе запремине и површине сферастих тела и први израчунао вредност константе пи (π), што се сматра једним од најзначајнијих његових доприноса. Сви ови доприноси су представљали потребан предуслов за развој нумеричке анализе и калкулација од стране Isaac Newton-a (1642–1727) и Gottfried Leibniz-a (1646–1716) (Encyclopedia Britannica).

Такође, многи математичари су се бавили нумеричком анализом где су одређени алгоритми добили њихова имена. Од великих научника који су се бавили нумеричком анализом, потребно је споменути италијанско – француског математичара Жозефа Луј Лагранжа на основу кога је названа Интерполација путем Лагранжових полинома. Потом швајцарског математичара Леонарда Ојлара и Ојлеров образац који повезује тригонометријске функције са комплексним експонентима, немачког математичара Фидриха Гауса и многе друге чији су утицаји створили нумеричку анализу једним моћним математичким алатом који има данас практичну употребу (Brezinski & Wuytack, 2001).

Почетак савремене нумеричке анализе се може везати за рад John von Neumann-a и Herman Goldstine-a из 1947 године под називом „Numerical Inverting of Matrices of High Order“. То је био један од првих радова који је проучавао грешке у заокруживању које настају код примене рачунара у науци и приликом математичких прорачуна. Такође, аутори дају поређење између „аналогних“ и „дигиталних“ уређаја који се користе за прорачун и улогу грешака које настају приликом заокруживања због утицајата ткз. „шумова“. Иако саму нумеричку анализу прати много дужа и богатија историја „савремена“ нумеричка анализа како је названа у раду John von Neumann-a и Herman Goldstine-a, карактерише се синергијом примене савремених речунара и програма, математичком анализом и тежњом да се реше велики и комплексни проблеми. Потреба за напредним апликацијама које би биле употребљене у разним областима технике и технологије

довела је до развоја не само рачунарске технике већ и до развоја и напредовања у областима нумеричке анализе и нумеричког моделовања (Von Neumann & Goldstine, 1947; Society for Industrial and Applied Mathematics).

Савремена нумеричка анализа се не може замислити без рачунара и рачунарске технике. Готово сва нумеричка обрада се врши на дигиталним рачунарима. Структура и својства дигиталних рачунара утичу на структуру нумеричких алгоритама, посебно када се решавају проблеми у великим линеарним системима. За добру нумеричку анализу потребан први и најважнији услов јесте да рачунарска аритметика мора бити схваћена. На почетку развоја рачунарске технике рачунарска аритметика се значајно разликовала код различитих произвођача рачунара. Ова разлика је стварала многе проблеме приликом покушаја писања софтвера који би се лако преносио између различитих рачунара. Варијације су биле значајно смањене 1985. године увођењем стандарда од стране Института инжењера електротехнике и електронике (енг. Institute of Electrical and Electronics Engineers – IEEE). IEEE је непрофитна организација која се бави развојем технологије и технолошких иновација везаних за електронске уређаје у корист човечанства. Број чланова прелази 423.000 из преко 160 земаља света. Увођењем стандарда у свету рачунара и програмирања, примена многих софтверских решења била је могућа на различите врсте рачунара различитих произвођача, где је створена могућност специјализације одређених особа за одређене подпроблеме у оквиру решавања одређеног заједничког проблема, што је значајно убрзало развој нумеричке анализе (IEEE).

Нумеричка анализа и формирање апликација развило је нумеричко моделовање и саму област научног моделовања. Веома се често феномени који се не могу посматрати директно описују помоћу научних модела. Овај приступ је распрострањен у многим научним дисциплинама, где се научним моделима описује или предвиђају карактеристике или понашање реалних објеката и система.

4.2. Моделовање

Иако изрази „модел“ и „моделирање“ могу изгледати као уобичајни термини који се и чак веома често поистовећују заправо представљају два потпуно различита концепта. Пошто су ови термини саставни део ове докторске дисертације потребно је у потпуности разумети њихово различито значење. „Модел“ заправо представља производ који се добија процесом моделирања, док термин „моделирање“ се односи на сам процес односно процедуру стварања модела (Dundar et al., 2012). У свакодневном животу се сусрећемо са различитим типовима модела који нам дају поједностављену представу реалних ствари. На пример, архитекта може приказати карактеристике зграде коју жели да прода пре саме изградње путем одговарајућег модела у циљу бољег разумевања од стране будућих купаца и њиховог привлачења. Такође, мала деца свакодневно имају прилику да се упознавају са деловима стварности путем модела изражених кроз играчке у облику авиона, возова, кућа итд.

Могу се дати многи примери појављивања модела у свакодневном животу међутим у свим примерима се могу пронаћи две заједничке тачке:

- Модел су формира како би нас упознао са реалношћу или мисли о реалношћу;
- Модел је поједностављен или идеализован облик одређене стварности (Dundar et al., 2012; Mihajlović, 2014).

Данас постоји широк спектар теорија, техника, метода и начина за научно моделирање који дају за резултат формирање физиичких, апстрактних, графичких, концептуалних и математичких модела. Резултат веродостојног и адекватног моделовања ће у великој мери зависити и од самог објекта моделавања и његове сложености. Оптималан научни модел би требао да симулира понашање одређеног реалног система са довољном поузданошћу у предвиђању понашања тог система, а такође да његова комплексност одговара актуелним могућностима прорачуна. Ово у великој мери зависи од тренутног развоја нумеричке анализе и хардверско-софтверске технологије која се примењује у научном моделовању (Kovačević, 2006; Mihajlović, 2014)

Математички модели, као део научних модела представљају математичку слику реалности. Они описују објекте и системе применом математичких знакова, концепта и једначина. Процес формирања математичких модела је процес математичког моделовања. У најширем смислу, математичко моделовање је процес покушаја математичког дефинисања нематематичке ситуације, феномена, појава и односа између тих феномена, појава и ситуација. Поред бројних дефиниција математичког моделовања најчешће примењивана дефиниција гласи: „математичко моделовање представља имплементацију математике у решавању неструктурираних проблема у реалним ситуацијама“. На основу тога, може се закључити да готово све у физичком и биолошком свету, било да је у питању природна појава или укључује утицај технологије или људског деловања, може бити анализирано путем примене математичких модела (Galbraith & Clatworthy, 1990; Cheng, 2001; Kovačević, 2006; Dundar et al., 2012; Mihajlović, 2014).

4.2.1. Нумеричко моделовање

Нумерички модели спадају у групу математичких модела који користе за описивање реалних система одређену нумеричку процедуру временског узорковања, како би се добила слика о понашању објекта моделовања током времена. Интересантно је то да сама нумеричка процедура израде нумеричког модела може бити спроведена и без познавања основних особина и карактеристика система који је објекат моделовања (структуре, броја подсистема и елемената и њихове међусобне везе) (Kovačević, 2006; Mihajlovic, 2007).

Развојем техника моделовања по принципу тзв. „црне кутије“, учинило је нумеричко моделовање широко доступним. Међутим иако је теоријски могуће примењивати алате нумеричког моделовања и за системе који нису у потпуности познати, јасно је правило да што је систем који се моделује познатији моделатору, то су и бољи резултати који ће крајњи модел дати. То значи да неадекватна примена алата нумеричког моделовања у предвиђању понашања одређеног система, може дати мање прецизне резултате у поређењу са реалним мерењима заснованим на експерименту.

Паралелан развој крајем 20 и почетком 21 века инфромационих технологија и опште теорије система, довело је до стварања широког спектра бројних рачунарских алата за моделовање. На тај начин, развијене су софтверске апликације које се употребљавају у различитим специјализованим научним дисциплинама (на пример: Mobility Testbed – развој транспортних модела, Auto Cast – софтвер за моделовање процеса ливења метала, DWSIM – хемијско инжењерство, FreeMat – брз развој прототипа у машинству, Minsky – развој и симулацију финансијских модела, CircuitLogix – електротехнику, SimProcess – за бизнис моделе и многи други), али и опште софтверске апликације које су примењиве независно од научне области за коју се модел развија (Mathematica – програмски језик који је и одлична платформа за развој модела и симулацију, LISREL – за развој модела по принципу структурне једначине, MATLAB – опште прихваћен софтвер за моделовање праћен пакетом SIMULINK који се користи за симулацију рада модела и многи други). Обе врсте апликација у суштини нуде интерактивно окружење које корисницима омогућава сагледавање структуре модела, омогућује покретање модела као симулације, и процену њихових предвиђања. Недвосмислено се извлачи закључак да научна заједница има велике користи од развоја рачунарске технике које комбинују савремене методе за анализу ради формирања комплексних модела посматраних технолошких система и процеса. На тај начин, се даје могућност истраживачима да прецизно изврше прогнозирање понашања технолошког система и процеса на основу претходно формираног нумеричког модела. Такође, добија се могућност доношења адекватних одлука, које би оптимизовале дати систем и процес, у складу са жељама и могућностима самог доносиоца одлука, као и ограничењима које поставља систем и процес. Дате су и могућности детекције одступања у предвиђању која индицирају потребу за ревизијом самог модела, и на крају аутоматски мењају полазни модел сходно тим закључцима у циљу смањења насталог одступања (Von Neumann & Goldstine, 1947; Kovačević, 2006; Mihajlovic, 2007; Dundar et al., 2012; Mihajlović, 2014; Society for Industrial and Applied Mathematics).

4.2.2. Моделовање технолошких процеса

Савремени технолошки процеси не захтевају оптимизацију само техничко–технолошких и економских, већ и организационих и еколошких аспеката процеса. На тај начин, успешно оперативно планирање и оптимизација било ког савременог технолошког процеса, подразумева потребу за претходно дефинисање процесног модела, који укључује велики број техничких, економских, еколошких и организационих фактора истовремено.

Иако је *трећа индустријска револуција* или тз. дигитална револуција која је започела почетком 70-тих година прошлог века (коју је карактерисало унапређење од аналогне електронике и механичких уређаја до дигиталне технологије) у многоме укључивала примену нумеричког моделовања, *четврта индустријска револуција* тај тренд и даље задржава. Значај моделовања и модела у Индустрији 4.0 је круцијалан. Поготову када се говори о моделима одлучивања који су повезани за одабир и управљање савременим технолошким процесима. Такви модели требају се заснивати не само на људском чиниоцу одлучивања већ и на вештачкој интелигенцији, јер једноставна интеграција софтверских решења у фабрици без одговарајућег модела неће представљати никакву конкурентну предност. Ова револуција представља фузију достигнућа у техници, моделовању и управљању где се бришу границе између физичке, биолошке и дигиталне сфере (Terziyan, 2018).

Узевши у обзир чињеницу да математички модел одређеног технолошког процеса мора да да слику реалног технолошког процес што је боље могуће, јавља се питање идеализације реалног процеса. На тај начин, са једне стране потребно је задржати примарне карактеристике процеса, док са друге стране математички модел не сме бити сувише комплексан, како не би отежао саму математичку анализу. Такође, комплексност смањује примењивост модела на уско окружење неке од равнотежних тачака система (Mihajlović, 2014).

Према анализи расположиве литературе и претходног истраживања у овој области (Mihajlović et al., 2007; Wilis & Tham, 2009; Ђорђевић et al., 2010, Mihajlović, 2014), уколико се занемаре модели у форми реалних макета објеката (физички модели), нумерички модели могу бити засновани на основи два полазна приступа:

математички приступ и статистички приступ (Wilis & Tham, 2009). Потом, даља класификација може се заснивати на начину развоја и разраде самих модела. Сходно томе, развој модела може бити заснован на познатој теоријској основи и научној спознаји самога система који је у литератури познат и као „први принцип моделовања (Terence, 1987; Ђорђевић et al., 2010; Миахајловић et al., 2011). Или на експериментално добијеним, или измереним, функционалним зависностима стварног објекта управљања у нестационарном режиму. У литератури је овај вид моделовања присутан и под називом „идентификација система“ или „моделовање управљано подацима“ (Sjoberg et al., 1995).

Према професору др Ивану Миахајловићу који се дуго година бави проблематиком моделовања технолошких система и процеса ова два приступа моделовању у својим радовима веома често означава као М1 и М2 (Миахајловић et al., 2007; Миахајловић et al., 2011; Миахајловић, 2014). За приступ М1 он наводи да се у таквим случајевима математички модел заснива на систему диференцијалних једначина и структура система је посланица спознаје теоријске основе самог разматраног система. У зависности од самог система, структура финалног модела може бити дата у облику два приказа. Први приказ је у облику збирног параметра или равномерно расподељених параметара система. Модели засновани на збирном параметру најчешће се описују ординарним диференцијалним једначинама (ОДЕ), док се дистрибутивни параметри (други приказ) описују системима парцијалних диференцијалних једначина (ПДЕ). ОДЕ се користе за опис система у једној димензији, најчешће времену док се ПДЕ модели узимају у обзир више димензија, као и могућу нехомогеност у понашању и структури система (Миахајловић, 2011; Миахајловић, 2014).

Да би се М1 приступ моделовању применио у целини, неопходно је познавати структуру система, као и његову природу која се осликава у неком физичком закону који описује његово понашање. Након тога, развија се сам модел у облику ОДЕ или ПДЕ система диференцијалних једначина, у зависно од тога колико независних променљивих је неопходно за опис стања система. Међутим, примена оваквих модела укључују бројне апроксимације и упрошћавања како би се добило поједностављење полазног модела. Обзиром да потпуно линеарни системи у природи не постоје, успех М1 приступа моделовању заснива се на

линеаризацији система нелинеарних диференцијалних једначина у окружењу изабране равнотежне тачке система. Ово води ка потешкоћама моделовања комплексних система, који могу имати више од једног стабилног стања и самим тиме више од једне равнотежне тачке. Такође, динамичко понашање реалних система додатно отежава М1 приступ моделовању. Самим тиме, овакав приступ моделовању система је најчешће примењив за једноставне физичке системе, где услед временских ограничења он често може бити практично неефикасан. На пример, ако се ради о процесима који су веома сложени, те се систем диференцијалних једначина који се добија као резултат моделовања не може решити у реалном времену или не постоји довољно претходно знање о самом процесу, тада се приступа другом начину моделовања означеном као М2 (Mihajlović, 2011; Mihajlović, 2014).

М2 начин моделовања заснива се на експериментално добијеним, или измереним, функционалним зависностима стварног објекта управљања у нестационарном режиму, где се код овог приступа моделовања користе мерења система како би се модел развио емпиријски. Често се користи унапред осмишљен експеримент како би се сакупили неопходни подаци о систему. На тај начин, употребом измерених излаза система, добијених након увођења предефинисаних улазних сигнала, дефинише се математички модел објекта система. У оваквим случајевима најчешће није неопходно детаљно познавати структуру система, као ни физичке законитости понашања система, већ је довољно сакупити излазе система након увођења претходо задатих вредности улазних величина и на тај начин формирати почетну основу података за даљи процес моделовања. Овај приступ назива се веома често у литератури и моделовање по принципу „црне кутије“. Моделовање по пинципу „црне кутије“ постаје све значајније из практичних разлога своје једноставности, где овакви модели једноставно описују везу између улаза и излаза посматраних система. Уколико се узме у обзир једноставнија процедура израде оваквих модела, јасна је широка експанзија ових модела. Модели базирани на М2 методологији даље се могу класификовати на линеарне и нелинеарне моделе. Што се тиче линеарних модела данас доминирају модели који се заснивају на временским серијама (временски трендови) или на функцији пореноса система. Ипак, најчешће коришћене технике за ову врсту

моделовања су оне које се заснивају на алгоритмима базираним на најмањем квадрату. И поред разлике које постоје у начинима моделовања заснованих на теоријској спознаји (M1) или експериментално добијеним параметрима система (M2) мора да постоји једна заједничка карактеристика резултирајућих модела, а то је валидација њихове ваљаности на крају (Taylor et al., 2003; Nikolić & Mihajlović, 2013; Mihajlović et al., 2014a, Mihajlović et al., 2014b).

У последњих неколико година јавља се велики број радова у којима аутори примењују савремене рачунске технике за израду нумеричких модела технолошких процеса. На пример Avalle et al. (2014), су на основу резултата добијених експерименталним путем из процеса механичког ширења цеви формирали нумерички модел који је примењив у пракси. Jovanović et al. (2014), су вршили моделовање процеса уклањања испарљивих компоненти српског лигнита. Такође, како оптимизација процеса, обновљиви извори енергије и заштита животне средине све више постају атрактивне научницима, тако се публикују бројни радови који се баве моделовањем у области енергетске ефикасности и заштите животне средине. На пример, Sa'idi et al. (2014), применом фази логике (Fuzzy Logic) врши моделовање потенцијалних ризика у рафинеријама нафте и гаса, где је предност коришћења фази модела у превазилажењу неизвесности одржавања заснованог на ризику (Nikolić & Mihajlović 2013; Mihajlović et al., 2014a, Mihajlović et al., 2014b).

Такође, треба истаћи да је све већа присутност истраживања која се баве моделовањем адекватне селекције технолошких процеса. Тако да се у раду Hsu et al. (2010), управо баве методама селекције технологиј за регенерацију мазива. У овом раду дат је модел примене Фази Delphi методологије у комбинацији са Фази АНР методологијом, где се применом одговарајуће методологије за селекцију адекватне технологије комбинује утицај свих технолошких, еколошких и економских параметара. Комбинацијом утицаја свих ових параметара у процесу селекције одговарајућег технолошког процесас остварују се циљеви свих интересних група.

Не треба занемарити и све већа присутност развоја методологија моделовања у области екологије и заштите животне средине. На пример у раду Johnson & Omland (2004) управо се баве методама селекције адекватних модела у

екологији. Такође, данас велики проблем почиње да ствара загађење ваздуха које настаје развојем саобраћаја у великим градовима, велики број аутора се бави развојем модела који могу довести до предвиђања и превенције појачаних концентрација полутаната у ваздуху. Не треба занемарити ни рад групе аутора Venegas, E.L., Mazzeo, N.A., Mariana, C.D. (2014), који су применили „Semi-Empirical Urban Street (SEUS) model”. Овај једноставан математички модел заснива се на мерењу концентрације полутаната у ваздуху унутар тзв. “уличног кањона”. Као утицајне параметре моделовања су користили количину емисије, везану за ширину самих улица, брзину расипања штетних примеса, количину аутомобила као и већ постојећу концентрацију полутаната у ваздуху. Изведени су закључци да је од највећег утицаја правац и брзина ветра као и концентрација саобраћаја у датом тренутку посматрања. Подаци који су били коришћени у истраживању прикупљени су мерењем на улицама европских градова.

На основу горе наведених примера, може се увидети велика примењивост различитих алата моделовања у различитим областима савремене науке и технике. Такође, присутно је и проширење у различитим правцима свих потенцијалних алата и техника моделовања које аутори примењују на различите технолошке процесе и системе, нарочито метода које се баве селекцијом и дају значајне доприносе доносиоцу одлука. Дешава се да у неким случајевима чак није ни најјасније предочено из ког разлога су се аутори определили за конкретан метод моделовања разматраног технолошког процеса. Није редак случај да се избор врши једноставном селекцијом неког од начина моделовања који су примењивали други истраживачи који су моделовали сличне технолошке системе.

У овој дисертацији идентификују се одговарајући технолошки параметри у оквиру датих технологија. Применом одговарајућих статистичких алата који су подржани од стране савремених софтверских пакета развијени су вишекритеријумски модели за одабир оптималног технолошког процеса у комплексним условима. У дисертацији се највећи акценат ставља на методама за селекцију технолошких процеса екстракције бакра.

5. АНАЛИЗА И ПРИМЕНА МОДЕЛА ВИШЕКРИТЕРИЈУМСКЕ АНАЛИЗЕ У ОДЛУЧИВАЊУ

Почетком 21. века дошло је до веома брзог развоја и популарности метода вишекритеријумске анализе. Без обзира о каквом проблему се ради, да ли је у питању стратегијска одлука или управљачка акција, да ли је у питању технички или економски проблем или се ради о неком мултидисциплинарном проблему који утиче на део система или систем у целини, методе вишекритеријумске анализе пружају велику помоћ у избору правих одлука и давању одговарајућих решења проблема. Менаџери у својој свакодневной пракси, хтели то или не, велики део времена утроше за доношење различитих пословних одлука. Одлуке које он доноси могу бити њихове личне или групне. Тимско донешене одлуке веома често даје боља решења, јер се на тај начин могу сагледати више углова одређеног проблема одлучивања. Делокруг пословних проблема је веома разноврсан и широк те се и комплексност доношења одговарајућих одлука знатно разликује. Сам процес је веома комплексан и не може се свести на алгоритам математичког одлучивања и програмирања, већ он представља сложену структуру где се веома често укључују и критеријуми задати атрибутима (Baker et al., 2001; Mitevaska, 2005; Deretić, 2012)

Анализа проблема одлучивања представља филозофију која омогућава да се системски и формално приђе проблемима одлучивања, а истовремено пружа и практичан прилаз проблему коришћењем потребних концепта. То је прилаз који користи свој скуп логичких методологија и детаљних процедура, које омогућавају системску анализу комплексних проблема одлучивања. Самим тим једна од фаза у процесу доношења одлуке припада и формирању модела за проблеме који се решавају. Модел у том случају представља синтаксну апстракцију реалности односно поједностављену слику објективне стварности из разлога што модел треба да обухвати само релевантне карактеристике феномена који представља.

Као предности коришћења модела може се навести следеће:

1. Омогућавају анализу и експериментисање са сложеним проблемима,

2. Обезбеђују ефикасно управљање ресурсима који се користе за анализу дате појаве,
3. Време за анализу дате појаве се значајно смањује,
4. Наглашавају се битне карактеристике појаве.

У процесу одлучивања може се сматрати да је фаза моделирања једна од најкритичнијих. Разлог томе је то што уколико се испусти нека од битних карактеристика појаве која се тим моделом описује, добијамо његову искривљену слику. Самим тим одлуке које се донесу на основу таквог једног модела одлучивања даваће лоша решења проблема. Треба нагласити да процес доношења одлука веома се разликује од процеса решавања проблема. Односно процес решавања проблема представља шири процес од процеса одлучивања. Одлучивање је само један део целокупног процеса решавања проблема. Међутим, може се рећи да иако одлучивање представља само један део он може представљати и најважнији део процеса решавања проблема. Јер погрешно донете одлуке у фази одлучивања не могу отклонити свој негативан утицај на решавање проблема у осталим фазама спровођења акција које су одабране у тој фази (Treitz, 2006; Deretić, 2012).

Вишекритеријумско одлучивање (Multicriteria Decision Making Methodology - MCDM) представља област где се формирају математички модели за одређене стварне проблеме водећи рачуна о више циљева истовремено. У основи трага се за решењем које ће дати најбоље резултате по свим разматраним критеријумима. Ови критеријуми могу бити изражени различитим мерним или новчаним јединицама, различитим вероватноћама појављивања или субјективних процена датих по некој мери или неких других разлога. Све ово доводи на закључак да без доносиоца одлуке коначног решења нема (Brans & Mareschal, 1994, Kazem & Nadinejad, 2015)

Задатке вишекритеријумског одлучивања у случајевима када се разматрају важне одлуке као што су одлуке у вези са капиталним улагањима (нпр. изградња новог постројења за екстракцију бакра), карактерише релативно велики број критеријума. Самим тим повећањем броја критеријума задаци анализе постају све комплекснији и тежи. У одлучивању учествује већи број појединаца или група и сви они дају предност својим системима вредности, односно критеријуме који

најбоље осликавају интересе групе којој припадају. Ради ефикаснијег анализирања одлуке и проналажења адекватнијег решења проблема критеријуми се групишу (Treitz, 2006; Deretić, 2012).

Најчешће се јављају следеће групе критеријума:

- економски,
- технички,
- технолошки,
- социјални и
- еколошки.

Према проблему који треба да се реши односно према намери доносиоца одлуке, вишекритеријумски задаци се класификују према Deretiću (2012) у следеће три групе:

1. задаци вишекритеријумске оптимизације којима се решавају проблеми одређивања подскупа решења која задовољавају одређене услове и/или избора једног решења из овог подскупа,
2. задаци вишекритеријумског или вишеатрибутног рангирања којима се решавају проблеми одређивања потпуног или делимичног редоследа, ранг листе, решења која припадају коначном и пребројивом скупу;
3. задаци вишекритеријумске или вишеатрибутне селекције којима се решавају проблеми избора одређеног броја решења која припадају коначном и пребројивом скупу.

Технолошки развој и све сложенији услови пословања захтевају вишекритеријумски приступ при решавању пословних проблема. На тај начин врши се објективно поређење између већег броја алтернатива које су оцењене у систему већег броја различитих разнородних критеријума, који могу бити изражени у различитим јединицама, са различитим релативним значајем, и са различитим захтевом за екстремизацијом (Mitevaska, 2005; Deretić, 2012).

Улога доносиоца одлуке приликом спровођења процеса вишекритеријумског одлучивања огледа се не само у доношењу финалне одлуке,

примењеном методологијом, већ и у дефинисању вишекритеријумске базе – система критеријума за евалуацију алтернатива, избору преференцијских функција, одређивању релативног значаја критеријума и одговарајућих параметара, а што све представља значајне и веома осетљиве фазе у процесу одлучивања.

Сам проблем одлучивања се може дефинисати на више начина. Најчешће се дефинише као догађај који неповољно утиче на остваривање потављених циљева. Да би доносиоц одлуке успешно остварио постављене циљеве он мора преузети одређене акције које ће уклонити утицај неповољних догађаја. Према нормативној теорији одлучивања, доносиоц одлуке је савршено рационалан појединац. Он увек зна шта хоће и настоји да то оствари. Мада се постављени циљеви веома често разликују по формулацији, сложености, садржини и знању, сви они у основи садрже и нешто зајеничко. Та зајеничка компонента је жеља доносиоца одлуке да повећа добитке, односно, смањи или ако је могуће у потпуности избегне губитке у материјалном, новчаном, емоционалном или неком другом смислу. При томе се рационални доносиоц одлуке руководи принципом *максимизације личне добробити* (Mitevska, 2005; Treitz, 2006; Deretić, 2012).

Доносилац одлуке на крају процеса одлучивања треба да усвоји неко решење и такво решење се назива најбоље или преферирано решење. Задатак MCDM је да доносиоцу одлуке помогне у избору решења које сматра најбољим за настали проблем који је потребно решити. Зато се напори ка решавању постављеног вишекритеријумског проблема често називају вишекритеријумска анализа. У процесу одређивања најбољег решења одлучујућу улогу има доносилац одлуке. Он је тај који одлучује шта му је важније и које решење радије прихвата ("преферира").

У литератури може се наћи велики број MCDM метода где ће се у наставку овог текста набројати неке од познатих и најчешће коришћених метода у пракси. У оквиру осталих поглавља биће дата нешто детаљнији опис примењен MCDM методологије на решавање конкретног проблема селекције адекватног технолошког процеса за екстракцију бакра. У табели 5.1. дата је једна од квалификација метода вишекритеријумског одлучивања. Оно што је карактеристично за све ове методе одлучивања јесте то да су настале у периоду

брзог развоја информационих технологија као и да се заснивају на примени истих (Deretić, 2012).

Табела 5.1. Класификација метода вишекритеријумског одлучивања (Deretić, 2012).

Назив групе	Опис групе	Методе у оквиру групе
Метода за одређивање неинфериорних решења	Одређује се скуп неинфериорних решења, а доставља се доносиоцу одлуке да на основу своје преференције усвоји коначно решење.	- метода тежинских коефицијената, - метода ограничења у простору критеријумских функција, - вишекритеријумска симплекс метода.
Методе са унапред израженом преференцијом	Формира се синтеза (резултантна) критеријумска функција па се задатак даље решава као да је једнокритеријумски.	- метода „PROMETHEE“, - циљно програмирање, - метода „ELECTREE“, - метода сурогат вредности размене.
Интерактивне методе	Донсилац одлуке посебно изражава своју преференцију интерактивним коришћењем одговарајуће методе	- метода STEM, - метода SEMOPS.
Стохастичке методе	У оптимизациони модел се укључују и показатељи неизвесности.	- метода PROTRADE.
Методе за "истицање" подскупа неинфериорних решења	Сужавање скупа неинфериорних решења се постиже увођењем додатних елемената одлучивања.	

Поред метода наведених у табели 5.1 развијене су и многе друге методе које се примењују у процесу доношења одлука као што је АНП, ANP, TOPSIS, VIKOR, као и њихова примена у фази (fuzzy) окружењу. У поглављима која следе биће дат детаљнији опис корићеног метода вишекритеријумског одлучивања. У седмом поглављу биће дат детаљнији опис PROMETHEE/GAIA методологије за

формирање модела селекције технолошких процеса пирометалуршке екстракције бакра, док ће у осмом поглављу бити дат детаљнији опис АНП-TOPSIS методологије у фази окружењу ради верификације претходно добијених резултата селекције. У деветом поглављу могу се сагледати резултати рангирања применом PROMETHEE/GAIA методологије на конкретним вредностима из праксе.

5.1. Примери примене модела вишекритеријумског одлучивања код технолошких система и процеса

Вишекритеријумско одлучивање је веома снажан алат који у свом саставу има широк спектар релеватних методологија развијених ради решавања проблема у оквиру којих треба узети у обзир неколико супростављених критеријума. Саме MCDM методе обезбеђују математичке моделе за рангирање алтернатива на основу селектованих критеријума, при чему на јасан и прегледан начин представљају резултате рангирања алтернатива и дају синтезу финалних резултата (Brans & Mareschal, 1994; Kazem & Hadinejad, 2015; Bagherikahvarin, 2016).

Значај вишекритеријумског одлучивања у процесу планирања као и развој широког спектра метода вишекритеријумског одлучивања које су подржане савременим информатичким технологијама допринело је примену ових метода и на технолошко техничком пољу. Најчешће се таква примена огледа кроз селекцију одређеног технолошког процеса где се у анализу укључује велики број критеријума који могу имати и различите тежинске вредности. Може се пак примена MCDM алата огледати кроз селекцију одговарајућих улазних сировина где се на такав начин унапређује технолошки процес кроз добијање бољих излазних резултата таквог процеса. Јер ако се жели добити квалитетан производ два основна фактора играју значајну улогу у свакој производњи. Први фактор је квалитет улазних сировина док се други фактор огледа у квалитету средстава за рад односно квалитету технолошког процеса.

У раду Yu-Lung Hsu из 2004 године, примењене су методе вишекритеријумског одлучивања за селекцију регенеративне технологије подмазивања. Пошто се ради о веома сложену технолошкком процесу где се

захтевају велика финансијска средства, за доношење овакве одлуке најчешће се формира комисија која је састављена од стручњака из академске заједнице, индустрије и владе. Ово истраживање је имало за циљ да обезбеди системски приступ у селекцији технолошког процеса где су предложене две фазе у којима ће бити примена два различита алата вишекритеријумског одлучивања.

У првој фази коришћен је Фази Делфи Метод (*eng.* Fuzzy Delphi Method – FDM) како би се одредили критични фактори код регенеративних технологија путем интервјуа са горе наведеним експертима. Друга фаза примењује фази Analytic hierarchy process (АНП) методе уз чију помоћ су додељени тежински коефицијенти за сваки посматрани критеријум. У процесу рангирања узета су осам технолошка процеса која имају широку употребу у свету. Добијени критеријуми након прве фазе истраживања били су сврстани у три групе и то у техничке, економске и еколошке. Од стране експерата било је предложено 17 критеријума, али након примене FDM методологије као кључни критеријуми за даљи процес одлучивања издвојено је 12 критеријума. Самим тим, кроз овај приступ може се и видети једна сврха моделовања, а то је селекција најутицајнијих параметра односно најзначајнијих параметра који ће описати дату реалност. Та реалност у овом случају су технолошки процеси који су од највћег значаја за све доносиоце одлука. Након примене друге фазе дошло се до закључка да је најважнији аспект од три наведена аспекта управо технолошки. Разлог томе је што се ради о веома сложеној технологији која има још увек доста елемената који су у експерименталном развоју па је доносиоцима одлуке поузданост технологије веома битна.

Као што је број технолошких процеса велики, а и тенденција развоја MCDM метода је у сталном расту, примена ових метода на различите технолошке процесе је обимна. Један од новијих радова јесте рад групе аутора Aşchilean et al. (2017) где се у њему примењује вишекритеријумско одлучивање у избору оптималне технологије за санацију водоводних цеви у систему за дистрибуцију воде у румунском граду Цлуј-Напоца. Такође, треба навести и истраживање које је вршено од стране групе аутора Yang et al. (2018) и у коме се користе методе вишекритеријумског одлучивања у циљу приоритизације обновљивих извора топлоте у домаћинству.

И поред развоја и примене многих MCDM алата и њихове примене у селекцији различитих технологија и технолошких процеса примена ових алата за селекцију технолошких процеса екстракције бакра веома је мало заступљена. Поготову што се ради о значајним технолошко-техничким системима који запошљавају велики број радника и имају значајан утицај на економију сваке земље. Чак је и примена MCDM метода у другим областима обојене металургије слабо заступљена. Један од радова који се бави применом вишекритеријумског одлучивања у области екстракције бакра јесте рад Nikolic et al (2009) у коме се врши селекција квалитета концентрата бакра који преставља улазну сировину овог технолошког процеса применом PROMETHEE/GAIA методологије са циљем да се одреди најквалитетнији концентрат, који ће дати најбоље економске и еколошке ефекте.

У даљим поглављима ове докторке дисертације биће дата детаљна примена одговарајућих алата одлучивања на конкретне технолошке процесе екстракције бакра применом пирометалуршких процеса. На тај начин долази се до развоја вишекритеријумског модела који даје могућност одабира технолошког процеса са највећим степеном практичне примене уз задовољење свих претходно постављених услова битних за стејкхолдере.

6. ТЕХНОЛОШКИ ПОСТУПЦИ ПИРОМЕТАЛУРШКЕ ЕКСТРАКЦИЈЕ БАКРА И ЊИХОВИ ОСНОВНИ ПАРАМЕТРИ

Имајући у виду да је основни циљ ове дисертације развој модела који на систематски начин посматра утицајност техничких, еколошких и економских параметара код селекције оптималног технолошког процеса за пирометалуршку екстракцију бакра, у овом поглављу биће детаљно представљени разматрани процеси и селектовани утицајни параметри.

Бакар представља веома значајан производ за економски развој сваке земље. Експолатација бакра датира од најранијих дана људске заједнице, тачније из праисторијског доба. Чак се и једно доба у људској историји назива „Бакарно доба“ (енгл. Chalcolithic) (Artioli, 2015). Иако представља један од најстаријих експлоатисаних метала, његова значајност није се ни данас умањила. Напротив, значајност овог метала је већа него икада и овакав позитиван тренд раста значајности се наставља.

Бакар данас представља веома важну сировину са многобројним наменама, док је у одређеним областима привреде незаменљива сировина. Иако је у једом периоду дошло до одређене замене у његовој примени другим материјалима то није успорило потражњу за овим металом. Као пример те замене може се навести алуминијум који је заменио бакар у погледу преноса електричне енергије заменом бакарних каблова алуминијумским. Такође, је до замене бакра алуминијумом дошло и у погледу производње хладњака и расхладних цеви. Са друге стране, откриће и практична примена нових материјала доводи до смањења доминатне примене бакра. Као пример може се навести замена бакарних каблова у оквиру комуникационе мреже оптичким проводницима. Такође, употреба пластичних материјала у изради водоводних и других цеви замењује досадашњу примену бакарних цеви. Ова замена новим материјалима најчешће се врши са циљем побољшања перформанси самог производа, као и смањења њихове цене коштања. Међутим и даље постоје многе области где је овај метал незаменљив. На пример, примена бакра у електронској индустрији је од суштинског значаја и представља

незаменљив материјал. Разлог томе су специфичне карактеристике које поседује бакар, те се његова доминација у тим областима не може довести у питање (Moskalyk & Alfantazi, 2003; Schlesinger et al., 2011; Jaunky, 2013; Elshkaki et al., 2016; Nikolić et al., 2018).

И поред наведених успорења, потражња и производња бакра из године у годину стално расте. Због тога је константно присутна потреба за развојем бољих научних алата и нових технологија за екстракцију бакра, које би омогућиле смањење негативног утицаја на природу. На тај начин, сачувала би се лепота и разноликост природе, а истовремено би се повећала производа и потрошња бакра (Sievers, 2003; Požega et al., 2010). Из тих разлога је у последњих 50 година забележен еволуциони развој технолошких процеса у екстракцији обојених метала, поготово у области екстракције бакра. На тај начин повећавали су се производни капацитети, а такође побољшавао се квалитет и смањивао негативан утицај на окружење (Herrerros et al., 1998; King, 2007; Nikolic et al., 2009).

Истраживање које је спровео Vishal Chandr Jaunky (2013) даје анализу развоја шеснаест земаља кроз утицај потрошње бакра. Ово истраживање, а и остала научна литература из ове области (Tilton, 1989; Ghosh, 2006; Nuh, 2011; Jaunky, 2012) доводи до закључка да производња и потрошња бакра представља један од елемената дугорочног економског развоја сваке земље. Утицај ових постројења на економију једне земље може се сагледати кроз више аспеката. У првом реду треба споменути да ова постројења запошљавају велики број радника, а такође производња бакра се мери у хиљадама тона што доприноси осетном бољитку непосредног окружења, а и земљи у којој ово постројење егзистира. Такође, економско побољшање земље се може сагледати кроз смањење увоза ове данас веома значајне сировие широке примене. Правилни одабир врсте постројења за екстракцију бакра доприноси и побољшаву животне средине у којој постројење реализује своју производњу. Имајући у виду утицај оваквих постројења на економију окружења као и укупан утицај на економију једне земље, потребно је приликом доношења одлуке о изградњи новог постројења, или повећања постојећих капацитета, или пак прелазка на нови технолошки процес, приступити са повећаном пажњом. Иако се производња бакра врши више векова, значајнији техничко - технолошки напредак овог процеса постигнут је у последњих сто година.

Међутим и даље се трага за оптималним процесом његове производње. Процесом који ће дати бакар високог квалитета са ниским трошковима пословања, и тиме резултовати најбољим економским ефектима уз што мање негативаног утицај на животну средину. Поред бројних технолошких процеса за пирометалуршку екстракцију бакра, у овој докторској дисертацији одабрано је осам најактуелнијих технолошких процеса уз консултацију експерата, као и на основу учесталости њихове примене. Опис одабраних поступака дат је у наставку овог поглавља (Davenport et al., 2002; Moskalyk & Alfantazi, 2003; Schlesinger et al., 2011; Najdenov et al, 2012; Najdenov, 2013). Док у раду Каруста (2004) који разматра више од 50 актуелних топионица у свету, на основу економских, еколошких и технолошких аспеката, може се најбоље уочити учесталост појављивања одређене врсте технолошког процеса за екстракцију бакра (Каруста, 2004).

Имајући у виду сам значај крајње одлуке о избору одговарајућег постројења за топљење концентрата бакра потребно је целокупну проблематику избора детаљно анализирати. У савременом окружењу препуном изазова, често су потребни брзи и ефикасни алати уз помоћ којих ће извршити брзо моделирање и оптимизацију неколико алтернативних решења, а затим их упоредити у складу са различитим предусловима или критеријумима учинка (Vučićak, 2016). Овај проблем је могуће решити коришћем вишекритеријумског одлучивања који пружа широк спектар математичких модела којима се може доћи до ефикасних решења. Суштина је била да се одреди који актуелни технолошки процес остварује успешно претходно постављене циљеве и самим тим одреди оптималан технолошки процес за дату ситуацију.

У овој дисертацији вршено је рангирање на основу једанаест економских, технолошких и еколошких параметара. За селекцију одабраних параметара коришћен је литературни преглед (Davenport et al., 2002; Moskalyk & Alfantazi, 2003; Schlesinger et al., 2011; Najdenov et al, 2012; Najdenov, 2013) као и консултације групе експерата. На основу оваквих извора одређено је једанаест значаних критеријума које треба користити приликом доношења одлуке о одабиру оптималног технолошког процеса за пирометалуршку екстракцију бака. Значај ових критеријума за само формирање модела биће дат кроз кратак опис у даљем тексту овог поглавља.

Посматрано са аспекта техничко-технолошких параметара, селектована технологија мора бити у сагласности са осталим деловима комплектног технолошког процеса једне компаније. На пример, селектовати најмодернију технологију пирометалуршке екстракције бакра, а да се при томе не узме у обзир капацитет рудне производње или могућност и расположивост увозне рудне сировине, сигурно неће дати адекватан укупни ефекат, у првом реду економски - а потом и све остале. Јер инвестиција у остале технолошке и економске аспекте овакве производње на дугорочном нивоу доноси боље економске ефекте. Ови ефекти се огледају кроз остварену уштеду од отклањана последица негативног утицаја на животну средину и људе, а такође и кроз оптимално коришћење ресурса.

6.1. Преглед разматраних технолошких процеса пирометалуршке екстракције бакра

У последњих пола века забележен је еволуциони развој технолошких процеса у области екстракције бакра а такође и у екстракцији осталих обојених метала (Herrerros et al., 1998; Nikolic et al., 2009; Kujawski & Pospiech, 2014).

Екстракција бакра из бакарних руда може се вршити коришћењем два основна поступка и то пирометалуршким и хидрометалуршким поступком. На основу тога, избор у првој фази је опредељење између пирометалургије и хидрометалургије, а потом за неку од технологија из ових широких области. Прегледом литературе може се закључити да су хидрометалуршки процеси еколошки прихватљивији од пирометалуршких процеса. Као разлози томе могу се навести да приликом употребе пирометалуршког процеса корсити се већа количина енергије и енергената јер се процеси одвијају најчешће на температурама изнад 1200 °C. Такође, пирометалуршким процесом настају гасови полутанти који се у даљем процесу требају адекватно третирати у првом реду SO₂, јер би њихово емитовање у атмосферу довело до великих еколошких проблема. Додатне еколошке проблеме код ове врсте процеса доводи и прашина која настаје у процесима млевења и флотирања као и транспорта кроз саму топионицу. Иако су хидрометалуршки процеси еколошки прихватљивији употреба пирометалуршког

поступка добијања бакра још увек је знатно заступљенија од употребе хидрометалуршког поступка. Разлог томе јесте што се пирометалуршки процеси одигравају на високим температурама које доводе до веома брзих реакција а самим тим применом пирометалуршког процеса добија се метал бакра знатно брже него применом хидрометалуршког процеса. Пирометалуршки процеси нису превише сложени, док хидрометалуршки процеси захтевају примену савремених технологија као и прецизнију регулацију и контролу свих параметара процеса. Такође, материјали који се користе у хидрометалургији захтевају сталну брзину дозирања и процес је осетљивији на промене квалитета и количине реактанта. Док материјали који се примењују у пирометалуршким процесима су погоднији за дисконтинуално, као и за континуално шаржирање (Bridge, 2000; Gordon, 2002; Schlesinger, 2011; Rajčić-Vujasinović & Grekulović, 2017). Приликом одабира технолошког поступка за добијање метала бакра као два основна критеријума узимају се економичност и еколошка прихватљивост. Еколошка прихватљивост технологије је знатно актуелизована крајем прошлог века, док је пре тога економичност била параметар који је био најутицајнији за одабир дате технологије. Из тих разлога данас се око 80% произведеног бакра добија првенствено пирометалуршким поступком (Požega et al., 2010; Schlesinger, 2011). Такође, бројна унапређења која су се десила у претходном периоду довела су, поред повећања производне инфраструктуре и капацитета и до смањења негативног утицаја на животну средину (Franzin et al., 1979; Filipou, 2007; Aznar, 2008; Kujawski & Pospiech, 2014).

У тренутној употреби, у топионицама бакра широм света, постоји велики број различитих пирометалуршких процеса за екстракцију бакра (Devenport, 2002; Moskalyk & Alfantazi, 2003). У даљем тексту овог рада анализирано је осам најактуелнијих и заступљенијих технолошких процеса који су уз консултацију експерата одабрани за даље разматрање. Технолошки процеси у овом истраживању представљаће алтернативе избора.

6.1.1. Outokumpu flash smelting (Outotec)

Outokumpu технолошки поступак спада у групу аутогених поступака топљења у лебдећем стању. Он је први пут уведен у индустријску праксу 1949. године у топионици Harjavalta у Финској. Међутим, историја развоја outokumpu tehnologije креће много раније (1910. године) и везује се са проналаском богатог рудног налазишта бакра у месту Kuusjärvi у источној Финској. У непосредној близини овог места налазило се брдо које је садржало богату руду бакра, ткз. „чудно брдо“ односно на Финском „outo kumpu“ одакле и проистиче назив ове технологије. Неколико година касније на овом месту почела је производња. Власништво прве компаније је било мешовито, односно комбинација приватног и државног капитала. Касније ову компанију у потпуности преузима држава Финска где Outokumpu постаје у потпуности државно предузеће (Outokumpu, 2018).

Иако је први светски рат успорио развој овог предузећа оно се константно развијало. До 1930. године outokumpu је постао главни произвођач бакра и извозник руде бакра. Ради даљег напретка и развоја ове компаније било је потребно променити власичку структуру, тако да је 1932. године ова компанија прешла у приватно власништво и постаје једна од пет највећих произвођача у Европи. Почетком 1940-ти и Другог светског рата Outokumpu је демонтирао своју топионицу и преместио је у Harjavalta како би се удаљило од источне границе и напада Русије јер је то био једини извор бакра у Финској. Обнова топионице је трајала само шест месеци, а обновљена топионица била је дупло већег капацитета. Међутим, због скока цене енергента након рата нарочито електричне енергије а и непостоја хидроелектране у близини нове локације ова компанија почиње да модификује свој технолошки процес производње бакра. Тако је развила процес аутогеног топљења бакарних концентрата где се користи енергија реакције која настаје оксидацијом сулфида. Outotec процес је у последњих шездесет година имао врло успешан развој, а данас је најраспрострањенији процес у производњи бакра и никла (Higgins et al., 2009; Враџар, 2010; Schlesinger et al., 2011; Najdenov, 2013; Liu et al., 2014).

Сва усавршавања овог технолошког процеса довела су до тога да је Outokumpu поступак постао флексибилан за топљење концентрата различитог

састава. Развој Outokumpu поступка топљења у лебдећем стању може се поделити у три периода:

1) Од 1949 – 1970. године када је аутогено топљење у пећима постигнуто употребом ваздуха предгрејаног на 400-500 °С. Изузетак је топионица у Јапану где се овај процес одвијао на уотребом ваздуха предгрејаног на 1050 °С.

2) Од 1970-1995. године када је предузеће Outokumpu поред предгрејаног вазуа, почело да употребљава и ваздух обогаћен кисеоником. Температура предгрејаног ваздуха као и проценат обогаћивања кисеоника разликовао се од топионице до топионице и најчешће је зависо од састава сировина и цене енергената. Тако је на пример у осам топионица ваздух предгрејан на 200 °С, а потом обогаћиван кисеоником до 30%, док је у седам топионица овај проценат био виши и кретао се од 30-40%. Постојале су пет топионице које су користиле ваздух обогаћен са 40-50% кисеоника, 50-60% O₂ у четири топионице, 60-70% O₂ у једној, 70%-80% O₂ у једној (САД) и 80-90% O₂ у једној (Чиле).

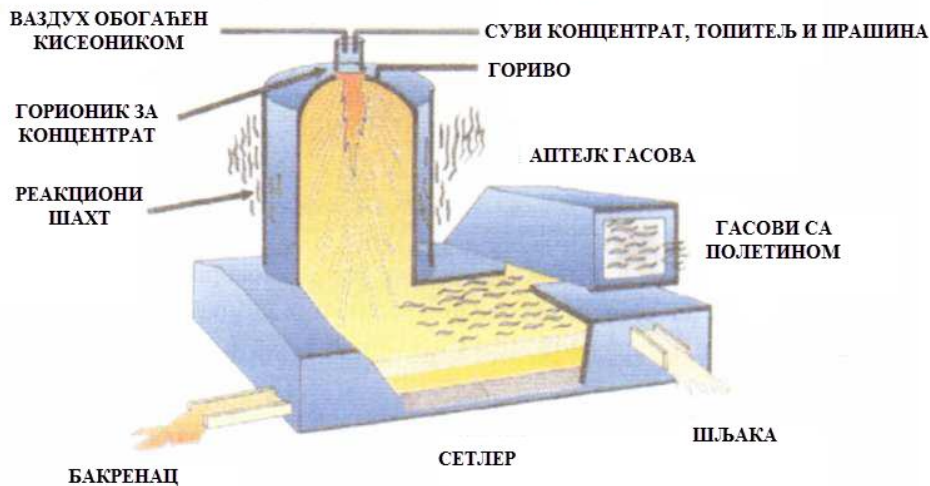
3) Од 1995 године када је топионица Kennecott у Америци увела континуалан процес топљења и конвертовања у лебдећем стању (Vраџаг, 2010).

Сврха увођења ваздуха обогаћеног кисеоником јесте да се створе уштеде у енергентима у првом реду нафте која постаје све скупље гориво.

На слици 6.1 дата је Outokumpu пећ која приказује токове концентрата, предгрејаног ваздуха обогаћеног кисеоником, горива (најчешће мазута ако је потребно), и испуштање бакренца и шљаке. Најважнији процесни параметри код овог процеса јесу степен обогаћивања ваздуха кисеоником који се обично креће од 30% до 70% а у неким топионицама може ићи и до 98% и садржај бакра у бакренцу. Ова два параметра имају директан утицај на смањење трошкова процеса топљења, процеса конвертовања, гасовног система и производње H₂SO₄. Утицај повећања садржаја бакра у бакренцу може се сагледати кроз потпуније и ефикасније коришћење топлоте у фази топљења. Такође, време потребно за конвертовање је знатно краће, самим тим потребан је мањи броји и капацитет конвертора. Бакренац

са великим садржајем бакра поред мањи трошкова конвертовања такође ослобађа и мању запремину конверторског гаса, што смањује и негативан утицај на животну средину (Vраћар, 2010).

Процес аутогеног топљења бакарних концентрата овим поступком у односу на пламене пећи има знатно боље техничко-економске показатеље, а такође ова технологија топљења је у еколошком и оперативном смислу најприхватљивија јер омогућава произвођачима да задовоље и најстрожије еколошке стандарде (Davenport 2002; Najdenov, 2013;).



Слика 6.1. Пећ Outokumpu (Najdenov, 2013)

Поступак топљења бакарних концентрата у лебдећем стању са предгрејаним вазухом обогаћен кисеоником применом Outokumpu поступка може се описати кроз следеће фазе:

Прва фаза – је припрема шарже која се саставља од бакарних концентрата, силикатног топитеља и повратних материјала. Шаржа се смешта у посебним бункерима, магацинима или силосима из којих се траком одводи на сушење.

Друга фаза – је сушење шарже. Аутогено топљење у лебдећем стању захтева што сувије концентрате. Испаравање воде из шарже у току фазе топљења имало би

много негативних утицаја. У првом реду дошло би до повећаног губитка топлоте у фази топљења. Такође, водена пара која напушта пећ у току топљења повећава и количину гасова загрејаних на 1250-1350 °С. Повећана количина отпадних гасова повлачи са собом и увећане губитке топлоте, увећано одношење прашине и др.

Сушење шарже у зависност од влажност изводи се најчешће у два степена:

- Први степен је сушење у ротационим цилиндричним сушницама у којима се садржај воде смањује од 10-14% на 6-7%.
- Други степен је у флуидизационом, или лебдећем стању у цевима за време транспорта шарже на висину од 25m. Сушење се врши топлим гасовима који настају сагоревањем горива, ваздухом загрејаном на 120 °С или процесним гасовима. При овим условима не долази до паљења и оксидације шарже.

У новије време у употребу су парне сушнице које имају ротационе цилиндричне цеви. Ова врста сушница показала се као веома добра јер даје могућност коришћења засићене паре која се добија у котлу утилизатора, спојеним са пећи за топљење. На тај начин стварају се мали губици топлоте и релативно мала запремина гасова што даје најповољнији ефекат сушења.

Трећа фаза – је топљење шарже. Топљење шарже применом аутогеног поступка у лебдећем стању врши се у Outokumpu пећима. Шематски приказ је дат на слици 6.1. Пећ Outokumpu се састоји из три дела: реакционог шахта (реактора), одвајача, и аптејка (димњака). Као продукти топљења добијају се бакренац, шљака и гасови. Спојени вертикалне куполе, сетлера (шљака и бакренац) и котла отпадне топлоте се хладе бакарним елементима за хлађење тзв. жакетима. Ови елементи обезбеђују знатно дужи рад ватросталне облоге а такође се могу мењати без заустављања рада пећи.

Претходно осушена шаржа се сипа у бункер пећи, а потом се из бункера убацује помоћу посебног горионика у реактор. Убацивање шарже (концентрата) у реактор врши се кроз његов свод, а сам реактор је загрејан на температури од 1500-1600 °С, тако да процес топљења започиње истог тренутка када шаржа уђе у реактор кроз горионик. Поред убацивања шарже кроз горионик убације се и предгрејан

ваздух најчешће на температури од 200 °C обогаћен кисеоником. Заправо главни задатак горионика јесте правилна припрема шарж и ваздушно-кисеоничне смеше, како би дошло до што бржег и потпунијег сагоревања сулфида. Добрим шаржирањем ствара се равномеран рад реактора пећи.

Убацивањем кроз горионик правилне смеше осушене шарже са предгрејаним вазухом који је обогаћен кисеоником долази до скоро тренутног паљења сулфида. Падањем честица сулфида од врха према подножију реактора (тзв, лебдећем стању) долази до оксидације честица, док се лако топлјиви сулфиди и силикати железа топе. Овај процес у реактору је веома интензиван, међутим у делу пећи за раздвајање бакренца, шљаке и гасова процеси се одвијају релативно споро. Ово доводи до високог садржаја бакра у шљаци што најчешће износи од 1,5 – 2% и захтјева њену додатну прераду у електропећима или флотацијом.

Добијени бакренац се из пећи испушта периодично у лонце, помоћу којих се крановима транспортују и уливају у конвертор. Такође се и шљака из Outokumpu пећи излива периодично. Као што је напоменуто она у себи садржи значајне количине бакра (1,5-2%) па је потребно додатно прерађивати. Најчешће се она меша са конверторском шљаком где се методом редукције у електропећима или методом флотације додатно обрађује.

Трећи продукт топљења бакарних концентрата јесу процесни гасови. У зависности од садржаја кисеоника у предгрејаном ваздуху они могу садржати од 12-45% SO₂, и око 3,5-8% прашине. Топлота процесних гасова не остаје неискоришћена. Они напуштањем пећи кроз димљак улазе у котло за искоришћење топлоте у коме се производи засићена водена пара под притиском која се може користити за добијање електричне енергије и тиме смањила потрошња електричне енергије приликом производње кисеоника или се може искористити за загревање ваздуха.

У котлу се хвата око 30-40% прашине однешене из пећи. Прашина се скупља и касније поново одлази на топљење заједно са сакупљеном прашином из електрофилтера. Гасови који напуштају котло одлазе у електрофилтер где се хвата највећи део прашине, а затим се они користе за производњу сумпорне киселине

(H₂SO₄) (Davenport et al., 2002; Vračar, 2010; Schlesinger et al., 2011; Najdenov, 2013; Outokumpu, 2018; Outotec, 2018).

Данас се око 50% светске производње бакра и никла добија овим технолошким поступком. Outokumpu технологија топљења има водећу позицију у производњи бакра на основу своје економичности, прилагодљивости, ниске потрошње енергије, и високог искоришћења сумпора. Искоришћење сумпора се код ове технологије креће од 94% до 99%. Процес аутогеног топљења бакарних концентрата овим поступком у односу на пример пламене пећи, које су до 70-тих година биле врло заступљене у светској пракси, има знатно боље техничко-економске показатеље што се огледа у следећем: ефикасније коришћење енергије сулфида из концентрата, вишим искоришћењима метала и сумпора и далеко бољом заштитом атмосфере од загађења путем SO₂ и других штетних материја (Davenport et al., 2002; Schlesinger et al., 2011; Outokumpu, 2018; Outotec, 2018;). Према доступним подацима, тренутно 21 топионица у свету користи ову технологију (USGS, 2017).

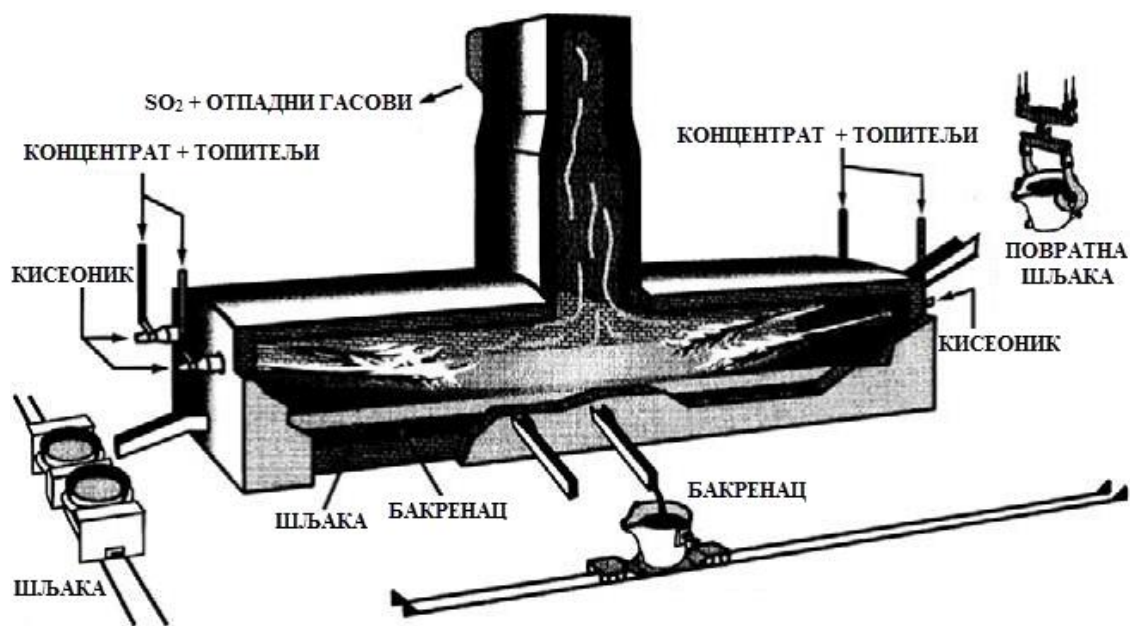
Добијени бакренац применом овог технолошког поступка садржи од 55% до 60% Cu, док добијена шљака садржи знатно нижи проценат бакра (од 0.5% до 0,7% Cu) у односу на Outokumpu технологију.

Остала два показатеља који карактеришу овај процес су искоришћење бакра 97%-98 % и искоришћење сумпора 97 %-98 %. Као основне предности овог процеса могу се навести: могућност прераде материјала различитог квалитета од богатих концентрата преко металуршке шљаке до отпадних материјала и секундарних сировина, нижи трошкови производње и мањи утрошак енергије.

6.1.2. Inco Flash

Пуштањем у рад Inco flash пећи за топљење бакарног концентрата, 1952. године елиминисани су недостаци доминантних пламених пећи. Овде се ради о аутогеном процесу топљења у лебдећем стању чији је циљ боље искоришћење енергије сулфидних минерала из концентрата. Примена овог технолошког процеса доприноси смањују потрошње енергије, побољшавају еколошких услова, а самим

тим повећању и искоришћењу бабра (Queneau & Marcuson, 1996; Moskalyk & Alfantazi, 2003; Vračar, 2010; Požega, 2010; Najdenov, 2013). Увођење овог процеса у индустријску примену остварено је обједињавање фазе пржења и топљења. Такође, употребом техничког кисеоника уместо ваздуха смањује се количина гасова насталих у процесу и до 40 пута, у поређењу са пламеном пећи, па се тиме побољшава економија њиховог рада а и потпуна заштита атмосфере. Међутим као главни недостатак ове технологије, поред скупе и сложене припреме шарже, јесте велика потрошња електричне енергије која прати производњу кисеоника чије је учешће у укупним трошковима 50%. Остали еколошки параметри који су од значаја су: искоришћење сумпора које износи у просеку 93.6%, производна прашина која се креће од 95 до 230 тона по дану, количина отпадних гасова од 35000 Nm³/h, док SO₂ у отпадним гасовима износи 70% (Kapusta, 2004; Schlesinger et al., 2011; Inco, 2017).



Слика 6.2. Шема Inco пећи у Sudbury, Ontario (Vračar, 2010; Schlesinger et al., 2011).

Inco пећ је слична пламеној пећи код класичног поступка топљења. Садржи одвод гасова на средини пећи и горионик за шаржу, као и кисеоник са обе чеоне

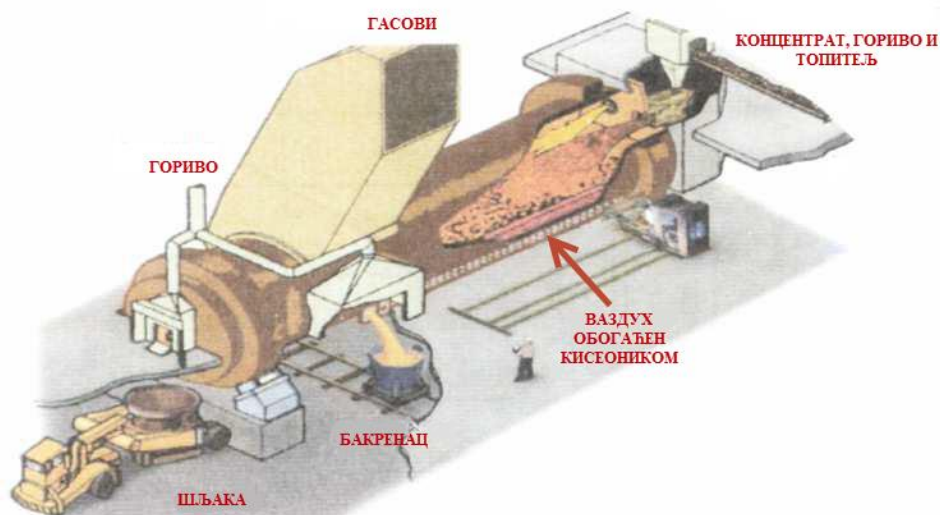
стране. Бакренац који се ствара топљењем улазног материјала испушта се кроз отвор на бочном, дужем делу пећи. Температура приликом испуштања бакренца у лонац износи од 1150 до 1250 °C. Бакренац се потом лонцима одвози до конвертора. Шљака се кроз два отвора која се налазе на чеоној страни пећи испушта у лонац и транспортује до електропећи на прераду. Шљака која настаје применом овог процеса топљења садржи око 2% Cu због чега је потребна додатна прерада у електропећима или флотацијом (Vračar, 2010; Schlesinger et al., 2011).

6.1.3. Noranda

Noranda Inc. је рударско металуршка компанија пореклом из Rouyn-Noranda, Квебек, Канада. Поступак топљења у течном купатилу Noranda је први пут употребљен у топионици Horne у Квебеку (Канада) 1973. године. Noranda представља и најстарији тип процеса топљења у течном купатилу. Даље су развијени и други аутогени поступци топљења бакарних сулфидних концентрата у течном купатилу. Тако је 1974. године развијен и Mitsubishi поступак а касније 1977. године El Teniente, 1982. године у Русији развијен је Vanyukov, а у Аустралији је 1992. Ausmelt/Isasmelt. Применом Noranda поступка долази до директног топљења бакарних концентрата где се добијања богат бакренц или метални бакр. Аутогеност је постигнута топлотом од оксидације сулфида или сагоревањем горива, начешће угља или природног гаса. Noranda процес је трпео стална усавршавања. Употребом ваздуха обогаћеног кисеоником са 34% остварен је готово аутогени процес уз коришћење мале количине горива, док је са садржајем кисеоника од 40% остварено потпуно аутогено топљење. Међутим, овакво обогаћење кисеоником представља горњу границу при којој је примећено нагло трошење ватросталног озида реактора, чиме је била угрожена стабилност читавог агрегата. Из тих разлога се у пракси употребљава 34% O_2 , уз додавање малих количина горива (Veldhuizen & Sippel 1994; Cui & Zhang, 2008; Vračar, 2010).

Капацитет првоизграђене топионице 1973. године износио је 725 тона/дан, касније усавршавањем овог поступка применом ваздуха обогаћеног кисеоником и другим техничким побољшањима, капацитет прераде шарже је повећан где је 1989. године, износио 2700 тона/дан. Технологија топљења по Noranda поступку

започиње убацивањем шарже одређеним уређајима из бункера у реактор. Noranda реактор користи цилиндричну пећ од челичног лима обложеног ватрсталним материјалима за хлађење пречника од 4,5 метра до 5,5 метра, дужине од 18 до 26 метра и дебљине 0,5 метра. Реактор има могућност делимичног обртања око хоризонталне осе, а ватрсталне облоге су најчешће израђене од хром-магнезитне цигле. Дебљина хром-магнезитних ватрсталних цигли је око 0,5 метра. Такође, по дужини пећи егзистирају од 35 до 65 дувница, пречника од 50 mm до 60 mm. Шаржирање се најчешће врши на једној чеоној страни реактора, док се на другој страни испушта бакренац и шљака. Шаржа је најчешће састављена од влажног концентрата бакра и топитеља. Принцип рада овог реактора се заснива на удубавању ваздуха обогаћеног кисеоником кроз најчешће 54 дувнице у слој бакреница који се у тим условима налази у барботажном стању. На тај начин се постижу температуре од 1150 °C -1200 °C. Гасови који настају у овом процесу производње се изводе преко уста реактора и одводе преко хаубе у систем за хватање гасова и након тога одлазе у систем за издвајање прашине из гасова. Шематски приказ Noranda реактора у коме се могу сагледати сви битни елементи овог технолошког процеса дат је на слици 6.3 (Davenport et al., 2002; Враџар, 2010; Schlesinger et al., 2011; Najdenov 2013).



Слика 6.3. Noranda реактор (Najdenov, 2013)

Ако се реактор у Noranda поступку топљења посматра по дужини онда се могу раздвојити три зоне у којима се тај процес врши:

- 1) зона топљења,
- 2) зона одвајања бакренца и шљаке и
- 3) зона пречишћавања шљаке.

Зона топљења представља прву зону посматрајући реактор од стране уноса сировина за екстракцију бакра. Налази се на чеоној страни реактора и загрејана је до температуре око 1160 °С. Шаржа се на површини течног купатила убацује великом брзином и она се састоји од: бакарног концентрата чија влажност треба да износи од 6% до 8%, бакарног концентрата који се добија флотацијом шљаке и који начешће садржи око 40% бакра, топитеља, мале количине горива, прашине из пећних гасова и др. Поред шарже у зони топљења убацује се и ваздух обогаћен са кисеоком (најчешће 34%) кроз претходно наведене дувнице у растоп бакренца. На тај начин долази до интензивног топљења шарже у течном купатилу растопа где настаје бакренац са садржајем бакра од 70% до 75%, шљака са садржајем од 5% до 6% бакра и гасови који садрже високе количине сумпор-диоксида.

Зона за раздвајање бакра и шљаке налази се у централном делу реактора. Заузима простор између последњих дувница и задњег дела реактора за шљаку чија дужина износи 8,9 метра. Раздвајање бакренца, шљаке и гасова одвија се на температури од 1250 °С, где се одвојени бакренац испушта кроз отвор који се налази на делу реактора између дувница и отвора за шљаку. Испуштени бакренац садржи најчешће 73% Си али његова вредност може да варира од 70% до 75% Си и он се потом одпрама на конвертовање, пламену и електро рафинацију где се као коначан производ добија катодни бакар.

Зона пречишћавања шљаке служи за додатну дораду шљаке која дотиче из прве и друге радне зоне. У овој зони се на растоп шљаке помоћу два горионика удувава гас за редукацију, где се потом шљака која садржи од 5-6% Си излива из реактора у лонце од 33 тоне, одводи на местио за хлађење и тамо хлади са водом 29 часова. Након хлађења шљака прелази из стања растопа у чврсто стање где је

потребно такву шљаку поново дробити, млети и флотирати. Концентрат који је добијен прерадом шљаке садржи 40% Cu и поново постаје саставна компонента шарже. Отпадна шљака која садржи испод 0,35% Cu и 11% влаге сматра се јаловином флотације и одвози се на јаловиште.

Гасови који излазе из реактора се сакупљају па потом хладе водом у тзв. спреј комори и потом се електростатичким путем пречишћавају и таложе. Количина прашине која настаје најчешће износи око 2% од тежине шарже. Део овако добијене прашине одлази уз мешање са шаржом на топљење у реактору, док остатак у топионицу олова (Vračar, 2010).

Као битне параметре овог технолошког процеса може се издвојити специфична потрошњу топлоте горива која износи 2321 - 2954 MJ/t концентрата, искоришћење сумпора које се креће до 94%, производна прашина 70 - 100 тона по дан, количина отпадних гасова од 55000 Nm³/h, као и садржај SO₂ у отпадним гасовима који се креће 16 - 20% (Davenport et al., 2002; Vračar, 2010; Schlesinger et al., 2011; Najdenov, 2013).

6.1.4. Mitsubishi

Mitsubishi процес представља процес аутогеног континуалног топљења бакарних сулфидних концентрата. Спада у групу новијих поступака који је уведен у индустријску праксу 1974. године. Топљење шарже се одвија аутогено топлотном оксидацијом сулфида, сумпора и железа ваздухом обогаћеним кисеоником. Прво долази до топљења лако топивих компоненти а потом долази до растварања тешко топивих компоненти у већ створеном растопу. Брзина топљења тешко топивих компоненти у растопу зависиће од брзине мешања растопа и његове температуре. Кључну улогу у овој врсти процеса има и место додавања вазуха обогаћен кисеоником као и начин на који се он додаје. Најчешће се врши на два начина. Први начин је убацивање вазуха обогаћеног кисеоником на површину истопљеног купатила путем вертикалних дувница уроњених у растоп. Други начин је кроз дувнице које се налазе са бочне стране пећи. У неким радовима већа предност се даје овом другом начину додавања вазуха обогаћеног кисеоником. Разлог томе

јесте то што сматрају да се тиме постиже максимална турбуленција па тиме и максимална брзина измене масе и топлоте (Vračar, 2010).

Специфичност Mitsubishi поступка јесте та што он једини обједињује операцију топљења, пречишћавање шљаке, конверторовање и анодну рафинацију. Ове операције се обављају у посебним пећима које су постављене у низу, каскадно, са висинском разликом од 1.5 метра. При томе растоп непрекидно тече из једне у другу пећ, почевши од пећи за топљење до анодне пећи и машине за ливење анода (Слика 6.4) (Vračar, 2010; Schlesinger et al., 2011; Najdenov, 2013).



Слика 6.4. Mitsubishi поступак континуираног топљења бакарних концентрата (Schlesinger et al., 2011; Najdenov, 2013).

Овај технолошки поступак карактерише високо искоришћење SO_2 који се издваја из процеса топљења и конверторовања и просечно износи око 99.5% па се преко електрофилтера даље усмерава у процес производње сумпорне киселине или течног SO_2 (Shibasaki et al, 1993; Asaki, et al, 2001; Wang et al., 2013). Такође, смањена је емисија штетних гасова због тога што се транспорт истопљеног материјала (растопа) не врши лонцима из једног агрегата у други. Mitsubishi процес континуалног топљења бакарних концентрата је стално модернизован и

усавршаван, самим тим и заштита животне средине је повећана. Овај поступак је заступљен у топионици у Наошими у Јапану капацитета 240 хиљада тона бакра годишње и Кид Крику у Канади капацитета од 120 до 150 хиљада тона бакра годишње. Предности овог поступка могу се огледати и у његовој флексибилности у односу на конвенционалне методе топљења бакарног концентрата, јер исти може да прерађује повратне и секундарне материјале разних врста и састава (Iida et al., 1997; Fthenakis et al., 2009). Поред смањене потрошње електричне енергије остали параметри овог процеса, који имају утицај на животну средину износе: производна прашина која се креће од 60 до 67 тона по дану, количина отпадних гасова од 500 Nm³/h, као и SO₂ у отпадним гасовима са уделом од 25 до 30% (Davenport et al., 2002; Schlesinger et al., 2011)

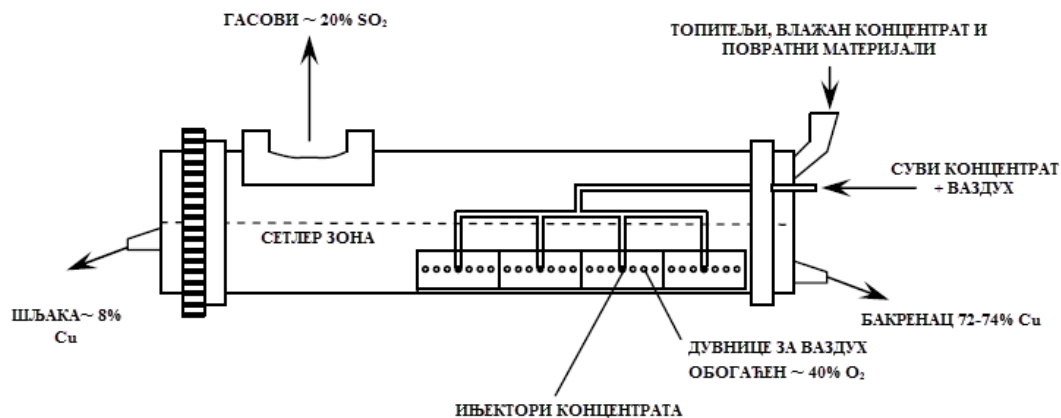
6.1.5. El Teniente

Повећање рударске производње у Чилеу довело је до повећање и топионичких капацитета. Поред захтева за повећање топионичких капацитета настају и захтеви за боље коришћење енергије, модернизацију процеса топљења и економичнију производњу. El Teniente, у том смислу, представља важну технологију за топљење и прераду бакарног концентрата. Контрола радног процеса је доста комплекснија од контроле осталих технологија. Та сложеност произлази из самих карактеристика технолошког процеса (Schaaf et al., 2010).

Техничке карактеристике Тениенте пећи су следеће:

- дужина од 14 до 22 метра,
- пречник од 4.5 –до 5 метра,
- облоге су хром-магнезитна опек дебљине око 50 cm,
- садрже од 35 до 50 дувница које су распорежене дуж пећи,
- пречник сваке дувнице је у просеку 5 до 6 cm,
- зона распореда дувнице заузимаја око 65% од дужине пећи, док осталих 35% представља зону за одвајање бакренца и шљаке (сетлер) (Davenport et al., 2002; Najdenov, 2013)

Технолошки процес El Teniente има доста заједничких карактеристика са раније развијеним процесом топљења у течном купатилу Noranda. Та сличност се огледа у томе што и једна и друга технологија користе цилиндричну пећ у којој су урођене дувнице. Кроз дувнице се убацује ваздух обогаћен кисеоником а такође кроз посебне дувнице убацује се концентрат док се топитељ, влажан концентрат и повратни материјали шаржирају директно у растоп бакренца и шљаке. Шематски приказ El Teniente конвертор за топљење у течном купатилу приказан је на слици 6.5 (Davenport et al., 2002; Carrasco et al., 2007; Schlesinger et al., 2011; Najdenov, 2013)



Слика 6.5. Шематски приказ El Teniente конвертор за топљење у течном купатилу (Schlesinger et al., 2011)

El Teniente tehnologiju u određenoj literaturi nalazimo pod nazivom „Caletones“ (Moskalyk & Alfantazi, 2003). Разлог томе јесте што је она први пут уведена у употребу 1977. године у топионици Caletones у Чилеу. Настала је на бази претходно планираних истраживања која су вођена у периоду од 1974. године до 1976. године. Главни правци ових истраживања били су усмерени ка бољем искоришћењу хемијске енергије коју поседују сулфидни концентрати. Такође, експериментисало се и са употребом вазуха обогаћеним кисеоником у циљу постизања што боље аутогености технолошког процеса топљења и конвертовања. Након прве примене у индустрији El Teniente процеса даљи развој кретао се ка повећању капацитета топљења и конвертовања бакренца са циљем повећања економичности самог

технолошког процеса (Davenport et al., 2002; Vračar, 2010; Najdenov et al., 2012; Najdenov et al., 2013).

Међутим, највећи технички напредак је сачињен 1988. године када је уведен процес ињектирања сувог концентрата кроз дувнице које су уроњене у растоп. Регулација аутогености процеса вршила се кроз регулацију односа параметара као што су: садржај O_2 у ваздуху који се удубава у процес, количина бакренца и количина сувог и влажног концентрата. Даља усавршавања су се наставила у правцу дефинисања параметара процеса који ће без додатка бакренца омогућити претапање влажних и сувих концентрата бакра. На тај начин истражени су услови и капацитети топљења који омогућавају одвијање процеса топљења са и без додатка бакренца и влажног концентрата. Укупна истраживања су дала за резултат постизање капацитета прераде концентрата од 1600 тона на дан до 2000 тона на дан и могућност претапања повратних материјала. Такође, видан је и ефекат смањења потрошње енергије у топионици Kalatones који је настао применом и модернизацијом овог технолошког процеса. Утицај El Teniente технолошког процеса на уштеду енергије може се сагледати кроз следећи хронолошки пример. Потрошња енергије применом пламене пећи 1970. године износила је 7990 MJ по тони концентрата. Увођењем Teniente конвентора ова потрошња смањена је за неких 35 процената и износила је 5170 MJ по тони концентрата. Даљим развојем овог технолошког процеса кроз шаржирање влажног и ињектованог сувог концентрата па сталним повећањем удела сувог концентрата где се 1993. године уводи друга флуидизациона сушница потрошња енергије је смањена на 2820 MJ по тони концентрата. Самим тим узевши у обзир почетну потрошњу у пламеној пећи која је износила 1970. године 7990 MJ по тони концентрата и потрошњу из 1993. године која је износила 2820 MJ по тони концентрата може се закључити да увођењем овог технолошког процеса дошло је до уштеде од 5170 MJ по тони концентрата. Ово смањење није занемарујуће јер износи око 65% што заправо представља двотрећинску уштеду енергије која је остварена за двадесет година развоја овог технолошког процеса. На тај начин се El Teniente технолошки процес сврстава у групу пирометалуршких процеса са најмањом потрошњом енергије, где га данас треба обавезно узети у разматрање приликом одлучивања о изградњи или модернизацији одређене топионице. El Teniente данас добија на значају јер је цена

енегената значајно увећана због сталног развоја друштва и њихове увећане потрошње као и због смањења постојећих залиха горива као што су угаљ, нафта, природни гас (Davenport et al., 2002; Vračar, 2010; Najdenov et al., 2013).

Производи процеса топљења овом технологијом који имају битан утицај на животну средину су: искоришћење сумпора које се креће 90% - 98%, производна прашина од 50 тона на дан, количина отпадних гасова од 60000 Nm³/h, SO₂ у излазним гасовима који се креће 12% - 25% (Davenport et al., 2002; Bergh et al., 2005; Valencia et al., 2006; Vračar, 2010; Najdenov et al., 2012; Najdenov et al., 2013).

Данас El Tentiente технолошки процес примењују више од десет топионица у свету. Осим примене ове технологије у Јужној Америци у земљама као што су Чиле и Перу ова технологија је нашла примену и на Тајланду у топионици „Thai Copper Industries Co. Ltd.“ у провинцији Rayong (Kapusta, 2004).

6.1.6. Vanuikov (ру. Ванюкова)

Процес Vanuikov је развијен након опсежних Руских истраживања у индустријским условима. Прва пећ је пуштена у рад 1982. године у топионици Norilsk (Русија). Назив Вањуков овај технолошки процес добија по Руском академику проф. А. В. Ванюкова. У бившем Совјетском савезу је шест оваквих пећи. Иако је по свом дизајну слична Inco технолошком процесу постоје и значајне разлике (Moskalyk & Alfantazi, 2003; Najdenov, 2013). Распрострањеност примене овог технолошког процеса ван граница Русије није велика. Једина земља која користи овај технолошки процес топљења сировина за добијање бакра јесте Казахстан. Примена Vanuikov технолошког процеса у Казахстану огледа се кроз Комбинат за Рударство и Металургију Balkhash (eng. Balkhash Mining and Metallurgical Combine - BGMC) или само Balkhash како је неформално овај комбинат познат. Налази се на северној обали језера Balhash које се налази у истоименом граду у Казакстану (ERG, 2018; Mining Encyclopedia)

Неке од карактеристика ове технологије су следеће: искоришћење сумпора 90%, производна прашина од 0.5 до 0.9% по тони шарже, количина отпадних гасова 35000-55000 Nm³/h, SO₂ у отпадним гасовима 25-40%, садржај бакра у

бакренцу од 45% до 75% , док је садржај бакра у шљаци од 0.7% до 2%, Губици са прашином су око 1%, Искоришћење бакра је 98% до 98.5% (Davenport et al., 2002; Schlesinger et al., 2011; Najdenov, 2013). Такође, као предност овог поступка топљења може се нагласити могућност аутогеног или полуаутогеног топљење сиромашних и богатих бакарних концентрата са разним додацима (влажности од 6% до 8%), што повећава флексибилност самог технолошког процеса у односу на поступак топљења у лебдећем стању. Најчешћи додаци који се топе заједно са концентратом су крупнокомадасте богате руде бакра, горива (најчешће угаљ), топитеља и повратни материјал (гранулације до 50 mm) (Moskalyk & Alfantazi, 2003; Najdenov et al., 2012).

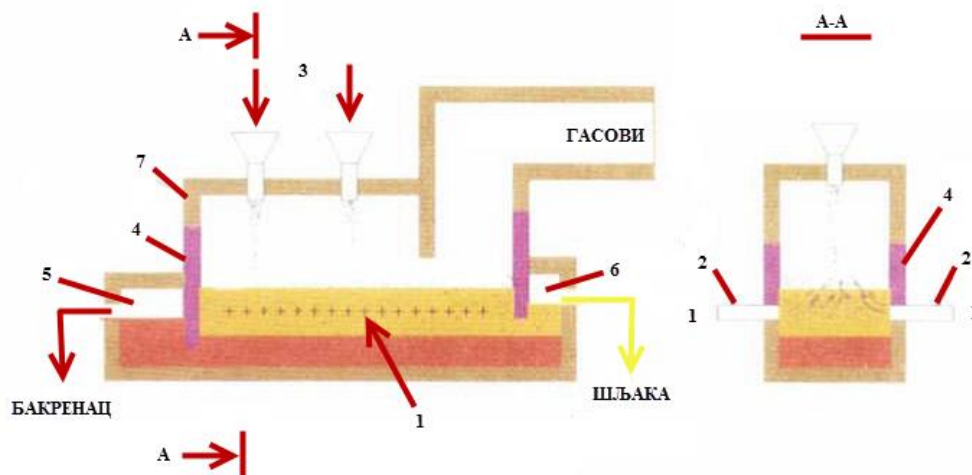
Шаржирање код ове врсте пећи врши се равномерно са свода кроз отворе који се налазе на растојању од 2 метра до 3 метра од чеоне стране пећи. Ово је високо интензивни процес који се постиже тако што се у пећ убацује шаржа са гориво, а кроз дувнице удубава ваздух обогаћен кисеоником стварајући такозвано барботирање шљаке. Дувнице су распоређене на по пола метра. Налазе се испод површине шљаке. Реакциони процеси топљења су слични оним процесима који се одвијају у пећима за топљење у Noranda и Teniente технолошком поступку. Сам процес топљења је континуираног карактера. Из тог разлога увек постоје слојеви растопљеног бакренца и шљаке. Бакренац и шљака се испуштају повремено на испустима који се налазе на супротним крајевима пећи (Schlesinger et al., 2011).

За разлику од ротирајућих пећи које се примењују у Noranda и Teniente технолошком поступку код Vanjukov технолошког процеса пећ је стационарног типа. Предност стационарне пећи јесте та што је директно повезана са системом за сакупљање гасова и не постојање покретних делова чиме се продужава животни век пећи. Међутим стационарна пећ има и своје недостатке. Недостатак се огледа у томе што се дувнице не могу подићи изнад шљаке што отежава њихово одржавање и поправку. Ово је можда и један од разлога због кога овај процес није широко распрострањен. Изглед ове пећи дат је на слици 6.6.

Бројчаним ознакама на слици 6.6. представљено је следеће:

1. дувнице за кисеоник,
2. ваздух и кисеоник,

3. шаржа и комадни угаљ,
4. водено хлађени жакет,
5. сифон за бакренац,
6. сифон за шљаку,
7. озид пећи.



Слика 6.6. Шематски приказ Vanјуков пећи за топљење у растопу (Najdenov, 2013).

6.1.7. Ausmelt/Isasmelt lance

Ausmelt/Isasmelt је једноставан и високо ефикасан процес производње обојених метала. Овај процес аутогеног континуалног топљења сулфидних бакарних и других концентрата и материјала спада у новије аутогене процесе топљења и заступљен је у девет топионица у свету (Davenport et al., 2002; Najdenov et al., 2012; USGS, 2017). Развијен је у Аустралији од стране Mount Isa Mines Limited и Australian Commonwealth Scientific and Research Organisation (CSIRO) и у комерцијалну употребу уведен 1992. године (Schlesinger et al., 2011). Основу технологије топљења Isasmelt/Ausmelt чини копље које се ураћа у растоп са врха пећи (TSL-Top Submerged Lance). Ова технологија заузима једну од водећих

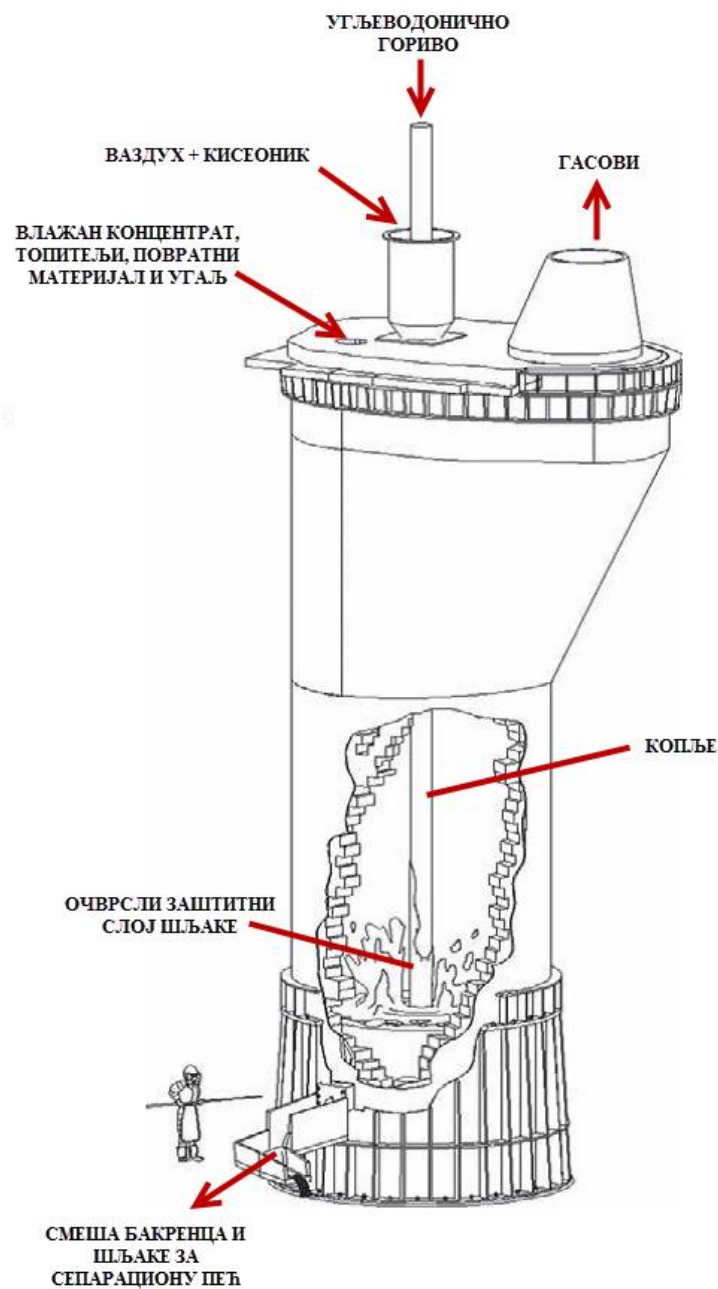
позиција у свету због ниских трошкова производње и задовољења строгих еколошких стандарда (Isasmelt, 2017).

Једна од основних карактеристика овог технолошког процеса јесте и флексибилност улазних материјала. Њиме можемо прерађивати сиромашне концентрате бакра и материјале са високим степеном нечистоћа који престављају веома често проблем за остале технолошке процесе, а такође због повећања отпадног бакра и његве рециклаже ови материјали постају веома важан извор сировина (Najdenov, 2013).

Ausmelt/Isasmelt процес спаја операције пржења и топљења. Користи се за топљење концентрата бакра као и секундарних сировина на бази бакра. Основне карактеристике овог технолошког процеса су висока продуктивност и смањена потрошња енергената. А такође се карактерише и високом концентрацијом SO_2 у излазним гасовима. Њихова флексибилност може се огледати и у примени различитих врста енергената. Тако на пример, могу се користити угаљ, кокс, нафта, природни гас или комбинацију наведених горива (Schlesinger et al., 2011; Najdenov, 2013; Isasmelt, 2017).

Реактор за топљење шарже је цилиндричног облика. Типичан пречник је од 3.5 метра до 3.6 метра а висина од 12 метра до 14 метара. Шаржа је израђена у облику пелета, а састоји се од бакарног концентрата, топитеља и угља. Као и код Outokumpu технолошког процеса шаржа се уводи кроз свод реактора у реакциони простор. Међутим, кроз свод реактора је постављено копље за продувавање растопа које је приликом топљења прекривено слојем очврсле шљаке на врху. Ова шљака га штити од хемијске и физичке абразије. Висина копља у растопу је подесива и најчешће се подешава тако да у излазним гасовима има мање од 1 % прашине у односу на шаржу. Копље је израђено по принципу цев на цев где је спољашња цев пречника око 46 cm и она је уроњена у растоп 40 cm, а ужа (унутрашња) цев је постављена изнад растопа на око 1 метар. Кроз простор који постоји између унутрашње и спољашње цеви удувава се ваздух обогаћен са око 50 % кисеоником, док кроз унутрашњу цев удувава се гориво најчешће природни гас. Овај технолошки поступак даје висок степен топљења. Високи интензитет топљења у Isasmelt реактору остварује се тако што се у течном купатилу (растоп шљаке и

бакренца), температуре 1165 °С, великом брзином убризгава загрејан обогаћени ваздух кисеоником који барботира растоп. Под тим условима се стварају јаке турбуленције које изазивају интензивно мешање течног растопа, самим тим и топлење шарже. Шематски приказ Ausmelt/Isasmelt реактора дат је на слици 6.7 (Schlesinger et al., 2011; Najdenov, 2013; Isasmelt, 2017).



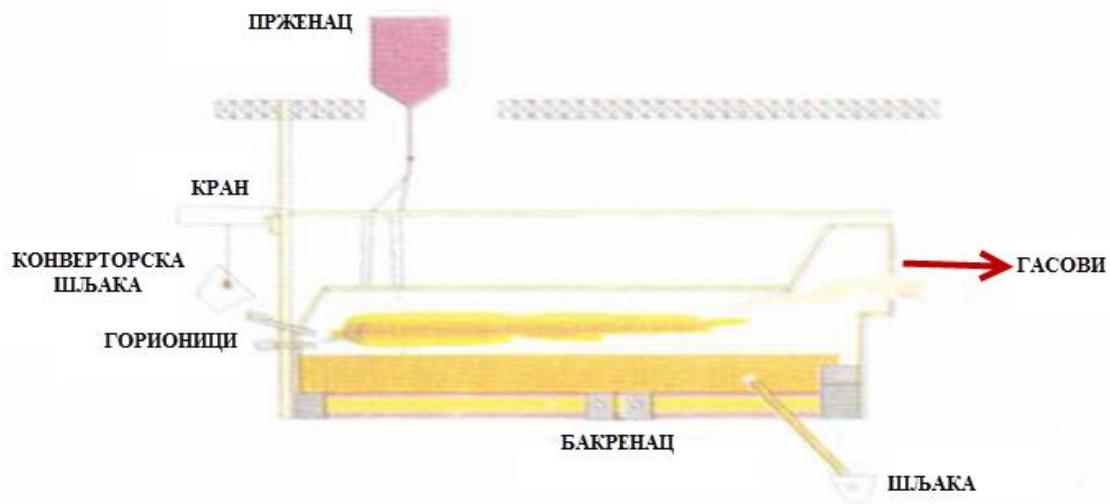
Слика 6.7. Isasmelt реактор (Schlesinger et al., 2011)

6.1.8. Пламена пећ (Reverberatory furnace)

Иако је ова технологија екстракције бакра углавном замењена неком од претходно описаних, готово у читавом свету, сматрам да је неопходно и њу узети у разматрајње кроз ову докторку дисертацију, јер је својевремено представљала основу за пирометалуршку производњу бакра. Такође, овај традиционални начин топљења сулфидних концентрата и даље егзистира у свету и користи се за топљење концентрата бакра у земљама као што су Кина (Changzhou, Jiangsu, Shuikoushan, Hunan, Wuhu, Anhui), Немачка (Hettstedt), Мађарска (Csepel); Иран (Sar Chesmeh), Румунија (Zlatna); итд. Ово је био једна од најчешће коришћених технолошких процеса за добијање бакренца у свету све до 1970-их година. Иако су била одређена усавршавања овог технолошког процеса због велике потрошње енергената и негативног утицаја на животну средину, сви велики произвођачи бакра су је данас одбацили (Ullmann, 1995; Moskalyk & Alfantazi, 2003; Mohagheghi & Askari, 2016; USGS, 2017).

Мешањем концентрата бакра са топитељима у одређеном односу према унапред урађеном прорачуну формира се шаржа. Овако формирана шаржа претходно захтева процес пржења. Процес пржења шарже је егзотерман процес и одвија се као делимична оксидација сулфида, при чему се смањује количина сумпора до границе која обезбеђује топљење богатог бакренца. У току овог процеса на температури од 650 °C до 700 °C долази до реакције дисоцијације виших сулфида на ниже, оксидације сумпорних пара до SO₂ и делимичне оксидације нижих сулфида до оксида (Stanković, 2000; Najdenov, 2013). Од вишка ваздуха зависиће степен оксидације и брзина пржења. Овај утицај ваздуха се огледа тако што ће већа количина вишка ваздуха убрзати оксидацију сулфида, такође ово ће довести и до разблаживања гасова који настају у процесу пржења. Степен десулфуризације је заправо степен одсумпоравања и њиме се мери успешност процеса пржења. Овај степен представља однос одстрањеног сумпора према укупној количини сумпора из шарже. Као продукти процеса пржења настаје прженац и гасови. Прженац даље иде у процес топљења, док гасови који садрже од 8% до 9% SO₂ из реактора иду на хлађење у тзв. спреј кули, пречишћавање (применом електрофилтра) па даље гасоводом до фабрике сумпорне киселине као улазна сировина за производњу сумпорне киселине. Прженац се телескопски шаржира у пламену пећ. Процеса

топљења се изводи на високим температурама (1550 °C) у мање или више оксидационој атмосфери, где се као продукти топљења добијају бакренац који садржи од 35% до 45% бакра, шљака која садржи од 0.5% до 1% бакра и гасови са 0.5 % -1.5 % сумпор диоксида. Слика 6.8 даје шематски приказ пламене пећи (Diaz, 1991; Davidović, 2009; Najdenov et al., 2012; Najdenov et al., 2013)



Слика 6.8. Шематски приказ пламене пећи (Najdenov, 2013)

6.2. Разматрани параметри пирометалуршких процеса екстракције бакра

Рангирање и селекција наведених технолошких процеса за пирометалуршку екстракцију бакра, у овој докторској дисертацији је вршено на основу једанаест критеријума који су од суштинске важности за све претходно наведене технолошке поступке и који су коришћени за представљање технолошких процеса код великог броја аутора (Davenport et al., 2002; Moskalyk & Alfantazi, 2003; Kapusta, 2004; Schlesinger et al., 2011; Najdenov et. al, 2012; Najdenov, 2013). Избор одговарајућих параметара (који се у процесу одлучивања називају критеријуми) за рангирање топioniца свакако има велики утицај на финалне резултате. Дату селекцију ових једанаест критеријума, из великог броја других критеријума који се појављују у претходној литератури, извршили смо уз помоћ косултације групе експерата из

области металургије. Значај ових критеријума за само формирање модела биће дат кроз кратак опис у даљем тексту овог поглавља.

6.2.1. Годишња производња бакра

Планирана годишња производња бакра представља један од битних параметара приликом доношења одлуке о изградњи нове топионице. Она у одређеној мери зависи и од технолошког процеса који се примењује али тај утицај није претерано значајан пошто се све топионице данас могу изградити са мањим или већим капацитетом, за било коју одабрану технологију. Од пресудног утицаја, за планирани годишњи капацитет, је управо расположивост сировинама за прераду и радна снага као и одређени финансијски предуслови који постоје пре саме изградње топионице. Поред самих пројектованих капацитета на годишњу производњу бакра има велики утицај и оптималност у коришћењу самог технолошког процеса. Тежи се увек да годишња производња буде што већа како би се сама профитабилност топионице повећала а такође и оптималност њеног рада. На основу података о топионицама које су одабане за анализу и које су престављене у деветом поглављу ове докторске дисертације, може се уочити да највећу годишњу производњу има Nippon Mining & Metals Co. Ltd. на шта нам указује рад Kapusta (2004). Годишњи пројектовани капацитет ове топионице износи преко 472 хиљаде тона. Ова Јапанска топионица је 1996. године имала остварену годишњу производњу од 330 хиљада тона, потом је сваке године усавршавала своју производњу и повећавала је сваке године за око 9.2%. Технолошки поступак који користи ова топионица јесте Outokumpu те се ови капацитети уклапају са пројектованим капацитетима овакве врсте топионице (Nippon Mining & Metals, 2000; Devenport, 2002; Moskalyk & Alfantazi, 2003; Vračar 2010). Из техничког и економског угла, већа годишња производња ће дати позитиван пословни ефекат. Ипак, уколико су лоши еколошки параметри селектоване технологије (као што су на пример количина емитованог SO₂ гаса или количина отпадне троске), већи ниво производње може се посматрати као већа изложеност животне средине штетним параметрима. Тако да посматрано кроз функцију преференције пожељно је да годишња производња има што већу вредност како би се добили добри економски ефекти под условом да су остали одабрани параметри са што мањим негативним

утицајем на животну средину (Bridge, 1998; Gordon, 2002; Schlesinger, 2011; Rajčić-Vujasinović & Grekulović, 2017)

6.2.2. Садржај бакра у концентрату

Велику количину бакарне руде због ниског садржаја бакра није могуће директно прерађивати пирометалуршким путем на економски оправдан начин. Зато се изводи њихово обогаћивање (Vračar, 2010). Сулфидне руде бакра обогаћују се искључиво флотацијом, која може бити:

1. селективна флотација са добијањем монометаличких концентрата, а међу њима и концентрата бакра и
2. колективна флотација којом се добија полиметалични концентрат: бакра, никла, цинка и др.

Већина топионица обрађених у овом раду користи аутогени начин топљења концентрата. Аутогени процес топљења сулфидних концентрата постиже се када се приходи топлоте остварени самих хемизмима реакција пржења и топљења, изједначе, или су већи, од расхода. На овај услов може се утицати начином извођења процеса. Параметри, или показатељи аутогеног топљења зависе од хемијског састава концентрата. Уколико концентрат садржи више железа и сумпора (присутног у облику FeS_2 , FeS и S), а мање бакра, утолико су веће њихове калоричне вредности, температура оксидације (сагоревања), запремина потребног ваздуха и запремина процесних гасова. Обрнуто, уколико бакарни концентрат садржи више бакра у виду сулфидних минерала CuFeS_2 , Cu_2S , CuS , $\text{Cu}_5\text{Fe}_4\text{S}$ и др., а мање сулфида железа (FeS и FeS_2) утолико је њихова топлотна вредност мања. Како сулфидни минерали из бакарних концентрата представљају главне топлотне компоненте за аутогено топљење шарже, топлотне вредности Cu – концентрата су ипак мале у односу на класичне врсте горива (нафта, кокс, угаљ, природни гас и др.). Због тога се неопходна топлота за аутогено топљење често добија додавањем концентрата богатијих са FeS и FeS_2 (већим од 30%), али то није рационално због повећања масе материјала која садржи мање бакра, затим повећање количине процесних гасова, количине шљаке, губитака бакра и др. На основу свега наведеног

изводи се закључак да је пожељно у топионицама обрађивати концентрат са већем садржајем бакра како би се повећала оптималност и економска исплатљивост самог технолошког процеса, а такође и побољшали еколошки ефекти саме топионице (Devenport, 2002; Moskalyk & Alfantazi, 2003; Vračar, 2010).

6.2.3. Век трајања облоге (Campaign Life)

Рад на високим температурама захтева да пећи у металургији буду адекватно заштићене са заштићене са унутрашње стране, која је у контакту са реакционом средином, али и са продуктима топљења, који су загрејани на високим температурама. Заштита се изводи озидом од ватроотпорне опеке, која изолује високе температурне зоне, смањујући губитке топлоте, и тиме осигурава статичку стабилност пећи и др. Век трајања ватросталних озидова је ограничен, међутим он се може повећати. Повећање се врши најчешће на два начина:

Први начин је употребом високо квалитетног ватросталног материјала;

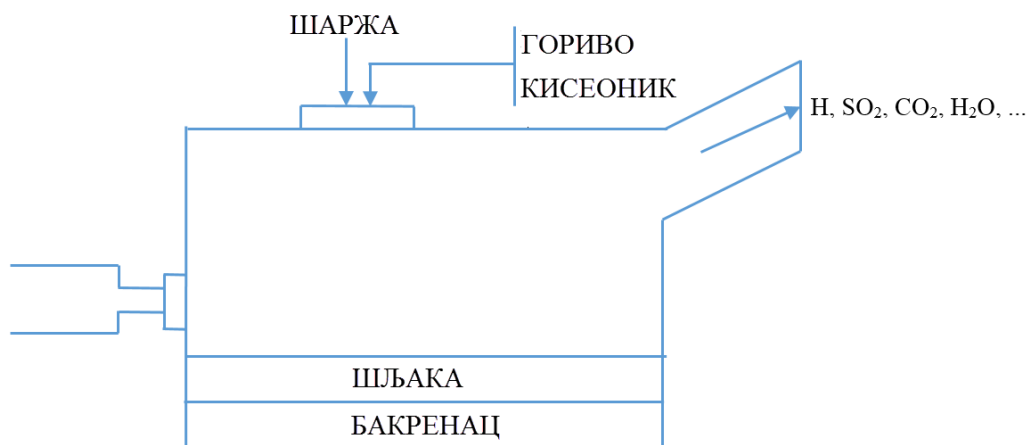
Други начин је уградњом заштитних уређаја (елемената зидова пећи, који се хладе водом), што се често употребљава;

У појединим деловима пећи (за одигравање хемијских реакција) за одвајање бакренца од шљаке, као и за одвајање гасова, владају различити технолошки услови, па је за њихову заштиту потребан избор различитих ватросталних материјала и различитих начина заштите уређаја хлађењем водом. Озид зидова код свих врста аутогених пећи је углавном од хром-магнезитне опека. Изузетак су Inco пећи. У њима владају високе температуре па су у зидове пећи уграђени жакети од бакра. Кроз бакарне жакете пролази вода ради што ефикаснијег хлађења пећи. Димњак пећи за топљење у лебдећем стању и топљење у растопу је раније зидан од ватросталне опеке. У последњим деценијама су испољене тенденције да се димњаци у потпуности хладе уређајима са воденим хлађењем одлазних гасова, у циљу преласка прашине у чврсто стање, пре његовог уласка у катао утилизатор (Vračar, 2010). Прилоком рангирања на основу овог параметра предност треба дати оним топионицама које имају дужи век трајања облога. На тај начин смањују се директни трошкови који настају променом облога и утрошеног времена радника приликом замене. Са друге стране смањују се индиректни трошкови настали застојем

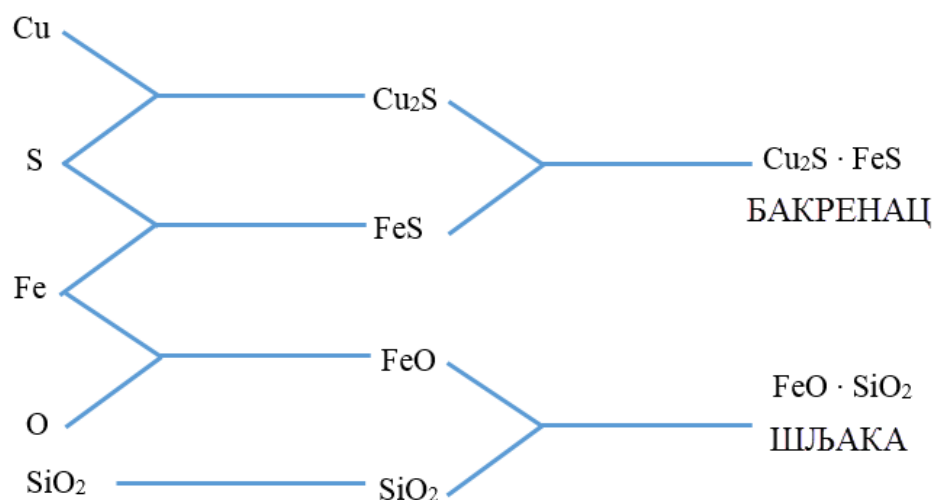
производње, а смањује се и негативан утицај на животну средину који се огледа путем прашине која настаје лошим хладјењем одлазних гасова (Devenport, 2002; Moskalyk & Alfantazi, 2003; Kapusta, 2004; Vračar, 2010; Schlesinger et al., 2011).

6.2.4. Продукти топљења (анализа бакренца, шљаке и гасова)

Продукти који настају приликом процеса топљења бакарних сулфидних концентрата су: бакренац (каменац), шљака и гасови (слика 6.9 и слика 6.10). То су оксидациони процеси, који се одвијају на високим температурама у распону 1150-1550 °C и у систему Cu-Fe-S-O-SiO₂. Заснивају се на високом афинитету бакра према сумпору и железа према кисеонику. На тој основи, бакар ће за време топљења бити заједно са делом FeS преведен у сулфидну фазу, која се зове бакренац (Cu₂S · FeS). Истовремено део сулфида железа FeS ће бити оксидисан до FeO и са SiO₂ бити преведен у оксидну фазу тј. фајелитну шљаку (2FeO · SiO₂). Зависно од степена оксидације FeS тј. од степена десулфуризације биће издвојен део FeS који прелази у бакренац, а тиме и квалитет бакренца, односно садржаја бакра у њему. Приликом рангирања технолошких процеса односно топионица бакра на основу овог параметра увек се даје предност оним технологијама које дају бакренац са већим процентом садржаја бакра у њему. Са друге стране садржај железа у бакренцу је непожељан па се предност даје оним топионицама које као свој продукт дају бакренац са нижим процентом садржаја железа. У формиранњу модела за рангирање технолошких процеса пирометалуршке екстракције бакра, значајан утицај има и дневна производња бакренца. Већа дневна производња бакренца ствара боље економске ефекте, па се увек тежи одабиру технолошког процеса са могућношћу веће производње (Devenport, 2002; Moskalyk & Alfantazi, 2003; Kapusta, 2004; Vračar, 2010; Nikolic et al., 2011).



Слика 6.9. Продукти топљења бакарних сулфидних концентрата (бакренац, шљака, гасови) (Vračar, 2010)



Слика 6.10. Шематски приказ стварања бакренаца и шљаке (Vračar, 2010).

Одређене технологије (нпр. Outokumpu, INCO итд.) захтевају додатни третман шљаке топљења пошто шљаке у себи садрже висок проценат бакра чија се вредност креће од 1.5% до 3%. Додатна прерада овакве шљаке врши се на два начина и то у електропећима или флотацијом.

Првом методом прераде шљаке путем редукације у електропећи се добија бакренац и коначна отпадна шљака. Бакренац добијен у електропећи се заједно са бакренцем добијеним топљењем одводи на прераду у конвертор, при чему се добија блистер бакар. Шљака која се добија из електропећи је отпадна те се гранулише са водом и отпрема на јаловиште, или се користи као грађевински материјал.

Други начин прераде путем флотације шљаке обухвата следеће активности: изливање и споро хлађење шљаке, њено млевење и флотирање. Као производи код овог начина прераде настају флотациони концентрат бакра и јаловина. Концентрат добијен флотацијом шљаке шаље се на топљење заједно са главним концентратом из руде, док јаловина одлази на јаловиште.

Код одређених технологија топљења бакарних концентрата (нпр. пламена пећ) углавном није потребан додатни третман прераде шљаке топљења пошто она садржи низак проценат садржаја бакра те не постоји њена економска оправданост. Приликом рангирања технологија по овом критеријуму даје се предност оним технологијама које не захтевају додатну прераду шљаке топљена, односно шљака топљења је истовремено и отпадна шљака (Vračar, 2010; Najdenov et al., 2012; Najdenov, 2013; Savic et al., 2015; Gyurov, 2017).

Гасови добијени технолошким процесима топљења бакарних сулфидних концентрата имају веома велики значај са гледишта заштите животне средине и добијање сумпора. Топљењем бакарних сулфидних концентрата добија се гас који садржи сумпор диоксид (SO_2). Сумпор диоксид је токсичан гас оштрог, иритирајућег мириса, који проузрокује киселе кише. Он се одговарајућим технолошким поступком може трансформисати у сумпорну киселину H_2SO_4 . Димни гасови поред сумпордиоксида (SO_2) углавном садрже још и азот (N_2), кисеоник (O_2), воду (H_2O) а такође садрже нечистоће као што су прашина, чврсте честице, испарења, итд. Поред садржаја димних гасова за очување животне средине је од велике важности и брзина протока димних гасова, односно запремина димних гасова која се испушта у јединици времена. Приликом рангирања технолошких процеса на основу ова два параметра предност се даје технологијама које дају мању количину димних гасова са мањим садржајем сумпордиоксида (Vračar, 2010; Nikolić, 2011)

6.2.5. Производња бакра по запосленом (Cu production/Employees)

Радна снага представља један од битнијих фактора приликом вођења технолошког процеса топљења бакарних сулфатних концентрата. У раду (Karusta, 2004) који разматра више од 50 топионица у свету дат је и податак о броју запослених унутар самих топионица које се баве процесом топљења бакра. Овај број се креће од неколико стотина до пар хиљада запослених. Иако одређене топионице запошљавају и неколико хиљада радника, њихови производни резултати понекад нису на завидном нивоу. Разлог томе може бити или лоша организација рада у фазама и активностима технолошког прецеса, или застарелост самог технолошког процеса (Gerhardsson et al., 2002; Vračar, 2010; Schlesinger et al., 2011). Како би се утицај запослених могао сагледати на што објективнији начин, као параметер је усвојена годишња производња бакра дата у односу на број запослених у датој топионици. На основу оваквог параметра рангирање се врши тако што се предност даје топионицама које са мањим бројем ангажованих радника успевају да произведу већу количину бакра. Овај параметар је коришћен при рангирању топионица бакра приказаном у деветоп поглављу, где је претходно формиран модел за рангирање пирометалуршких процеса екстракције бакра примењен на конкретним вредностима из праксе. У овом рангирању се види да селекција најадекватније технологије треба да буде у сагласности са тренутним економским параметрима и спремности компаније да их мења. Утицај овог параметра може се сагледати и кроз следећи пример. Уколико компанија, у којој је одабрана технологија која подразумева дупло мање запослених од тренутног броја, нема намеру да изврши смањење броја радника, неће остварити исти економски ефекат као што би остварила њиховим смањењем. Стога, компанија која жели побољшање економских ефеката, мора бити свесна да нови и ефикаснији технолошки процес подразумева смањење броја радника.

7. РАЗВОЈ И ПРИМЕНА PROMETHEE/GAIA МОДЕЛА ЗА РАНГИРАЊЕ ПИРОМЕТАЛУРШКИХ ПОСТУПАКА ЕКСТРАКЦИЈЕ БАКРА

У овој дисертацији, разматрано је осам технолошких поступака који имају највећу примену у пирометалуршкој екстракцији бакра у свету (Moskalyk & Alfantazi, 2003; Schlesinger et al., 2011) и који су детаљно представљени у претходном поглављу. Укратко, на основу сагледавања највеће заступљености расположивих технологија, разматрани су следећи технолошки поступци:

1. Outokumpu flash smelting (у савременој пракси познатији као Outotec flash smelting),
2. Ausmelt/Isasmelt lance,
3. Inco Flash,
4. Mitsubishi,
5. Noranda,
6. El Teniente,
7. Vanyukov и
8. Пламена пећ

Приоритетизација и селекција укупних показатеља рангирања сваке од наведених технологија извршена је на основу одабраних једанаест релевантних параметара процеса. Параметри који су узети у разматрање су следећи:

1. количина концентрата у шаржи (t/дан),
2. опсег флексибилности садржаја Cu у концентрату, односно разлика између максималног и минималног могућег садржаја у концентрату који дата технологија може прерадити (%),
3. садржај Cu у бакренцу (%),
4. садржај Fe у бакренцу (%),
5. производња отпадне шљаке (t/дан),
6. производња бакренца (t/дан),
7. век трајања облоге (године),
8. искоришћење сумпора (%),

9. искоришћење бакра (%),
10. садржај Cu у отпадној шљаци (%),
11. минимални садржај Cu у концентрату (%).

Обзиром да је анализиран већи број топионица које користе сваку од наведених технологија, за анализу сваког од датих једанаест параметара, узимана је просечна вредност. За само рангирање анализираних технолошких процеса топљења концентрата бакра, према наведених једанаест параметара, коришћена је методологија вишекритеријумског одлучивања (Multi-Criteria Decision Making Methodology – MCDM, такође позната и као Multi-Criteria Decision Analysis – MCDA), применом софтвера Decision Lab 2000 (Behzadian et al., 2010, Nikolic et al., 2011; Schlesinger et al., 2011; Milijic et al., 2013). У оквиру вишекритеријумске анализе, у овој дисертацији коришћен је PROMETHEE метод за селекцију најоптималније технологије на основу претходно дефинисаних критеријума. Док је коришћење GAIA равни дало графичку интерпретацију PROMETHEE метода и на тај начин је визуално подржана анализа датог проблема одлучивања и селекције.

7.1. Прикупљање и анализа података

Подаци за анализу и рангирање технологија, представљени у овом делу дисертације прикупљени су из релевантне литературе (Biswas & Davenport, 1994; Davenport, et al, 2001; Davenport et al., 2002; Moskalyk & Alfantazi, 2003; Kapusta, 2004; Vračar, 2010; Schlesinger et al., 2011; Najdenov et al, 2012; Najdenov, 2013). На основу анализираних података из литературе, одабрани су наведени критеријуми за рангирање технологија. Потом, на основу прикупљених података коришћених у овом раду извршено је рангирање технологија за пирометалуршку производњу бакра, помоћу алата вишекритеријумског одлучивања MCDM.

Саме MCDM методе обезбеђују математичке моделе за рангирање алтернатива на основу селектованих критеријума, при чему на јасан и прегледан начин представљају резултате рангирања алтернатива и дају синтезу финалних резултата (Kazem & Nadinejad, 2015; Bagherikahvarin, 2016). PROMETHEE (Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluation) је врста MCDM

методе коју је развио Жан Пјер Бранс (Jean-Pierre Brans, 1982), чија је суштина поређење на основу поравнања (Brans, 1982; Brans & Mareschal, 2005; Abedi, 2012; Kadziński, 2016). Ова метода спада у групу млађих метода која даје могућност рангирања и селекције међусобно супростављених критеријума. Постоје више варијанте PROMETHEE методе. Метод који ће у овом раду бити коришћен је PROMETHEE II који је Бранс први пут представио 1982. год на конференцији „Nadeau and Landry at the University Laval“ у Квебеку (Канада) (Brans, 1982). Овој методи претходи PROMETHEE I која се користи за праџијално рангирање алтернатива. Након представљања PROMETHEE II уследио је развој осталих верзија PROMETHEE (PROMETHEE III, PROMETHEE IV, PROMETHEE V, PROMETHEE VI, PROMETHEE GDSS) које нису од значаја за формирање овог модела у овој докторској дисертацији.

Главни циљ избора ове методе за рангирање наведених технологија за прозводњу бакра је у томе што PROMETHEE узима у обзир унутрашње односе свих фактора евалуације у процесу доношења одлуке, као и алтернативе које се вреднују према сваком утврђеном критеријуму. Поред тога што су сви одабрани критеријуми рангирања квантитативне природе, PROMETHEE метода омогућава сагледавање више критеријума са разнородним јединицама (Roy & Vincke, 1981), што је био додатни разлог одабира ове методе. Резултати рангирања према PROMETHEE методологији, праћени су графичким приказом алтернативе, применом такозване GAIA равни. Те се сама техника у савременој литератури назива PROMETHEE/GAIA. Број истраживача који у својим истраживањима примењују PROMETHEE/GAIA методе, и који их и даље истражују у смислу њихове осетљивости, из године у годину је све већи, што потврђују бројне публикације (Abedi et al., 2012; Vetschera & de Almeida, 2012; Peng & Xiao, 2013; Tavana et al., 2013; Yu et al., 2013; Zhao et al., 2013; Amaral & Costa, 2014; Kazem & Hadinejad, 2015; Veza et al., 2015; Bagherikahvarin & De Smet, 2016; Kadziński & Ciomek, 2016).

7.2. Вишекритеријумска анализа технологија за добијање бакра

Подаци прикупљени на основу расположивих техничких карактеристика анализираних технолошких процеса сакупљени су из литературних извора (Biswas

& Davenport, 1994; Davenport et al., 2002; Moskalyk & Alfantazi, 2003; Kapusta, 2004; Schlesinger et al., 2011; Najdenov et al, 2012; Vračar 2010; Najdenov, 2013; Nikolić et al, 2018). Наведени подаци представљају основу за вишекритеријумску анализу актуелних технологија за добијање бакра. Прикупљене су вредности једанаест разматраних техничких карактеристика (критеријума) за сваку анализирану технологију (алтернативу). На тај начин формиран је скуп полазних података за примену PROMETHEE методе (табела 7.1).

Табела 7.1. Средње вредности параметара за рангирање технологија екстракције бакра

Критеријуми Алтернативе	Количина концентрата у шаржи (t/d)	Опсег флексибилности садржаја Cu у концентрату (%)	Cu у бакренцу (%)	Fe у бакренцу (%)	Производња отпадне шљакe (t/d)	Производња бакренца (t/d)	Век трајања облоге (година)	Искоришћење SO ₂ (%)	Искоришћење Cu (%)	Cu у отпадној шљаци (%)	Мин. садржај Cu у концентрату (%)
Outokumpu flash	2750	5	65	11.5	2025	1500	9	96	97	0.65	26
Ausmelt / Isasmelt lance	2250	4	67	14	1210	1200	2.1	97	97	0.6	25
Inco Flash	3000	9	50	15	1350	935	15	93.6	97.5	0.65	20
Mitsubishi	2150	6	71.5	7.75	1375	1209	3	99.5	97	0.75	28
Noranda	2250	9	72.5	4.5	1500	975	1.75	94	95	0.75	28
El Teniente	2300	7	73	4.5	1725	962.5	1.5	90	96	0.325	26
Vanyukov	2150	8	59.5	10.5	1750	1300	4.5	90	98	0.6	26
Пламена пећ	2000	16	40	27.5	1050	1450	3.5	50	93	0.75	19

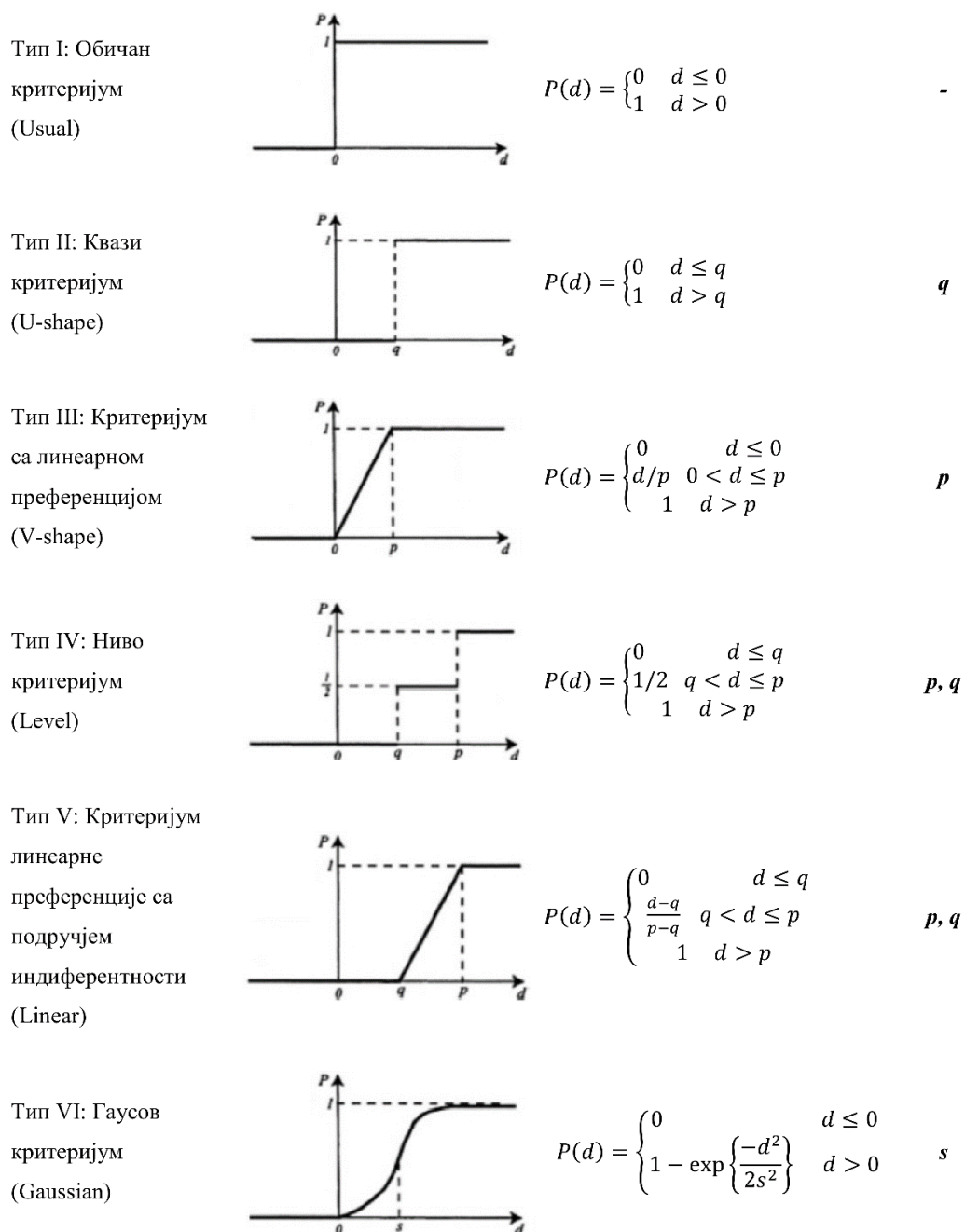
У овој десиртацији ни једном параметру (критеријуму) није дата предност у односу на друге параметре, тако да су тежински коефицијенти искључени као део вишекритеријумске анализе, на тај начин уклоњена је субјективност која настаје додељивањем тежинских коефицијената и давање предности једној технологији

у односу на неку другу (Vetschera & Almeida, 2012; Peng & Xiao, 2013; Tavana et al., 2013; Yu et al., 2013)

У PROMETHEE методи, постоји шест потенцијалних функција преференције које омогућавају кориснику да изрази разлике на основу минималних разликажења (Nikolić et al., 2011, Milijić et al., 2014), а то су:

1. Основна, обична функција – тип I (енгл. Usual);
2. Функција U-облика – тип II (енгл. U-shape);
3. Функција V-облика – тип III (енгл. V-shape);
4. Функција облика нивоа – тип IV (енгл. Level);
5. Линеарна функција – тип V (енгл. Linear);
6. Гаусова функција – тип VI (енгл. Gaussian).

На слици 7.1 дат је приказ наведених функција. Облик функције зависиће од прагова индиферентности (q) и преферентности (p). Праг индиферентности представља највећу девијацију коју доносилац одлуке сматра неважном, док праг преферентности представља најмању девијацију која се сматра одлучујућом за доносиоца одлуке. Такође треба напоменути да праг преферентности не сме бити мањи од прага индиферентности.



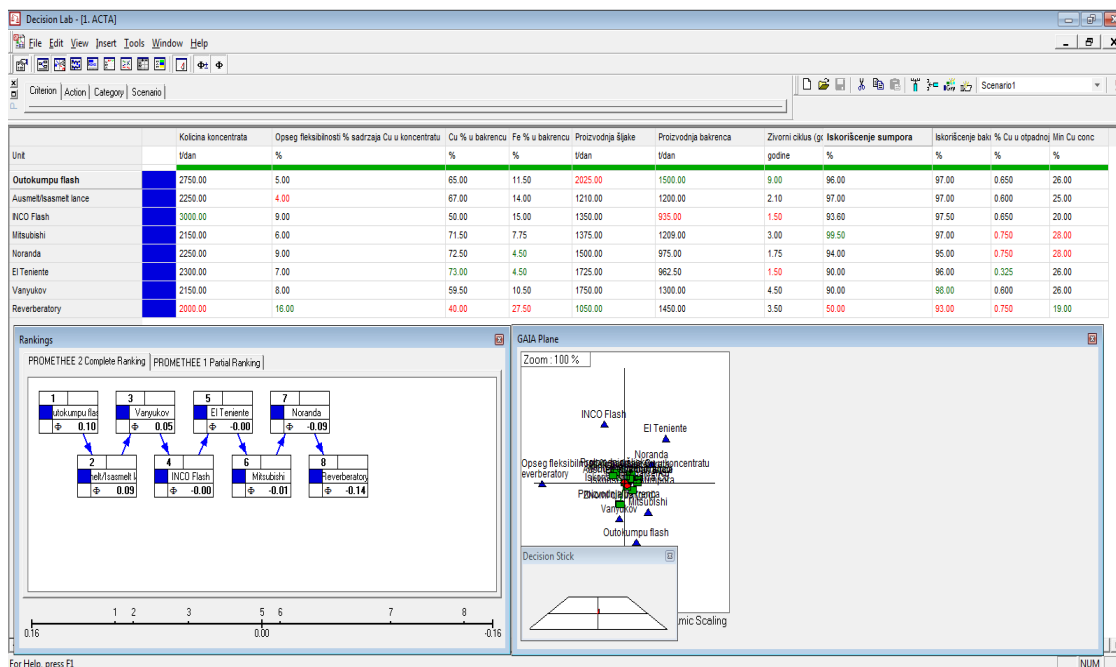
Слика 7.1. Типови функције преференце у методи PROMETHEE (Gervasio, H., da Silva, L.S., 2012)

У истраживању представљеном у овој дисертацији котишћена је функција тип I (Usual). Функција преференције Usual је одабрана као најбоље решење за опис анализираних података (сви подаци су квантитативни) (Vego et al., 2008). Вредности Min/Max усмерења су базиране на основу контекста сваке разматране карактеристике технологија и њиховог потенцијалног утицаја на истраживане технологије (табела 7.2). Према томе, матрица евалуације приказана је у табели 7.2. Карактер сваког критеријума може бити Max или Min и он се дефинише на основу унапред постављених циљева. На тај начин, у овој дисертацији је нпр. критеријум количина концентрата у шаржи дефинисан као Max јер веће вредности датог параметра остварују економичност производње и знатно утичу на боље пословне резултате. Такође, већа вредност опсега флексибилности садржаја концентрата имаће боље искоришћење, тако да се и за овај параметар узима максимална вредност карактера. Наиме, уколико је за технолошки процес који се може обрадити опсег садржаја већи, то значи да се могу обрађивати и сиромашни концентрати, а не само они који су богати бакром. На овај начин даје се предност технологијама које имају могућност топљења концентрата са већим варирањем садржаја бакра у њему.

Садржај бакра у бакренцу се дефинише као параметер за који је пожељна већа вредност, као бољи показатељ технологије, тако да се и он дефинише као Max. Такође, време реновирања облога реактора дефинише се као Max пошто боље хлађење облога и дужи период трајања повећава економичност процеса. Искоришћење сумпора и искоришћење бакра такође се дефинише као Max, у првом реду из економских али и из еколошких разлога. Док је карактер осталих параметра дефинисан као Min. Тежи се да садржај Fe у бакренцу буде увек што мањи како би садржај бакра био виши и захтевао мањи опсег даље рафинације. Такође и садржај Cu у шљаци треба бити на што нижем нивоу како би искоришћење бакра било што боље. Предност се даје и топионицама које имају могућност топљења сиромашнијих концентрата, те се и параметер минималног садржаја Cu у концентрату дефинише као Min (Nikolic et al., 2009; Savic et al., 2015). Потом је помоћу софтверског пакета Decision Lab 2000 извршена вишекритеријумска компаративна анализа технологија за добијање бакра. Изглед екрана са улазним

Моделовање утицајних параметара за рангирање технолошких процеса пирометалуршке екстракције бакра применом метода вишекритеријумске анализе

подацима и добијеним резултатима применом софтверског пакета Decision Lab 2000 дат је на слици 7.2.



Слика 7.2. Изглед екрана са улазним подацима и добијеним резултатима применом софтверског пакета Decision Lab 2000

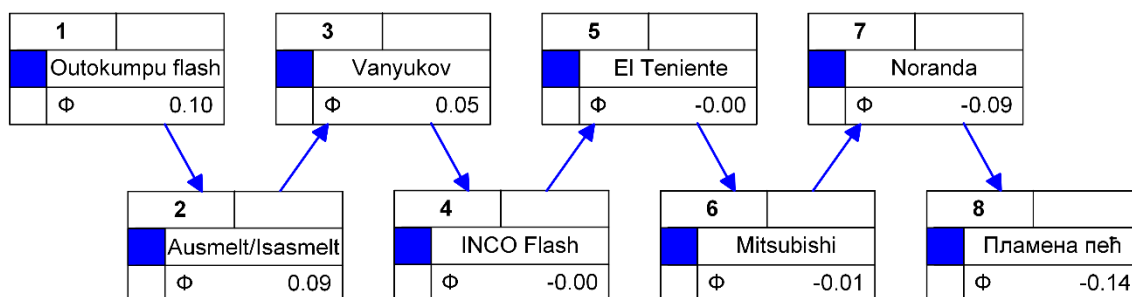
Табела 7.2. Функције преференције са одговарајућим усмерењима

Критеријуми	Количина концентрата у шаржи (t/d)	Опсег флексибилности садржаја Cu у концентрату (%)	Cu у бакренцу (%)	Fe у бакренцу (%)	Производња отпадне шљаке (t/d)	Производња бакренца (t/d)	Век трајања облоге (година)	Искоришћење SO ₂ (%)	Искоришћење Cu (%)	Cu у отпадној шљаци (%)	Мин. садржај Cu у концентрату (%)
Функција преференције	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual
Min/Max	Max	Max	Max	Min	Min	Max	Max	Max	Max	Min	Min

PROMETHEE метод се базира на одређивању позитивног (Φ^+) и негативног тока (Φ^-) преференција за сваку од алтернатива. Позитивни ток преференције показује колико одређена алтернатива доминира над осталим алтернативама. Ако је вредност већа ($\Phi^+ \rightarrow 1$) алтернатива је значајнија. Негативни ток преференције показује колико је одређена алтернатива преферирана од других алтернатива. Алтернатива је значајнија ако је вредност тока нижа ($\Phi^- \rightarrow 0$). Комплетно рангирање према PROMETHEE II се базира на израчунавању нето тока (Φ), који представља разлику између позитивног и негативног тока преференције. Алтернатива која има највећу вредност нето тока је најбоље рангирана и тако редом до најлошије рангиране алтернативе (Roy & Vincke, 1981; Brans & Mareschal, 1994; Anand & Kodali, 2008). На основу наведеног и вредности критеријума (техничке карактеристике за сваку проучавану технологију за добијање бакра, дате у табели 7.1), извршено је комплетно рангирање (PROMETHEE II) осам технологија за добијање бакра. Добијени резултати приказани су у табели 7.3 и на слици 7.3.

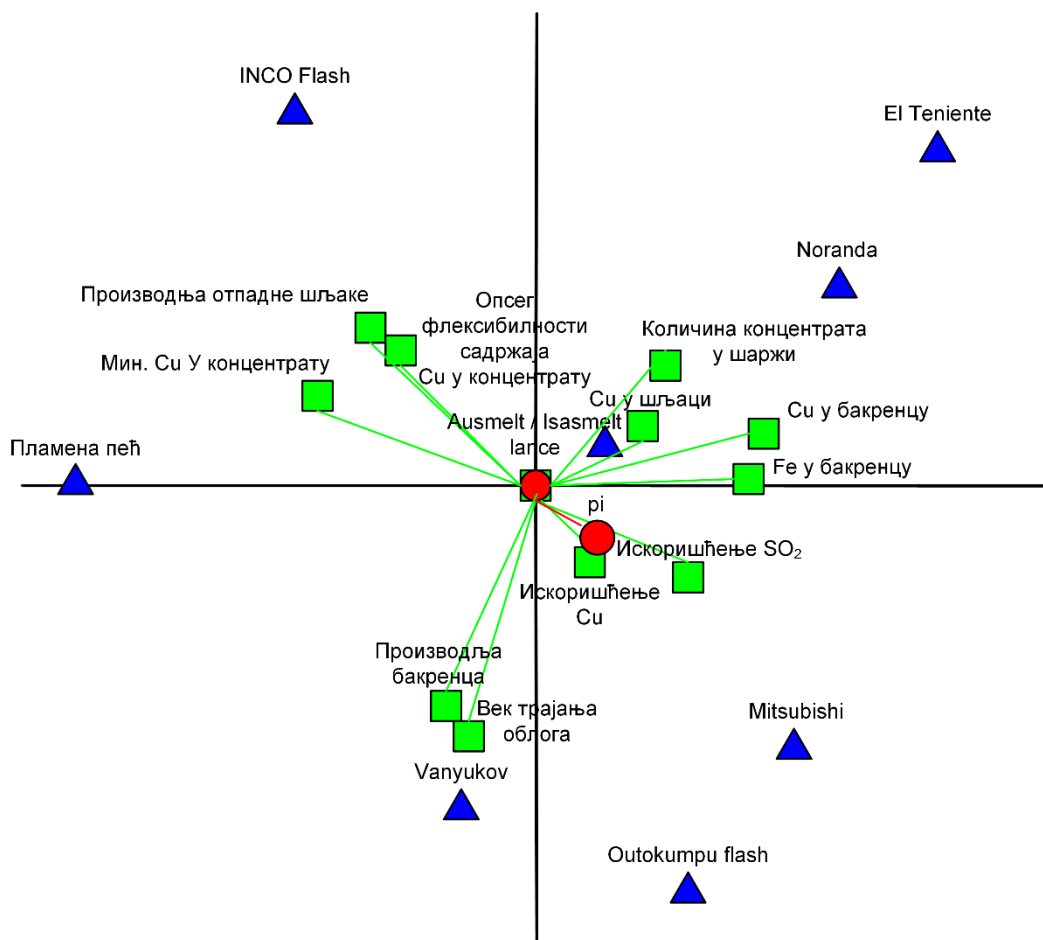
Табела 7.3. Резултати комплетног рангирања технологија за добијање бакра на основу PROMETHEE II MCDM методе

Ранг	Alternative	Φ^+	Φ^-	Φ
1	Outokumpu flash	0.5195	0.4156	0.1039
2	Ausmelt/Isasmelt lance	0.5195	0.4286	0.0909
3	Vanyukov	0.4935	0.4416	0.0519
4	Inco Flash	0.4805	0.4805	0.0000
5	El Teniente	0.4675	0.4675	0.0000
6	Mitsubishi	0.4545	0.4675	0.0130
7	Noranda	0.4156	0.5065	-0.0909
8	Reverberatory (Пламена пећ)	0.4156	0.5584	-0.1429



Слика 7.3. PROMETHEE II комплетно рангирање алтернатива (технологije за пирометалуршку екстракцију бакра)

Веома изражену значајну погодност приликом примене PROMETHEE методологије коришћењем помоћу Decision Lab-a, представља визуелизација добијених резултата, односно решења рангирања помоћу GAIA (Geometrical Analysis for Interactive Aid) равни. GAIA раван и добијена решења на њој олакшавају евалуацију добијених решења, као и тумачење значајности појединих варијабли. GAIA анализа обезбеђује значајне информације о рангирању у дводимензионалном простору, које се добија PCA (енгл. Principal Components Analysis) екстракцијом. На овај начин, могуће је графички приказати проблематику спроведеног рангирања, одредити специфичне карактеристике односа међу одабраним алтернативама и коначно добити веома важне информације о природи и значајности критеријума као и утицају тежинских параметара критеријума на финалне резултате спроведене анализе. Позиције разматраних алтернатива (троуглови) детерминишу снаге или слабости својстава акција у погледу одабраних критеријума, што заправо и детерминише будући резултат спроведеног финалног рангирања. Што је алтернатива ближа правцу вектора критеријума, то је та алтернатива боља на основу тог критеријума (Brans & Mareschal, 1994; Ishizaka & Nemery, 2011). На слици 7.4 приказан је положај разматраних алтернатива на GAIA равни.



Слика 7.4. GAIA раван избора најповољније алтернативе (технологије за добијање бабра)

7.3. Дискусија добијених резултата

На основу прикупљених техничких, економских и еколошких карактеристика разматраних технологија за добијање бабра, очито је да је могуће извршити рангирање на основу свих карактеристика (критеријума) истовремено. Према томе, примена вишекритеријумске анализе омогућава рангирање према више критеријума истовремено, чиме се обезбеђује листа приоритета и исцрпна анализа предметног проблема. На тај начин, подаци приказани у табели 7.1, анализирани су коришћењем софтверског пакета Decision Lab 2000. Резултати

комплетног рангирања помоћу PROMETHEE II метода приказани су у табели 7.3 и на слици 7.3. Визуелна презентација обављеног рангирања представљена је на слици 7.4, где се уочава компарација свих алтернатива по сваком критеријуму – GAIA раван. Процент прикупљања података на GAIA равни, односно поузданост дате графичке интерпретације је већа од 60 % (Δ :70.19%), што се сматра веома прихватљивим (Brans & Mareschal, 1994).

Положај алтернативе (троуглови на GAIA равни) одређује њену снагу или слабост у односу на критеријуме. Уколико је алтернатива ближа усмерењу осе неког критеријума, утолико је та алтернатива боља по том критеријуму. Према томе технологија Outokumpu flash проседује најбоље перформансе, пошто је ова алтернатива најближа усмерењу оса критеријума са највећим утицајем, а осим тога, за разлику од већине алтернатива, веома је близу позиционирана осам осталих критеријума. Вектор pi (штап одлуке) је приказан осом која се завршава кругом и представља оптимално решење у складу са датим тежинским критеријумима. Најбоља је она алтернатива која је најближа штапу одлуке (Outokumpu flash), док је најлошија алтернатива Пламена пећ која није добра ни по једном критеријуму (са изузетком критеријума могућности прераде сиромашних концентрата), те се тиме и налази супротно од правца штапа одлуке.

Посматрајући ексцентричност позиција критеријума (осе које се завршавају квадратима), тј. њихову удаљеност од координатног почетка, очигледно је да су критеријуми искоришћење бакра (%), искоришћење сумпура (%), Садржај Fe у бакренцу (%) утицајнији у односу на осталих осам критеријума. Додатно, они су најближи штапу одлуке pi , што потврђује њихов највећи утицај при рангирању алтернатива. Имајући у виду да је коришћен релативно велики број критеријума рангирања, њихов квалитет може се оценити као задовољавајући, јер се не јављају изражени конфликти међу њима (не постоје два критеријума која су позиционирана један наспрам другом на GAIA равни).

С обзиром да се рангирање технолошких процеса у овој дисертацији базира на техничким, економским и еколошким критеријумима, могао се и очекивати овакав резултат на основу прикупљеног сета података коришћеног у овом раду. Технологију Outokumpu (рангирана на првом месту) карактерише аутогеност

континуалног топљења сулфидних бакарних и других концентрата и материјала, која спада у групу најновијих аутогених процеса топљења. Ова технологија заузима једну од водећих позиција у свету због ниских трошкова производње и задовољења строгих еколошких стандарда. Насупрот њој, технологија Пламена пећ рангирана је на последњем месту због лоших техничких карактеристика (Cu у бакренцу = 56,50%; Fe у бакренцу= 15,00%, Cu у шљаци=1,20%), тако да није случајно да је ова технологија готово потпуно потиснута, присутна је у свега неколико топионица у свету.

Веома слабе перформансе има и технологија Noranda, док Mitsubishi, Inco Flesh и El Teniente, такође немају изражене позитивне перформансе. Noranda има изразито негативну а Mitsubishi негативну вредност нето тока Φ , док Inco Flesh и El Teniente имају вредност нето тока Φ блиску нули (табела 7.3 и слика 7.3). Примарни разлог за овакво рангирање Noranda и Mitsubishi технологија треба тражити у томе што оне обрађују искључиво концентрате са високим садржајем Cu и дају отпадну троску са повишеним садржајем Cu. С друге стране, технологија Inco Flesh је релативно лоше рангирана због ниског садржаја Cu у бакренцу, ниске производности бакренца и кратког века трајања облога. Слично је и са El Teniente технологијом, која има и ниско укупно искоришћење Cu.

На основу својих техничких, економских и еколошких карактеристика, технологије Ausmelt/Isasmelt и Vanyukov су релативно задовољавајуће рангиране (позитивне вредности нето тока Φ). Технологија Ausmelt/Isasmelt је веома добро рангирана (позиционирана) према критеријумима Cu у шљаци, искоришћењу Cu, количини концентрата у шаржи, Cu у бакренцу и Fe у бакренцу. То заправо говори о задовољавајућим перформансама ових техничких карактеристика код Ausmelt/Isasmelt технологије. Са друге стране, простор за унапређење техничких перформанси ове технологије за добијање бакра налази се у могућности продужавања века трајања облога, у повећању производње бакренца и коришћењу сиромашних концентрата бакром. На основу добијених резултата, веома интересантан је податак да је за разлику од технологије Ausmelt/Isasmelt, технологија Vanyukov веома добро рангирана (позиционирана) баш према критеријумима: век трајања облога, производња бакренца, производња отпадне

шљаке, опсег флексибилности садржаја Cu у концентрату, минималном садржају Cu у концентрату и количина садржаја концентрата у шаржи. Наведени критеријуми се могу посматрати и као потенцијалне области побољшања перформанси технологије Vanuykov.

Коначно, положај алтернатива El Teniente и Mitsubishi на GAIA равни, указује на то да је унапређење перформанси техничких, економских и еколошких карактеристика ових технологија за добијање бакра могуће постићи путем унапређења било које од разматраних карактеристика, због мале негативне вредности нето тока Φ . С друге стране, унапређење позиције технологије Пламена пећ, па чак и Noranda технологије, захтевало би потребу за потпуном модификацијом вредности готово свих разматраних операционих параметара, јер су негативне вредности нето тока Φ изузетно велике за ове две технологије.

7.4. Закључна разматрања спроведеног истраживања

Производња бакра представља једну од примарних активности у индустријском сектору. Високо је енергетски интензивна због чега је позиционирана на трећем месту по потрошњи специфичне енергије узимајући у обзир производњу пет базичних метала (Djordjević et al., 2013; Nikolić et al., 2015; Nikolić et al., 2016; Nikolić et al., 2018). Из тог разлога неопходно је и даље вршити анализу расположивих технологија за производњу бакра и евентуално предложити њихово даље унапређење. Томе сведочи и чињеница да су се технологије за пирометалуршку екстракцију бакра из концентрата сулфидног типа, еволутивно развијале и даље се развијају у циљу оптимизације како техничких и економских, тако и еколошких параметара процеса. Из тог разлога, у овој дисертацији анализирани су тренутно актуелне технологије за екстракцију бакра, и извршено њихово вишекритеријумско рангирање.

Сама дисертација базиран је на приоритетизацији и селекцији посматраних технологија где је селекција извршена на основу средњих вредности одабраних једанаест релевантних параметара. Већина обрађених технологија у овој дисертацији заснива се на аутогености процеса топљења концентрата бакра, који

полази од захтева за обједињавањем појединих фаза прераде (пржење, топљење, конверторовање). Многе водеће компаније из области производње бакра развиле су сопствене аутогене процесе топљења бакарних концентрата који су технолошко и операционо различити. Такође, мали број компанија и даље послује са технолошким процесима који нису аутогени (као што је пламена пећ). Из наведеног разлога, анализирани су и једни и други процеси.

Вишекритеријумска компаративна анализа података коришћена у овој дисертацији дала је значајне закључке у погледу рангирања и евентуалне селекције оптималне технологије за топљење концентрата бакра, која је извршена на основу једанаест одабраних параметра из група техничких и еколошких показатеља. Додатно, вишекритеријумска анализа експлицитно истиче све кључне елементе, који су у великој мери утицали на коначни резултат приоритизације. Најбоље рангирана технологија Outokumpu flash укупно поседује најбоље перформансе. Наиме, уколико би се посматрали само појединачни параметри за рангирање, ова технологија је у предности у односу на све остале параметре, због велике количине произведеног бакренца и дугог животног циклуса пре ремонта. Међутим, она је најбоље рангирана, када се узме утицај свих разматраних фактора у исто време, што и јесте циљ вишекритеријумске анализе, представљене у овој дисертацији.

Коначно, методологија презентована у овој дисертацији, може послужити доносиоцима одлука, односно представницима компанија које се баве процесом топљења бакра, као добар алат приликом одабира оптималне технологије, по разним критеријумима које желе да посматрају. Суштина овог дела рада састојала се у томе да се доносиоцима одлука, који се баве рангирањем и селекцијом технологија екстракције бакра, предочи могућност примене метода MCDM као корисне подршке одлучаивању. Наравно, овде су коришћене просечне вредности параметара различитих светских топионица, које користе наведене технологије. Међутим, исту методу би било могуће применити и у реалном пословном окружењу, код одлучивања заснованом на реалним технолошким параметрима процеса. Поред тога, у овој докторској дисертацији је узето да сви критеријуми имају подједнаку вредност тежинских коефицијената. Међутим, уколико су потенцијалним доносиоцима одлука у одређеним реалним условима, од већег значаја нпр. еколошки параметри, као што је рецимо искоришћење SO₂, они могу овом

параметру доделити већи тежински коефицијент у односу на друге параметре. То ће бити предмет даљег истраживања, где ће се извршити анкетање експерата из области екстрактивне металургије о значају сваког од једанаест анализираних параметара и на основу њиховог мишљења биће додељени тежински параметри за ново рангирање. Интересантан пример је и тај где се у току 2013. године у Бору (Србија), у компанији РТБ Бор, на основу мишљења више стручњака, вршила селекција нове технологије која је требала да замени до тада коришћену технологију Пламене пећи (RTB Bor 2018). Искључиво на основу мишљења стручњака, селетована је управо Оутокумпу технологија, што недвосмислено доказује да извршена селекција и резулти вишекритеријумске анализе, представљени у овом раду, имају и практично упориште.

8. ВАЛИДАЦИЈА ДОБИЈЕНИХ РЕЗУЛТАТА У ФАЗИ ОКРУЖЕЊУ ПРИМЕНОМ АНР-TOPSIS МЕТОДЕ

Верификација добијених резултата у претходном поглављу (поглавље 7) извршена је применом нове методологије у циљу одабира оптималног технолошког поступка екстракције бакра у комплексним условима. За оцену тежинских фактора одабраних критеријума коришћена је фази АНР (енгл. Fuzzy Analytical Hierarchy Process) метода, а потом применом TOPSIS (енгл. Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) методе спроведено је комплетно рангирање технолошких процеса од оптималног до и мање ефикасног решења. У наставку биће укратко описане основе ових двеју метода вишекритеријумског одлучивања.

8.1. Фази АНР (Fuzzy АНР)

АНР (Analytic Hierarchy Process) metoda razvijena од стране Thomas-a Saaty-a (1980) и представља једну од најпознатијих метода вишекритеријумског одлучивања, која је данас пронашла широку примену у различитим областима. Она се најчешће користи када не постоје услови за прецизну, статистичку квантификацију ризика. Завалајујући својој лакоћи примене, као и великој флексибилности, имала је значајну примену приликом решавања различитих проблема вишекритеријумског одлучивања из финансијског, производног, политичког, друштвеног, образованог, владиног, индустријског, и менаџмент сектора (Vaidya & Kumar, 2006; Pamučar et al., 2017; Emrouznejad & Ho, 2018). Основна идеја ове методе је да обухвати и примену знања и искуства експерата о проблему који се анализира.

Међутим, и поред бројних предности које примена ове методе нуди, један од главних недостатака АНР методе јесте тај што она не обухвата, на одговарајући начин, размишљање доносиоца одлуке. Наиме, АНР метода користи егзактне вредности приликом упоређивања критеријума или алтернатива, док доносиоци одлуке своје ставове углавном изражавају интервалним оценама, много чешће него

егзактним вредностима. Ово је из разлога што доносиоци одлуке не могу експлицитно да изразе своје преференције због нејасне (fuzzy) природе самог процеса поређења (Kahraman et al., 2003).

Како би се превазишли претходно наведени недостаци, развијен је фази аналитички хијерахијски процес FАНР (енгл. Fuzzy Analytical Hierarchy Process) где би се његовом применом отклонила присутна неизвесност и непрецизност која се јавља код класичном АНР методом (Alavi & Alinejad-Rokny, 2011). Ово решење је било предложено од стране Laarhoven и Pedrycz (1983). Они су предложили примену принципа фази логике код АНР методе што је довело до развоја фази АНР (FАНР) методе (Анојкумар et al., 2014). Касније су развијене различите варијанте FАНР методе, међутим у овом раду биће примењена модификована Chang's степен анализа (енгл. Modified Chang's extent analysis). Наиме, Chang (1996) је применио троугласте фази бројеве (ТФБ) за скалу упоређења парова код фази АНР као и *extent analysis* метода за синтетичку вредност S_i у парном поређењу. Међутим, тежине одређене применом ове методе, не представљају релативну значајност критеријума одлучивања или алтернатива и не могу се користити као њихови приоритети. Овај проблем су касније Wang и Chen (2007) уклонили корекцијом нормализационе формуле (Wang & Chen, 2007). На тај начин су Wang и Chen својим примером из 2007 године показали да погрешна примена метода фази АНР може довести до погрешно донешене одлуке односно до погрешних решења.

Спровођење наведене FАНР методе може се описати кроз следећих неколико корака:

Први корак: Дефинисање проблема и развијање фази матрице упоређивање парова.

У првом кораку је потребно дефинисати проблем и развити хијерархијску структуру проблема која се састоји од најмање три нивоа. На врху ове структуре налази се целокупни циљ проблема, у средини се налазе дефинисани критеријуми и подкритеријуми, док се у дну налазе алтернативе (Анојкумар et al., 2014). Затим, доносиоци одлуке врше оцену релативне значајности појединих критеријума и

алтернатива на сваком хијерархијском нивоу у паровима уз помоћ лингвистичких варијабли. На тај начин дефинишу се матрице упоређивање парова, чије се вредности преводе у триангуларне фази бројеве (ТФБ) према табели 8.1, како би се добила фази матрица упоређивања парова. Овим се завршава први корак Chang (1996) Extent Analysis методе (Hsu et al., 2010; Pehlivan et al., 2018).

Табела 8.1. Лингвистичке варијабле за поређење парова сваког критеријума (Sun, 2010; Kannan et al., 2013; Pehlivan et al., 2018)

Лингвистићке варијабле	Триангуларна фази скала	Триангуларна фази реципрочна скала
Подједнако снажно	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)
Умерено снажно	(2, 3, 4)	(1/4, 1/3, 1/2)
Снажно	(4, 5, 6)	(1/6, 1/5, 1/4)
Веома снажно	(6, 7, 8)	(1/8, 1/7, 1/6)
Изузетно снажно	(9, 9, 9)	(1/9, 1/9, 1/9)
Интермедијске вредности (међувредности)	(1, 2, 3)	(1/3, 1/2, 1)
	(3, 4, 5)	(1/5, 1/4, 1/3)
	(5, 6, 7)	(1/7, 1/6, 1/5)
	(7, 8, 9)	(1/9, 1/8, 1/7)

Други корак: Одређивање фази синтетичког опсега \tilde{S}_i у односу на критеријуме i .

Одређивање фази синтетичког опсега \tilde{S}_i врши се према обасцу (Kabir & Sumi, 2014):

$$\tilde{S}_i = \sum_{j=1}^n \tilde{c}_{ij} \otimes [\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \tilde{c}_{ij}]^{-1}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (8.1)$$

При чему n представља величину фази матрице упоређивања.

Инверзни вектор из претходне једначине може се израчунати по обрасцу:

$$[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \tilde{c}_{ij}]^{-1} = \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n u_{ij}}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n m_{ij}}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n l_{ij}} \right) \quad (8.2)$$

Међутим, како је већ наведено, Wang et al. (2007) су извршили корекцију нормализационе формуле према следећем обрасцу:

$$[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \tilde{c}_{ij}]^{-1} = \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^n l_{ij} + \sum_{k=1, k \neq i}^n \sum_{y=1}^n u_{ij}}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n m_{ij}}, \frac{1}{\sum_{y=1}^n u_{kj} + \sum_{k=1, k \neq i}^n \sum_{y=1}^n l_{kj}} \right) \quad (8.3)$$

Будући да нормализовани степени вероватноћа могу да покажу до ког степена је одређени триангуларни фази броји (ТФБ) већи од свих осталих ТФБ, али не и њихове релативне значајности. Liou и Wang (1992) су предложили тоталну интегралну вредност са индексом оптимизма a , који даје приоритете синтетичког опсега вредности према следећој једначини (Kabir & Sumi, 2014):

$$I_T^a(\tilde{S}_i) = \frac{1}{2} a(m_i + u_i) + \frac{1}{2} (1 - a)(l_i + m_i) = \frac{1}{2} [au_i + m_i + (1 - a)l_i] \quad (8.4)$$

Индекс оптимизма a , заправо представља степен оптимизма доносиоца одлука и креће се у опсегу од 0 до 1. Што је индекс оптимизма ближи 1, то је доносилац одлуке више оптимистичан, и супротно, што је индекс оптимизма ближи 0 то је доносилац одлуке више песимистичан (Sen & Çinar, 2010).

Трећи корак: Одређивање нормализованог вектора тежине $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$ фази матрице упоређивања.

Одређивање нормализованог вектора тежине $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$ фази матрице упоређивања врши се коришћењем следећег обрасца (Sen & Çinar, 2010):

$$w_x = \frac{I_T^a(\tilde{S}_x)}{\sum_{k=1}^n I_T^a(\tilde{S}_k)} \quad (8.5)$$

при чему w_x представља не-фази број.

8.2. Фази TOPSIS (Fuzzy TOPSIS)

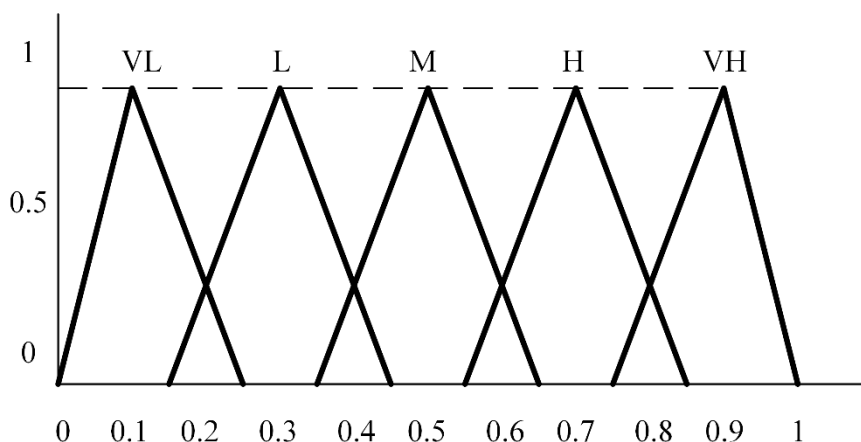
TOPSIS (*Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*) је MCDM метод развијен од стране Hwang и Yoon 1981. године. Најбоља алтернатива одабрана овом методом има најкраће растојање од позитивног идеалног решења (енгл. Positive Ideal Solution - PIS) и најдуже растојање од негативног идеалног решења (енгл. Negative Ideal Solution - NIS) (Hwang & Yoon, 1981). Позитивно идеално решење представља решење које максимизира атрибуте који представљају корист (енгл. benefit attribute) и минимизира атрибуте који представљају трошак за пословање (енгл. cost attribute) (Benitez et al., 2007). TOPSIS метода се широко примењује за решавање проблема рангирања у реалним ситуацијама пружајући на тај начин лако разумљив и програмибилан поступак прорачуна. Ова метода има способност узимања у обзир различитих критеријума истовремено са различитим мерним јединицама (Kutlu & Ekmekcioglu, 2012). Такође, како би се омогућила примена ове методе, вредности одабраних критеријума на основу којих се врши селекција морају бити нумеричке, монотонно растуће или опадајуће, а такође морају бити организоване у виду пропорционалних јединица (Behzadian et al., 2012). Међутим, упркос њеној популарности и једноставности, као и код АНР методе, и ова метода је најчешће критикована због неспособности да адекватно рукује неизвесношћу и непрецизношћу у додељивању вредности од стране доносиоца одлука (Chan & Kumar, 2007). Као решење развијена је фази TOPSIS метода (енгл. Fuzzy Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution - FTOPSIS) у циљу решавања проблема рангирања и оправданости добијених резултата (Torfi et al., 2010). Ова методологија са својим екстензијама може се приказати кроз следећа неколико корака:

Корак 1. Доносилац одлука треба изабрати лингвистичке вредности за алтернативе узимајући у обзир дате критеријуме (\tilde{x}_{ij} , $i=1,2,\dots,m$, $j=1,2,\dots,n$), као и одговарајуће лингвистичке варијабле за одређивање значаја тежина критеријума \tilde{w}_j ($j=1, 2, \dots, n$). Као резултат се формира следећа матрица:

$$\begin{matrix}
 & K_1 & K_2 & \dots & K_n \\
 A_1 & \tilde{x}_{11} & \tilde{x}_{12} & \dots & \tilde{x}_{1n} \\
 A_2 & \tilde{x}_{21} & \tilde{x}_{22} & \dots & \tilde{x}_{2n} \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 A_m & \tilde{x}_{m1} & \tilde{x}_{m2} & \dots & \tilde{x}_{mn}
 \end{matrix} \quad (8.6)$$

$$\tilde{w}_j = [\tilde{w}_1, \tilde{w}_2, \dots, \tilde{w}_n] \quad (8.7)$$

Вредности лингвистичких варијабли ($i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$) могу бити узете као триангуларни фази бројеви (ТФБ) приказани у табели 8.1 са одговарајућим функцијама припадности са одговарајућим функцијама припадности (видети слику 8.1).



Слика 8.1. ТФБ функција припадности за лингвистичке оцене у Табели 8.1. (Н – висок од енгл. High; М – средњи од енгл. Medium; L – низак од енгл. Low) (Živković & Nikolić, 2016)

Корак 2. Како би се превазишле разлике између јединица у овом кораку приступа се конструисању нормализоване фази матрице одлучивања $\tilde{x}_{ij} \otimes \tilde{w}_j$. Нормализација такође омогућава меру вредновања у истом опсегу вредности, обично између 0 и 1.

Корак 3. Конструисање тежински нормализоване матрице,

$$\tilde{V} = \tilde{r}_{ij} \otimes \tilde{w}_j = \tilde{x}_{ij} \otimes \tilde{w}_j = \begin{bmatrix} \tilde{v}_{11} & \tilde{v}_{12} & \dots & \tilde{v}_{1n} \\ \tilde{v}_{21} & \tilde{v}_{22} & \dots & \tilde{v}_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \tilde{v}_{m1} & \tilde{v}_{m2} & \dots & \tilde{v}_{mn} \end{bmatrix} \quad (8.8)$$

Корак 4. Одређивање фази позитивног идеалног (енгл. Fuzzy Positive Ideal Solution - FPIS (A^+)) и фази негативног идеалног решења (енгл. Fuzzy Negative Ideal Solution - FNIS (A^-)).

$$\tilde{A}^+ = \{\tilde{v}_1^+, \tilde{v}_2^+, \dots, \tilde{v}_n^+\} = \{(\max_i \tilde{v}_{ij} \mid i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n)\} \quad (8.9)$$

$$\tilde{A}^- = \{\tilde{v}_1^-, \tilde{v}_2^-, \dots, \tilde{v}_n^-\} = \{(\min_i \tilde{v}_{ij} \mid i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n)\} \quad (8.10)$$

Обзиром да су елементи тежински нормализоване матрице $\tilde{V} = [\tilde{v}_{ij}]_{m \times n} \forall i, j$ позитивни нормализовани фази бројеви, који се налазе у опсегу $[0,1]$, као и да су сви критеријуми са растућом функцијом преференције, могу се дефинисати позитивно идеално решење и негативно идеално решење као:

$$\tilde{v}_j^+ (1,1,1) \quad \text{и} \quad \tilde{v}_j^- (0,0,0); j=1,2,\dots,n. \quad (8.11)$$

Корак 5. Прорачун *distance S* (удаљености) сваке алтернативе од FPIS и FNIS, при чему се дистанца (*S*) између два фази броја рачуна према формули:

$$s_i^+ = \sum_{j=1}^n d(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^+); \quad i=1,2,\dots,m \quad (8.12)$$

$$s_i^- = \sum_{j=1}^n d(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^-); \quad i=1,2,\dots,m \quad (8.13)$$

Корак 6: Израчунавање релативне близине идеалном решењу C^*_i (енгл. Closeness Coefficient) помоћу следећег израза:

$$C_i^* = S_i^- / (S_i^+ + S_i^-), \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (8.14)$$

где је вредност C^*_i између вредности 0 и 1.

Корак 7: У последњем кораку врши се рангирање алтернатива помоћу вредности C^*_i . Што је вредност већа, то је алтернатива боље рангирана (Živković & Nikolić, 2016).

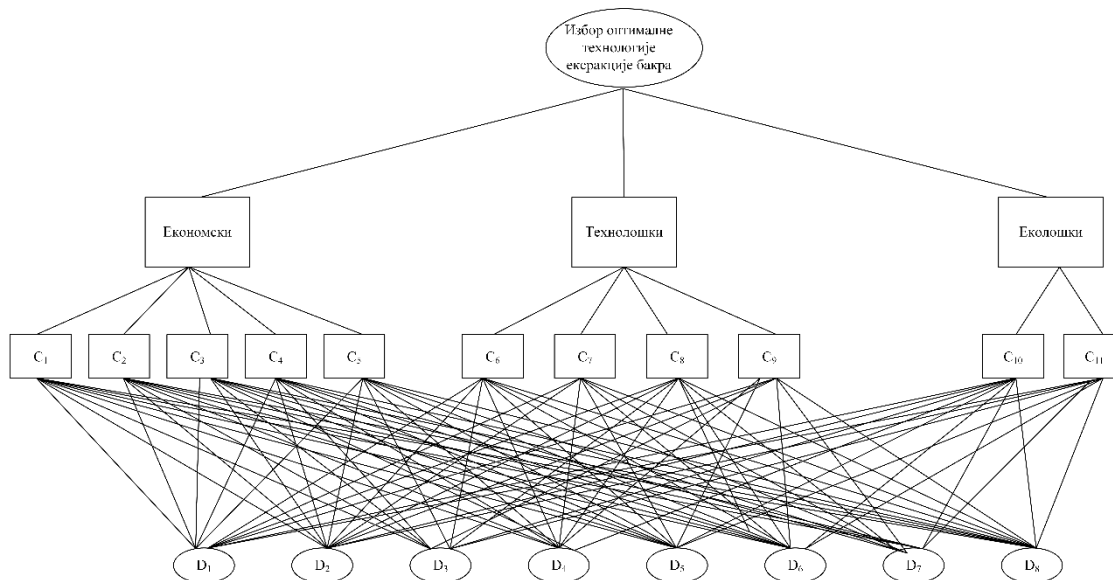
8.3. Резултати и дискусија

У претходним подпоглављима дати су алати вишекритеријумског одлучивања, као и математичке методе које су искоришћене као подршка овом истраживању. На овај начин, постављена је подлога за решавање дефинисане проблематике. Корак који следи јесте примена дефинисане методологије чијом се успешном имплементацијом ствара могућност реализације основног циља овог истраживања.

Примена предложене методологије састоји се из шест корака који ће кроз одговарајуће табеле и слике бити приказани у овом поглављу докторске дисертације. Шест корака примењене методологије су:

1. Дефинисање проблема и хијерархијске структуре
2. Формирање експертског тима
3. Дефинисање матрице поређења парова критеријума и подкритеријума.
4. Фазификовање матрица поређења парова
5. Одређивање значајности критеријума и подкритеријума.
6. Рангирање разматраних технолошких процеса

Први корак предложене методологије састоји се од дефинисање проблема и хијерархијске структуре проблема. Хијерархијска структуре проблема приказана је на слици 8.2.



Слика 8.2. Хијерархијска структуре проблема

На врху хијерархијске структуре налази се циљ решења проблема. У овом случају то је идентификовање оптималног технолошког процеса екстракције бакра. На другом нивоу налазе се критеријуми који су коришћени приликом рангирања. Рангирање посматраних фактора спроведено је на основу три критеријума: Економски, Технолошки и Еколошки. На трећем нивоу налазе се подкритеријуми у оквиру критеријума. Распоред сваког подкритеријума у оквиру критеријума је следећи:

1. *Економски*

- 1.1. С₁ - количина концентата у шаржи (t/дан),
- 1.2. С₂ - производња бакренца (t/дан),
- 1.3. С₃ - век трајања облоге (године),
- 1.4. С₄ - искоришћење бакра (%),
- 1.5. С₅ - садржај Си у отпадној шљаци (%).

2. Технолошки

- 2.1. C_6 - опсег флексибилности садржаја Cu у концентрату, односно разлика између максималног и минималног могућег садржаја у концентрату који дата технологија може прерадити (%),
- 2.2. C_7 - садржај Cu у бакренцу (%),
- 2.3. C_8 - садржај Fe у бакренцу (%),
- 2.4. C_9 - минимални садржај Cu у концентрату (%).

3. Еколошки

- 3.1. C_{10} - производња отпадне шљаке (t/дан),
- 3.2. C_{11} - искоришћење сумпора (%).

На дну хијерархијске структуре налазе технолошки процеси пирометалуршке екстракције бакра који су у овом примеру понуђени као алтернативна решења. Листа алтернатива се састоји од следећих технолошких процеса:

- D_1 - Outokumpu flash,
- D_2 - Ausmelt/Isasmelt lance,
- D_3 - Inco Flash,
- D_4 - Mitsubishi,
- D_5 - Noranda,
- D_6 - El Teniente,
- D_7 - Vanyukov,
- D_8 - Пламена пећ (Reverberatory).

У следећем кораку анализе, формирана је група експерата састављена од професора неколико универзитета и инжењера неколико топионица како би дефинисали почетне матрице поређења парова критеријума у односу на дефинисани циљ, као и подкритеријума у односу на критеријуме. Почетне матрице

поређења парова са одговарајућим оценама од стране експерта приказане су у табелма 8.2 до 8.5

Табела 8.2. Почетна матрица поређења парова: Ниво критеријума

<i>Ниво критеријума</i>	Екологија	Технологија	Економија
Екологија	1	3	3
Технологија	1/3	1	1
Економија	1/3	1	1

Табела 8.3. Почетна матрица поређења парова: Ниво подкритеријума Екологија

<i>Ниво екологија</i>	Производња отпадне шљаке (t/дан)	Искоришћење сумпора (%)
Производња отпадне шљаке (t/дан)	1	1/5
Искоришћење сумпора (%)	5	1

Табела 8.4. Почетна матрица поређења парова: Ниво подкритеријума Технологија

<i>Ниво технологија</i>	Опсег флексибилности садржаја Cu у концентрату (%)	Садржај Cu у бакренцу (%)	Садржај Fe у бакренцу (%)	Минимални садржај Cu у концентрату (%)
Опсег флексибилности садржаја Cu у концентрату (%)	1	1/3	1/3	1
Садржај Cu у бакренцу (%)	3	1	3	3
Садржај Fe у бакренцу (%)	3	1/3	1	3
Минимални садржај Cu у концентрату (%)	1	1/3	1/3	1

Табела 8.5. Почетна матрица поређења парова: Ниво подкритеријума Економија

Ниво економија	Количина концентата у шаржи (t/дан)	Производња бакренца (t/дан)	Век трајања облоге (године)	Искоришћење бакра (%)	Садржај Си у отпадној шљаци (%)
Количина концентата у шаржи (t/дан)	1	3	3	1/3	1/3
Производња бакренца (t/дан)	1/3	1	1	1/3	1/3
Век трајања облоге (године)	1/3	1	1	1/5	1/3
Искоришћење бакра (%)	3	3	5	1	1
Садржај Си у отпадној шљаци (%)	3	3	3	1	1

Затим се приступило фазификовању матрица поређења парова. Оцене додељене од стране експерата приказују се у виду фази сетова. Трансформација додељених се врши применом правила датих у табели 8.1. Резултати овог корака су дати су табелама од 8.6 до 8.9.

У наведеним табелама ознака L – представља најмању могућу вредност; M – представља очекивану и U – представља највећу могућу вредност којом се описује ТФБ.

Табела 8.6. Фазификована матрица поређења парова: Ниво критеријума

Ниво критеријума	Екологија			Технологија			Економија		
	L	M	U	L	M	U	L	M	U
Екологија	1	1	1	2	3	4	2	3	4
Технологија	1/4	1/3	1/2	1	1	1	1	1	1
Економија	1/4	1/3	1/2	1	1	1	1	1	1

Табела 8.7. Фазификована матрица поређења парова: Ниво подкритеријума Екологија

<i>Ниво екологија</i>	Производња отпадне шљаке (t/дан)			Искоришћење сумпора (%)		
	L	M	U	L	M	U
Производња отпадне шљаке (t/дан)	1	1	1	1/6	1/5	1/4
Искоришћење сумпора (%)	4	5	6	1	1	1

Табела 8.8. Фазификована матрица поређења парова: Ниво подкритеријума Технологија

<i>Ниво технологија</i>	Опсег флексибилности садржаја Cu у концентрату (%)			Садржај Cu у бакренцу (%)			Садржај Fe у бакренцу (%)			Минимални садржај Cu у концентрату (%)		
	L	M	U	L	M	U	L	M	U	L	M	U
Опсег флексибилности садржаја Cu у концентрату (%)	1	1	1	1/4	1/3	1/2	1/4	1/3	1/2	1	1	1
Садржај Cu у бакренцу (%)	2	3	4	1	1	1	2	3	4	2	3	4
Садржај Fe у бакренцу (%)	2	3	4	1/4	1/3	1/2	1	1	1	2	3	4
Минимални садржај Cu у концентрату (%)	1	1	1	1/4	1/3	1/2	1/4	1/3	1/2	1	1	1

Табела 8.9. Фазификована матрица поређења парова: Ниво подкритеријума Економија

Ниво економија	Количина концентата у шаржи (t/дан)			Производња бакренца (t/дан)			Век трајања облоге (године)			Искоришћење бакра (%)			Садржај Cu у отпадној шљаци (%)		
	L	M	U	L	M	U	L	M	U	L	M	U	L	M	U
Количина концентата у шаржи (t/дан)	1	1	1	2	3	4	2	3	4	1/4	1/3	1/2	1/4	1/3	1/2
Производња бакренца (t/дан)	1/4	1/3	1/2	1	1	1	1	1	1	1/4	1/3	1/2	1/4	1/3	1/2
Век трајања облоге (године)	1/4	1/3	1/2	1	1	1	1	1	1	1/6	1/5	1/4	1/4	1/3	1/2
Искоришћење бакра (%)	2	3	4	2	3	4	4	5	6	1	1	1	1	1	1
Садржај Cu у отпадној шљаци (%)	2	3	4	2	3	4	2	3	4	1	1	1	1	1	1

Следи одређивање $\tilde{S}_i = (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij})$ вредности за дефинисане критеријуме и подкритеријуме. Прорачун ових вредности врши се применом једначина 8.1 – 8.3, а резултати прорачуна дате су табелама 8 .10. до 8.13.

Табела 8.10. \tilde{S}_i вредности за дефинисане критеријуме

\tilde{S}_i вредности за критеријуме	l_{ij}	m_{ij}	u_{ij}
Екологија	0.50	0.60	0.67
Технологија	0.16	0.20	0.26
Економија	0.16	0.20	0.26

Табела 8.11. \tilde{S}_i вредности за подкритеријум екологија

\tilde{S}_i вредности за подкритеријум (екологија)	l_{ij}	m_{ij}	u_{ij}
Производња отпадне шљаке (t/дан)	0.14	0.17	0.20
Искоришћење сумпора (%)	0.80	0.83	0.86

Табела 8.12. \tilde{S}_i вредности за подкритеријум технологија

\tilde{S}_i вредности за подкритеријум (технологија)	l_{ij}	m_{ij}	u_{ij}
Опсег флексибилности садржаја Cu у концентрату (%)	0.09	0.12	0.17
Садржај Cu у бакренцу (%)	0.31	0.44	0.56
Садржај Fe у бакренцу (%)	0.22	0.32	0.44
Минимални садржај Cu у концентрату (%)	0.09	0.12	0.17

Табела 8.13. \tilde{S}_i вредности за подкритеријум економија

\tilde{S}_i вредности за подкритеријум (економија)	l_{ij}	m_{ij}	u_{ij}
Количина концентата у шаржи (t/дан)	0.13	0.20	0.30
Производња бакренца (t/дан)	0.06	0.08	0.12
Век трајања облоге (године)	0.06	0.08	0.11
Искоришћење бакра (%)	0.25	0.35	0.46
Садржај Cu у отпадној шљаци (%)	0.20	0.29	0.40

Овом нормализацијом степена вероватноће показано је до ког степена је триангуларни фази број већи од осталих, али он не може бити искоришћен за представљање њиховог релативног значаја. Да би се решио овај проблем израчунавају се интегралне вредности са индексом оптимизације $\alpha=0.5$ применом једначине 8.4, а потом извршен је прорачун нормализованог векора тежинског значаја w_i применом једначине 8.5. Прорачунате вредности дате су табелама 8.14 до 8.17.

Табела 8.14. Прорачун приоритета I_T и нормализованог вектора тежинског значаја w_i за критеријуме

I_T и w_i вредности за критеријуме	I_T	w_i
Екологија	0.43	0.602
Технологија	0.14	0.199
Економија	0.14	0.199
Σ	0.71	1.00

Табела 8.15. Прорачун приоритета I_T и нормализованог вектора тежинског значаја w_i за подкритеријум екологија

I_T и w_i вредности за подкритеријум (екологија)	I_T	w_i
Производња отпадне шљаке (t/дан)	0.17	0.169
Искоришћење сумпора (%)	0.83	0.831
Σ	1	1

Табела 8.16. Прорачун приоритета I_T и нормализованог вектора тежинског значаја w_i за подкритеријум технологија

I_T и w_i вредности за подкритеријум (технологија)	I_T	w_i
Опсег флексибилности садржаја Cu у концентрату (%)	0.12	0.122
Садржај Cu у бакренцу (%)	0.44	0.433
Садржај Fe у бакренцу (%)	0.33	0.323
Минимални садржај Cu у концентрату (%)	0.12	0.122
Σ	1.01	1

Табела 8.17. Прорачун приоритета I_T и нормализованог вектора тежинског значаја w_i за подкритеријум економија

I_T и w_i вредности за подкритеријум (економија)	I_T	w_i
Количина концентата у шаржи (t/дан)	0.13	0.200
Производња бакренца (t/дан)	0.05	0.082
Век трајања облоге (године)	0.05	0.078
Искоришћење бакра (%)	0.23	0.349
Садржај Си у отпадној шљаци (%)	0.20	0.291
Σ	0.67	1

У наредном кораку применом горе наведене ФАНП методологије одређене су свеукупне значајности подкритеријума и самих критеријума. Резултати овог дела анализе приказани су у табели 8.18.

Табела 8.18. Локалне и свеукупне значајности критеријума и подкритеријума

Критеријуми	Значајност критеријума	Подкритеријуми	Локална значајност подкритеријума	Свеукупна значајност подкритеријума
Екологија	0.6013	Производња отпадне шљакe (t/дан)	0.1690	0.1016
		Искоришћење сумпора (%)	0.8310	0.4996
Технологија	0.1994	Опсег флексибилности садржаја Си у концентрату (%)	0.1220	0.0243
		Садржај Си у бакренцу (%)	0.4333	0.0864
		Садржај Fe у бакренцу (%)	0.3227	0.0644
		Минимални садржај Си у концентрату (%)	0.1220	0.0243
Економија	0.1994	Количина концентата у шаржи (t/дан)	0.2003	0.0399
		Производња бакренца (t/дан)	0.0817	0.0163
		Век трајања облоге (године)	0.0783	0.0156
		Искоришћење бакра (%)	0.3488	0.0695
		Садржај Си у отпадној шљаци (%)	0.2909	0.0581
		Σ		1

Добијене свеукупне значајности подкритеријума представљају тежинске коефицијенте критеријума који су коришћени приликом рангирања технолошких процеса уз помоћ ФАНП, што уједно представља и следећи корак анализе. Током овог рангирања, извршено је комплетно рангирање свих технолошких процеса. У табели 8.19 дате су средње вредности параметра који су одабрани као најутицајнији са њиховим тежинским вредностима и усмерењима. Просечне вредности параметара који уједно представљају први критеријуме одлучивања добијене су на основу широког прегледа литературе која је наведена у седмом поглављу ове докторске дисертације.

Табела 8.19. Средње вредности параметара за рангирање технологија екстракције бакра са усмерењима функције преференције и тежинским коефицијенти критеријума

Критеријуми Алтернативе	Количина концентрата у шаржи (t/d)	Опсег флексибилности садржаја Cu у концентрату (%)	Cu у бакренцу (%)	Fe у бакренцу (%)	Производња отпадне шљакe (t/d)	Производња бакренца (t/d)	Век трајања облоге (година)	Искористићење SO ₂ (%)	Искористићење Cu (%)	Cu у отпадној шљакци (%)	Мин. садржај Cu у концентрату (%)
Outokumpu flash	2750	5	65	11.5	2025	1500	9	96	97	0.65	26
Ausmelt / Isasmelt lance	2250	4	67	14	1210	1200	2.1	97	97	0.6	25
Inco Flash	3000	9	50	15	1350	935	15	93.6	97.5	0.65	20
Mitsubishi	2150	6	71.5	7.75	1375	1209	3	99.5	97	0.75	28
Noranda	2250	9	72.5	4.5	1500	975	1.75	94	95	0.75	28
El Teniente	2300	7	73	4.5	1725	962.5	1.5	90	96	0.325	26
Vanyukov	2150	8	59.5	10.5	1750	1300	4.5	90	98	0.6	26
Пламена пећ	2000	16	40	27.5	1050	1450	3.5	50	93	0.75	19
Тежинске вредности	.0399	.0243	.0864	.0644	.1016	.0163	.0156	.4996	.0695	.0581	.0243
Min/Max	Max	Max	Max	Min	Min	Max	Max	Max	Max	Min	Min

Пошто се ради о критеријумима који имај различите мерне јединице конструисана је нормализована фази матрице одлучивања како би се превазишле разлике између мерних јединица. Нормализована фази матрице одлучивања дата је табелом 8.20.

Табела 8.20. Нормализована фази матрице одлучивања

Критеријуми Алтернативе	Количина концентата у шаржи (t/d)	Опсег флексибилности садржаја Cu у концентрату (%)	Cu у бакренцу (%)	Fe у бакренцу (%)	Производња отпадне шљаке (t/d)	Производња бакренца (t/d)	Век трајања облоге (година)	Искоришћење SO ₂ (%)	Искоришћење Cu (%)	Cu у отпадној шљаци (%)	Мин. садржај Cu у концентрату (%)
Outokumpu flash	.4089	.2028	.3631	.2949	.4687	0.4386	.4762	.3771	.3560	.3547	.3684
Ausmelt / Isasmelt lance	.3346	.1622	.3742	.3591	.2800	0.3509	.1111	.3810	.3560	.3274	.3542
Inco Flash	.4461	.3650	.2793	.3847	.3124	0.2734	.7936	.3676	.3579	.3547	.2834
Mitsubishi	.3197	.2433	.3994	.1988	.3182	0.3535	.1587	.3908	.3560	.4093	.3967
Noranda	.3346	.3650	.4050	.1154	.3472	0.2851	.0926	.3692	.3487	.4093	.3967
El Teniente	.3420	.2839	.4078	.1154	.3992	0.2814	.0794	.3535	.3524	.1774	.3684
Vanyukov	.3197	.3244	.3323	.2693	.4050	0.3801	.2381	.3535	.3597	.3274	.3684
Пламена пећ	.2974	.6489	.2234	.7053	.2430	0.4240	.1852	.1964	.3414	.4093	.2692
Тежинске вредности	.0399	.0243	.0864	.0644	.1016	.0163	.0156	.4996	.0695	.0581	.0243
Min/Max	Max	Max	Max	Min	Min	Max	Max	Max	Max	Min	Min

Након нормализације података у циљу смањења разлика које настају због различитих мерних јединица потребно је извршити тежинску нормализацију и конст матрицу тежинске нормализације, ова матрица дата је табелом 8.21.

Табела 8.21. Тежински нормализована фази матрице одлучивања

Критеријуми Алтернативе	Количина концентрата у шаржи (t/d)	Опсег флексибилности садржаја Cu у концентрату (%)	Cu у бакренцу (%)	Fe у бакренцу (%)	Производња отпадне шљаке (t/d)	Производња бакренца (t/d)	Век трајања облоге (година)	Искоришћење SO ₂ (%)	Искоришћење Cu (%)	Cu у отпадној шљаци (%)	Мин. садржај Cu у концентрату (%)
Outokumpu flash	.0163	.0049	.0314	.0190	.0407	.0059	.0074	.1884	.0248	.0206	.0090
Ausmelt / Isasmelt lance	.0134	.0039	.0323	.0231	.0297	.0058	.0017	.1904	.0248	.0190	.0086
Inco Flash	.0178	.0089	.0241	.0247	.0249	.0034	.0124	.1837	.0249	.0206	.0069
Mitsubishi	.0128	.0059	.0345	.0128	.0353	.0061	.0025	.1953	.0248	.0237	.0096
Noranda	.0134	.0089	.0350	.0074	.0368	.0047	.0014	.1845	.0242	.0237	.0096
El Teniente	.0137	.0069	.0352	.0074	.0414	.0045	.0012	.1766	.0245	.0103	.0090
Vanyukov	.0128	.0079	.0287	.0173	.0449	.0066	.0037	.1766	.0250	.0190	.0090
Пламена пећ	.0119	.0158	.0193	.0454	.0290	.0079	.0029	.0981	.0237	.0237	.0065
Min/Max	Max	Max	Max	Min	Min	Max	Max	Max	Max	Min	Min

Одређивање фази позитивног - FPIS (A+) и фази негативног идеалног решења - FNIS (A-) је следећи корак FTOPSIS методологије, а добијени резултати приказани су у табели 8.22.

Табела 8.22. Вредности фази позитивног и фази негативног идеалног решења

Критеријуми FPIS / FNIS	Количина концентрата у шаржи (t/d)	Опсег флексибилности садржаја Cu у концентрату (%)	Cu у бакренцу (%)	Fe у бакренцу (%)	Производња отпадне шљакe (t/d)	Производња бакренца (t/d)	Век трајања облоге (година)	Искоришћење SO ₂ (%)	Искоришћење Cu (%)	Cu у отпадној шљаци (%)	Мин. садржај Cu у концентрату (%)
FPIS (A+)	.0178	.0158	.0352	.0074	.0249	.0079	.0124	.1953	.0250	.0103	.0065
FNIS (A-)	.0119	.0039	.0193	.0454	.0449	.0034	.0012	.0981	.0237	.0237	.0096
Min/Max	Max	Max	Max	Min	Min	Max	Max	Max	Max	Min	Min

Прорачун удаљености (енгл. *distance*) S сваке алтернативе од FPIS и FNIS дат је у табели 8.23.

Табела 8.23. Одређивање S_i^+ и S_i^-

Удаљеност Алтернативе	S_i^+	S_i^-
Outokumpu flash	.0266	.0953
Ausmelt / Isasmelt lance	.0257	.0972
Inco Flash	.0270	.0915
Mitsubishi	.0235	.1041
Noranda	.0255	.0961
El Teniente	.0293	.0898
Vanyukov	.0337	.0842
Пламена пећ	.1070	.0207

Следећи корак FTOPSIS методологије јесте одређивање релативне близине идеалном решењу C_i^* (енгл. Closeness Coefficient). Вредности добијене у овом кораку дате су у табели 8.24 и послужиће за коначно рангирање технолошких процеса пирометалуршке екстракције бакра. Атернатива која има већу вредност боље је рангирана по овом критеријуму.

Табела 8.24. Рангирање технолошких процеса пирометалуршке екстракције бакра на основу релативне близине идеалном решењу

C_i^* и рангирање Алтернативе	C_i^*	Ранг
Outokumpu flash	.7821	4
Ausmelt / Isasmelt lance	.7909	2
Inco Flash	.7719	5
Mitsubishi	.8157	1
Noranda	.7906	3
El Teniente	.7539	6
Vanyukov	.7140	7
Пламена пећ	.1619	8

На основу табеле 8.24 може се закључити да је најбоље рангирана технологија Mitsubishi. Након тога применом ове методологије рангира се Ausmelt/Isasmelt lance, Noranda, Outokumpo, Inco Flash, El Teniente, Vanyukov и на последњем месту налази се Пламена пећ.

Као што се примећује, оцењивање значајности од стране експерта дало је већу предност еколошким параметрима него економским, иако је број ових параметра био значајно мањи. Све технологије које се заснивају на аутогености процеса еколошки су прихватљивије и економски оправдане. Док је примена Пламене пећи застарео процес који треба искључити из употребе. Код

првопласиране технологије велики утицај има искоришћење сумпора који код ове технологије износи 99,5%

8.4. Закључна разматрања спроведеног истраживања

Производња бакра представља једну од примарних активности у индустријском сектору која доприноси економском развоју сваке земље. Приликом изградње постројења за екстракцију бакра тежи се примени технолошког поступка који ће дати најбоље економске ефекте, а у исто време бити и еколошки прихватљив. Проблем избора технолошког процеса екстракције бакра представља веома комплексан проблем, у првом реду због великог броја критеријума коју морају бити узети у обзир као и због њихове природе. Такође велики број учесника у процесу одлучивања може имати различите интересе тако да се приоритети могу разликовати па сами тим и тежински значај одабраних критеријума.

Примењена методологија у овој докторској дисертацији дала је добру верификацију добијеног модела из предходног поглавља (поглавље 7). Добијене разлике у резултатима проистичу из субјективног мишљења експерата који су вршили оцењивање параметара поменутих технолошких процеса. На основу овакве верификације, могуће је закључити да је добијени модел прихватљив и применљив, не само са аспекта научног достигнућа, већ и у практичне примене.

У складу са тим овим истраживањем, дефинисан је један веома ефикасан модел за решавање проблема овакве врсте. Наиме, дефинисана је комплексна методологија која омогућава детаљну анализу проблема и знатно поспешује процес доношења одлуке када је рећ о изградњи овакве врсте постројења.

9. РЕЗУЛТАТИ РАНГИРАЊА ПРИМЕНОМ PROMETHEE/GAIA МЕТОДОЛОГИЈЕ НА КОНКРЕТНИМ ВРЕДНОСТИМА ИЗ ПРАКСЕ

У овом делу докторске дисертације вршено је рангирање тридесет топионица које примењују седам различитих технолошких поступака топљења концентрата бакра. Технолошки поступци који се разматрају у оквиру анализираних топионица су Isasmelt, Noranda, Outokumpu, Mitsubishi, Teniente, Electric Flash и Пламена пећ (Kapusta, 2004). Рангирање и селекција је вршена на основу једанаест критеријума који су од есенцијалне важности за све претходно наведене технолошке поступке. Такође, ови карактеристични параметри су коришћени за представљање технолошких процеса код великог броја аутора (Davenport et al., 2002; Moskalyk & Alfantazi, 2003; Kapusta, 2004; Schlesinger et al., 2011; Najdenov et al, 2012; Najdenov, 2013). Избор одговарајућих параметара за рангирање топионица свакако има велики утицај на финалне резултате. Параметри који су узети за рангирање представљено у овом раду су следећи:

1. годишња производња бакра (t/година);
2. садржај Cu у концентрату (wt.%);
3. век трајања облоге (године),
4. садржај Cu у бакренцу (%),
5. садржај Fe у бакренцу (%),
6. садржај Cu у шљаци (%),
7. садржај Fe у шљаци (%),
8. потребан додатни третман шљаке топљења (0 - није потребан / 1 - потребан),
9. протока димних гасова (Nm³/h),
10. садржај SO₂ у димним гасовима (%),
11. производња бакра по запосленом (t/година по запосленом).

Преглед одабраних топионица концентрата бакра са одговарајућим технолошким поступком који се у њима примењује дат је у Табели 9.1.

Табела 9.1. Преглед анализираних топионица са технолошким поступцима које се у њима примењују (Каруста, 2004)

<i>Р. бр</i>	<i>Произвођач (Компанија)</i>	<i>Тип технолошког процеса</i>
1.	Mount Isa Mines	Isasmelt
2.	Port Kembla Copper Pty. Ltd.	Noranda reactor
3.	Daye Nonferrous Metals Co.	Noranda reactor
4.	Jiangxi Copper	Outokumpu flash
5.	Tongling Nonferrous Metals Co.	Outokumpu flash
6.	Yunnan Copper Co.	Isasmelt
7.	Sterlite Industries	Isasmelt
8.	PT Smelting	Mitsubishi S-furnace
9.	Dowa Mining Co. Ltd.	Outokumpu flash
10.	Hibi Kyodo Smelting Co. Ltd.	Flash furnace with electrodes
11.	Nippon Mining & Metals Co. Ltd.	Outokumpu flash
12.	Onahama Smelting & Refining Co. Ltd.	Reverberatory
13.	Sumitomo Metals Mining Co. Ltd.	Outokumpu flash
14.	Pasar (Philippines)	Flash furnace with electrodes
15.	Umicore Med	Outokumpu flash
16.	Harjavalta Metals OY	Outokumpu flash
17.	Norddeutsche Affinerie AG	Outokumpu flash
18.	Atlantic Copper	Outokumpu flash
19.	Boliden Mineral	Flash furnace with electrodes
20.	North America Falconbridge Ltd.	Mitsubishi S-furnace
21.	Hudson Bay Mining & Smelting	Reverberatory
22.	Noranda Inc. (Horne, Canada)	Noranda reactor
23.	Mejicana de Cobre A.S. de C.V.	Flash Teniente converter
24.	Kennecott Utah Copper	Outokumpu flash
25.	South America Caraiba Metals	Outokumpu flash
26.	Codelco Chile (Potreillos)	Teniente converter
27.	Codelco Chile (Caletones)	Teniente converter
28.	Enami (Herman Videla Lira)	Teniente converter
29.	Enami (Las Ventanas)	Teniente converter
30.	Noranda Inc. (Altonorte, Chile)	Noranda reactor

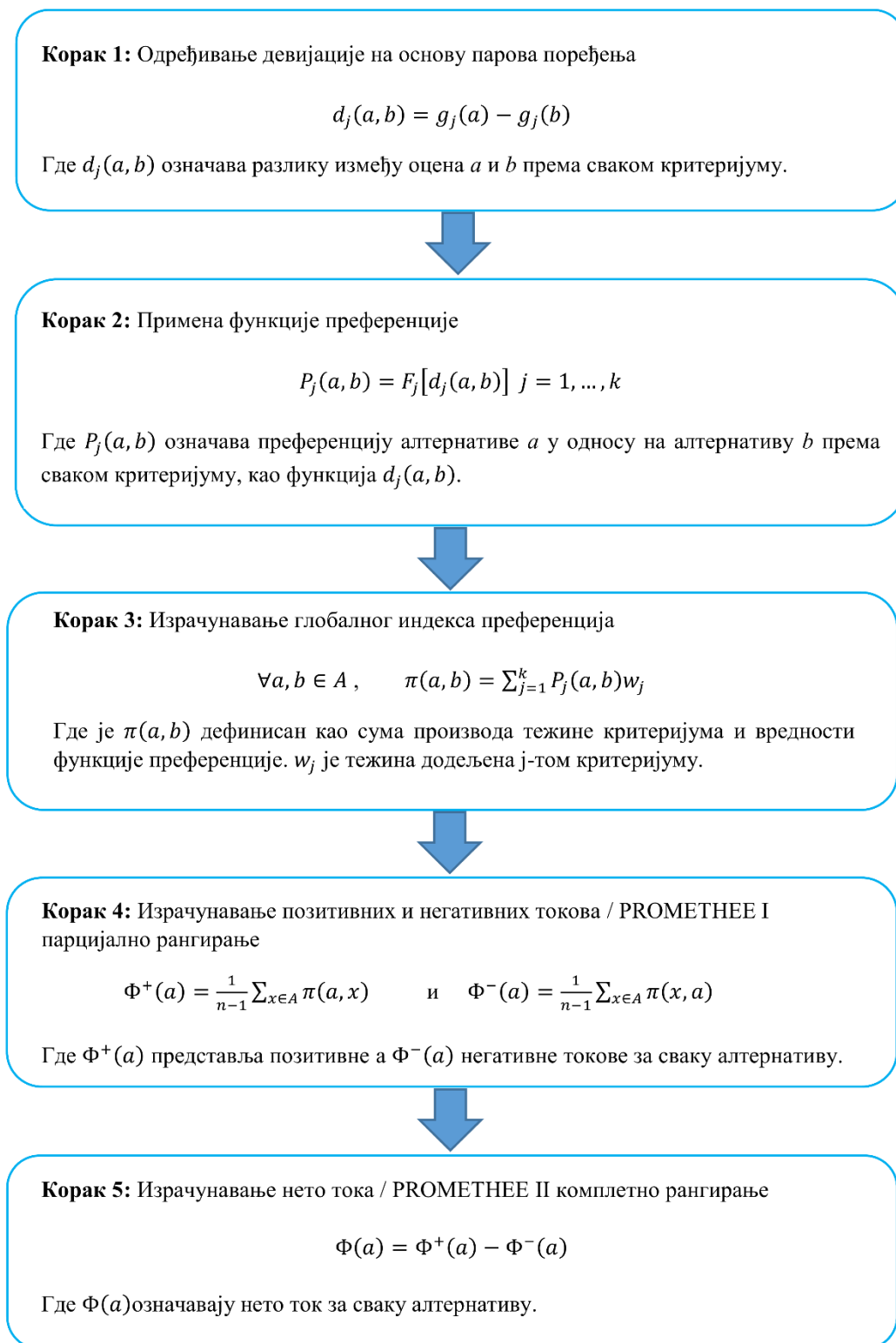
9.1. Методологија за анализу података

На основу претходно наведених критеријума који су међусобно супростављени као најадекватнија метода за анализу датих података јсте MCDM. Саме MCDM методе обезбеђују математичке моделе за рангирање алтернатива на основу селектованих критеријума, при чему на јасан и прегледан начин представљају резултате рангирања алтернатива и дају синтезу финалних резултата (Brans & Mareschal, 1994; Kazem & Hadinejad, 2015; Bagherikahvarin, 2016).

У оквиру шестог поглавља ове докторске дисертације развијен је PROMETHEE/GAIA метод за селекцију оптималног пирометалуршког технолошког процеса екстракције бакра. Како би доказали његову практичну примену у овом поглављу је вршено рангирање тридесет топионица на основу једанаест критеријума.

Процедура спровођења PROMETHEE методе била је детаљније дата у шестом поглављу, међутим она је укратко представљена сликом 9.1. Ово поглавље ће се више бавити представљањем добијених резултата рангирања.

PROMETHEE метода спада у групу млађих метода која даје могућност рангирања и селекције међусобно супростављених критеријума што је и случај код топионица бакра из чијег сложеног технолошког процеса проистичу бројни комплексни критеријуми. Резултати рангирања топионица према PROMETHEE методологији, праћени су графичким приказом алтернатива, применом GAIA равни. Те се сама техника у савременој литератури назива PROMETHEE/GAIA. Број истраживача који у својим истраживањима примењују PROMETHEE/GAIA методе, и који их и даље истражују у смислу њихове осетљивости, из године у годину је све већи, што потврђују бројне публикације (Abedi et al., 2012; Vetschera & de Almeida, 2012; Peng & Xiao, 2013; Tavana et al., 2013; Yu et al., 2013; Zhao et al., 2013; Veza et al., 2015; Bagherikahvarin & De Smet, 2016; Kadziński & Ciomek, 2016). Међутим, у научној литератури не постоје радови који се баве селекцијом технолошких процеса пирометалуршке екстракције бакра применом вишекритеријумске анализе. То представља додатан разлог наставка овакве врсте истраживања и примене вишекритеријумских алата за селекцију ових процеса.



Слика 9.1. Шематски приказ процедура спровођења PROMETHEE методе (Behzadian et al., 2010).

9.2. Резултати и дискусија

Приликом анализе података ни једном параметру није дата предност у односу на друге параметер, те су тежински коефицијент искључени као део вишекритеријумске анализе како би се избегла субјективност код рангирања, односно дала предност једној топионици бакра у односу на неку другу, на основу субјективног мишљења доносиоца одлука (Vetschera, 2012; Tavana, 2013; Yu, 2013; Nikolic et al., 2019).

У PROMETHEE II методи, корисник има могућност да анализира разлике засноване на минималном разилажењу шест потенцијалних функција преференције. У истраживању представљеном у овом делу докторске дисертације коришћена је функција тип 1 (usual). Функција преференције usual је одабрана као најбоље решење за опис анализираних података (зато што су сви подаци квантитативни) (Vego et al., 2008). Вредности Min/Max усмерења су базиране на основу контекста сваке од разматраних једанаест карактеристика топионица, описаних у шестом поглављу ове докторске дисертације, и њиховог потенцијалног утицаја на истраживане топионице бакра (табела 9.2).

Табела 9.2. Функције преференције и вредности усмерења за одабране параметре

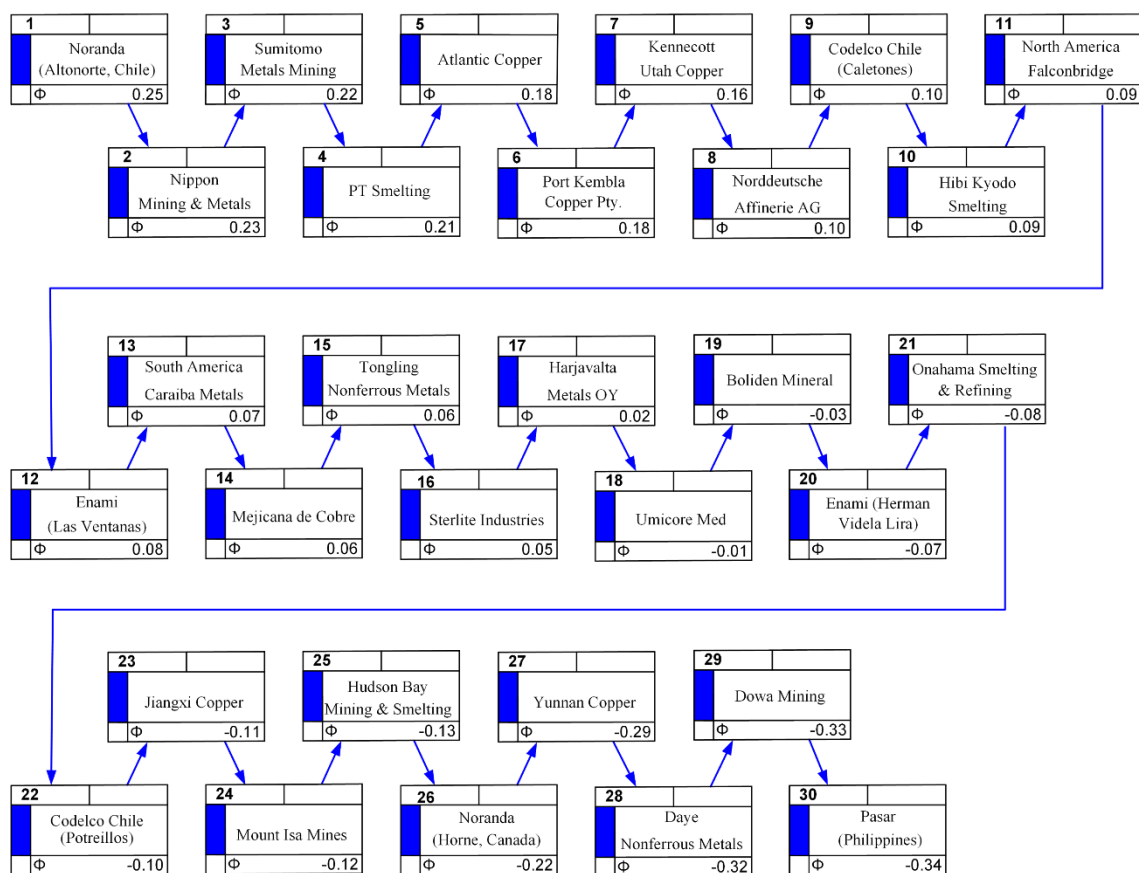
Критеријуми	Годишња производња бакра (t/година)	Садржај Cu у концентрату (wt.%)	Век трајања облоге (године)	Садржај Cu у бакренцу (%)	Садржај Fe у бакренцу (%)	Садржај Cu у шљаци (%)	Садржај Fe у шљаци (%)	Потребан додатни третман шљак топлења (0 - није потребан / 1 -потребан)	Протока димних гасова (Nm ³ /h)	Садржај SO ₂ у димним гасовима Offgas (%)	Производња бакра по запосленом (t/година по запосленом)
Функције преференције	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual
Min/Max	Max	Max	Max	Max	Min	Min	Max	Min	Min	Min	Max

Као што је већ објашњено у седмом поглављу, комплетно рангирање према PROMETHEE II методи базире се на израчунавању нето тока (Φ), који представља разлику између позитивног и негативног тока преференције. Алтернатива која има највећу вредност нето тока је најбоље рангирана и тако редом до најлошије рангиране алтернативе (Roy & Vincke, 1981; Vincke, 1992; Brans & Mareschal, 1994; Anand & Kodali, 2008; Nikolic et al., 2019). На основу наведеног и вредности алтернатива (заједничких карактеристика у оквиру свих топионица, датих у табели 2), извршено је комплетно рангирање (PROMETHEE II методом) тридесет топионица које се баве топљењем бакра у свету. Добијени резултати су приказани у табели 9.3 и на слици 9.2.

Табела 9.3. Резултати комплетног рангирања репрезентативних топионица за топљење бакра на основу PROMETHEE II MCDA методе

Ранг	Алтернативе	Φ^+	Φ^-	Φ
1	Noranda Inc. (Altonorte, Chile)	0.5674	0.3135	0.2539
2	Nippon Mining & Metals Co. Ltd.	0.5611	0.3292	0.2320
3	Sumitomo Metals Mining Co. Ltd.	0.5486	0.3323	0.2163
4	PT Smelting	0.5486	0.3386	0.2100
5	Atlantic Copper	0.5361	0.3542	0.1818
6	Port Kembla Copper Pty. Ltd.	0.5266	0.3511	0.1755
7	Kennecott Utah Copper	0.5329	0.3699	0.1630
8	Norddeutsche Affinerie AG	0.4890	0.3856	0.1034
9	Codelco Chile (Caletones)	0.4984	0.4013	0.0972
10	Hibi Kyodo Smelting Co. Ltd.	0.4953	0.4013	0.0940
11	North America Falconbridge Ltd.	0.4796	0.3887	0.0909
12	Enami (Las Ventanas)	0.4859	0.4107	0.0752
13	South America Caraiba Metals	0.4828	0.4169	0.0658
14	Mejicana de Cobre A.S. de C.V	0.4734	0.4138	0.0596
15	Tongling Nonferrous Metals Co.	0.4734	0.4169	0.0564
16	Sterlite Industries	0.4702	0.4169	0.0533
17	Harjavalta Metals OY	0.4577	0.4420	0.0157
18	Umicore Med	0.4357	0.4420	-0.0063
19	Boliden Mineral	0.4232	0.4483	-0.0251
20	Enami (Herman Videla Lira)	0.4201	0.4859	-0.0658
21	Onahama Smelting & Refining Co. Ltd.	0.4357	0.5204	-0.0846
22	Codelco Chile (Potreillos)	0.3887	0.4890	-0.1003
23	Jiangxi Copper	0.3824	0.4953	-0.1129
24	Mount Isa Mines	0.3950	0.5141	-0.1191
25	Hudson Bay Mining & Smelting	0.4326	0.5580	-0.1254
26	Noranda Inc. (Horne, Canada)	0.3448	0.5674	-0.2226
27	Yunnan Copper Co.	0.3041	0.5893	-0.2853
28	Daye Nonferrous Metals Co.	0.2915	0.6144	-0.3229
29	Dowa Mining Co. Ltd.	0.2633	0.5956	-0.3323
30	Pasar (Philippines)	0.2727	0.6144	-0.3417

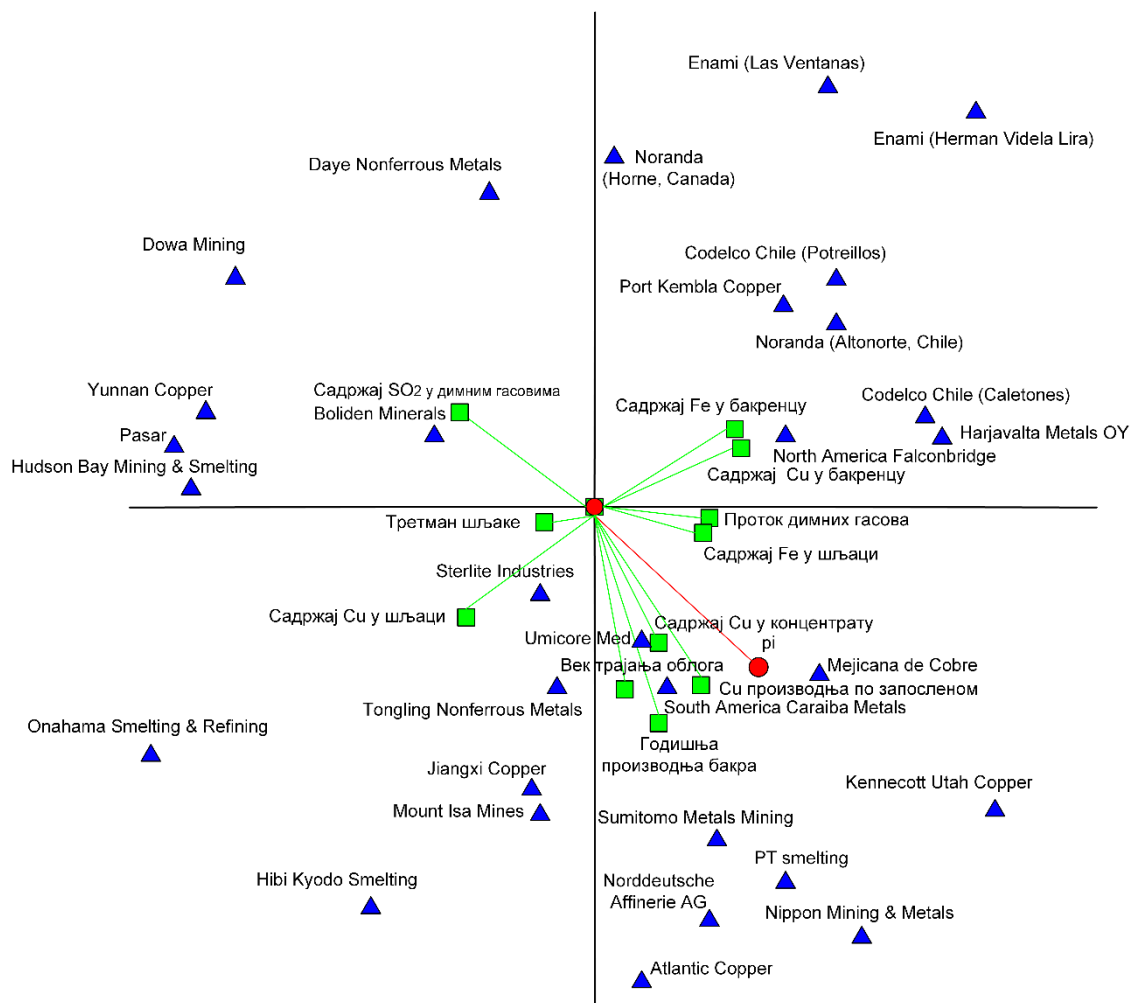
Моделовање утицајних параметара за рангирање технолошких процеса пирометалуршке екстракције бакра применом метода вишекритеријумске анализе



Слика 9.2. PROMETHEE II комплетно рангирање алтернатива (репрезентативних топионица за топљење бакра)

Једна од главних предности ове методе је и могућност геометријске интерпретације резултата уз помоћ GAIA методе што нам увелико олакшава софтверски пакет Decision Lab-a. Престављањем резултата коришћењем GAIA равни доносиоци одлуке имају могућност бољег сагледавања конфликтног карактера критеријума и утицају тежинских фактора на коначне резултате. На тај начин, резултати рангирања су јасније и прегледније представљени (Brans & Mareschal, 1994; Ishizaka & Nemery, 2011). На слици 9.3. приказан је положај разматраних алтернатива на GAIA равни.

Моделовање утицајних параметара за рангирање технолошких процеса пирометалуршке екстракције бакра применом метода вишекритеријумске анализе



Слика 9.3. GAIA раван избора најповољније алтернативе (топионице бакра)

На основу прикупљених података о техничким, економским и еколошким карактеристикама разматраних топионица за топљење бакра, јасно се указује да је могуће извршити рангирање ових топионица бакра на основу разматраних карактеристика. Применом вишекритеријумске анализе се према томе врши рангирање према више критеријума истовремено, чиме се обезбеђује листа приоритета и исцрпна анализа предметног проблема. Прикупљени подаци у овом делу докторске дисертације су били анализирани коришћењем софтверског пакета Decision Lab 2000. Резултати комплетног рангирања помоћу PROMETHEE II су приказани у табели 9.3 и на слици 9.2, док је на слици 9.3 представљена визуелна презентација обављеног рангирања. На слици 9.3 се уочава компарација свих алтернатива по сваком критеријуму – GAIA раван. Процент прикупљања података

на GAIA равни, односно поузданост дате графичке интерпретације је већа од 60 % (Δ : 62.37%), што се сматра веома прихватљивим (Brans & Mareschal, 1994; Brans & Mareschal, 2005).

Положај алтернативе (троуглови на GAIA равни са разматраним именима топионица) одређује њену снагу или слабост у односу на критеријуме (правоугаоници). Уколико је алтернатива ближа усмерењу осе неког критеријума, утолико је та алтернатива боља по том критеријуму. Према томе, топионица Noranda Inc. (Altonorte, Chile) проседује најбоље перформансе, пошто је ова алтернатива најближа усмерењу већини оса критеријума, за разлику од већине алтернатива. Самим тиме, вектор pi (штап одлуке), који је приказан осом која се завршава кругом и представља оптимално решење у складу са датим тежинским критеријумима, у дводимензионалном простору се налази најближе овој алтернативи. Најбоља је она алтернатива која је најближа штапу одлуке (Noranda (Altonorte, Chile)), док је најлошија алтернативе (Pasar (Philippines)) која не даје добре резултате ни по једном критеријуму, те се тиме и налази супротно од правца штапа одлуке.

Посматрајући ексцентричност позиција критеријума (осе које се завршавају квадратима), тј. њихову удаљеност од координатног почетка, очигледно је да су критеријуми садржај Cu у концентрату (wt.%), век трајања облоге (године), садржај Fe у шљаци (%) и производња бакра по запосленом (t/година по запосленом) утицајнији у односу на осталих седам посматраних критеријума. Додатно, они су најближи штапу одлуке pi , што потврђује њихов највећи утицај при рангирању алтернативе. Имајући у виду да је коришћен релативно велики број критеријума рангирања, њихов квалитет се може оценити као задовољавајући, јер се не јављају изражени конфликти међу њима (не постоје два критеријума која су позиционирана један наспрам другом на GAIA равни).

С обзиром да се рангирање карактеристичних топионица бакра у овом делу дисертације у већој мери базира на технолошким критеријумима, могао се и очекивати овакав резултат на основу прикупљеног сета података. Топионицу Noranda Inc. (Altonorte, Chile) која је рангирана на првом месту, карактерише аутогеност континуалног топљења сулфидних бакарних и других концентрата и

материјала. Технологија која се у овој топионици примењује је Noranda која спада у групу најновијих аутогених процеса топљења. Ову технологију карактерише прилично ниски трошкови производње и задовољење строгих еколошких стандарда, где је групише међу водеће технологије за аутогено топљење сулфидних бакарних концентрата у свету. Насупрот њој, топионица Pasar (Philippines) је рангирана на последњем месту због лоших техничких карактеристика од којих ће бити издвојено: кратак период трајања облоге и њихова честа замену (краћи од годину дана), садржај бакра у бакренцу је низак (55%), док је са друге стране садржај Fe у бакренцу прилично висок (око 24%), такође је потребна додатна прерада добијене шлаке, јер она у себи садржи бакар (1.5%). Технологија која се овде примењује је флеш пећ са електродама (енгл. Flash furnace with electrodes). Ова врста технолошког процеса се примењује још у једној топионици која је узета као репрезентативна у овом раду а то је Hibi Kyodo Smelting Co. Ltd. Ова топионица је на основу рангирања исте врсте технолошких параметара свртана на десето место. Где може се закључити да примена једног истог технолошког процеса у две или више топионица може дати различите резултате. Такође, исто се могло закључити и код прворангиране топионице у којој је примењена технологија Noranda. Примена ове исте технологије у топионици Noranda Inc. (Horne, Canada) сврстава је на двадесетшестом месту.

Посматрањем технологија које су примењене у карактеристичним топионицама бакра које су разматране у овом раду, може се приметити и то да примена Mitsubishi технолошког процеса за топљење бакра сврстава дате две топионице међу првих једанаест иако ниједна од њих није свртана на прва три места. Ову технологију поред добрих економских параметра карактерише низак садржај Fe у бакренцу као и висока прозводња бакренца по запосленом раднику. Реципрочан закључак се може извести на основу пламене пећи коју примењују друге две карактеристичне топионице. Примена ове технологије обе топионице рангира међу последње. Разлог томе је и то што ова технологија представља један од најстаријих технолошких процеса за добијање бакра и не спаде у групу аутогених процеса топљења бакарних сулфидних концентрата те захтева претодно фазу пржења. На тај начин се нерационално троше енергетски ресурси који самим тим повећавају и трошкове топљења. Најпримењиванија технологија код свих

разматраних топионица била је Outokumpu. Ова технологија се примењује код трећине разматраних топионица (десет топионица) и као резултат даје одређену стабилност технолошког процеса,

9.3. Закључна разматрања спроведеног истраживања

Бакар представља једну од најтраженијих сировина. Да би се те потребе подмириле у свету је отворено и активно се бави његовом производњом преко 120 топионица. Циљ сваке топионице јесте да произведе што већу количину црвеног метала са што мањим трошковима, уз задовољење еколошких стандард и законских норматива. Како би се истражила њихова оптималност и задовољење претходно наведеног циља, у овом делу дисертације је анализирано тридесет карактеристичних и тренутно активних топионица. Већина обрађених топионица бакра, у овом раду, користи аутогене процесе топљења концентрата бакра, који полази од захтева за обједињавањем појединих фаза прераде (пржење, топљење, конверторовање). Вишекритеријумска компаративна анализа података коришћена у овом делу дисертације дала је значајне закључке у погледу рангирања и евентуалне селекције оптималне топионице за топљење сулфидних концентрата бакра. Додатно, вишекритеријумска анализа експлицитно истиче све кључне елементе, који су у великој мери утицали на коначни резултат приоритизације. Најбоље рангирана топионица у овом раду Noranda Inc. (Altonorte, Chile) укупно поседује најбоље перформансе. Наиме, уколико би се посматрали само појединачни параметри за рангирање, ова топионица је у предности у односу на све остале због велике количине произведеног бакренца и дугог животног циклуса (campaign life) пре ремонта. Међутим, она је најбоље рангирана, када се узме и утицај свих разматраних фактора у исто време, што и јесте циљ вишекритеријумске анализе, представљене у овом делу докторске докторске дисертације. Такође, у овом делу дисертације показано је да сам одабир технолошког процеса који ће бити имплементиран нема великог утицаја на саме перформансе топионица за топљење бакра, колико имају утицај други инжењерски и економски фактори, као и организационо знање вођења самог технолошког процеса и располагање одређеним ресурсима и кадровским решењима. Наиме, показало се да иста врста

технологије може бити различито рангирана, у различитим околностима примене, јер је осим техничких капацитета, од великог значаја састав коришћеног концентрата, као и производња у односу на број запослених.

На овај начин, формиран је користан модел који даје могућност доносиоцима одлуке да одаберу не најбољу већ оптималну технологију која ће имати највеће шансе да се спроведе у реалнос.

Према томе, ова истраживања и модел могу бити од користи доносиоцима одлука, код избора оптимлане технологије за екстракцију бакра из сулфидне минералне сировине, јер показује да одлуку не треба заснивати само на чињеници да је нека технологија најзаступљенија у свету. Већ треба узети у обзир и сопствене ресурсе и капацитете, као и састав улазне сировине који је на располагању, уз задовољење свих еколошких стандарда. Изградња топионице која ће давати само добре економске резултате без вођење рачуна о еколошким захтевима може у дугорочном периоду доносиоце одлуке много више да кошта.

10. ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА И НАУЧНИ ДОПРИНОСИ

Бакар и његова производња значајно доприносе развоју економије сваке земље. Изградња постројења за производњу бакра захтева велика новчана улагања, док пословање таквих постројења има велики утицај не само на економију већ и на животну средину и стандард друштва. Примена савмених технолошких процеса за његову екстракцију даје слику и о одрђеном технолошком развоју земље у којој постојење егзистира.

У овој дисертацији, идентификовани су одговарајући технолошки параметри у оквиру актуелних разматраних технологија. Применом адекватних статистичких алата који су подржани од стране савмених софтверских пакета, развијен је вишекритеријумски модел за избор оптималног технолошког процеса у комплексним условима.

Имајући у виду циљеве и задатке истраживања постављене на почетку ове докторске дисертације може се закључити да су они постигнути.

Узевши у обзир полазне хипотезе које представљају основни оквир за истраживање у овој дисертацији, могуће је извести следеће закључке:

Нулта хипотеза (H_0) која гласи: „Могуће је развити вишекритеријумски модел одлучивања у циљу одређивања оптималног технолошког процеса екстракције бакра у комплексним условима“, потврђена је истраживањем представњеним у седмом поглављу ове докторске дисертације. Истраживање је показало да је могуће развити вишекритеријумски модел одлучивања у циљу одређивања оптималног технолошког процеса екстракције бакра у комплексним условима. Развој вишекритеријумског модела одлучивања вршено је на бази селекције и рангирања осам најактуелнијих процеса за пирометалуршку екстракцију бакра.

Хипотеза (H₁) која гласи: „Аутогени пирометалуршки процеси дају у већини случајева боље резултате од оних који нису аутогени“, потврђена је применом вишекритеријумских алата одлучивања за рангирање технолошких процеса пирометалуршке екстракције бакра, представљеним у поглављима седам и осам, такође, примењени су у деветом поглављу на кокретним вредностима за рангирање реалних топионица у свету. Као резултат овог рангирања аутогени пирометалуршки процеси били су боље ранжирани од оних који нису аутогени због својих бољих резултата. Предност аутогених пирометалуршких процеса могу се огледати кроз економски аспект, с обзиром да мање користе горива за одвијање процеса од оних који нису аутогени. Такође, имају мањи негативан утицај на животну средину тако да су и еколошки прихвативији. Док као основни недостатак може се навести немогућност топљења сиромашних концентрата.

Хипотеза (H₂) која гласи: „Могуће је формирати модел вишекритеријумског одлучивања у циљу одређивања оптималног технолошког процеса укључивањем најважнијих стејхолдера у процесу групног одлучивања“ је потврђена. Приликом решавања проблема вишекритеријумског одлучивања, све раније развијене методе као и методе новијег датума имају за циљ да помогну доносиоцима одлука у што бољем и ефикаснијем одлучивању. Предности математичких метода у одлучивању из области менаџмента укључују решавање већег броја проблема са којим се доносиоци одлука сусрећу и који захтевају додатна истраживања. Методе одлучивања никако немају за циљ да замене доносиоца одлуке, с обзиром да највећи утицај на крајњи процес одлучивања заправо имају они. Њихов утицај се огледа кроз поглавље седам и девет где су укључени у одређивању најутицајнијих критерија приликом рангирања и селекције оптималног технолошког процеса. Такође, може се приметити њихов утицај на формирани модел у осмом поглављу у развоју FAHP-TOPSIS приликом оцењивања значајности сваког критеријума и подкритеријума. Најчешће се као доносиоци одлука за изградњу ових постројења појављују стејхолдери који имају највећи интерес за добро донешену одлуку.

Хипотеза (H₃) која гласи: „Применом PROMETHEE/GAIA методе може се поуздано извршити приоритизација технолошких процеса екстракције бакра“ била је доказана у шестом поглављу ове дисертације. Добијен модел овом методом може поуздано извршити приоритизација технолошких процеса екстракције бакра што је верификовано и истраживањем спроведеном у осмом поглављу.

Хипотеза (H₄) гласи „Одабир технолошког процеса који ће бити имплементиран има мањи утицаја на саме перформансе топионица од утицаја других инжењерских и економских фактора, као и организационих знања вођења самог технолошког процеса, располагања одређеним ресурсима и кадровским решењима“. Ова хипотеза је потврђена применом развијене методологије на конкретним вредностима, што је представљено у деветом поглављу. Доказано је да имплементирани технолошки процес нема значајан утицај на перформансе топионица за разлику од утицаја других инжењерских и економских фактора. У првом реду, истиче се организационо знање вођења самог технолошког процеса, као и располагање одређеним ресурсима и кадровским решењима.

Хипотеза (H₅) која гласи: „Применом модела АНП-TOPSIS у фази окружењу може се поуздано извршити валидација модела којим је извршена приоритизација технолошких процеса екстракције бакра“ потврђена је. У осмом поглављу представљени су резултати извршене верификације предходно формираног модела.

Хипотеза (H₆) гласи: „Развијена PROMETHEE/GAIA метода може се успешно применити и на селекцију и рангирање конкретних постројења за пирометалуршку екстракцију бакра“. Ова хипотеза потврђена је успешном применом развијене PROMETHEE/GAIA методе на сету конкретних вредности параметара, датих у деветом поглављу ове докторске дисертације. Рангирањем конкретних топионица потврђује се и практична примена овог модела. Поред топионица за

пирометалуршку екстракцију бакра, модел је могуће применити и за селекцију и других технолошких постројења.

Може се закључити да оптималне производне резултате не остварује најбоља технологија, већ она која је оптимална за примену у датим условима индустријског окружења. Стога, ови модели пружиће могућност избора, не најбоље технологије, већ оне која ће се најбоље примењивати у датим условима

У складу са тим, овим истраживањем дефинисан је један од веома ефикасних начина за решавање проблема овакве врсте. Наиме, дефинисана је комплексна методологија која омогућава детаљну анализу проблема и знатно поспешује процес доношења одлуке. Примењене су три потпуно различите методологије као што су PROMETHEE/GAIA, FAHP и FTOPSIS. PROMETHEE/GAIA методологија примењена је за дефинисање модела док фази FAHP-TOPSIS хибридна методологија коришћена је за верификацију добијеног модела. Приликом имплементације ових метода коришћени су подаци из релевантне литературе. Након што су испоштована правила примене наведених метода успешно је извршено рангирање технолошких процеса за пирометалуршку екстракцију бакра.

И поред постојања великог броја метода, техника и алата за вишекритеријумску анализу још увек не постоји јединствен алат који ће дати најбољи резултат у решавању конкретних проблема. У зависности од врсте проблема који треба да се реши и очекиваних резултата различити доносиоци одлука одабраће различите методе одлучивања.

Може се рећи да постоје проблеми који у пракси могу имати бесконачан број алтернатива. Међутим, проблеми везани за процес одабира одговарајућег технолошког процеса претопстављају да је број алтернатива ограничен јер оне представљају развој ограниченог људског достигнућа.

Коришћење овог модела у одлучивању о изградњи новог постројења или замени старог технолошког процеса даје целокупну слику о свим предностима једне алтернативе у односу на друге узимајући све разматране критеријуме у обзир.

На тај начин даје се могућност доносиоцима одлуке да са више аргумената могу образложити своју одлуку о предностима одређене алтернативе у односу на друге. Међутим и поред примене модела, коначна одлука у процесу одлучивања остаје доносиоцима одлуке. Циљ овог модела јесте да учини управљачки механизам и процес доношења одлуке ефикаснијим а донета решења оптималним.

ЛИТЕРАТУРА

- Abedi, M., Torabi, S.A., Norouzi, G.H., Hamzeh, M., Elyasi, G.R. 2012. PROMETHEE II: a knowledge-driven method for copper exploration. *Computers & Geosciences*, 46, 255-263.
- Alavi, I., Alinejad-Rokny, H. 2011. Comparison of Fuzzy AHP and Fuzzy TOPSIS Methods for Plant Species Selection (Case study: Reclamation Plan of Sungun Copper Mine; Iran). *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5 (12), 1104-1113.
- Amaral, T.M, Costa A.P.C. 2014. Improving decision-making and management of hospital resources: An application of the PROMETHEE II method in an Emergency Department. *Operations Research for Health Care*, 3, 1-6.
- Anand, G., Kodali R. 2008. Selection of lean manufacturing systems using the PROMETHEE, *Journal of Modelling in Management*, 3 (1), 40-70.
- Anojkumar, L., Pangkumaran, M., Sasirekha, V. 2014. Comparative analysis of MCDM methods for pipe material selection in sugar industry. *Expert Systems with Applications*, 41, 2964-2980.
- Artioli, G., Angelini, I., Tecchiati, U., Pedrotti, A. 2015. Eneolithic copper smelting slags in the Eastern Alps: Local patterns of metallurgical exploitation in the Copper Age. *Journal of Archaeological Science*, 63, 78-83.
- Asaki, Z., Taniguchi, T., Hayashi, M. 2001. Kinetics of the reactions in the smelting furnace of the Mitsubishi process. *The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, 53(5), 25-27.
- Aşchilean, I., Badea, G., Giurcab, I., Naghiuc, G.S., Iloaiec, F.G. 2017. Choosing the optimal technology to rehabilitate the pipes in water distribution systems using the AHP method. *Energy Procedia*, 112, 19-26.
- Avalle, M., Priarone, P.C., Scattina, A. 2014. Experimental and numerical characterization of a mechanical expansion process for thin-walled tubes. *Journal of Materials Processing Technology*, 214 (5), 1143-1152.

- Aznar, J.C., Richer-Lafleche, M., Cluis, D. 2008. Metal contamination in the lichen *Alectoria sarmentosa* near the copper smelter of Murdochville, Quebec. *Environmental Pollution*, 156 (1), 76-81.
- Bagherikahvarin, M., De Smet, Y. 2016. A ranking method based on DEA and PROMETHEE II (a rank based on DEA & PR.II). *Measurement*, 89, 333-342.
- Baker, D., Bridges, D., Hunter, R., Johnson, G., Krupa, J., Murphy, J., Sorenson, K. 2001. *Guidebook to Decision-Making Methods*, Washington: US Department of Energy
- Behzadian, M., Kazemzadeh, R.B., Albadvi, A., Aghdasi, M. 2010. PROMETHEE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. *European Journal of Operational Research*, 200 (1), 198-215.
- Behzadian, M., Otaghsara, K., Yazdani, M., Ignatius, J. 2012. A state-of-art survey of TOPSIS applications. *Expert Systems with Applications*, 39, 13051-13069.
- Benitez, J.M., Martin, J.C., Roman, C. 2007. Using fuzzy number for measuring quality of service in the hotel industry. *Tourism Management*, 28 (2), 544-555.
- Bergh, L.G., Chacana, P., Carrasco, C. 2005. Control strategy for a Teniente Converter. *Minerals Engineering*, 18 (11), 1123-1126.
- Bibinum: <http://www.bibnum.education.fr/mathematiques/algebre/tablette-ycb-7289>
- Biswas, A.K, Davenport, W.G. 1994. *Extractive Metallurgy of Copper* (Third edition). Great Britain: British Library
- Brans, J.P. 1982. "L'ingénierie de la décision; Elaboration d'instruments d'aide à la décision. La méthode PROMETHEE." u *Laideala Decision: Nature, Instrumentset Perspectives Davenir*, urednici R. Nadeau, i M. Landry, 183-214. Quebec, Canada: Pressesde Universite Laval.
- Brans, J.P., Mareschal B. 2005. *Promethee Methods*. In G. Salvatore (Ed.) *Multiple Criteria Decision Analysis, State Of The Art Survey*. New York: Springer-Verlag New York. 163-186.
- Brans, J.P., Mareschal, B. 1994. The PROMCALC and GAIA decision support system for multicriteria decision aid. *Decision Support Systems*, 12 (4-5), 297-310.

- Brezinski, C., Wuytack, L. 2001. Numerical Analysis: Historical Developments in the 20th Century, Elsevier Science
- Bridge G. 2000. The social regulation of resource access and environmental impact: production, nature and contradiction in the US copper industry. *Geoforum*, 31, 237-256.
- Carrasco, C., Bobadilla, J., Duarte, G., Araneda, J., Rubilar, S. 2007. Evolution of the Teniente converter e Caletones smelter. In A.E.M. Warner, C.J. Newman, A. Vahed, D.G. George, P.J. Mackey & A. Warczok (Eds.), *Coppere Cobre 2007*, Vol. III Book 2: The Carlos Diaz symposium of pyrometallurgy, 325-337. Montreal: CIM.
- Chan, F.T.S. & Kumar, N. 2007. Global supplier development considering risk factors using fuzzy extended AHP-based approach. *OMEGA*, 35, 417-431.
- Chang, D.Y. 1996. Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. *European Journal of Operational Research*, 95 (3), 649-655.
- Cheng, K.A. 2001. Teaching mathematical modelling in Singapore schools, *The Mathematics Educator*, 6 (1), 62-74.
- Cui, J., Zhang, L. 2008. Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 158, 228-256.
- Davenport, W.G., Jones, D.M., King, M.J., 2001. Partelpoeg EH. Flash Smelting: Analysis, Control and Optimization. TMS (The Minerals, Metals and Materials Society), Warrendale. PA
- Davenport, W.G., King, M., Schlesinger, M., Biswas, A. 2002. Extractive Metallurgy of Copper, 4th ed. Amsterdam: Elsevier
- Davidović, A., Najdenov, I., Husović, Volkov, T., Raić, T.K. 2009. Indukciona peč bez jezgra: konstrukcija, radni parametri i primena. *Livarstvo*, 48 (2), 12-23.
- Deretić, N. 2012. Analiza i primena analitičkih metoda višekriterijumske analize u poslovnom odlučivanju – Doktorska disertacija, Singidunum Univerzitet, Beograd, Srbija

- Deturck, D., Wilf, H. 2002. Lectures on Numerical Analysis, Philadelphia: University of Pennsylvania
- Diaz, C., Landolt, C., Luraschi, A., Newman C.J. 1991. Pyrometallurgy of copper. Volume IV. New York: Pergamon Press
- Djordjević, P., Nikolić, D., Jovanović, I., Mihajlović, I., Savić, M., Živković, Ž. 2013. Episodes of extremely high concentrations of SO₂ and particulate matter in the urban environment of Bor, Serbia. Environmental Research, 126, 204-207.
- Dreyer, J.L.E. 1953. A History of Astronomy from Thales to Kepler, 2nd ed. New York: Dover
- Dundara, S., Gokkurt, B., Soyuc, Y. 2012. Mathematical modelling at a glance: a theoretical study. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 46, 3465-3470.
- Dorđević, P., Mihajlović, I., Živković, Ž. 2010. Comparison of linear and nonlinear statistics methods applied in industrial process modeling procedure. Serbian Journal of Management, 6 (2), 189-198.
- Elshkaki, A., Graedel, T.E., Ciacci, L., Reck B. 2016. Copper demand, supply, and associated energy use to 2050. Global Environmental Change, 39, 305–315.
- Emrouznejad, A., Ho, W. 2018. "Analytic Hierarchy Process and Fuzzy Set Theory" in Fuzzy Analytic Hierarchy Process ed by Ali Emrouznejad and William Ho, 1-10. Portland: Taylor & Francis Inc
- Encyclopedia Britannica: <https://www.britannica.com>
- ERG: <https://www.eurasianresources.lu/en/pages/our-business/history>
- Filipou, D., St.German, P., Grammatikopolus, T. 2007. Recovery of metal values from copper – arsenic minerals and other related resources. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 28 (4), 247-298.
- Fowler, D., Robson, E. 1998. Square Root Approximations in Old Babylonian Mathematics: YBC 7289 in Context. Historia Mathematica, 25 (4), 366-378.

- Franzin, W.G., McFarlane, G.A., Lutz, A. 1979. Atmospheric fallout in the vicinity of a base metal smelter at Flin Flon, Manitoba, Canada. *Environmental Science & Technology*, 13 (12), 1513-1522.
- Fthenakis, V., Wang, W., Kim, H.C. 2009. Life cycle inventory analysis of the production of metals used in photovoltaics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 493-517.
- Galbraith P., Clatworthy, N. 1990. Beyond standard models-meeting the challenge of modeling, *Educational Studies in Mathematics*, 21, 137-163.
- Gautschi, W. 2011. *Numerical Analysis*, 2nd Ed. New York: Springer
- Gerhardsson, L., Englyst, V., Lundstrom, N., Sandberg, S., Nordberg, G. 2002. Cadmium, copper and zinc in tissues of deceased copper smelter workers. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 16 (4), 261-266.
- Gervasio, H., da Silva, L.S. 2012. A probabilistic decision-making approach for the sustainable assessment of infrastructures. *Expert Systems with Applications*, 39 (8), 7121-7131.
- Ghosh, S. 2006. Steel consumption and economic growth: Evidence from India. *Resources Policy*, 31 (1), 7-11.
- Gordon, R. B. 2002. Production residues in copper technological Cycles. *Resources, Conservation and Recycling*, 36, 87-106.
- Gyurov, S., Marinkov, N., Kostova, Y., Rabadjieva, D., Kovacheva, D., Tzvetkova, C., Gentsheva, G., Penkov, I. 2017. Technological scheme for copper slag processing. *International Journal of Mineral Processing*, 158, 1-7.
- Herreros, O., Quiroz, R., Manzano, E., Bou, C., Vinals, J. 1998. Copper extraction from reverberatory and flash furnace slags by chlorine leaching. *Hydrometallurgy*, 49 (1-2), 87-101.
- Higgins, D. R., Gray, N. B., Davidson, M.R. 2009. Simulating particle agglomeration in the flash smelting reaction shaft. *Minerals Engineering*, 22, 1251-1265.

- Hofkirchner, W., Schafranek, M. 2011. General System Theory, Philosophy of Complex Systems, in Handbook of the Philosophy of Science, 10, 177-194.
- Hong, J., Huang, C., Wang, X. 2018. Symplectic Runge–Kutta methods for Hamiltonian systems driven by Gaussian rough paths. Applied Numerical Mathematics, 129, 120-136.
- Hsu, Y.L., Lee, C.H., Kreng, V.B. 2010. The application of Fuzzy Delphi Method and Fuzzy AHP in lubricant regenerative technology selection. Expert Systems with Applications, 37, 419-425.
- Huh, K.-S. 2011. Steel consumption and economic growth in Korea: Long-term and short-term evidence. Resources Policy, 36 (2), 107-113.
- Hwang, C.L., Yoon, K. 1981. Multiple attribute decision making: Methods and applications, A State of the Art Survey, New York: Springer-Verlag
- IEEE: <https://www.ieee.org/>
- Iida, O., Hayashi, M., Goto, M. 1997. Process designs on new smelter projects of the Mitsubishi continuous copper smelting and converting process. In: Proceedings of the Nickel–Cobalt 97 International Symposium, vol. 3, August 17-20, Sudbury, Canada: 499-511.
- Inco: <http://www.inco.com.tr/about.php> 2017
- Isasmelt: <http://www.isasmelt.com/EN/technology/Pages/Technology.aspx> 2017
- Ishizaka, A., Nemery, P., 2011. Selecting the best statistical distribution with PROMETHEE and GAIA. Computers and Industrial Engineering, 61 (4), 958-969.
- Jaunky, V.C. 2012. Aluminum consumption and economic growth: evidence from high-income countries. Natural Resources Research, 21 (2), 265-278.
- Jaunky, V.C. 2013. A cointegration and causality analysis of copper consumption and economic growth in rich countries. Resources Policy, 38, 628-639.

- Johnson, J.B., Omland, K. 2004. Model selection in ecology and evolution. *Trends in Ecology and Evolution*, 19 (2), 101-108.
- Jovanović, R., Cvetinović, D., Erić, M., Rašuo, B, Adžić, M. 2014. Sensitivity analysis of different kinetic factors for numerical modeling of Serbian lignite devolatilization process. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 72, 489-500.
- Kabir, G., Sumi, R.S. 2014. Power substation location selection using fuzzy analytic hierarchy process and PROMETHEE: A case study from Bangladesh. *Energy*, 72, 717-730.
- Kadziński, M., Ciomek, K., 2016. Integrated framework for preference modeling and robustness analysis for outranking-based multiple criteria sorting with ELECTRE and PROMETHEE. *Information Sciences*, 352–353, 167-187.
- Kahraman, C., Cebeci, U., Ulukan, Z. 2003. Multi-criteria supplier selection using fuzzy AHP. *Logistics Information Management*, 16 (6), 382-394.
- Kannan, D., Khodaverdi, R., Olfat, L., Jafarian, A., Diabat, A. 2013. Integrated fuzzy multi criteria decision making method and multiobjective programming approach for supplier selection and order allocation in a green supply chain. *Journal of Cleaner Production*, 47, 355-367.
- Kapusta, J., 2004. JOM World Nonferrous Smelters Survey, Part I: Copper. *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, 56 (7), 21-27.
- Kazem, S., Hadinejad, F. 2015. PROMETHEE technique to select the best radial basis functions for solving the 2-dimensional heat equations based on Hermite interpolation. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 50, 29-38.
- King, G.M. 2007. The evolution of technology for extractive metallurgy over the last 50 years – is the best yet to come?. *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, 59 (2), 21-27.
- Kovačević, D. 2006. Neki aspekti numeričkog modeliranja ponašanja konstrukcije, *Materijali i konstrukcije*, 49, 64-75.

- Kujawski, W., Pospiech, B. 2014. Processes and technologies for the recycling of spent fluorescent lamps. *Polish Journal of Chemical Technology*, 16 (3), 80-85.
- Kutlu, A.C., Ekmekcioglu, M. 2012. Fuzzy failure modes and effects analysis by using fuzzy TOPSIS-based fuzzy AHP. *Expert Systems with Applications*, 39, 61-67.
- Laarhoven, P.J.M.V., Pedrycz, W. 1983. A fuzzy extension of Saaty's priority theory. *Fuzzy Sets and Systems*, 11, 229-241.
- Liou, T.S, Wang, M.J. 1992. Ranking fuzzy numbers with integral value. *Fuzzy Sets and Systems*, 50 (3), 247-255.
- Liu, D., Yuan, Y., Liao, S., 2009. Artificial neural network vs. nonlinear regression for gold content estimation in pyrometallurgy. *Expert Systems with Applications*, 36 (7), 10397-10400.
- Liu, J., Gui, W., Xie, Y., Yang, C. 2014. Dynamic modeling of copper flash smelting process at a Smelter in China. *Applied Mathematical Modelling*, 38, 2206-2213.
- Mihajlovic, I. Nikolić Đ., Jovanović, A. 2007. *Osnove teorije sistema – Inženjerski menadžment pristup*. Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru, (autorizovana predavanja).
- Mihajlović I., 2014. *Razvoj algoritma za selekciju adekvatnog modela procesa na osnovu strukture ulaznih podataka – Doktorska disertacija*, Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru, Bor
- Mihajlović, I., Đurić, I., Živković, Ž. 2014a. ANFIS based prediction of the aluminium extraction from boehmite bauxite in the Bayer process. *Polish Journal of Chemical Technology*, 16 (1), 103-109.
- Mihajlović, I., Štrbac, N., Đorđević, P., Ivanović, A., Živković, Ž. 2011. Technological process modelling aiming to improve its operations management. *Serbian Journal of Management*, 6 (2), 135-144.
- Mihajlović, I., Živković, Ž., Milošević, I., Đorđević, P., Development of the algorithm for selection of appropriate numerical modeling approach, *International May*

Conference on Strategic Management - IMKSM2014 , 23-25 May (2014b), Bor, Serbia

Milijić, N., Mihajlović, I., Nikolić, Dj., Živković, Ž. 2014. Multicriteria analysis of safety climate measurements at workplaces in production industries in Serbia. International Journal of Industrial Ergonomics, 44 (4), 510-519.

Milijić, N., Mihajlović, I., Štrbac, N., Živković, Ž. 2013. Developing a Questionnaire for Measuring Safety Climate in the Workplace in Serbia. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics, 19 (4), 631-645.

Mining Encyclopedia: <http://mining-enc.com/b/balkhash-mining-metallurgical-combined-enterprise/>

Mitevska, N. 2005. Teorija odlučivanja sa primerima, Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru (autorizovano predavanje)

Mohagheghi, M., Askari, M. 2016. Copper recovery from reverberatory furnace flue dust. International Journal of Mineral Processing, 157, 205-209.

Moskalyk, R., Alfantazi, A., 2003. Review of copper pyrometallurgical practice: today and tomorrow. Minerals Engineering, 16, 893-919.

Najdenov, I. 2013. Upravljanje procesima topljenja i rafinacije bakra u funkciji unapređenja energetske efikasnosti i ekonomske opravdanosti - Doktorska disertacija. Univerzitet u Beogradu, Tehnološko -Metalurški fakultet, Beograd, Srbija

Najdenov, I., Rai, K.T., Kokeza, G. 2012. Aspects of energy reduction by autogenous copper production in the copper smelting plant Bor, Energy, 43 (1), 376-384.

Nikolic, D., Jovanovic, I., Mihajlovic, I., Zivan, Z. 2009. Multi-criteria ranking of copper concentrates according to their quality – An element of environmental management in the vicinity of copper – Smelting complex in Bor. Serbia Journal of Environmental Management, 91, 509-515.

Nikolic, D., Milosevic, N., Zivkovic, Z., Mihajlovic, I., Kovacevic, R., Petrovic, N. 2011. Multi-criteria analysis of soil pollution by heavy metals in the vicinity of the

- Copper Smelting Plant in Bor (Serbia). Journal of the Serbian Chemical Society, 76 (4), 625-641.
- Nikolić, I., Jovanović, I., Mihajlović, I., Miljanović, I. 2015. Analysis of copper concentrate production by systemic approach. Copper, 40 (2), 33-50.
- Nikolić, I., Milošević, I., Milijić, N., Mihajlović, I. 2016. Impact on the environment on selection of adequate technology for the copper smelting, Environmental awareness as a universal European Value 2016, Bor, University of Belgrade, Technical Faculty in Bor, Engineering Management Department (EMD). 168-177.
- Nikolić, I., Mihajlović, I. Sistemski pristup u analizi uticaja svetske ekonomske krize na cenu osnovnih metala, Zbornik izvoda radova, Internacionalna majjska konferencija o strategijskom menadžmentu, 24. – 26. maj 2013, Bor, 80-81.
- Nikolić, I., Milošević, I., Milijić, N., Mihajlović, I. 2019. Cleaner production and technical effectiveness: Multi-criteria Analysis of Copper Smelting Facilities, Journal of Cleaner Production, (In press)
- Nikolić, I., Milošević, I., Milijić, N., Jovanović, A., Mihajlović, I. 2018. New Approach to Multi-criteria Ranking of the Copper Concentrate Smelting Processes based on the PROMETHEE/GAIA Methodology. Acta Polytechnica Hungarica, (In press)
- Nippon Mining and Metals. (2000, March), Annual Report 2000. www.hd.jxtggroup.co.jp/ir/library/annual/1999/pdf/nm_en_ar_fy1999.pdf.
- Outokumpu: <https://www.outokumpu.com/about-outokumpu/history-of-outokumpu>
- Outotec: <http://new.outotec.com>
- Pamučar, D., Božanić, D., Randelović, A. 2017. Multi-criteria decision making: An example of sensitivity analysis. Serbian Journal of Management, 12 (1), 1-27.
- Pehlivan, N.Y., Paksoy, T., Çalik, A. 2018. „Comparison of Methods in FAHP with Application in Supplier Selection“ in Fuzzy Analytic Hierarchy Process ed by Ali Emrouznejad and William Ho, 45-75.

- Peng, A.H., Xiao, X.M. 2013. Material selection using PROMETHEE combined with analytic network process under hybrid environment. *Materials and Design*, 47, 643-652.
- Piqueras, M.A., Company, R., Jódar. L. 2018. Numerical analysis and computing of free boundary problems for concrete carbonation chemical corrosion. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 336, 297-316.
- Požega, E., Gomidželović, L., Trujić, V., Živković D., 2010. Analysis of advanced technologies in copper metallurgy. *Copper*, 35 (1), 15-24.
- Promentilla, M.A.B., Janairo, J.I.B., Yu, D.E.C., Pausta, C.M.J., Beltran, A.B., Huelgas-Orbecido, A.P., Tapia, J.F.D., Aviso, K.B., Tan, R.R. 2018. A stochastic fuzzy multi-criteria decision-making model for optimal selection of clean technologies. *Journal of Cleaner Production*, 183, 1289-1299.
- Queneau, P.E., Marcuson, S.W. 1996. Oxygen pyrometallurgy at copper cliff—a half century of progress. *Journal of Metals*, 48(1), 14-21.
- Rajčić-Vujasinović, M., Grekulović, V. 2017. *Teorija Hidro i Elektometalurških procesa*. Bor: Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru
- Roberts, M.C. 1990. Predicting metal consumption. *Resources Policy*, 16 (1), 56-73
- Roy, B., Vincke, P., 1981. Multicriteria analyses: survey and new directions. *European Journal of Operational Research*, 8 (3), 207-218.
- RTB Bor: <http://rtb.rs>
- Ruisheng N., Mui L.S.N., Hian L.I.C., Chee W.P.S. 2014. Bin Songa, Comparative Ecoefficiency Analyses of Copper to Copper Bonding Technologies. *Procedia CIRP*, 15, 96–104.
- Saaty, T.L. 1980. *The analytic hierarchy process*. New York: McGraw-Hill.
- Sa'idi, E., Anvaripour, B., Jaderi, F., Nabhani, N. 2014 .Fuzzy risk modeling of process operations in the oil and gas refineries. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 30, 63-73.

- Savic, M., Djordjevic, P., Mihajlovic, I., Zivkovic, Z. 2015. Statistical modeling of copper losses in the silicate slag of the sulfide concentrate smelting process. Polish Journal of Chemical Technology, 17 (3), 62-69.
- Schaaf, M., Gómez, Z., Cipriano, A. 2010. Real-time hybrid predictive modeling of the Teniente Converter. Journal of process control, 20 (3), 3-17.
- Schlesinger, M., King, M., Sole, K., Davenport, W. 2011. Extractive Metallurgy of Copper, 5th ed. Amsterdam: Elsevier
- Sen, C.G., Çinar G. 2010. Evaluation and pre-allocation of operators with multiple skills: a combined fuzzy AHP and maxemin approach. Expert Systems with Applications, 37 (3), 2043-53.
- Shibasaki, T., Hayashi, M., Nishiyama, Y. 1993. Recent operation at Naoshima with a larger Mitsubishi furnace line, in: C. Landolt (Ed.). Extractive Metallurgy of Copper, Nickel and Cobalt (the Paul E. Queneau International Symposium). Volume II: Copper and Nickel Smelter Operations TMS, Warrendale, PA, 1413-1428.
- Sievers, H., Meyer, F.M. 2003. Parameters influencing the efficiency of copper extraction. Erzmetall 56 (8), 420-425.
- Sjöberg, J., Zhang, Q., Ljung, L., Benveniste, A., Delyon, B., Glorennec, P.Y., Hjalmarsson, H., Juditsky, A. 1995. Nonlinear black-box modeling in system identification: a unified overview. Automatica, 31 (12), 1691-1724.
- Society for Industrial and Applied Mathematics: <https://www.siam.org>
- Stanković, Ž. 2000. Management of technological innovations in metallurgy of heavy non-ferrous metals. Bor: RTB Bor and Mining and Metallurgy Institute Bor
- Stoer, J., Bulirsch, R. 1976. Introduction to Numerical Analysis, 2nd ed. Berlin:Springer
- Straussfogel, D., von Schilling, C. 2009. Systems Theory. International Encyclopedia of Human Geography, 151-158.
- Sun, C.-C. 2010. A performance evaluation model by integrating fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS methods. Expert Systems with Applications, 37, 7745-7754.

- Tavana, M., Behzadian, M., Pirdashti, M., Pirdashti, H. 2013. A PROMETHEE-GDSS for oil and gas pipeline planning in the Caspian Sea basin. *Energy Economics*, 36, 716-728.
- Taylor, C.F., Paton, N.W., Garwood, K.L. 2003. A systematic approach to modeling, capturing, and disseminating proteomics experimental data. *Nature Biotechnology*, 2, 247-254.
- Terence, I. 1987. *Aristotle's First Principles*. Oxford: Oxford University Press.
- Terziyan, V., Gryshko, S., Golovianko, M. 2018. Patented intelligence: Cloning human decision models for Industry 4.0, *Journal of Manufacturing Systems* (In Press).
- Tilton, J.E. 1989. The new view of minerals and economic growth. *Economic Record*, 65 (3), 265-278.
- Torfi, F., Farahani, R.Z., Rezapour, S. 2010. Fuzzy AHP to determine the relative weights of evaluation criteria and Fuzzy TOPSIS to rank the alternatives. *Applied Soft Computing*, 10, 520-528.
- Treitz, M. 2006. *Production Process Design Using Multi-Criteria Analysis*, Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe
- Ullmann, F. 1995. *Ullmann's Encyclopaedia of Industrial Chemistry*, 7th ed., Weinheim: Wiley-VCH, 471-524.
- USGS 2017. US Geological Survey. <https://mrdata.usgs.gov/copper/>
- Vaidya, O.S., Kumar, S. 2006. Analytic hierarchy process: An overview of applications. *European Journal of Operational Research*, 169 (1), 1-29.
- Valencia, A., Rosales, M., Paredes, R., Leon, C., Moyano, A. 2006. Numerical and experimental investigation of the fluid dynamics in a Teniente type copper converter. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 33 (3), 302-310.
- Vego, G., Kučar-Dragičević, S., Koprivanac N. 2008. Application of multi-criteria decision-making on strategic municipal solid waste management in Dalmatia, Croatia. *Waste Management*, 28, 2192–2201.

- Veldhuizen, H., Sippel, B. 1994. Mining discarded electronics. *Industry Environment*, 17 (3), 7-11.
- Venegas, E.L., Mazzeo, N.A., Mariana, C.D. 2014. A simple model for calculating air pollution within street canyons. *Atmospheric Environment*, 87, 77-86.
- Vetschera, R., de Almeida, A.T. 2012. A PROMETHEE-based approach to portfolio selection problems, *Computers & Operations Research*, 39 (5), 1010-1020.
- Veza, I., Celar, S., Peronja, I. 2015. Competences-based Comparison and Ranking of Industrial Enterprises using PROMETHEE Method. *Procedia Engineering*, 100, 445-449.
- Von Neumann, J., Goldstine, H.H. 1947. Numerical Inverting of Matrices of High Order. *The American Mathematical Society*, 53, 1021-1099.
- Vračar, R. 2010. *Teorija i praksa dobijanja obojenih metala*. Beograd: Savez inženjera metalurgije Srbije
- Vučijak, B., Mirdžić-Kurtagić, S., Silajdžić, I. 2016. Multicriteria decision making in selecting best solid waste management scenario: a municipal case study from Bosnia and Herzegovina. *Journal of Cleaner Production*, 130, 166-174
- Wang, J.L., Chen, Y.Z., Zhang, W.H., Zhang, C.F. 2013. Furnace structure analysis for copper flash continuous smelting based on numerical simulation. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 23 (12), 3799-3807.
- Wang, T.C., Chen, Y.H. 2007. Applying consistent fuzzy preference relations to partnership selection. *Omega*, 35 (4), 384-388.
- Willis, M.J., Tham, M.T. 2009. *Advanced process control*, School of Chemical Engineering and Advanced Materials, Newcastle University.
- Yang, Y., Ren, J., Solgaard, H.S., Xu, D., Nguyen, T.T. 2018. Using multi-criteria analysis to prioritize renewable energy home heating technologies. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 29, 36-43.

- Yu, X., Xu, Z., Ma, Y. 2013. Prioritized multi-criteria decision making based on the idea of PROMETHEE. *Procedia Computer Science*, 17, 449-456.
- Zhao, H., Peng, Y., Li, W. 2013. Revised PROMETHEE II for Improving Efficiency in Emergency Response. *Procedia Computer Science*, 17, 181–188.
- Živković, Ž., Nikolić, Đ. 2016. *Osnove matematičke škole strategijskog*, Bor: Tehnički fakultet u Boru

БИОГРАФИЈА

Ивица Николић рођен је 18.01.1989. године у Бору, где је завршио основну и средњу школу. Дипломирао је 11.9.2012. године на Техничком факултету у Бору на Катедри за менаџмент са просечном оценом у току студија 9.27 и оценом 10 на дипломском раду. На истом факултету дана 19.9.2013. завршио је мастер студије на студијском програму Инжењерски менаџмент са просечном оценом 9.87. Школске 2013/2014. уписао је докторске студије на Техничком факултету у Бору на студијском програму Инжењерски менаџмент, где је положило све испите са просечном оценом 10.

Током школске 2011/2012 године, обављао је функцију студента продекана на Техничком факултету у Бору, као и члан Комисије за обезбеђење и унапређење квалитета. Од октобра 2012. године радио је као сарадник у настави на Техничком факултету у Бору. Као сарадник у настави био је ангажован на извођењу вежби из следећих наставних предмета: Управљање новим технологијама и иновацијама, Теорије система, Основи технологије и познавања робе. На овим предметима је од 2013. године био унапређен у звање асистента.

Добитник је једне од тридесет стипендија фонда Милана Стевановића-Смедеревца и супруге Даринке за школску 2011/2012 годину, као и стипендије Министарства просвете и науке Републике Србије. Такође је од 2013. године члан мреже Техлошких Брокера Србије за шта поседује одговарајући сертификат.

Током студирања учествовао је у интернационалним радионицама у Србији, Немачкој, Румунији, Бугарској, Пољској, Македонији и Албанији.

Јануар 2015. године боравио је у Mannheim-у (Немачка), ради стручног усваршавања и истраживања у оквиру пројекта академске мреже за реконструкцију југоисточне Европе 2014 (енгл. Academic Reconstruction South Eastern Europe 2014“).

Од 2016. године предсендик је организационог одбора студентског симпозијума – IMCSM, док је у претходном период био потпредседник овог одбора.

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора Ивица Николић

Број индекса 3/13

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Моделовање утицајних параметара за рангирање технолошких процеса
пирометалуршке екстракције бакра применом метода вишекритеријумске анализе

- 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, _____

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Ивица Николић

Број индекса 3/13

Студијски програм Инжењерски менаџмент

Наслов рада Моделовање утицајних параметара за рангирање
технолошких процеса пирометалуршке екстракције бакра применом метода
вишекритеријумске анализе

Ментор проф. др Исидора Милошевић

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, _____

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Моделовање утицајних параметара за рангирање технолошких процеса _____
пирометалуршке екстракције бакра применом метода вишекритеријумске анализе

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, _____

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.