

Процена животног циклуса депонија летећег пепела из процеса сагоревања лигнита у термоелектранама у Србији

Огњен Адамовић



Дигитални репозиторијум Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду

[ДР РГФ]

Процена животног циклуса депонија летећег пепела из процеса сагоревања лигнита у термоелектранама у Србији |
Огњен Адамовић | | 2023 | |

<http://dr.rgf.bg.ac.rs/s/repo/item/0007448>

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
РУДАРСКО-ГЕОЛОШКИ ФАКУЛТЕТ
ИНЖЕЊЕРСТВО ЗАШТИТЕ ЖИВОТНЕ СРЕДИНЕ



МАСТЕР РАД

**Процена животног циклуса депонија летећег пепела из
процеса сагоревања лигнита у термоелектранама у Србији**

Ментор:

Проф. Др. Ивица Ристовић

Студент:

Огњен Адамовић

Београд, 2023.

Комисија:

Проф. Др. Ивица Ристовић – редовни професор, ментор

Проф. Др. Александар Цвјетић – редовни професор, члан

Проф. Др. Владимир Милисављевић – ванредни професор, члан

Рударско-геолошки факултет, Београд

Датум одбране: _____

Резиме:

Велика количина енергије у свету се и даље добија сагоревањем различитих врста угљева. Поред тога што његово сагоревање има веома штетне последице по здравље људи и околине, велики проблем представља и летећи пепео који настаје његовим сагоревањем, а који се третира као отпад и у највећим количинама одлаже на депоније. Количине се процењују на милијарду тона на годишњем нивоу. Само у Србији је до овог тренутка депоновано ко 250 милиона тона летећег пепела, који је настао сагоревањем лигнита. Међутим, многа истраживања су показала да се у овој врсти отпада налази одређена количина елемената ретких земаља (REE) који се могу валоризовати, што овом отпаду даје употребну вредност. Поготово данас када су ови елементи преко потребни због напретка технологије. Овај рад послужиће се методом процене животног циклуса (LCA), како би се дао увид о утицају екстракције ретких земаља из летећег пепела на животну средину.

Кључне речи: *Оцена животног циклуса (LCA), елементи ретких земаља (REE), депонија пепела, лигнит.*

Abstract:

A large amount of energy in the world is still obtained by burning various types of coal. In addition to the fact that its combustion has harmful consequences for the health of people and the environment, a big problem is also the fly ash produced by its combustion, which is treated as waste and in the largest quantities disposed in landfills. The quantities are estimated at one billion tons annually. In Serbia alone, about 250 million tons of fly ash, which was created by burning lignite, have been deposited up to this moment. However, many studies have shown that this type of waste contains a certain amount of rare earth elements (REE) that can be valorized, which gives value to this type of waste. Especially today when these elements are much needed due to the advancement in technology. This paper will use the Life Cycle Assessment (LCA) method to provide insight into the impact of the extraction of rare earths from fly ash on the environment.

Key words: *Life cycle assessment (LCA), rare earth elements (REE), fly ash landfill, lignite*

Овај мастер рад рађен је у оквиру пројекта „RECO2MAG – Grain boundaries engineered Nd-Fe-B permanent magnets“, који се финансира средствима EIT RawMaterials, тела EU, и у сарадњи са ИВЛ – Шведским институтом за истраживање животне средине.

Највећу захвалност дугујем Проф. Др. Ивици Ристовићу који ми је омогућио да будем део овог пројекта, као и Емилији Ширадовић која је заједно са професором учествовала, како у организацији мог одласка у Шведску, Гетеборг на израду мастер рада, тако и у помоћи око саме израде. Такође желим да се захвалим професорки термодинамике Марији Живковић која је одрадила део прорачуна који се тиче потрошње енергије.

Захваљујем се мом супервизору са ИВЛ института Erik Emilsson-и, као и Esilabet Hallberg која је обезбедила потребне податке из Екоинвент базе података. Такође, желео бих да се захвалим ЛЦА групи са ИВЛ института, посебно Ravinee Nojrapуа и Emil Svensson-и коју су били од велике помоћи током израде мастер рада.

На крају, желео бих да се захвалим мојој породици и девојци Тамари који су ми пружали непрекидну подршку и подстицај кроз године студирања као и кроз процес писања овог мастер рада.

This master thesis was done as part of the project "RECO2MAG - Grain boundaries engineered Nd-Fe-B permanent magnets" which is funded by EIT RawMaterials, an EU body, and in cooperation with IVL – Swedish Environmental Research Institute.

I owe the biggest gratitude to Prof. dr. Ivica Ristović, who made it possible for me to be a part of this project, as well as Emilija Širadović, who, together with the professor, participated both in the organization of my trip to Sweden, Gothenburg, and in helping with my master's thesis. I also want to thank the professor of thermodynamics, Marija Živković, who did the part of the calculations concerning energy consumption.

I would like to thank my supervisor from the IVL Institute, Erik Emilsson, as well as Elisabet Hallberg, who provided the necessary data from the Ecoinvent database. I would also want to thank the LCA group from the IVL Institute, especially to Pavinee Nojpanya and Emil Svensson, who were of great help in my master's thesis work.

Finally, I would like to thank my family and my girlfriend Tamara, who provided me with continuous support and encouragement throughout my years of study as well as through the process of writing this master's thesis.

САДРЖАЈ

1	УВОД	1
2	УГАЉ.....	3
2.1	Лигнит.....	5
2.2	Угљеви у Републици Србији	7
3	ЛЕТЕЋИ ПЕПЕО.....	10
3.1	Карактеристике летећег пепела.....	11
3.1.1	Физичке карактеристике летећег пепела.....	12
3.1.2	Хемијски састав летећег пепела	13
3.1.3	Минералошки састав летећег пепела.....	16
3.2	Тешки метали у летећем пепелу.....	19
3.3	Класификација летећег пепела	20
3.4	Утицај летећег пепела на околину и људско здравље	24
3.5	Примена летећег пепела.....	24
3.6	Примена летећег пепела у Србији.....	25
4	ДЕПОНИЈЕ ЛЕТЕЋЕГ ПЕПЕЛА У СРБИЈИ.....	29
4.1	Депонија ТЕ Костолац – Средње костолачко острво.....	29
4.2	Депонија ТЕ Костолац – ПК Ћириковац	37
4.3	Депонија ТЕ Колубара	41
4.4	Депонија ТЕ Морава.....	47
4.5	Депонија ТЕ Никола Тесла А	51
4.6	Депонија ТЕ Никола Тесла Б.....	56
5	ЕЛЕМЕНТИ РЕТКИХ ЗЕМАЉА.....	61
5.1	Назив	62
5.2	Физичке и хемијске карактеристике.....	63

5.3	Класификација ретких земаља	65
5.4	Примена елемената ретких земаља	67
5.5	Летећи пепео као сировина за добијање ретких земаља.....	68
6	ПРОЦЕНА ЖИВОТНОГ ЦИКЛУСА (LCA)	71
6.1	Основа за израду LCA	72
6.2	Циљ, предмет и подручје примене.....	78
6.2.1	Функција и функционална јединица	79
6.2.2	Границе система	80
6.3	Квалитет података	83
6.3.1	Географски оквир.....	84
6.3.2	Временски оквир	84
6.4	Анализа инвентара животног циклуса (LCI)	84
6.4.1	Хлороводонична киселина (HCl) – производња	85
6.4.2	Натријум хидроксид (NaOH) – производња.....	86
6.4.3	Производња електричне енергије из лигнита	86
6.4.4	Транспорт летећег пепела са депоније – камион	86
6.4.5	Лужење натријум хидроксидом (NaOH)	86
6.4.6	Лужење хлороводоничном киселином (HCl).....	86
6.5	Прорачун.....	87
6.5.1	Прорачун за лужење натријум хидроксидом (NaOH)	87
6.5.2	Прорачун за лужење хлороводоничном киселином.....	90
6.6	Процена утицаја животног циклуса (LCIA).....	92
7	ЗАКЉУЧАК	101
8	ЛИТЕРАТУРА	102

СПИСАК СЛИКА

Слика 2.1	Настанак угља [1].....	3
Слика 2.2	Чврста фосилна горива - угаљ [2]	4
Слика 2.3	Највећи произвођачи лигнита у 2016. години [3], [6]	6
Слика 2.4	Најштетније термоелектране по здравље у Европи [7].....	7
Слика 2.5	Географски положај басена у Србији [11]	9
Слика 3.1	Различите врсте летећег пепела [13].....	12
Слика 3.2	Аморфна фаза, састављена од алумо-силикатних сферних честица у летећем пепелу [32], [16]	17
Слика 3.3	Алумо-силикатна сферна честица [32], [16]	18
Слика 3.4	Алумо-силикатна плеросфера у пепелу [32], [16]	18
Слика 3.5	Феросфера са дендритичним магнетитским кристализацијама [32], [16]	19
Слика 3.6	Класе летећег пепела – F (лево) и C (десно) према ASTM C618-17a [13]	21
Слика 3.7	Затравњена касета депоније Термоелектране „Никола Тесла А“ [13]	26
Слика 3.8	Депонија Термоелектране „Никола Тесла Б“ [13].....	27
Слика 3.9	Депонија Термоелектране „Колубара А“ [13]	27
Слика 3.10	Депонија ПД „Термоелектране и копови Костолац“ [13].....	28
Слика 4.1	ТЕ Костолац А (лево) и ТЕ Костолац Б (десно) [48].....	30
Слика 4.2	Намена простора депоније СКО [48]	31
Слика 4.3	Локација депоније СКО [48].....	32
Слика 4.4	Магистрални челични цевоводи за транспорт пепела и шљаке из ТЕКО А (лево) и ТЕКО Б (десно) до депоније СКО [48]	33
Слика 4.5	Истакачки цевовод на депонији СКО [48]	33
Слика 4.6	Касета А на коти 91,0 mnm – пасивна, привремено рекултивисана [48]	34
Слика 4.7	Касета Б на коти 95,0 mnm - активна [48]	34
Слика 4.8	Касета Ц на коти 95,5 mnm - активна [48]	34
Слика 4.9	Локација депоније ПК Тириковац [49]	38

Слика 4.10 Локација депоније ПК Ђириковац у односу на друге објекте огранка ТЕКО [49]	39
Слика 4.11 Магистрални цевоводи хидромешавине и повратне воде ТЕКО А (лево) и ТЕКО Б (десно) [49]	40
Слика 4.12 Касета 1 – активна [49]	40
Слика 4.13 ТЕ Колубара А [50]	42
Слика 4.14 Депонија ТЕ Колубара [50]	43
Слика 4.15 Разводни цевовод DN400 за хидраулички транспорт хидромешавине из блокова А1-А4 [50]	44
Слика 4.16 Разводни цевовод DN175 за хидраулички транспорт мешавине из блока А5 [50]	45
Слика 4.17 ТЕ Морава [51]	48
Слика 4.18 Депонија пепела и шљаке ТЕ Морава [51]	49
Слика 4.19 ТЕ Никола Тесла А [52]	52
Слика 4.20 Депонија пепела и шљаке ТЕНТ А [52]	53
Слика 4.21 ТЕ Никола Тесла Б [53]	57
Слика 4.22 Депонија пепела и шљаке ТЕНТ Б [53]	58
Слика 5.1 Менделејејев периодни систем елемената – елементи ретких земаља уоквирени црвеном бојом [54]	62
Слика 5.2 Заступљеност REE у земљиној кори [55]	63
Слика 5.3 Карактеризација ретких земаља [60]	67
Слика 6.1 Фазе и оквир LCA [72]	72
Слика 6.2 Комплетан процес екстракције ретких земаља из летећег пепела [75]	78
Слика 6.3 Границе система	82
Слика 6.4 Процесни дијаграм	83
Слика 6.5 График за категорију утицаја „Global Warming Potential“	98
Слика 6.6 График за категорију утицаја „Acidification Potential“	98
Слика 6.7 График за категорију утицаја „Human Toxicity Potential“	99
Слика 6.8 График за категорију утицаја „Ozone Layer Depletion Potential“	99
Слика 6.9 График за категорију утицаја „Eutrophication Potential“	100

СПИСАК ТАБЕЛА

Табела 2.1 Приказ основних карактеристика појединих врста угљева [2]	5
Табела 3.1 Хемијски састав у зависности од врсте угља [19], [13], [18].....	13
Табела 3.2 Хемијски састав летећег пепела из Индије [27]	14
Табела 3.3 Хемијски састав летећег пепела из Турске	15
Табела 3.4 Хемијски састав летећег пепела по регионима.....	15
Табела 3.5 Критеријуми за класификацију летећег пепела према ASTM C618-17a [34], [13], [35].....	21
Табела 3.6 Критеријум за класификацију летећег пепела према EN 450-1:2012 [36], [13],.....	22
Табела 3.7 Критеријуми за класификацију летећег пепела према IS 3812:2013 [37], [38], [13].....	23
Табела 4.1 Хемијски састав летећег пепела, композит ТЕКО А1 [48].....	35
Табела 4.2 Хемијски састав летећег пепела, композит ТЕКО А2 [48].....	35
Табела 4.3 Хемијски састав летећег пепела ТЕКО Б [48].....	35
Табела 4.4 Хамијски састав шљаке ТЕКО Б [48]	35
Табела 4.5 Часовне и годишње продукције ТЕКО А и ТЕКО Б [48]	36
Табела 4.6 Хемијски састав пепела и шљаке на депонији ТЕ Колубара [50].....	46
Табела 4.7 Димензије депоније и запремина одложеног пепела [50].....	47
Табела 4.8 Хемијски састав пепела [51]	50
Табела 4.9 Специфична и запреминска маса	50
Табела 4.10 Хемијски састав пепела ТЕНТ А [52]	54
Табела 4.11 Хемијски састав шљаке ТЕНТ А [52]	55
Табела 4.12 Физичке карактеристике пепела и шљаке ТЕНТ А [52].....	55
Табела 4.13 Хемијски састав пепела ТЕНТ Б [53].....	59
Табела 4.14 Хемијски састав шљаке ТЕНТ Б [53].....	59
Табела 4.15 Специфична и запреминска маса пепела и шљаке ТЕНТ Б [53].....	60
Табела 5.1 Карактеристике REE [55]	65
Табела 5.2 Примена ретких земаља у различитим индустријама [59]	68

Табела 6.1 Поставка фактора и нивоа за тестове луђења NaOH [75]	74
Табела 6.2 Поставка фактора и нивоа за тестове луђења HCl [75]	74
Табела 6.3 Садржај ретких земаља ($\mu\text{g/g}$) и SiO_2 (%) у пепелу пре и после десиликације [75]	76
Табела 6.4 Инвентар животног циклуса за процес екстракције ретких земаља .	85
Табела 6.5 Категорије утицаја (https://www.researchgate.net/figure/Impact-categories-for-the-CML-2001-baseline-life-cycle-impact-assessment-LCIA-method_tbl1_339339156)	93
Табела 6.6 Резултати за категорије утицаја за процес производње електричне енергије из лигнита.	94
Табела 6.7 Резултати за категорије утицаја за процес производње натријум хидроксида	94
Табела 6.8 Резултати за категорије утицаја за процес производње хлороводоничне киселине	95
Табела 6.9 Резултати за категорије утицаја за процес транспорта летећег пепела са депоније	96
Табела 6.10 Резултати за категорије утицаја за процес лужења натријум хидроксидом	96
Табела 6.11 Резултати за категорије утицаја за процес лужења хлороводоничном киселином	97

1 УВОД

У Србији постоје значајне резерве угља које премашују резерве свих осталих фосилних горива на овим просторима. Због тога, угаљ се дуги низ година користи као стратешки енергент у Србији, на којем се заснива енергентски развој и економски раст Републике Србије, како у досадашњем, тако и у будућем периоду.

Лигнит представља један од стратешких извора енергије у Србији и због своје примене и количине има изузетан потенцијал у енергетском смислу. Лигнит се због ниске густине, сиромашног састава и високог садржаја воде користи готово искључиво као гориво у процесима производње електричне и топлотне енергије.

Један од проблема који прати производњу електричне енергије коришћењем угља јесте проблем такозваног „енергетског отпада“. С обзиром на то да се у Србији већина електричне енергије, око 65% добија из термоелектрана сагоревањем лигнита, добија се и значајна количина отпада и штетних супстанци. Отпад који се добија сагоревањем лигнита су шљака и пепео који садрже сумпордиоксид и алуминијумоксид, али и тешке метале као што су олово, жива, кадмијум, хром, волфрам, који имају утицај на загађење површинских и подземних вода као и земљишта.

У Србији се годишње генерише шљаке и летећег пепела у количини до седам милиона тона, од чега летећи пепео чини око 90% укупне количине отпада из сагоревања лигнита, а до данас је заузето око 1500 хектара плодног земљишта и депоновано око 250 милиона кубика пепела. Иако је практична примена летећег пепела веома истражена, у Србији се и даље највеће количине истог и даље одлажу на депоније у близини места генерисања, које често покривају значајне површине обрадивог земљишта, што представља велики технички, економски и еколошки проблем. Са аспекта практичне примене, веома је важно да употреба летећег пепела нема негативне ефекте на животну средину, већ само ефекте који се позитивно огледају у заштити природних ресурса, смањењу емисије CO₂,

уштеди енергије, и пре свега, смањењу количина неискоришћеног отпадног материјала из рударства и енергетике.

Са друге стране, разна истраживања у свету показују да се пепео осим употребе у грађевинској индустрији може користити и за валоризацију критичних елемената из пепела. Разне студије и научни радови, као и велики број лабораторијских истраживања доказали су да се у саставу пепела налазе одређене количине корисних и критичних елемената за које је Европска Унија веома заинтересована. Валоризација и искоришћење ових елемената, посебно ретких земаља (REE) је данас предмет великог броја истраживања кроз разне европске пројекте. Један такав пројекат је и RECO2MAG (<https://reco2mag.rgf.bg.ac.rs/>). Ова истраживања сагласна су са Зеленим договором Европске Уније (A European Green Deal - https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en).

Осим употребе летећег пепела у сврху екстракције корисних и критичних минералних сировина чиме се повећава економски потенцијал рударског отпада, искоришћење пепела у ове сврхе има и еколошки и социјални ефекат. Еколошки ефекат се огледа у смањењу утицаја рударског отпада на животну средину, док се социјални ефекат огледа у отварању нових радних места и запошљавању локалног становништва.

У светлу значаја интеграције принципа одрживог развоја у управљању отпадом, коришћење LCA за системску процену утицаја на животну средину из перспективе животног циклуса је од суштинског значаја за постизање оптималних циљева одрживости. Циљ овог мастер рада је да се процени утицај депоније летећег пепела и третмана летећег пепела на животну средину. У раду ће се обрадити сценарио за екстракцију ретких земаља из летећег пепела који ће моћи у будућности да се упореди са другим сценаријима.

2 УГАЉ

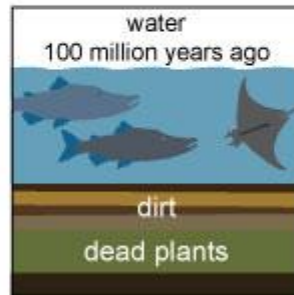
Угаљ је запаљива црна или браонкасто-црна седиментна стена са великом количином угљеника и угљоводоника. Угаљ је класификован као необновљиви извор енергије јер су му потребни милиони година да се формира. Угаљ садржи енергију ускладиштену у биљкама које су живе пре стотину милиона година у мочварним шумама. Слојеви прљавштине и стена прекривали су биљке милионима година и под утицајем притиска и топлоте претворили биљке у супстанцу коју називамо угаљ [1].

How coal was formed

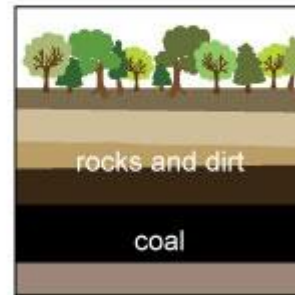
Before the dinosaurs, many giant plants died in swamps.



Over millions of years, the plants were buried under water and dirt.



Heat and pressure turned the dead plants into coal.



Source: Adapted from National Energy Education Development Project (public domain)

Слика 2.1 Настанак угља [1]

Најчешћа подела чврстих фосилних горива је на:

- a) Камени угаљ – садржи мало влаге, садржај пепела му је различит у широким границама, и потиче из старијих геолошких формација.
- b) Мрки угаљ – има различит садржај влаге и пепела, и потиче из новијих терцијарних геолошких формација.
- c) Лигнит – има велики садржај влаге и пепела и представља најмлађу врсту угља

- d) Тресет – најмлађе фосилно гориво, које се и не може сматрати угљем. Настао је од тресишта уз потпуну изолацију од ваздуха [2].



Слика 2.2 Чврста фосилна горива - угаљ [2]

Угаљ је енергент са највећим процентом заступљености међу процењеним фосилним горивима (преко 65 %), и његова налазишта су равномерније распоређена у свету у односу на налазишта нафте и гаса. Највеће залихе угља се налазе у Русији, Сједињеним Америчким Државама, Кини, Аустралији, Јужној Африци, а у Европи у Немачкој, Пољској, Чешкој и Великој Британији [2].

Угаљ је најиздашније и широко распрострањено фосилно гориво у свету. Око 23 % потреба за примарном енергијом и 39 % за електричном енергијом се добија из угља. Угаљ је и даље главни извор за производњу електричне енергије на глобалном нивоу иако је један од главних извора загађења ваздуха које штети здрављу и климатских промена које су узроковане гасовима стаклене баште [2] [3].

Основне карактеристике угља су топлотна моћ, садржај воде, испарљиви састојци, горива материја (првенствено садржај угљеника). У табели 2.1 дат је приказ основних карактеристика појединих врста угљева.

Табела 2.1 Приказ основних карактеристика појединих врста угљева [2]

Врста угља	Топлотна моћ, МЈ/kg	Садржај влаге, %	Испарљиви остаци, %	Садржај угљеника, %
Лигнит	до 12,6	31 – 60	51 – 60	65 – 70
Мрки угаљ	12,7 – 23,9	11 – 30	46 – 50	71 – 80
Камени угаљ	24 – 37,7	до 10	4 - 45	81 - 98

2.1 Лигнит

Лигнит, још познат и као смеђи угаљ, је угаљ настао од тресета на мањим дубинама где није био изложен екстремно високим температурама и притиску, и који се јавља у релативно младим налазиштима у односу на друге врсте угља [1] [4]. Обично је жућкасте до тамно смеђе боје, мек и прашњав на додир, за разлику од антрацита који је тврд и чист на додир [4], [5].

Лигнит је угаљ најнижег ранга и најштетнија врста угља по здравље, јер садржи више сумпора и веће количине пепела па се његовим сагоревањем ослобађају веће количине загађујућих емисија у ваздух [3], [5]. Садржај угљеника му је нижи у односу на остале угљеве (до 70%) и има висок проценат влаге који се креће и до 60% [2]. Због ниске топлотне моћи (<16,5MJ/kg), нижег садржаја угљеника и високог процента влаге, транспорт лигнита на великим дистанцама није исплатив, већ се користи у близини лежишта и углавном за производњу електричне и топлотне енергије [3], [6].

Око 13,5% светске производње угља долази из лигнита. Према подацима из 2016. године, у Европи и свету, Немачка је највећи произвођач и потрошач, док су све земље у Европи одговорне за 50% светске производње и потрошње лигнита. У Србији и осталим земљама Западног Балкана (Црна Гора, Македонија, Босна и Херцеговина, и Албанија) свих 16 термоелектрана на угаљ као гориво користе лигнит [3].

На слици 2.3 дати су проценти за 10 држава које су највише допринеле производњи лигнита у 2016. години:



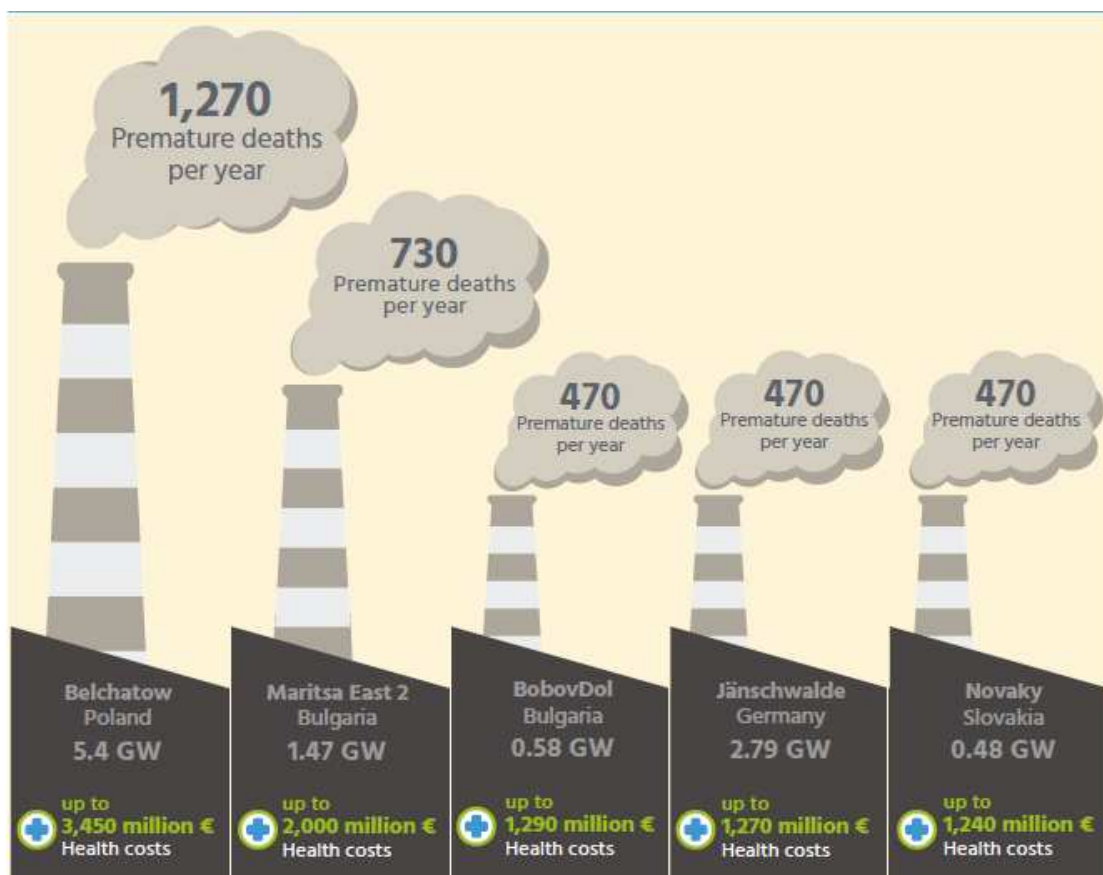
Слика 2.3 Највећи произвођачи лигнита у 2016. години [3], [6]

Према студији „Europe’s Dark Cloud“, процењује се да је 257 термоелектрана на угаљ одговорно за око 22 900 преурањених смрти. Ове смрти резултат су утицаја 3 главна загађивача: РМ честице, приземни озон и азот диоксид (NO₂). Према истој студији, од 10 термоелектрана на угаљ које су највећи узрочници преурањених смрти у Европи 7 користе лигнит као гориво [7].

Поред ова главна 3 узрочника преурањених смрти, постоје и други загађивачи који имају штетан утицај на здравље и животну средину. Производња енергије испушта у животну средину више живе од било ког индустријског извора, скоро два пута више од свих осталих сектора индустрије (метална индустрија, хемијска индустрија, индустрија папира и дрвета, отпад) [7]. Од 10 термоелектрана на угаљ које емитују опасне количине живе у животну средину, 9 их користи лигнит као гориво [3].

На слици 2.4 дате су термоелектране на угаљ које су најштетније по здравље становника Европе. Дати су подаци о броју преурањених смрти на

годишњем нивоу, производњи електричне енергије, и количини новца потрошеног за лечење становништва на годишњем нивоу.



Слика 2.4 Најитетније термоелектране по здравље у Европи [7]

2.2 Угљеви у Републици Србији

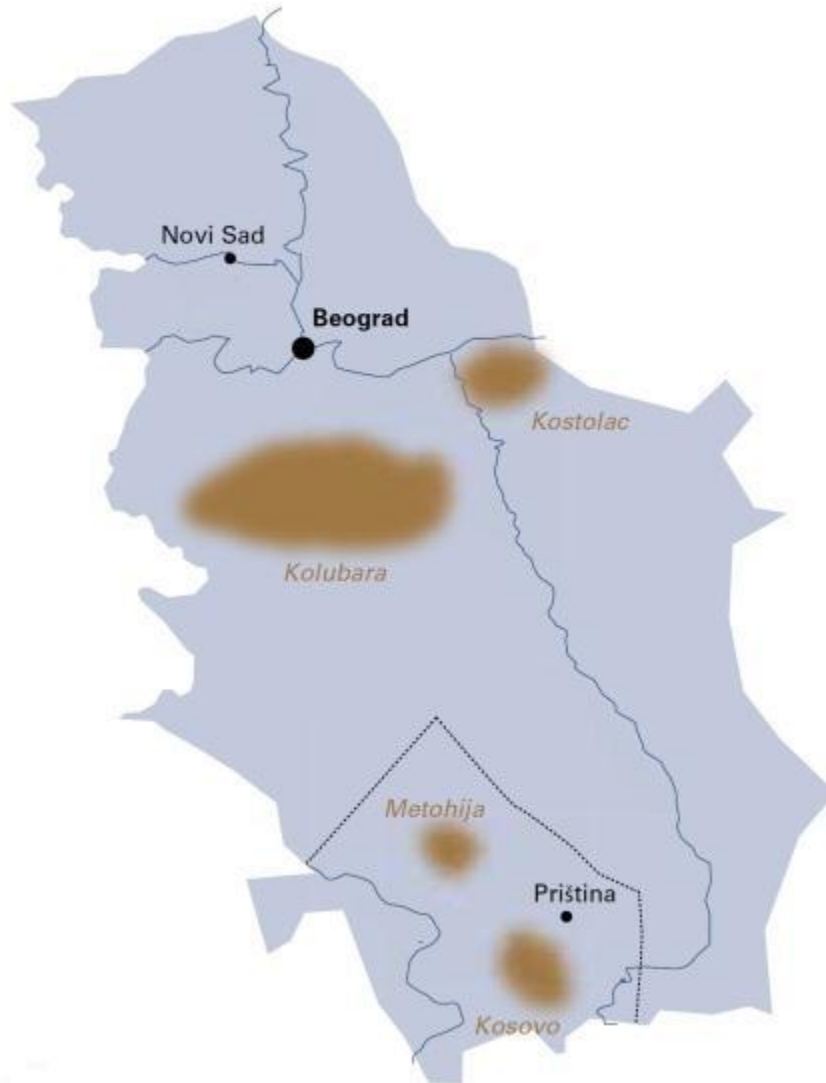
Србија има близу 21 милијарде тона геолошких резерви угља [8], [9]. Ипак, структура тих енергетских резерви у Србији је веома неповољна јер између 97% и 98% од укупних резерви свих врста угља чине лигнити ниског ранга [8], [9], са високим садржајем минералних материја и влаге, доње топлотне моћи између 5000 и 9000 kJ/kg [10], просечне вредности 7850 kJ/kg [11]. Ова количина геолошких резерви угља сврстава Србију у земље са највећим геолошким налазиштима лигнита у Европи [9], [11]. Ова чињеница условљава да термоенергетски капацитети буду основ енергетског система, то јест, да се између 45% и 49% укупних потреба за енергијом у Србији обезбеђује из лигнита [11], [12].

Лигнит представља највећи извор електричне енергије у Србији, са учешћем у производњи између 65% и 70%, а наводи се да достиже чак и 74%. Такође, сасвим је реална тенденција да лигнит буде доминантан извор електричне енергије и до 2050. године [13].

Најзначајније резерве лигнита у Србији, око 4 милијарде тона, налазе се у Колубарском и Костолачком басену. Укупне експлоатабилне резерве угља су значајне и представљају основу за даљи дугорочни развој енергетике уопште, посебно за производњу електричне енергије. На око 4,5 милијарди тона у Косовско-метохијском басену се тренутно не може рачунати. [8].

Производња лигнита који се користи као основно гориво у термоелектранама, одвија се на површинским и подземним коповима колубарског и костолачког басена. Термоелектране у Србији се у највећој мери снабдевају лигнитом из Колубарског басена, где се остварује око 75% производње лигнита у Србији, док се у Костолачком басену произведе око 25% [11].

На слици 2.5 дат је положај басена на географској карти Србије:



Слика 2.5 Географски положај басена у Србији [11]

Годишња производња лигнита у колубарском басену износи око 30 милиона тона. Од почетка експлоатације 1896. године у басену је произведено око 883,2 милиона тона, док су резерве су процењене на 2811 милиона тона. Већина угља се искористи у термоелектранама, где се годишње произведе око 17 милијарди kWh електричне енергије. [14], [12].

3 ЛЕТЕЋИ ПЕПЕО

Угаљ је и даље један од најбитнијих примарних енергетских ресурса и електрична енергија се у свету највише производи у термоелектранама које користе угаљ. Током процеса производње електричне енергије, као остатак у процесу сагоревања угља настаје пепео, и његове количине се процењују на око милијарду тона годишње на светском нивоу [15].

Приликом производње електричне струје, после сагоревања угља највећи део неорганске материје из угља заостаје као пепео. На дну пећи у мањим количинама заостаје шљака, док се пепео прикупља на електростатичким филтерима. Зато се и назива летећи пепео, мада је веома уобичајен и назив "летећи" пепео (енгл. Fly ash). Хидрауличким путем летећи пепео се одлаже на депоније које се обично налазе у непосредној близини саме термоелектране. Мали део (око 1%) од укупно произведеног пепела приликом сагоревања угља испушта се кроз димњак у атмосферу, док се сав остатак депонује на одлагалишта. Количине пепела које депонује једна термоелектрана, у зависности од њеног капацитета, мере се у милионима тона годишње. У свим земљама у свету ово представља огроман економски и еколошки проблем, далеко испред проблема других индустријских отпада, као што су фосфогипс, флуорогипс, цитрогипс, различити индустријски муљеви [16].

Као што је наведено у претходном поглављу, иако постоји тенденција ка смањивању употребе угља у производњи електричне енергије, у скоријој будућности не постоји реална алтернатива која ће обезбедити енергетску стабилност, нарочито у земљама у развоју. Из године у годину, евидентан је пораст количине чврстог остатка из процеса сагоревања угља у термоелектранама. Енормне количине летећег пепела чине га најзаступљенијим нуспроизводом овог процеса, а његово управљање и одлагање са разлогом представља глобални проблем. Дobar пример који илустрије озбиљност проблема је да је 1997. године годишња продукција на глобалном нивоу износила 500

милиона тона [17], деценију касније, тачније 2010. године је порасла на 660 милиона тона [18], а већ 2012. године износила је 750 милиона тона [19].

3.1 Карактеристике летећег пепела

Поред угљеника, испарљивих материја и влаге, у саставу угља се може наћи и неоргански материјал, укључујући различите врсте минерала. Количина и врста минерала у угљевима је битна с аспекта анализе летећег пепела, јер ове несагориве компоненте могу имати знатан утицај на хемијски састав пепела и физичке карактеристике пепела [20], [13]. Угљеви са минералима из шкриљаца и каолинских група дају алуминосиликатне пепеле, док угљеви са израженим садржајем сулфидних минерала, пирита и марказита, дају повећану концентрацију гвожђа у пепелу. Угљеви настали у алкалној средини (свежа вода) утичу на таложeње и висок садржај карбоната Са и На у угљу, док барске или слане воде утичу на висок садржај S (због разградње воденог света) снижавајући рН вредност [21]. Различити микроелементи са укупним масеним уделом мањим од 1% се могу наћи у саставу угљева [22]. Структура ових елемената одређује њихову расподелу у честицама пепела, а углавном су чврсто везани и не могу се лако ослободити [23].

Сагоревањем различитих врста угљева (антрацита, мрких и лигнита) настају различите врсте летећих пепела. У складу са тим, у зависности од врсте угља настали пепели имају различите физичке и хемијске карактеристике. На слици 3.1 дат је изглед различитих врста летећег пепела [13]:



Слика 3.1 Различите врсте летећег пепела [13]

3.1.1 Физичке карактеристике летећег пепела

Летећи пепео у најужем смислу подразумева најфиније честице од 0,2 до 90 μm , настале трансформацијом минералних материја у процесу сагоревања угља у термоелектранама, довољно ситних да остану у суспензији са гасовитим продуктима сагоревања и на тај начин буду изнесене из котла. Међутим, мала ефикасност сагоревања у котловима термоелектрана, угљеви ниског ранга и неодговарајућа контрола гранулометрије мељаве угља, довели су до тога да се под летећим пепелом сматрају и честице до 300 μm , па чак и до 500 μm [24], [13].

Летећи пепео је фини прашкасти материјал сложеног састава и порозне структуре, пореклом од несагориве неорганске материје у угљу. Претежно га чине честице неправилног облика, чврсте, или шупље сферичне, углавном стакласте (аморфне) структуре. Физичке густине 2,1-2,6 g/cm^3 и насипне густине 1-1,8 g/cm^3 . Боја варира од водено беле, преко жуте и наранџасте, јарко црвене и браон до тамне. Боја пепела зависи од садржаја оксида гвожђа [13].

3.1.2 Хемијски састав летећег пепела

Хемијски састав летећег пепела чине основни елементи ($> 1\%$), примесе ($0,1 - 1\%$) и елементи у траговима ($< 0,1\%$). Основни елементи и примесе су у облику оксида, а најзаступљенији хемијски елементи у опадајућем низу су кисеоник, силицијум, алуминијум, калцијум, гвожђе, угљеник, калијум, магнезијум, водоник, натријум, титанијум, азот, фосфор, и баријум, док се остали елементи налазе само у траговима, у облику органске и неорганске материје, у зависности од минерала и фаза у летећем пепелу [25]. Основне компоненте летећег пепела су силицијум-диоксид (SiO_2), алуминијум-оксид (Al_2O_3), калцијум-оксид (CaO) и гвожђе(III)-оксид (Fe_2O_3) и чине између 75% и 85% материјала, док преостали део чине кристални облици и несагорели угљеник [26]. Састав летећег пепела пре свега зависи од врсте угља који се сагорева [19], па су у табели 3.1 дати типични хемијски састави пепела у зависности од врсте угља:

Табела 3.1 Хемијски састав у зависности од врсте угља [19], [13], [18]

Угаљ Компонента	Камени (% _{mas})	Мрки (% _{mas})	Лигнит (% _{mas})
SiO_2	20 – 60	40 – 60	15 – 45
Al_2O_3	5 – 35	20 – 30	10 – 25
Fe_2O_3	10 – 40	4 – 10	4 – 15
CaO	1 – 12	5 – 30	15 – 40
MgO	0 – 5	1 – 6	3 – 10
SO_3	0 – 4	0 – 2	0 – 10
Na_2O_3	0 – 4	0 – 2	0 – 6
K_2O	0 – 3	0 – 4	0 – 4
Несагориве	0 - 15	0 – 3	0 – 5

Да хемијски састав може да одудара од уобичајеног за врсте угљева. Може се видети на примерима индијског и турског пепела где су оба настала сагоревањем лигнита али им хемијски састави много одударају један од другог. Исто се може видети и на примеру пепела насталом сагоревањем лигнита у Србији о коме ће бити речи у даљем раду.

У табели 3.2 и табели 3.3 дати су хемијски састави угљева из Индије и Турске:

Табела 3.2 Хемијски састав летећег пепела из Индије [27]

Компонента	Удео (%_{mas})
SiO ₂	39,57 – 55,40
Al ₂ O ₃	22,13 – 26,77
Fe ₂ O ₃	3,21 – 5,32
CaO	0,42 – 0,54
MgO	0,19 – 0,29
Na ₂ O	0,13 – 0,16
K ₂ O	0,93 – 1,0
P ₂ O ₅	0,23 – 0,32
TiO ₂	2,06 – 0,24
SO ₃	0,39 – 1,45
Г.Ж.	6,88 – 29,8

Табела 3.3 Хемијски састав летећег пепела из Турске

Компонента	Удео (% _{mas})
SiO ₂	13 – 49,5
Al ₂ O ₃	3 – 26,70
Fe ₂ O ₃	3 – 16,30
CaO	0,1 – 60,0
MgO	1 – 6,11
Na ₂ O	0,27 – 3,0
K ₂ O	0,28 – 3,70
TiO ₂	0,12 – 1,50
SO ₃	0,57 – 31,5
Г.Ж.	1,33 – 6,47

У табели 3.4 дат је хемијски састав још неких пепела по регионима:

Табела 3.4 Хемијски састав летећег пепела по регионима

Компонента	Удео (% _{mas})			
	Европа	САД	Кина	Аустралија
SiO ₂	28,5 – 59,7	37,8 – 58,5	35,6 – 57,2	48,8 – 66,0
Al ₂ O ₃	12,5 – 35,6	19,1 – 28,6	18,8 – 55,0	17,0 – 27,8
Fe ₂ O ₃	2,6 – 21,2	6,8 – 25,5	2,3 – 19,3	1,1 – 13,9
CaO	0,5 – 28,9	1,4 – 22,4	1,1 – 7,0	2,9 – 5,3
MgO	0,6 – 3,8	0,7 – 4,8	0,7 – 4,8	0,3 – 2,0
Na ₂ O	0,1 – 1,9	0,3 – 1,8	0,6 – 1,3	0,2 – 1,3
K ₂ O	0,4 – 4	0,9 – 2,6	0,8 – 0,9	1,1 – 2,9
P ₂ O ₅	0,1 – 1,7	0,1 – 0,3	1,1 – 1,5	0,2 – 3,9
TiO ₂	0,5 – 2,6	1,1 – 1,6	0,2 – 0,7	1,3 – 3,7
MnO	0,03 – 0,2	-	-	-
SO ₃	0,1 – 12,7	0,1 – 2,1	1,0 – 2,9	0,1 – 0,6
G.Ž.	0,8 – 32,8	0,2 – 11,0	-	-

3.1.3 Минералошки састав летећег пепела

Поред хемијских карактеристика за утврђивање индустријске примене битну улогу игра и минералошки састав [25]. Минералошки састав зависи од геолошких фактора повезаних са формирањем и таложењем резерви угља [28], услова сагоревања и др. Летећи пепео се састоји из градивних (>10%), основних (1-10%), споредних (0,1-1%) и допунских (<0,1%) минерала и фаза. [25].

Према начину настанка минерали и фазе код летећег пепела могу бити примарни, секундарни и терцијарни. Примарне минерале чине изворни минерали из угља, код којих се није догодила трансформација, а карактерише их висока температура топљења. У ову групу спадају неки силикати, оксиди, сулфати, фосфати и карбонати. Секундарни минерали су настали у току процеса сагоревања, и то су различити силикати, оксиди, сулфати, карбонати, сулфиди, стакло и коксни остатак. У терцијарну групу спадају минерали формирану у току транспорта и складиштења: портландит, бруцит, гипс, гвожђе сулфат, калцит, доломит, хидроксида гвожђа и алуминијума и аморфни материјали [25].

Минералне материје из угља у току процеса сагоревања прелазе у кристалне и аморфне фазе од којих се пепео састоји. Минерални састав летећег пепела у ширем смислу обухвата следеће компоненте:

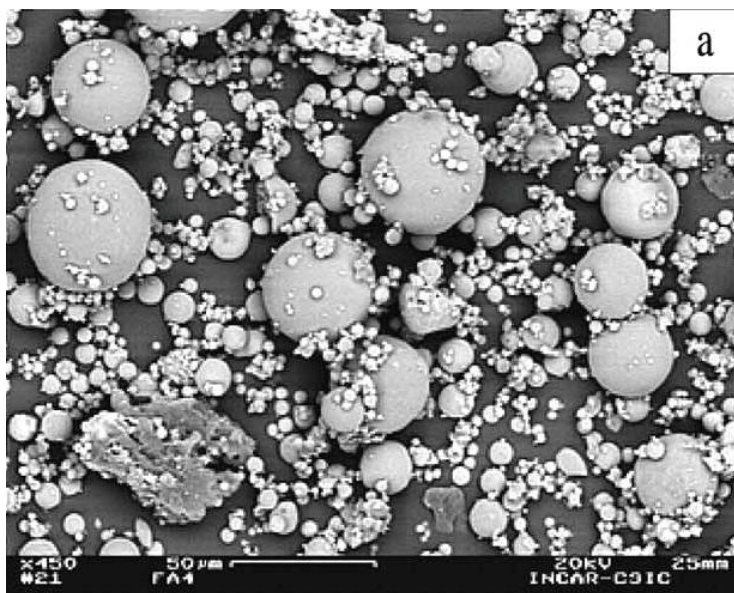
- Неорганске састојке, кристалне и аморфне
- Органске супстанце које потичу из угља
- Течне, гасовите и гасовито-течне инклузије у неорганској и органској компоненти [16]

Доминантне кристалне структуре код лигнитског летећег пепела су кварц, анортит, галенит, хематит и мулит [29], [30], [31].

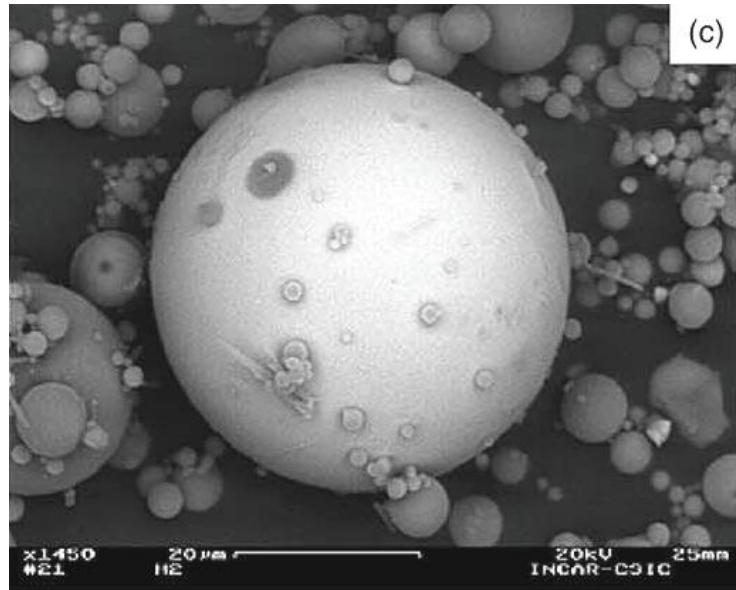
Сферне цестице од којих се састоји стакласти (аморфни) део пепела углавном су танке, шупље, керамичке микросфере и називају се ценосфере (Слика 3.2 и слика 3.3). Састав њихове чврсте коре обухвата алумосиликатно стакло, мулит, кварц, калцит, Fe-оксиде, Са-силикате и сулфате. Ове сфере

настају под специфичним условима, као истопљене капи од глиновитих минерала, лискуна, фелдспата и кварца. Сфере су обично напуњене гасовима који су настали од сагоревања органске материје, декомпозиције карбоната, дехидратације глиновитих минерала и евапорације воде из пора. То су углавном CO_2 , N_2 , O_2 и H_2O . Претпоставља се да се ове сфере настају на температурама између 1230°C и 1400°C . Ценосфере у чијим се шупљинама налазе још мање сферне честице називају се плеросфере (Слика 3.4) [32], [16].

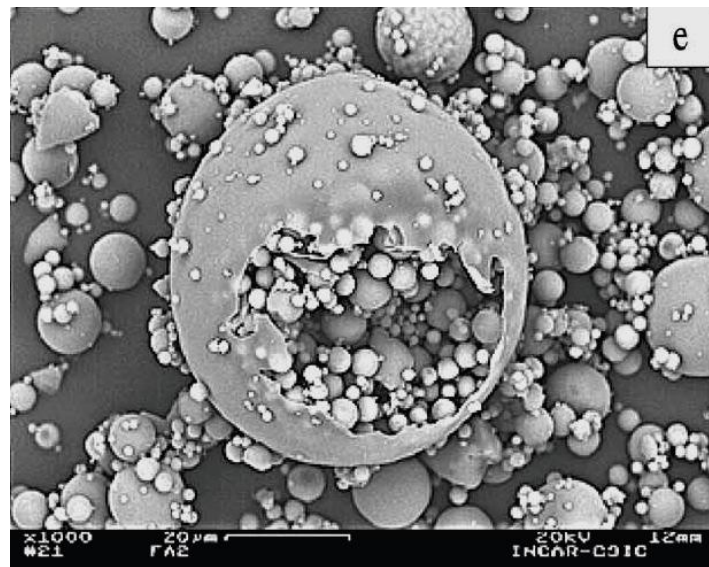
У пепелу лигнитских, битуминозних и антрацитских угљева постоје и феросфере (Слика 3.5), које се састоје од фериспинела, чврстих раствора магнетита са садржајем Mg, Mn и Ca, хематита, и у мањој мери илменита и хромита. Керамичке ценосфере, као и магнетичне феросфере могу се специјалним методама концентрисати и као такве наћи своју индустријску примену. Феросфере се на пример, користе као катализатори у процесима високотемпературне конверзије метала. Поред аморфне фазе и наведених кристалних фаза, у пепелима се такође могу наћи честице чађи, а понекад и минерали као што су барит, англезит, апатит и монацит [32], [16].



Слика 3.2 Аморфна фаза, састављена од алумо-силикатних сферних честица у летећем пепелу [32], [16]



Слика 3.3 Алумо-силикатна сферна честица [32], [16]



Слика 3.4 Алумо-силикатна плеросфера у пепелу [32], [16]



Слика 3.5 Феросфера са дендритичним магнетитским кристализацијама [32], [16]

3.2 Тешки метали у летећем пепелу

Угљеви који се сагоревају у термоелектранама могу садржати елементе у траговима, од којих су неки веома токсични. Познавање понашања елемената у траговима у току и после процеса сагоревања од великог је значаја, јер осим што се емитују у атмосферу, присутни су у одређеним концентрацијама и у пепелу који се одлаже на депоније. Како ови елементи имају потенцијалну мобилност у воденој средини, могуће је њихово излуживање у земљиште, подземне, па и површинске водене токове. [16]

У пепелима лигнитских угљева могу се детектовати у траговима елементи Ag, As, V, Ba, Be, Cd, Cr, Cs, Su, Ga, Ge, Li, Mn, Mo, Nb, Ni, Pb, Rb, Sb, Sc, Sn, Sr, U, Tl, V, Y, Zn и Zr. Многи од ових елемената су изузетно отровни, док неки могу бити врло корисни, па се врши њихова екстракција из пепела, као на пример Ge [33], [16].

Елементи у траговима могу бити равномерно распоређени у честицама пепела, а могу бити и сконцентрисани на површини ових честица. У стакластој фази концентришу се V, Su, Zr и Cr. На површини честица пепела обично се концентришу As, Su, Pb, Tl, Mo, Se, U, Ga и Ge [33], [16].

3.3 Класификација летећег пепела

У литератури постоји више класификација летећег пепела, а биће приказане најзначајније с аспекта класификације летећег пепела пореклом од лигнита, односно његове употребе

Према врсти угља од кога је настао летећи пепео може бити

- Силикатни
- Кречњачки

И силикатни и кречњачки пепео гради иста група оксида (Si, Al I Fe). Разлика је у присуству кречњака, чији је удео мањи од 10% код силикатних, односно већи од 10% код кречњачких [18].

Свакако је најзаступљенија класификација према америчком стандарду ASTM C618-17а, где се летећи пепео дели у две класе [34]:

- Класа F
- Класа C

Летећи пепео са збиром удела SiO_2 , Al_2O_3 , и Fe_2O_3 већим од 70% и ниским садржајем кречњака, припада класи F. Настаје сагоревањем угљева вишег ранга и одликују га пуцоланска својства. Летећи пепео са високим садржајем кречњака и збиром удела SiO_2 , Al_2O_3 , и Fe_2O_3 између 50% и 70% припада класи C. Настаје сагоревањем угљева ниског ранга, мрких угљева и лигнита, а ову класу карактеришу пуцоланска и цементна својства у контакту са $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и водом [34].

Критеријуми за класификацију летећег пепела према стандарду ASTM C618-17а дати су у табели 3.5, а фотографије класе F и класе C дате су на слици 3.6.

Табела 3.5 Критеријуми за класификацију летећег пепела према ASTM C618-17a [34], [13], [35]

Класа	F	C
Критеријум		
SiO ₂ + Al ₂ O ₂ + Fe ₂ O ₃ (% _{min})	70	50
SO ₃ (% _{max})	5	5
Влага (% _{max})	3	3
Губитак жарењем (% _{max})	6	6

**Слика 3.6** Класе летећег пепела – F (лево) и C (десно) према ASTM C618-17a [13]

Основна разлика између летећег пепела класе F и класе C је у садржају Ca. Код класе F укупан удео калцијума се креће између 1% и 12%, и налази се у облику Ca(OH)₂, CaSO₄ и стакластих компонената у комбинацији са SiO₂ и Al₂O₃. Код класе C калцијум се налази у облику CaO са уделом од чак 30% до 40% и карактерише га веће присуство алкалија (Na, K) и сулфата [26].

У европским земљама класификација се најчешће врши према стандарду EN 450-1:2012 (табела 3.6) [36]:

Табела 3.6 Критеријум за класификацију летећег пепела према EN 450-1:2012 [36], [13],

Критеријум	Захтев према EN 450-1:2012	
	Губитак жарењем (% _{max})	Категорија А
Категорија В		7
Категорија С		9
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ (% _{min})	70	
Реактивни SiO ₂ (% _{min})	25	
Укупне алкалије (% _{max})	5	
Реактивни СаО (% _{max})	10	
Слободни СаО (% _{max})	1,5	
SO ₃ (% _{max})	3	
MgO (% _{max})	4	
Укупни хлориди (% _{max})	0,1	

Европски регулаторни систем показао је позитиван пример у области употребе летећег пепела, а с обзиром на искоришћење преко 90% на нивоу Европске уније [18], било би од глобалног значаја применити га и у другим регионима [13].

Индијски стандард IS 3812:2013 класификује летећи пепео у две групе у зависности од примене, као замену за цемент и као примесу. Овај стандард је најобимнији у погледу испитивања хемијских карактеристика летећег пепела, јер поред основних елемената укључује одређивање садржаја магнезијум оксида, укупног садржаја алкалија као и укупног садржаја хлорида [35].

У табели 3.7 дати су критеријуми за класификацију летећег пепела према IS 3812:2013:

Табела 3.7 Критеријуми за класификацију летећег пепела према IS 3812:2013 [37], [38], [13]

Критеријум \ Примена/група	Замена за цемент		Примена	
	Силикатни	Калцитни	Силикатни	Калцитни
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (% _{min})	70	50	70	50
SO_3 (% _{max})	3	3	5	5
SiO_2 (% _{min})	35	25	35	25
MgO (% _{max})	5	5	5	5
Алкалије као Na_2O (% _{max})	1,5	1,5	1,5	1,5
Укупни хлориди (% _{max})	0,05	0,05	0,05	0,05
Влага (% _{max})	2	2	-	-
Губитак жарењем (% _{max})	5	5	7	7

У раду који су писали Vassilev и остали [25] се наводи подела летећег пепела предложена од стране Комисије за примену летећег пепела при Уједињеним нацијама, која класификује у четири групе:

- **Силико-алуминатни** – однос $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 2$ и садржи мање од 15 % CaO ,
- **Алумо-силикатни** – однос $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 < 2$ и садржи мање од 15% CaO и мање од 3 % SO_3 ,
- **Кречњачко-сулфатни** – садржај CaO већи од 15 % и садржај SO_3 већи од 3 %,
- **Базни** – садржај CaO већи од 15 % и садржај SO_3 мањи од 3 %.

У зависности од R модула, летећи пепео се може сврстати у 3 групе [13]:

- Силикатно-калцитни ($R < 2$)
- Силикатни ($R = 2-6$)
- Алуми-силикатни ($R > 6$)

3.4 Утицај летећег пепела на околину и људско здравље

Честице електрофилтеског пепела могу имати и непосредне штене последице по околину и здравље људи. Честице пепела се разносе ветром и на веће удаљености од околине саме термоелектране. Могу дуго да се задрже у ваздуху, што повећава могућност њиховог удисања. Највећем утицају свакако су изложени запослени у термоелектранама, али пошто су пошто су честице летећег пепела веома мобилне, свакако су угрожени и становници у насељима близу термоелектрана и депонија пепела. Према неким мерењима, под нормалним условима рада, концентрације инхалативног пепела у самим термоелектранама крећу се од 0,1 до 7 mg/m³. Честице летећег пепела код људи могу изазвати иритацију очију и коже, као и слузокоже носа и грла. Дуготрајна инхалација може чак довести до веома озбиљних обољења као што су хронични бронхитис и канцер плућа [16].

Поред веома опасних последица директног дејства удисањем, честице пепела загађују земљиште, површинске и подземне водене токове, пошто могу доспети и до дубљих слојева земљишта. Када пепео доспе у природне дренажне системе снижава рН вредност воде, а такође доводи до поремећаја у фотосинтези код воденог биља, чиме се нарушава природни ланац исхране. Летећи пепео такође може изазвати корозију металних структура са којима дође у додир [16].

3.5 Примена летећег пепела

Све мање простора и све већи трошкови одлагања летећег пепела потпуно су променили поглед према некада највећој количина отпада у свету. Строжи прописи у области заштите животне средине, економски разлози, а у новије време посебни захтеви технологије и индустрије, претворили су летећи пепео у потенцијално прихватљиву робу или сировину. Због тога, све више термоелектрана прелази на модерније системе пнеуматског транспорта и депоновања летећег пепела, подстакнути не само мерама заштите животне средине, већ и повећаном потражњом [13].

Врло је важна чињеница да се летећи пепео може употребљавати директно, без претходног третмана. С друге стране, поједине компоненте се могу издвојити из летећег пепела различитим методама (хемијски, термички, механички) и даље користити као делимична замена за важне сировине, или као кључни адитиви за побољшавање одређених производа (нпр. пуцолански адитив за цемент и бетон). Нарочито је значајан пораст његове употребе у цементној индустрији и грађевинарству. Поред тога, летећи пепео налази мноштво примена: као покривка, у подлогама за путеве, за солидификацију и стабилизацију отпада, за производњу лаких агрегата, у индустрији керамике, металургији, за побољшање пољопривредног земљишта и воде, и др [26].

Према подацима из 2016. које даје ЕСОВА (European Coal Combustion Association), искоришћење летећег пепела на нивоу ЕУ је око 92 %, од тога вечина у грађевинској и цементној индустрији [39]. Према подацима АСАА (American Coal Ash Association) за 2019. годину, укупно искоришћење летећег пепела у САД износи 52,14 % [40]. У периоду 2021-2022. године, у Индији је произведено 280,72 милиона тона летећег пепела, од чега је искоришћено 259,86 милиона тона, што чини 95,95 % [41]. Међутим, и поред неких добрих примера и многобројних примена у различитим гранама индустрије, поражавајућа је чињеница да свега 25% овог нуспроизвода буде искоришћено на глобалном нивоу [19], а његова недовољна употреба представља константан извор загађења, огроман терет за животну средину, и ствара проблеме са одржавањем депонија.

3.6 Примена летећег пепела у Србији

Учешће Србије у глобалној продукцији летећег пепела може се учинити као занемарљиво, где са око 32 милиона тона сагорелог угља ниског ранга, укупној количини доприноси са око 6 милиона тона годишње [10]. Непланска и незнатна употреба летећег пепела онемоућшава добијање валидних података о његовом коришћењу. Због тога се може претпоставити да је ситуација непромењена у односу на 2011. годину, када се наводи податак о искоришћењу од само 2,7% на годишњем нивоу, и то у цементној индустрији [42], [13]. Узевши

у обзир занемарљиву употребу и чињеницу да се највећи део овог нуспроизвода одлаже на депоније у близини термоелектрана, заузимајући више од 1500 ha обрадивог земљишта, као и мере које је потребно применити за одржавање и санацију депонија, проблем добија сасвим друге размере. Нажалост, таква је ситуација у већини земаља у развоју [13].

На следећим сликама приказане су неке од непрегледних депонија пепела у Србији:



Слика 3.7 Затравњена касета депоније Термоелектране „Никола Тесла А“ [13]



Слика 3.8 Депонија Термоелектране „Никола Тесла Б“ [13]



Слика 3.9 Депонија Термоелектране „Колубара А“ [13]



Слика 3.10 Депонија ПД „Термоелектране и копови Костолац“ [13]

4 ДЕПОНИЈЕ ЛЕТЕЋЕГ ПЕПЕЛА У СРБИЈИ

У Србији угаљ представља главни енергетски извор. Чак 96% угља од укупне производње се сагори у термоелектранама ради производње електричне енергије. Један од проблема који прати производњу енергије из угља јесте тзв. „енергетски отпад“, односно пепео и шљака који настају као несагориви и несагорели остаци [43].

У раду који су писали Нишић и остали [44], наводи се да се у Србији, без Косова и Метохије издваја 62,5 тоне пепела по километру квадратном или 0,77 тона по становнику, чиме се Србија сврстава у сам светски врх.

Термоенергетски објекти су највећи произвођачи отпада ове врсте. Пепео, шљака и прашина из котла заједно са летећим пепелом од угља који у Каталогу отпада имају ознаку 10 01 01 и 10 01 02 [45], у 2020. години генерисани су у количини од 7,78 милиона тона, од чега 90% представља летећи пепео. Узимајући у обзир да је у току исте године произведено укупно 9,57 милиона тона отпада, то значи да отпад из термоенергетских постројења представља 81% укупне количине произведеног отпада [46].

У Србији се пепео од сагоревања лигнита у термоелектранама одлаже на следећих 6 депонија [47]:

- Депонија ТЕ Костолац – Средње костолачко острво
- Депонија ТЕ Костолац – ПК Ћириковац
- Депонија ТЕ Колубара
- Депонија ТЕ Морава
- Депонија ТЕ Никола Тесла А
- Депонија ТЕ Никола Тесла Б

4.1 Депонија ТЕ Костолац – Средње костолачко острво

Термоенергетско постројење Костолац чине две термоелектране са по два блока. Прва је термоелектрана Костолац А (ТЕКО А) која се налази се на десној

обали Дунава, на периферији Новог Костолаца, и њен комплекс заузима површину од 18 ha. У раду су два блока А1 и А2. Први блок (ТЕКО А1) снаге од 100 MW пуштен је у рад 1967. године и други (ТЕКО А2) од 210 MW који је почео са радом 1980. године. Термоелектрана Костолац А годишње троши око 3.000.000 тона угља, при чему ТЕКО А1 троши 1.000.000 тона а ТЕКО А2 око 2.000.000 тона [48].

Друга је термоелектрана Костолац Б (ТЕКО Б), која се налази на простору комплекса који заузима површину од око 102 ha, и предвиђена за базни рад у електро-енергетском систему. Налази се 3 км источно од термоелектране Костолац А, на североисточном делу костолачког угљеног басена, поред села Дрмно. Кондензациона је блоковског типа, са проточним хлађењем. У раду су два блока, оба блока су номиналне снаге од по 348,5 MW. Први блок је у раду од 1988. године а други од 1991. године. Годишња потрошња угља ових блокова износи око 5.000.000 тона. [48].

Обе термоелектране снабдевају се ровним угљем из површинског копа Дрмно који се до термоелектрана допрема системом тракастих транспортера до дробиличног постројења на даљу припрему и упућивање у термоелектране. Угаљ површинског копа Дрмно има просечну доњу топлотну моћ око 6.850 kJ/kg са просечним садржајем пепела око 25 % [48].

Обе термоелектране приказане су на слици 4.1:



Слика 4.1 ТЕ Костолац А (лево) и ТЕ Костолац Б (десно) [48]

Депонија пепела и шљаке Средње костолачко острво (СКО) налази се на удаљености од око 4 km од ТЕКО Б и око 1,5 km од ТЕКО А. Територијално припада катастарској општини КО Костолац град и заузима површину од 256 ha у основи. Простор депоније подељен је на три касете од којих Касета А заузима површину од 100 ha, Касета Б - 76 ha, Касета Ц – 80 ha [48].



Слика 4.2 Намена простора депоније СКО [48]

Комплекс депоније је везан са мрежом јавних путева и насељских улица преко интерне сабирне саобраћајнице на два места, с тим што је функција прикључка на општински пут изгубљена пре пар година након надвишења, односно успостављања новог заштитног левообалног насипа Млаве. Тренутно је у функцији само прикључак на јавну насељску саобраћајницу која се завршава прелазом преко Канала топле воде – веза са ТЕ "Костолац А" кроз насеље Канал (улица Кнеза Милоша). За прилаз појединачним објектима унутар комплекса депоније и везу са јаловиштем "Кипа Дунавац" постоји мрежа земљаних путева [48].

Највећи део подручја које заузима чини антропогени предео који је настао измештањем дела Дунавца. Напуштено корито Дунавца је засуто, и тако је формиран простор за одлагање рудничке откривке "Кипа Дунавац", а затим и депонијски простор [48].

Депонија је са севера ограничено одбрамбеним насипом Дунава; са југа јаловиштем ”Кипа Дунавац” и ободним насипом изграђеним на десној обали Дунавца непосредно поред насеља ”Стари Костолац”; са истока ободним насипом трасираним паралелно са каналом расхладне воде и регулисаним водотоком реке Млаве; и са запада каналом топле воде који се улива у реку Дунав [48].



Слика 4.3 Локација депоније СКО [48]

Пепео из термоелектрана А1 и А2 се доводи до депоније Средње костолачко острво са по два магистрална цевовода у дужини од 1350 до 1500 m. Из ТЕКО Б се хидромешавина пепела транспортује до депоније СКО кроз три магистрална цевовода преко моста на Млави до касете Ц на депонији. Дужина трасе магистралног цевовода из ТЕКО Б до депоније је 3.370 m. Магистрални цевоводи из ТЕКО А и ТЕКО Б приказани су на слици 4.4 [48]:



Слика 4.4 Магистрални челични цевоводи за транспорт пепела и шљаке из ТЕКО А (лево) и ТЕКО Б (десно) до депоније СКО [48]

Хидромешавина се по депонији пепела и шљаке СКО дистрибуира помоћу 7 цевовода, од којих су 2 из ТЕКО А1, 2 из ТЕКО А2, и 3 из ТЕКО Б. На касети Ц постављено је 20 истакача, док је на касети Б постављено 16 истакача. На касети А нема постављених истакача. Истакачки цевовод приказан је на слици 4.5 [48].



Слика 4.5 Истакачки цевовод на депонији СКО [48]

Одлагање хидромешавине пепела и шљаке у касети А (слика 4.6) је завршено на 91,0 mmm. Ободни насип изведен је до коте 91,5 mmm. Ова касета није предвиђена за даље коришћење и привремено је рекултивисана до њеног затварања. Касете Б и Ц су активне (слике 4.7 и 4.8). Акумулација у обе касете достигла је коту од ~95.0 mmm, док је кота ободног насипа достигла коту од 96,0 mmm [48].



Слика 4.6 Касета А на коти 91,0 мпм – пасивна, привремено рекултивисана [48]



Слика 4.7 Касета Б на коти 95,0 мпм - активна [48]



Слика 4.8 Касета Ц на коти 95,5 мпм - активна [48]

На пепелу и шљаци који је настао сагоревањем угља са ПК Дрмно извршена је класична хемијска (силикатна) анализа (табеле 4.1, 4.2, 4.3 и 4.4).

Табела 4.1 Хемијски састав летећег пепела, композит ТЕКО А1 [48]

Хемијски састав пепела - садржај (%)										
SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	P ₂ O ₅	TiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	Губитак жарењем
52,78	7,97	19,71	5,80	3,10	3,70	0,05	0,65	0,29	0,74	3,03
54,47	8,22	20,34	5,99	3,20	3,82	0,05	0,67	0,30	0,76	-

Табела 4.2 Хемијски састав летећег пепела, композит ТЕКО А2 [48]

Хемијски састав пепела - садржај (%)										
SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	P ₂ O ₅	TiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	Губитак жарењем
54,15	5,96	21,33	5,96	2,74	3,97	0,07	0,61	0,46	0,60	2,38
55,49	6,11	21,86	6,11	2,81	4,07	0,07	0,62	0,47	0,61	-

Табела 4.3 Хемијски састав летећег пепела ТЕКО Б [48]

Хемијски састав пепела - садржај (%)						
SiO ₂	Fe ₂ O ₃	TiO ₂ + P ₂ O ₅ + Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O + K ₂ O
44,82	7,98	27,87	8,70	4,30	5,06	1,27

Табела 4.4 Хемијски састав шљакe ТЕКО Б [48]

Хемијски састав шљакe - садржај (%)						
SiO ₂	Fe ₂ O ₃	TiO ₂ + P ₂ O ₅ + Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O + K ₂ O
51,47	8,57	26,28	7,80	2,41	2,05	1,42

У наредном делу дати су специфична и запреминска маса пепела и шљакe, као и гранулометријски састав на депонији СКО:

- Специфична маса сувог пепела – 2070-2100 kg/m³
- Запреминска маса сувог пепела у растреситом стању – 620-648 kg/m³
- Запреминска маса сувог пепела у збијеном стању – 770-800 kg/m³
- Средњи пречник зрна летећег пепела ТЕКО А1 – d₅₀=80 μm
- Средњи пречник зрна летећег пепела ТЕКО А2 – d₅₀=90 μm
- Средњи пречник зрна летећег пепела ТЕКО Б – d₅₀=20 μm
- Запреминска маса суве шљаке у растреситом стању – 380-510 kg/m³
- Запреминска маса суве шљаке у збијеном стању – 440-600 kg/m³
- Средњи пречник композита шљаке из ТЕКО А1 – d₅₀ = 0,3 mm
- Средњи пречник композита шљаке из ТЕКО А2 – d₅₀ = 0,4 mm
- Средњи пречник зрна шљаке из ТЕКО Б – d₅₀ = 1 mm

У табели 4.5 дате су просечне часовне и годишње продукције пепела и шљаке из ТЕКО А и ТЕКО Б. Годишња продукција рачуната је на основу еквивалентног годишњег број сати рада блока од 7000 h/god [48].

Табела 4.5 Часовне и годишње продукције ТЕКО А и ТЕКО Б [48]

	Пепео	Шљака	Укупно
Количина из ТЕКО А (оба котла)			
t/h	121,00	7,50	128,50
t/god	847 000,00	52 500,00	899 500,00
Количина из ТЕКО Б (оба котла)			
t/h	213,16	23,68	236,84
t/god	1 492 120,00	165 760,00	1 657 880,00
Количина из ТЕКО А + ТЕКО Б			
t/h	334,16	31,18	365,34
t/god	2 339 120,00	218 260,00	2 557 380,00

На основу ситуационе карте постојећег стања депоније СКО која се може наћи као прилог у студији [48], дефинисана је запремина одложеног пепела и шљаке:

- Површина депоније у основи – 2 529 100,0 m²
- Површина косине депоније – 671 500,0 m²
- Површина завршне контуре депоније – 1 878 300,0 m²
- Површина контуре у основи Касете А на коти 70,0 mm – 988 200,0 m²
- Површина садашње контуре Касета А на коти 91,0 mm – 815 600,0 m²
- Висина одложеног пепела у Касети А износи – 21,0 m
- Површина контуре у основи Касете Б на коти 70,0 mm – 746 200,0 m²
- Површина садашње контуре Касета Б на коти 96,0 mm – 505 000,0 m²
- Висина одложеног пепела у Касети Б – 26,0 m
- Површина контуре у основи Касете Ц на коти 70,0 mm – 794 700,0 m²
- Површина садашње контуре Касета Ц на коти 96,0 mm – 557 700,0 m²
- Висина одложеног пепела у Касети Ц – 26,0 m

Према овим подацима, укупна запремина пепела и шљаке до завршне коте депоновања на касетама А, Б и Ц, процењена је на [48]:

$$V = 52\,786\,700,0 \text{ m}^3$$

4.2 Депонија ТЕ Костолац – ПК Ћириковац

Након изведених радова на реконструкцији термоенергетских постројења ТЕКО А и Б технолошки систем припреме и транспорта ретке хидромешавине пепела и шљаке замењен је системом густе хидромешавине, чиме су створени услови да се целокупна продукција термогеног отпада одлаже на депонију ПК Ћириковац имајући у виду ограничени просторни и еколошки капацитет депоније СКО [49].

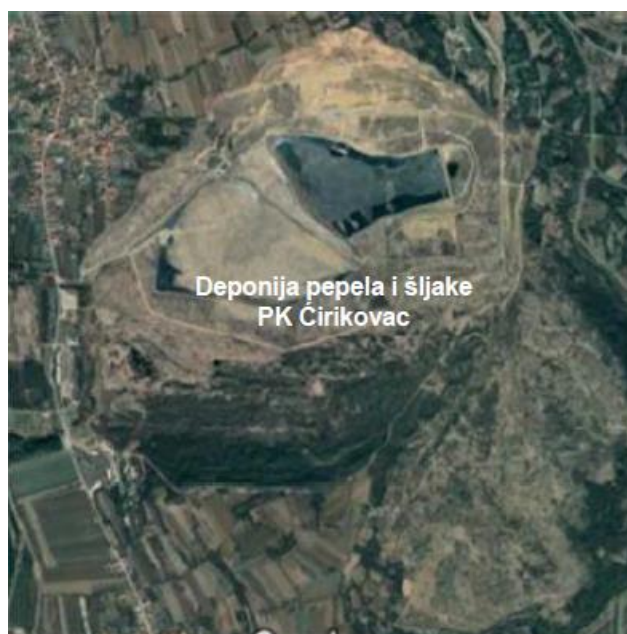
Пепео се на депонију ПК Ћириковац транспортује из термоелектрана Костолац А и Костолац Б. Транспортује се у виду густе хидромешавине са односом пепео:вода = 1:1 [49].

Површински коп Ћириковац, на коме је експлоатација обустављена 2009. године, се налази на приближно истој удаљености од ТЕКО А и ТЕКО Б, око 4

km. Налази се у централном и северном делу експлоатационог поља Тириковац на површини од око 300 ha. Депонија се састоји из 2 касете у које се наизменично врши истакање пепела и шљаке. Тренутно се истакање врши у касету 1, док је касета 2 привремено рекултивисана на коти 67 mnm. Дно депоније је на коти 45 mnm а завршна кота депоновања ће бити на коти 92 mnm [49].

Депонија се налази недалеко од села Кленовик, на око 7 km од Пожаревац и око 4,5 km од Костолац. Ограничена је државним путем другог реда Пожаревац-Костолац, са западне стране, и уређеним коритом реке Млаве са источне стране [49].

На сликама 4.9 и 4.10 дати су локација депоније ПК Тириковац и њен положај на карти:



Слика 4.9 Локација депоније ПК Тириковац [49]



Слика 4.10 Локација депоније ПК Ћириковац у односу на друге објекте огранка ТЕКО [49]

Траса транспортних цевовода којим се транспортују пепео и шљака из ТЕКО А креће из постројења за припрему и транспорт густе хидромешавине. Обухвата две идентичне независне линије са по једним цевоводом, од којих је једна радна а друга у резерви. Од постројења до уласка на депонију траса је дужине око 5450 m, док је дистрибутивни део цевовода на депонији у дужини око 1050 m, што укупно износи 6500 m [49].

Траса транспортних цевовода из ТЕКО Б има две идентичне независне линије са по два цевовода, од којих је једна радна а друга резервна. Од постројења до депоније магистрални цевовод је дужине око 5100 m, док је дистрибутивни цевовод на депонији као и за ТЕКО А око 1000 m, што укупно износи око 6100 m [49].

На слици 4.11 и 4.12 дати су магистрални цевовод и активна касета са дистрибутивним цевоводом који води до истакачког места:



Слика 4.11 Магистрални цевоводи хидромешавине и повратне воде ТЕКО А (лево) и ТЕКО Б (десно) [49]



Слика 4.12 Касета 1 – активна [49]

С обзиром да се ради о истом пепелу и шљаци који се одлаже и на депонију СКО, у студији „Свеска 2: Процена коначне вредности затварања депоније ТЕ Костолац - ПК Ћириковац“ [49] је дато да су карактеристике одложеног материјала на депонији ПК Ћириковац (хемијски састав, гранулометријски

састав, запреминска маса, пројектована количина пепела и шљаке) исте као што је већ дато у претходном поглављу.

На основу ситуационе карте депоније пепела и шљаке ПК Тириковац која је дата као прилог у овој студији [49], процењена је укупна запремина одложеног пепела и шљаке. Такође је дата и укупна запремина смештајног простора на депонији.

Запремина простора за одлагање пепела и шљаке у касети 1 до коте депоновања 92,0 mnm износи 12 087 116,0 m³, док запремина за одлагање у касети 2 до исте коте износи 19 963 678 m³. Према томе укупна запремина смештајног простора на депонији ПК Тириковац износи [49]:

$$V = 32\,050\,794,0\text{ m}^3$$

Запремина тренутно одложеног пепела и шљаке на депонији ПК Тириковац у касети 1 износи 755 749,2 m³, док у касети 2 износи 3 935 894,5 m³. Укупна запремина према томе износи приближно:

$$V = 4\,691\,645\text{ m}^3$$

4.3 Депонија ТЕ Колубара

ТЕ Колубара А је кондензациона термоелектрана, блоковског типа и представља најстарију термоелектрану ЈП ЕПС-а. Налази се непосредно уз насеље Велики Црљени, на путу Београд – Лазаревац, око 60 km од Београда и око 15 km од Лазареваца. Комплекс ТЕК А заузима површину од 44,5 ha [50].

Њена изградња извршена је у четири етапе, при чему су најпре, 1956. год., изграђени блокови А1 и А2, инсталисаног капацитета по 32 MW, након чега је 1960. год. изграђен блок А3, снаге 65 МЊ. Блок А4, капацитета 32 MW, пуштен је у погон 1961. год.. Завршну, четврту етапу изградње представљала је изградња блока А5, капацитета 110 MW, који је почео са радом 1979. год. На тај начин, укупна инсталисана снага електране данас износи 271 MW. ТЕК А користи спрашени лигнит са површинских копова из угљеног басена Колубара [50].

Из блокова А1-А4 пепео и шљака се транспортују и депонују у виду ретке хидромешавине (однос чврсто:течно = 1:10) у радну касету депоније, а из блока А5 се део пепела прикупља и продаје спољним корисницима, док се остатак пепела заједно са шљаком транспортује и депонује као угушћена хидромешавина у радну касету депоније [50].

На слици 4.13 дат је изглед комплекса ТЕ Колубара А:



Слика 4.13 ТЕ Колубара А [50]

Депонија пепела и шљаке ТЕК А се налази на око 1,2 km источно од термоелектране. Територијално припада катастарским општинама Велики Црљени, Соколово и Степојевац. Подељена на четири касете, „Стару” депонију коју сачињавају Касета 1 и Касета 2 са 32 ha и „Нову” депонију, коју сачињавају касете А (20 ha) и Б (26,5 ha). „Стара” и „Нова” депонија су смештене једна уз другу (слика 29). У периоду од 1977. до 1984. год. пепео и шљака су депоноване у „Стару” депонију. Од 1984. год. формиране су и активне касете А и Б „Нове” депоније. До данас су, грађевинском механизацијом, неколико пута надвишаване обе касете „Нове” депоније. Касета А је запуњена до коте ~118,0 mnm, а предвиђено је уклањање одложеног пепела и шљаке до коте 116,0 mnm према важећој пројектној документацији. Касета Б је у овом моменту активна касета [50].



Слика 4.14 Депонија ТЕ Колубара [50]

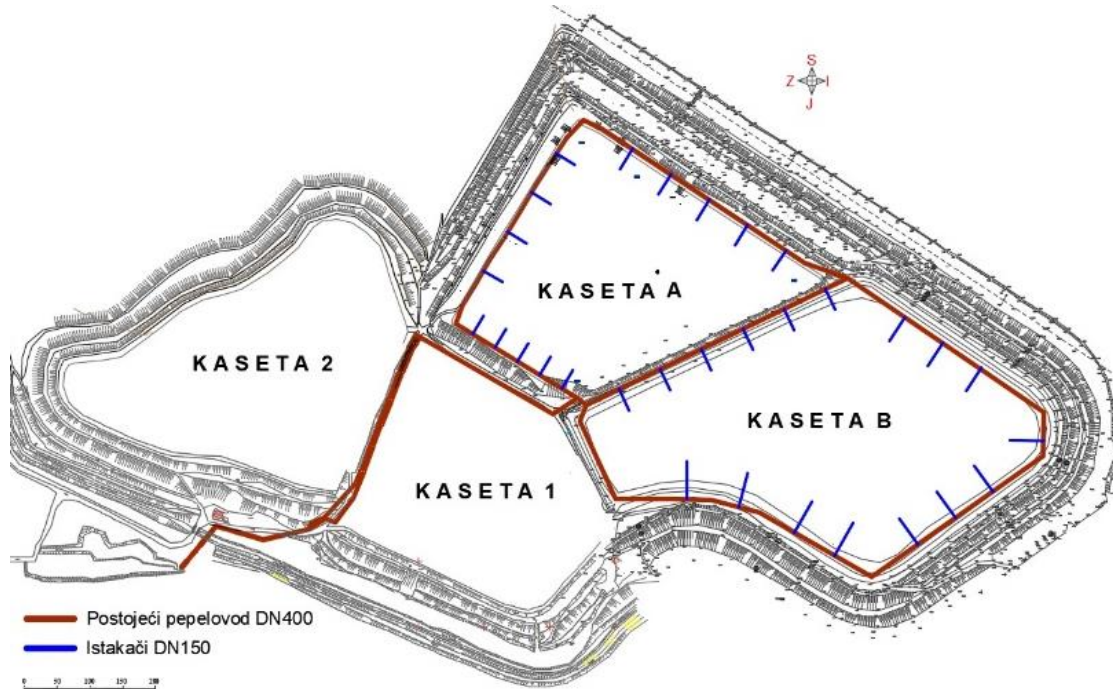
За транспорт хидромешавине пепела и шљаке из багер станице блокова А1-А4 до депоније се користе два челична цевовода пречника ДН400 , а из пумпне станице испод силоса блока А5 два челична цевовода ДН 175. Целокупна траса цевовода функционално се може поделити на две целине:

- Магистрални део цевовода од постројења за припрему хидромешавине до Касете А на депонији
- Истакачки прстен положен по круни насипа касета А и Б [50]

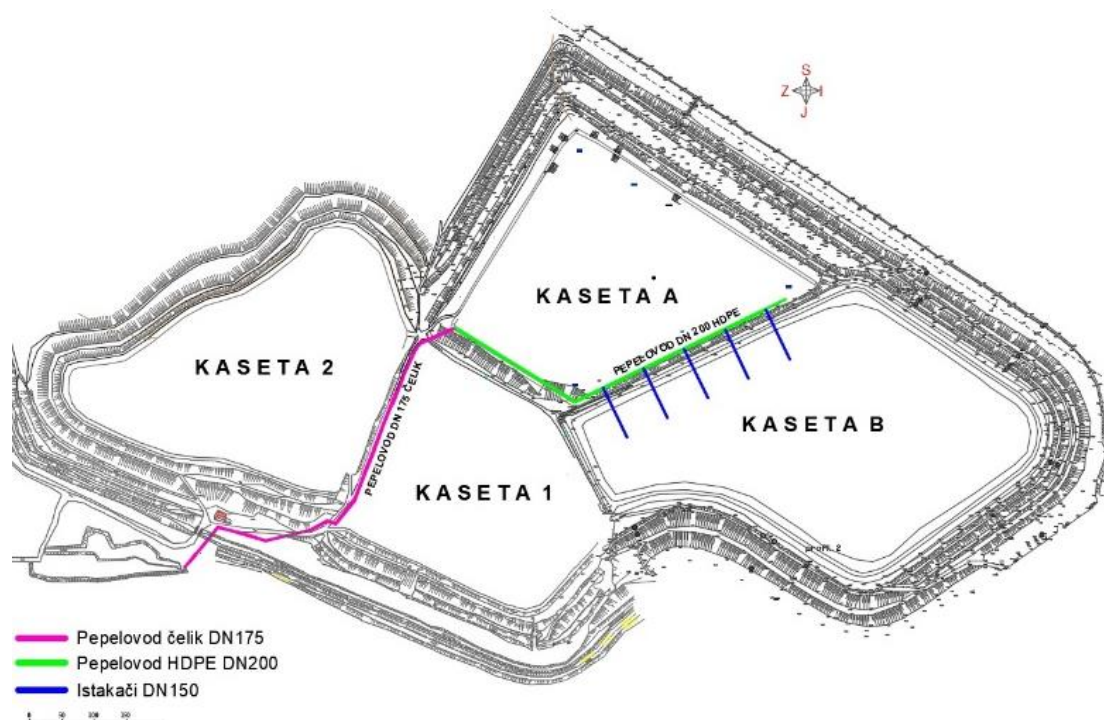
Цевоводи за хидротранспорт хидромешавине из блокова А1-А4, 2хDN400, се у подножју касете А спајају у један цевовод који скреће поред касете А и иде све до преградног насипа између касета А и Б (Слика 4.15). Од ове тачке је даље омогућено гранање истакачког цевовода по крунама насипа касета А и Б, и довођење хидромешавине на истакање у радну касету. У делу касете Б део овог цевовода је од HDPE материјала [50].

Цевоводи за транспорт хидромешавине из блока А5, 2хDN175 по изласку на круну насипа касета А где се преко усмеравајућег чвора гранају лево и десно по ободу касете А (слика 4.16) [50].

По ободу активне касете изведен је дистрибутивни цевовод са системом истакача за депоновање хидромешавине. Истакачи су од PVC цеви пречника DN160 мм ослоњени на челичне ослонце [50].



Слика 4.15 Разводни цевовод DN400 за хидраулички транспорт хидромешавине из блокова А1-А4 [50]



Слика 4.16 Разводни цевовод DN175 за хидраулички транспорт мешавине из блока A5 [50]

Гориво које користи ТЕК А је спрашени лигнит са површинског копа из источног дела угљеног басена Колубара, просев мокре сепарације и асортиман прах из процеса сушења сушаре Вреоци. Угаљ који се ложи у котловима термоелектране, има просечну доњу топлотну моћ око 7.900 kJ/kg са просечним садржајем влаге је око 45 % и просечним садржајем пепела око 14% и шљаке од 3 до 5 %. Пепео ТЕК А по свом хемијском саставу спада у категорију силикатних пепела [50].

У табели 4.6 је приказани су опсези вредности садржаја компоненти пепела. Приказани резултати су добијени на узорцима пепела који су узимани дужи временски период период на различитим местима на депонији пепела и шљаке.

Као што се пепео разликује по хемијском саставу, тако се разликује и по густини, а што је од значаја за хидраулички транспорт до депоније. У наредном делу дати су специфична и запреминска маса пепела, као и гранулометријски састав пепела на депонији ТЕ Колубара [50]:

- Специфична маса – 1,97-2,13 g/cm³
- Запреминска маса пепела у растреситом стању – 641,2-754,63 kg/m³

- Запреминска маса пепела у збијеном стању – 695,73-1042,73 kg/m³
- Средњи пречник зрна пепела d₅₀ – 0.25-0.45 mm

Табела 4.6 Хемијски састав пепела и шљаке на депонији ТЕ Колубара [50]

Компонента	Садржај (%)
SiO ₂	47,88-61,66
Fe ₂ O ₃	2,39-4,75
Al ₂ O ₃	21,15-25,69
CaO	4,70-9,77
MgO	2,90-4,79
SO ₃	3,09-8,80
P ₂ O ₅	0,10-0,13
TiO ₂	0,69-1,07
Na ₂ O	0,4-0,53
K ₂ O	0,83-1,03
Специфична маса [g/cm ³]	1,97-2,13

Годишња потрошња термоелектрана је око 2.250.000 тона угља (346 t/h угља x 6.500 h/god), при чему Стари блокови троше око 1.470.000 тона (226 t/h), а Нови око 780.000 тона (120 t/h). Из поменуте годишње потрошње угља ТЕК А има следећу продукцију пепела [50]:

- Стари блокови (А1-А4) – 248 300 t/god
- Нови блок (А5) – 132 600 t/god

На основу ситуационе карте завршне контуре депоније пепела и шљаке ТЕК А која се може наћи као прилог у студији [50], и оријентационих попречних профила на делу са депонованим материјалом одређени су следећи подаци у табели 4.7:

Табела 4.7 Димензије депоније и запремина одложеног пепела [50]

	Касета 1	Касета 2	Касета А	Касета В
Површина касете у основи (m ²)	130 365,0	200 430,0	207 556,0	259 942,5
Површина завршне контуре касете (m ²)	111 287,5	127 893,0	127 087,0	171 186,5
Кота касете у основи (mm)	95,0	95,0	94,5	94,5
Завршна кота депоновања (mm)	110,0	113,0	118,0	116,0
Висина одложеног пепела (m)	15,0	18,0	23,5	21,5
Запремина одложеног пепела (m ³)	1 828 394,75	2 954 907,0	3 932 055,25	4 634 636,75

Укупна запремина пепела и шљаке одложена на депонију ТЕ Колубара А према претходним подацима из табеле 4.7 процењена је на:

$$V = 13\,345\,000,0 \text{ m}^3$$

4.4 Депонија ТЕ Морава

ТЕ Морава (ТЕМ) је пројектована за сагоревање отпадних угљева из јамске експлоатације (угаљ Рембас), као вршна електрана за рад током године у трајању од 6 месеци али је од августа 2004. год., након капиталног ремонта, термоелектрана стално на мрежи. Модернизација и нови аутоматски систем за надзор и управљање блоком је обезбедио још сигурнији и ефикаснији рад. Термоелектрана је инсталисане снаге 125 MW. На бази 120 MW предвиђена је могућа годишња производња за 6.000 сати ангажовања од 720.000 MWh са потребном количином угља од 975.000 до 1.000.000 t [51].

Првобитно је за производњу електричне енергије термоелектрана као гориво користила лигнит, мрки и камени угаљ из оближњих јамских рудника угља, који су различити по свом хемијском саставу и топлотној вредности. Због пада производње ове врсте угља, сада се угаљ допрема и из ПК Колубара или ПК

Костолац. Мазут и нафта се користе као помоћно гориво за покретање блока (потпалу котлова) и за подршку ватре у току погона [51].

У оквиру комплекса термоелектране Морава (слика 4.17), ограђене површине око 26 ha, поред главног погонског објекта и транспортно технолошког дела, налазе се административно управни део, магацини и складишта, зелене површине и заштитно зеленило.



Слика 4.17 ТЕ Морава [51]

Депонија пепела и шљаке ТЕМ се налази непосредно јужно од главног погонског објекта. Територијално припада катастарским општинама Дубље и Црквенац. Формирана је на локалитету Муртаљ на локацији између термоелектране и десне обале корита Велике Мораве. Локалитет је изабран као природна депресија од скоро 8 m [51].

Депонија је формирана на површини од око 30 ha. Састоји се од 8 касета (слика 33) укупне површине 27 ha и огледне површине у централном делу од 2,4 ha. Касете 1, 2, 3, 4 и 5 укупне површине од 11 ha су достигле пројектовану коту запуњавања од 114,5 mm и привремено су рекултивисане. Касете 6, 7 и 8 се користе за одлагање пепела и шљаке према постојећој пројектној документацији.

На касети 3 је након престанка истакања до коте 115,0 mnm формирана привремена депонија пепела извађеног из активних касета 5 и 6. Овај пепео се перманентно одвози камионима и служи у производњи цемента. Висина депонованог пепела на наведеној привременој депонији је око 7,0 m [51].



Слика 4.18 Депонија пепела и шљаке ТЕ Морава [51]

Топлотна вредност угљева који се сагоревају у ТЕМ креће се од 7.100 до 20.934 kJ/kg. Садржај пепела у угљу варира од 12,5 до 43%, а најчешће 15-25%. Продукција пепела и шљаке уобичајено се креће у опсегу 16-20 t/h. Хемијски састав пепела и шљаке разликује се у зависности од врсте угља који се сагорева, и дат је у табели 4.8. Сагоревањем угља различитог по врсти и тоplotној вредности одлаже се пепео потпуно различитог хемијског састава, што се најбоље види по садржају СаО који варира од 5% до 60% [51].

Табела 4.8 Хемијски састав пепела [51]

Угаљ	Садржај (%)									
	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	P ₂ O ₅	TiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O
Боговина	16,36	1,60	7,42	60,20	2,19	11,48	0,17	0,31	0,18	0,12
Лубница	55,60	9,18	16,75	7,85	5,33	4,26	0,13	0,69	1,03	1,26
Соко	44,16	9,38	20,04	12,02	3,05	8,47	0,20	0,52	1,01	1,25
Морава	51,48	10,26	18,14	6,65	3,18	6,79	0,18	0,72	0,51	2,20
Пљевља	31,24	13,17	13,53	24,05	2,04	13,50	0,33	0,45	0,33	1,44
Ресавица	51,15	10,57	15,85	11,35	2,28	6,02	0,09	0,61	1,07	1,09
Ибар	56,99	14,47	17,28	4,75	1,95	1,20	0,18	0,48	0,97	1,79
Костолац	33,40	19,16	18,91	11,20	3,26	10,77	0,16	0,62	1,21	0,96

Као што се пепео од различитих угљева разликује по хемијском саставу, тако се разликује и по густини, а што је од значаја за хидраулични транспорт до депоније (табела 4.9).

Табела 4.9 Специфична и запреминска маса

Врста угља	Специфична маса, (g/cm ³)	Запреминска маса, (g/l)	
		у расутом	у збијеном
Ресавица	2,17	800	1215
Боговина	2,82	775	1485
Ибар и Соко	2,21 -2,28	460 - 480	850 -870

За еквивалентни број радних сати термоелектране од 6.000 часова и података о утрошеним количинама угља за сагоревање проистекли су следећи технолошки подаци о часовној продукцији пепела и шљаке блокова ТЕМ. У зависности од врсте угља која се сагорева продукција пепела и шљаке варира у интервалу од 99 000 до 100 000 t/god [51].

На основу ситуационе карте завршне контуре депоније пепела и шљаке ТЕМ која је дата као прилог у студији [51] и оријентационих попречних профила на делу са депонованим материјалом одређени су следећи подаци:

- Површина депоније у основи – 430 875,0 m²
- Површина завршне контуре депоније – 344 305,0 m²
- Површина косине депоније 652 217,81 m²
- Кота депоније у основи – 100,0 mm
- Завршна кота депоније – 115,0 mm

На основу ових података израчуната је запремина одложеног пепела и шљаке на депонији ТЕМ до коте 115,0 mm, и она износи [51]:

$$V = 5\,745\,759,3\text{ m}^3$$

Преостали простор за депоновање процењен је на основу геодетског снимка и важеће пројектне документације. Укупна запремина расположивог простора за депоновање у касетама 6, 7 и 8, које су према постојећој пројектној документацији предвиђене за одлагање до коте 115,0 mm, износи [51]:

$$V = 893\,532,5\text{ m}^3$$

Узимајући у обзир расположиви простор за одлагање добије се да је радни век депоније приближно 6,0 до 6,5 година, при чему није узета у обзир количина пепела која се пласира цементарама [51].

4.5 Депонија ТЕ Никола Тесла А

Термоелектрана Никола Тесла А (ТЕНТ А) се налази на десној обали реке Саве, 35 km узводно од Београда, на око 3 km западно од Обреновца и 18 km низводно од ТЕ Никола Тесла Б (слика 4.19) [52].



Слика 4.19 ТЕ Никола Тесла А [52]

У овој термоелектрани инсталисано је шест блокова који су пуштени у погон у периоду од 1973. год. до 1979. год., укупне снаге 1652 MW, што је чини највећим електроенергетским објектом у Србији. ТЕНТ А као гориво користи угаљ из колубарског угљеног басена. При регуларном експлоатационом режиму сагори око 13 милиона тона угља на годишњем нивоу, при чему се издвоји око 2 милиона тона пепела. Термоелектрана је кондензациона, блоковског типа са проточним хлађењем. Сачињавају је четири блока снаге 310 MW и 2 блока снаге од 200 MW [52].

Депонија пепела и шљаке ТЕ Никола Тесла А се налази на око 700 m источно од термоелектране. Територијално је део катастарских општина К.О. Кртинска и К.О. Уровци и заузима укупну површину од 382 ha у основи. Простор депоније подељен је на три касете од којих Касета 1 заузима површину од ~112 ha у основи, Касета 2 - 122 ha, Касета 3 – 148 ha (слика 4.20). На источном и северном делу депонија пепела и шљаке је ограничена савским одбрамбеним насипом, а северна и северозападна страна се граниче делимично путем Бреска–Пољопривредни комбинат Београд. На западној страни, у залеђу је пољопривредно добро Младост, а на јужној је термоелектрана [52].



Слика 4.20 Депонија пепела и шљаке ТЕНТ А [52]

Према технолошком пројекту предвиђено је да једна касета буде активна, једна резервна и једна ван употребе, која је привремено рекултивисана. Касета 1 неактивна је већ десетак година. Кота депонованог пепела и шљаке достигла је 111,0 mnm, а круна ободног насипа 112,5 mnm. Након престанка одлагања у овој касети, 2005. год. извршена је њена привремена рекултивација Касета 2 која је активна од децембра 2020. год. запуњена је до коте ~ 117,5 mnm, док је кота ободног насипа достигла коту од 123,0 mnm. Касета 3 има статус резервне. Ободни насип изведен је до коте 115,0 mnm, а депоновани пепео достигао је коту 113,0 mnm. Локација нове касете 4 се налази непосредно уз постојећу депонију и ослања се делом на касету 1 и целом дужином на касете 2 и 3. Пројектује се као јединствен простор, који формира иницијални ободни насип заједно са насипом постојеће депоније. Простире се на око 115 ha [52].

На блоковима ТЕ Никола Тесла А уграђен је систем за транспорт ретке хидромешавине пепела и шљаке, у коме се пепео и шљака мешају са водом у односу 1:10 и транспортују у багер станице, одакле се пумпају на депонију. Хидраулични транспорт хидромешавине пепела и шљаке до депоније врши се кроз 8 магистралних челичних цевовода [52].

Топлотна вредност угља који сагорева се креће од 6.018 до 6.600 kJ/kg. Садржај пепела у угљу варира од 18,48 до 23,0%, са тренутном продукцијом пепела од око 519,5 t/h и за ефективно време рада термоелектране од 7.500 h/god [52].

Хемијски састав пепела и шљаке преузет је из извештаја о испитивању Лабораторије за чврста горива Рударског института д.о.о. Београд (табеле 4.10 и 4.11).

Табела 4.10 Хемијски састав пепела ТЕНТ А [52]

Компонента	Садржај (%)
SiO ₂	55,09-57,58
Fe ₂ O ₃	4,88-5,96
Al ₂ O ₃	22,68-24,92
CaO	5,97-6,74
MgO	2,03-2,57
SO ₃	1,55-2,36
P ₂ O ₅	0,04-0,05
TiO ₂	0,55-0,63
Na ₂ O	0,44-0,49
K ₂ O	0,90-0,09
G.Ž	2,14-2,51
CO ₂	0,25-0,50
CaO (активни)	0,17-0,29

Физичке карактеристике пепела и шљаке преузете су из Извештаја о испитивању физичких карактеристика пепела и шљаке ТЕ Никола Тесла А урађеног од стране Рударског института д.о.о. Београд. (табела 4.12).

Табела 4.11 Хемијски састав шљаке ТЕНТ А [52]

Компонента	Садржај (%)
SiO ₂	49,20-56,70
Fe ₂ O ₃	5,16-6,83
Al ₂ O ₃	12,25-15,70
CaO	4,08-6,21
MgO	2,07-2,73
SO ₃	1,63-2,15
P ₂ O ₅	0,03-0,06
TiO ₂	0,58-0,65
Na ₂ O	0,45-0,60
K ₂ O	0,91-1,11
G.Ž	12,04-20,18
CO ₂	0,37-0,72
CaO (активни)	-

Табела 4.12 Физичке карактеристике пепела и шљаке ТЕНТ А [52]

	Пепео	Шљака
Густина (g/cm ³)	2,1	2,2
Насипна маса (kg/m ³)	652,4	503,8
Запреминска маса (kg/m ³)	795,1	560,1

Средњи пречник зрна пепела насталог сагоревањем угља у ТЕНТ А d₅₀ варира од 0.2 до 0,45 mm, а горња гранична крупноћа d₉₅ од 1,35 до 1,6 mm [52].

На основу ситуационе карте завршне контуре депоније пепела и шљаке ТЕНТ А која је дата као прилог у студији [52] и оријентационих попречних профила на делу са депонованим материјалом одређени су следећи подаци:

- Површина депоније у основи – 3 813 775,50 m³
- Површина завршне контуре депоније – 1 868 253,0 m³
- Површина косине депоније – 1 814 770,0 m³
- Кота депоније у основи – 73,0-78,0 mm
- Завршна кота депоније 122,5 mm

Према претходним подацима укупна запремина пепела и шљаке одложена на депонију ТЕНТ А процењена је на [52]:

$$V = 132\,258\,432,5 \text{ m}^3$$

Укупна запремина расположивог простора за депоновање пепела и шљаке у касетама 1, 2 и 3, где је према постојећој пројектној документацији предвиђено одлагање до коте 122,5 mnm, процењена је на основу геодетског снимка и пројектне документације, и износи [52]:

$$V = 18\,413\,595,0 \text{ m}^3$$

4.6 Депонија ТЕ Никола Тесла Б

Термоелектрана Никола Тесла Б (ТЕНТ Б) је лоцирана на десној обали реке Саве, 50 km узводно од Београда између насеља Скела и Ушће, на подручју Ворбис, око 18 km узводно од термоелектране Никола Тесла А. (Слика 4.21). Термоелектрана као и депонија пепела удаљене су 50 km од Београда. Налазе се на територији општине Обреновац и између насеља Ушће, Дрен, Грабовац, Скела, Ратари, Орашац и поред реке Вукићевице [53].

Прва фаза изградње термоелектране обухватила је изградњу два блока Б1 и Б2, укупне инсталисане снаге 1240 MW (2x620 MW), док је другом фазом била предвиђена изградња још два идентична блока у наставку постојећих блокова, тако да главни погонски објекат чини јединствену грађевинску целину. Блок Б1 пуштен је у погон у новембру 1983. године, а блок Б2 у новембру 1985. године. У протеклом периоду ангажовање блокова је било преко 7.500 сати на годишњем нивоу, где се просечно произведе око 10 милијарди киловата електричне енергије годишње. ТЕНТ-Б користи угаљ из колубарског угљеног басена [53].



Слика 4.21 ТЕ Никола Тесла Б [53]

Депонија пепела и шљаке ТЕНТ Б налази се на удаљености од око 5 km југозападно од багер станице у Ворбису код Обреновца тј. око 26 km од Обреновца. Западна половина депоније смештена је поред корита реке Вукићевице. Целокупна депонија пепела у иницијалном облику има укупну површину од око 600 ha. Подељена на три једнаке касете површине по 200 ha преградним насипима (слика 4.22). Предвиђено је да се касета 3 активира тек након доградње нових блокова термоелектране (3. и 4. блок). Како то до данас није урађено, у функцији су само касете 1 и 2. Депонија је димензионисана за смештај око 140.000.000 t пепела и шљаке. До сада су у експлоатацији, као активна или резервна, наизменично коришћене две касете. Тренутно је активна касета 2, а касета 1 је пасивна [53].



Слика 4.22 Депонија пепела и шљаке ТЕНТ Б [53]

Технологија прикупљања, транспорта и одлагања пепела је промењена са ретке на густу мешавину пепела и воде, 4. октобра 2009. године је блок Б2 повезан на нов систем, док је блок Б1 је повезан 30. маја 2010. године. Од термоелектране до депоније пепела по траси дугој 4200 m постављена су три цевовода $\text{Ø } 559 \times 8 \text{ mm}$ на бетонским ослонцима, који су се у користили за транспорт ретке хидромешавине пепела и шљаке (тренутно се користи један за транспорт повратне воде са депоније). На истој траси су постављена и три цевовода $\text{Ø } 273 \times 8 \text{ mm}$ за транспорт густе хидромешавине који су у функцији [53].

Топлотна вредност угља који сагорева се креће око 6.700 kJ/kg. Садржај пепела у угљу од 15%. У табели 4.13 и 4.14 је приказано како се крећу садржаји који су испитани силикатном анализом пепела и шљаке насталих сагоревањем угља у ТЕНТ Б [53].

Табела 4.13 Хемијски састав пепела ТЕНТ Б [53]

Компонента	Садржај (%)
SiO ₂	55.09 - 57.58
Fe ₂ O ₃	4.88 - 5.96
Al ₂ O ₃	22.68 - 24.92
CaO	5.97 - 6.74
MgO	2.03 - 2.57
SO ₃	1.55 - 2.36
P ₂ O ₅	0.04 - 0.05
TiO ₂	0.55 - 0.63
Na ₂ O	0.44 - 0.49
K ₂ O	0.90 - 0.99
CO ₂	0.25 - 0.50
CaO (активни)	0.17 - 0.29
Губитак жарењем	2.14 - 2.51
Реакција	базна

Табела 4.14 Хемијски састав шљаке ТЕНТ Б [53]

Компонента	Садржај (%)
SiO ₂	49.29 - 56.70
Fe ₂ O ₃	5.16 - 6.83
Al ₂ O ₃	12.25 - 15.70
CaO	4.08 - 6.21
MgO	2.07 - 2.73
SO ₃	1.63 - 2.15
P ₂ O ₅	0.03 - 0.06
TiO ₂	0.58 - 0.65
Na ₂ O	0.45 - 0.60
K ₂ O	0.91 - 1.11
CO ₂	0.37 - 0.72
CaO (активни)	-
Губитак жарењем	12.04 - 20.18
Реакција	базна

У табели 4,15 дати су специфична и запреминска маса пепела и шљаке.

Табела 4.15 Специфична и запреминска маса пепела и шљаке ТЕНТ Б [53]

Сировина	Специфична маса, (g/cm ³)	Запреминска маса, (g/l)	
		Растресито стање	Збијено стање
Пепео (комполит)	2,08 - 2,15	652,40	795,10
Шљака	2,10 - 2,20	503,80	560,10

Средњи пречник зрна пепела за композит износи $d_{50} = 110 \mu\text{m}$. Средњи пречник зрна шљаке за композит износи $d_{50} = 1,1 \text{ mm}$ [53].

За еквивалентни број радних сати термоелектране од 6.000 часова и података о утрошеним количинама угља за сагоревање, годишња продукција пепела и шљаке процењена је на 2 100 000 t/god. Садржај шљаке у укупним продуктима сагоревања износи око 8%. Ова количина преведена на запремину потребног простора износи 2 333 333 m³/god [53].

На основу ситуационе карте завршне контуре депоније пепела и шљаке ТЕНТ Б која се налази као прилог у студији „Свеска б: Процена коначне вредности затварања депоније ТЕ Никола Тесла Б“ [53] и оријентационих попречних профила на делу са депонованим материјалом одређени су следећи подаци:

- Површина депоније у основи – 600 ha
- Површина завршне контуре депоније – 3 052 600,0 m²
- Површина косина депоније – 959 901,3 m²
- Кота депоније у основи – 76,0 mnm
- Завршна кота депоније – 107,0 mnm

Према претходним подацима укупна запремина пепела и шљаке одложена на депонију ТЕНТ Б процењена је на:

$$V = 76\,014\,339,6 \text{ m}^3$$

Укупна запремина расположивог простора за депоновање у касетама 1 и 2, које су према постојећој пројектној документацији предвиђене за одлагање до коте 107,0 mnm, која је довољна за 10,8 година, износи:

$$V = 25\,237\,244,0 \text{ m}^3$$

5 ЕЛЕМЕНТИ РЕТКИХ ЗЕМАЉА

Елементи ретких земаља (скраћено REE¹) су група од 17 хемијски сличних елемената метала. Према IUPAC-у дефинисани су као група од 15 елемената из групе лантаноида, плус елементи итријум и скандијум (слика 5.1). У групи лантаноида су елементи [54]:

- Лантан – Lanthanum – La
- Церијум – Cerium – Ce
- Празеодимијум – Praseodymium – Pr
- Неодимијум – Neodymium – Nd
- Прометијум – Promethium – Pm
- Самаријум – Samarium – Sm
- Еуропијум – Europium – Eu
- Гадолинијум – Gadolinium – Gd
- Тербијум – Terbium – Tm
- Диспрозијум – Dysprosium – Dy
- Холмијум – Holmium – Ho
- Ербијум – Erbium – Er
- Тулијум – Thulium – Tm
- Итербијум – Ytterbium – Yb
- Лутецијум – Lutetium – Lu

¹ REE = Rare Earth Elements

Mendeleev's Periodic Table of Elements

Table of Common Polyatomic Ions

acetate	$\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2^-$	silicate	SiO_3^{2-}
chlorate	ClO_3^-	sulfate	SO_4^{2-}
hydroxide	OH^-	thiosulfate	$\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$
nitrate	NO_3^-	arsenate	AsO_4^{3-}
permanganate	MnO_4^-	phosphate	PO_4^{3-}
carbonate	CO_3^{2-}	ammonium	NH_4^+
chromate	CrO_4^{2-}	hydronium	H_3O^+
dichromate	$\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$		

Element categories

- Alkali metals
- Alkaline-earth metals
- Transition metals
- Other metals
- Hydrogen
- Semiconductors
- Halogens
- Noble gases
- Other nonmetals

State of matter at 25 °C

Gas	Liquid	Solid	Artificially prepared	Unknown
-----	--------	-------	-----------------------	---------

Selected Oxidation States

Atomic Number

Symbol

Electron Configuration

Atomic Mass

Слика 5.1 Менделјејев периодни систем елемената – елементи ретких земаља уоквирени црвеном бојом [54]

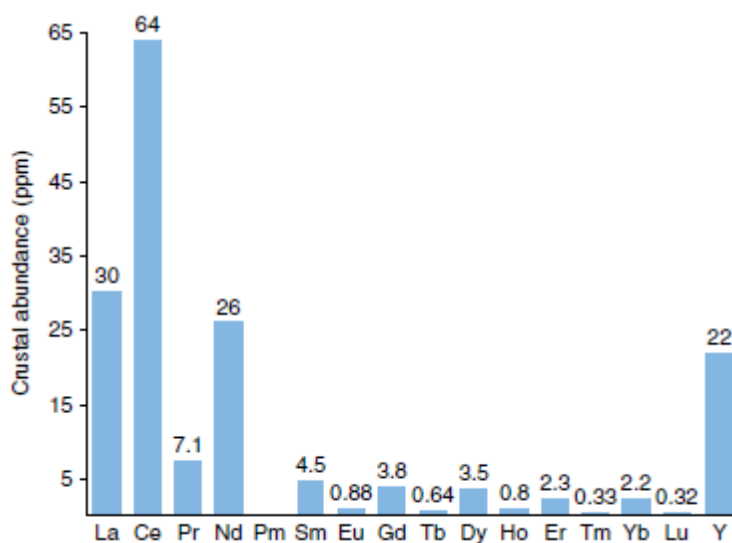
У пракси, укључивање скандијума у групу ретких земаља није од посебне помоћи јер се он по природи понаша поприлично другачије од осталих елемената из ове групе. Такође, елемент прометијум из групе лантаноида има кратко време полураспада па је стога изузетно редак. Ово оставља осталих 14 елемената из групе лантаноида и итријум који се могу користити у технолошке сврхе [55].

5.1 Назив

Први елемент из ове групе који је пронађен био је итријум, а пронашао га је фински хемичар и минералог Јохан Гадолин (Johan Gadolin) крајем 18-ог века (1794.) [56]. Назив ретке земље води порекло из времена када је већина ових елемената откривена у 19-ом веку, осим раније поменутог итријума, као и лутецијума (1907.) и прометијума (1947.) који су откривени у 20. веку. Један од разлога што ови елементи носе назив ретке земље је тај што је до 19-ог века било познато само једно налазиште ових елемената, па су се сматрали ретким. Други

разлог је јер су се ретке земље прво екстраковале у виду оксида, а на француском језику, који је у то време био главни научни језик, реч „terra“ која је означавала оксид неког елемента, у преводу такође значи и „земља“ [54].

Ретке земље нису толико ретке као што им име каже. Лежишта руда која их садрже јесу прилично ограничена у броју, али је њихова заступљеност у земљиној кори прилично велика. Неки од заступљенијих елемената из ове групе имају заступљеност сличну као и хром, никл, бакар, цинк, молибден. Најчешћи елемент ретке земље је церијум (Ce), чија је заступљеност у земљиној кори 60 ppm, што га ставља на 27. место по заступљености у земљиној кори. На пример, олово има заступљеност 10 ppm и налази се на 37. месту. Исто тако, један од најређих елемената ретке земље, лутецијум, има заступљеност од 0,5 ppm, што је око 200 пута више у односу на злато (слика 5.2) [57].



Слика 5.2 Заступљеност REE у земљиној кори [55]

5.2 Физичке и хемијске карактеристике

Веома слично хемијско понашање елемената ретких земаља и њихово заједничко појављивање у природи, дуго је задавало проблеме приликом њиховог откривања, раздвајања и изоловања у чистом стању. Научницима је било потребно око 160 година да их изолују и идентификују. Експериментима је

потврђено да су велике сличности између ових елемената последица сличних електронских конфигурација. Последњих неколико деценија развиле су се поуздане методе за њихово издвајање, што је омогућило детаљнија физичка и хемијска испитивања [56], [58].

Ретке земље су меки метали, сребрне, сребрнасто беле или сиве боје. Великог су сјаја али лако потамне на ваздуху. Имају високу тачку топљења и високу електричну проводљивост. Такође имају магнетична и спектроскопска својства које их чине корисним за многе примене. Радије се везују за јако електронегативне елементе као што су кисеоник или флуор, и постоје веома мале разлике у растворљивости и формирању једињења ових елемената. Ретке земље се могу у природи заједно наћи у минералима, и у природи су најчешће у 3+ валентном стању [54], [55].

У табели 5.1 дате су неке од карактеристика ретких земаља:

Табела 5.1 Карактеристике REE [55]

Element	Hemijski simbol	Atomski broj	Atomska masa	Gustina na 25° (kg/m ³)	Таčka topljenja (°C)	Радијус катјона (pm)	Боја у воденим растворима
Skandijum	Sc	21	44,96	2992	1541	87,0	Bezbojan
Itrijum	Z	39	88,91	4475	1522	107,5	Bezbojan
Lantan	La	57	138,91	6174	918	121,6	Bezbojan
Cerijum	Ce	58	140,12	6711	798	119,6	Bezbojan
Prazeodimijum	Pr	59	140,91	6779	931	117,9	Žuto-zelen
Neodimijum	Nd	60	144,24	7000	1021	116,3	Roze (rose)
Prometijum	Pm	61	144,91	7220	1042	-	Roze (pink)
Samarijum	Sm	62	150,36	7536	1074	113,2	Žut
Europijum	Eu	63	151,96	5248	822	112,0	Bezbojan
Gadolinijum	Gd	64	157,25	7870	1313	110,7	Bezbojan
Terbijum	Tb	65	158,93	8267	1356	109,5	Bledo roze
Disprozijum	Dy	66	162,50	8531	1412	108,3	Bledo žuto-zelen
Holmijum	Ho	67	164,93	8797	1474	107,2	Žut
Erbijum	Er	68	167,26	9044	1529	106,2	Roze (pink)
Tulijum	Tm	69	168,93	9325	1545	105,2	Zelenkast
Yterbijum	Yb	70	173,04	6966	819	104,2	Bezbojan
Lutecijum	Lu	71	174,97	9842	1663	103,2	Bezbojan

Од свих ретких земаља, само један елемент је радиоактиван и нема стабилне изотопе, а то је прометијум (Pm). Сви остали елементи имају стабилне изотопе. Чак и изотопи неких елемената који имају ограничену стабилност, имају дуг период полураспада, па се могу сматрати стабилним. Прометијум се не може наћи у природи ни као слободан елемент, ни у једињењима. Он је синтетички произведен у нуклеарним реакторима [54].

5.3 Класификација ретких земаља

Геохемијски, ретке земље су подељене у две групе, лаке и тешке. У групи лаким елемената ретких земаља налазе се елементи са атомским бројем од 57 до 63, односно низ од лантана (La) до еуропијума (Eu). У групи тешких елемената

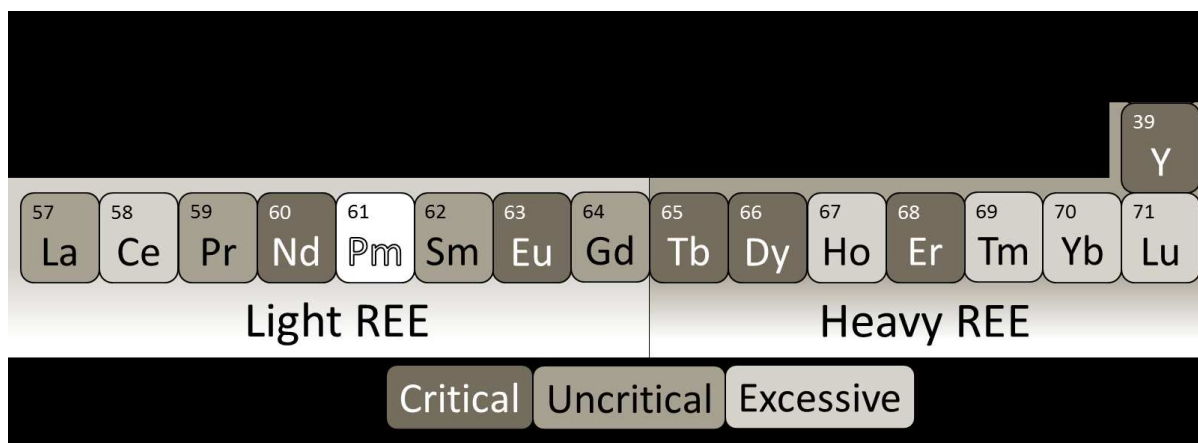
ретких земаља налазе се елементи са атомским бројем од 64 до 71, односно низ од гадолинијума (Gd) до лутецијума (Lu). Итријум (Y) иако је најлакши међу ретким земљама, сврстава се у тешке елементе ретких земаља због своје хемијске и физичке сличности са њима. Скандијум (Sc) није сврстан ни у једну од ове две групе [59] [60].

Лаки елементи ретких земаља процентуално чине већину ових елемената у минералима, док тешки чине само малу фракцију. Тешки елементи ретких земаља се због овога сматрају вреднијим [60]. Међутим, овај фактор не узима у обзир потражњу. Према томе, усвојена је и индустријска класификација која дели ретке земље на [61]:

- **Критичне** – итријум (Y), неодимијум (Nd), еуропијум (Eu), тербијум (Tb), диспрозијум (Dy) и ербијум (Er)
- **Некритичне** – лантан (La), празеодијум (Pr), самаријум (Sm), гадолинијум (Gd)
- **Сувишне** – церијум (Ce), холијум (Ho), тулијум (Tm), итербијум (Yb), лутецијум (Lu)

На пример, елементи тулијум, итербијум и лутецијум се сматрају сувишним упркос томе што су ретки у односу на друге елементе из ове групе. Разлог томе је то што је њихова примена мања и захтева мање количине, што значи да светска производња може да задовољи тренутну потражњу. Са друге стране, елемент неодимијум који је много заступљенији у природи сврстан је у критичне, јер је недовољно произведен у односу на своју високу потражњу [60].

На слици 5.3 приказана је карактеризација ретких земаља:



Слика 5.3 Карактеризација ретких земаља [60]

5.4 Примена елемената ретких земаља

Елементи ретких земаља имају широку лепезу употребе. Иако се често користе у малим количинама, постали су незаобилазни део у многим технологијама, посебно у дигиталним технологијама и технологијама за побољшање енергетске ефикасности. Пудери од церијум-оксида се и данас користе за полирање за све производе од полираног стакла. Церијум је такође један од најбитнијих компоненти у катализаторима за аутомобиле. Еуропијум је заслужан за црвену боју телевизора у боји. Употреба у перманентним магнетима је тренутно од највеће вредности на тржишту и предвиђа се да ће се само повећавати. $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ је најјачи познати перманентни магнет, док је SmCo_5 такође важан магнетни материјал, а мале количине Dy и Tb се замењују у $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ магнете да би се побољшала њихова својства и перформансе на вишим температурама [55].

Још неке од примена ретких земаља дате су у табели 5.2 која је преузета из рада [59]:

Табела 5.2 *Примена ретких земаља у различитим индустријама [59]*

Аутомобилска индустрија	Катализатори за контролу загађења; пуњиве батерије; горивне ћелије; боја за пластику
Индустрија керамике	Сензори кисеоника; конструкцијска керамика за лежајеве; превлака за млазне моторе; калупи за ливење; ватростални материјали; пигменти
Хемијска индустрија	Каталитички крекинг у рафинерији; фармацевтски производи; третман вода; катализатори; контрола влаге, сушење, и детекција
Одбрамбена индустрија	Ласери; пројектили на навођење; радари; уређаји за комуникацију
Електронска индустрија	Кондензатори; катоде; електроде; полупроводници; термистори; циркулатори;
Индустрија стакла	Полирање; Скидање боје; повећање рефракције; смањење дисперзије; апсорбери
Осветљење	Трихроматске флуоросцентне сијалице; живине сијалице; Ауерова мрежица; фарови;
Магнети	Звучници и слушалице; линеарни електромотори; ABS системи; електромотори; пумпе; системи за паљење
Магнетострикција	Сонарни системи; прецизни актуатори; сателитски системи
Медицина	Контрастна средства; магнетна резонантна томографија (MRI); Позитронска емисиона томографија (PET); радиотрасери
Металургија	Агенци за легирање за алуминијум, магнезијум, гвожђе, никл, и гвожђе alloys; superalloys; пирофорне легуре; кремени

5.5 Летећи пепео као сировина за добијање ретких земаља

Очекује се да ће се потражња за ретким земљама повећавати за 5-15% на годишњем нивоу, посебно за технологије за производњу чисте енергије [62].

Тренутно се више од 86% производње ретких земаља, скоро половина познатих резерви, и већина процеса обраде дешавају се у Кини [63]. У прошлости, тачније пре 2010. године, Кина је производила још већи проценат ретких земаља у односу на остатак света, чак 97%. Због оваквог монопола који је имала над ретким земљама, Кина је 2010. године ограничила извозну квоту, што је изазвало раст цена ових елемената широм света [64]. Због тога, у 2010. и 2011. години глобална потражња премашила је производњу за отприлике 3000 тона [65]. Ово је подстакло истрагу о новим рудницима. Од тада, отварање нових рудника је смањило зависност од Кине у погледу ретких земаља. Ипак, могу проћи године пре него што нови рудник постане потпуно оперативан. Због тога је кренуло истраживање о алтернативним изворима елемената ретких земаља, а један од таквих извора је свакако летећи пепео.

Са 750 милиона тона произведеног летећег пепела на годишњем нивоу, поред тога што представља огроман ток отпада, могао би да буде и огроман извор елемената ретких земаља, под условом да се пронађу исплативе методе екстракције [19]. Летећи пепео представља обећавајући материјал за добијање са геохемијског и физичког аспекта. Неки пепели имају концентрације ретких земаља једнаке оним у рудним налазиштима, до 0,1% масе, односно 1000 mg/kg. Док је садржај критичних ретких земаља и виши него у налазиштима, преко 30% [61] [66]. Предност пепела са физичког аспекта је та што не захтева ископавање, нити додатно уситњавање као што то захтева руда, већ је одмах спреман за хемијски третман [67]. Још једна предност пепела у односу на ископавање је та што се у налазиштима ретких земаља могу наћи високу концентрације уранијума и торијума, који онда резултује великим количинама опасног отпада.

Летећи пепео је такође бољи извор ретких земаља од шљаке, иако оба настају од истог угља. Постоје 3 разлога зашто је то тако:

1. Количина летећег пепела која се произведе на годишњем нивоу је много већа од количине шљаке, који чини само 10-20% од укупне количине пепела од угља.

2. Летећи пепео има финију величину честица и мању количину несагорелог угља, као и већу количину аморфне стакласте фазе, што чини ову врсту пепела пожељнијом за хемијску екстракцију и захтева мању претходну физичку обраду или је не захтева уопште.
3. Већа количина ретких земаља је везана за аморфну фазу, која је подложнија лужењу уз помоћ киселине.

6 ПРОЦЕНА ЖИВОТНОГ ЦИКЛУСА (LCA)

Међународна организација за стандардизацију је објавила систематизовани оквир за спровођење „процене животног циклуса“ (LCA²) у периоду 1997-2000. године, што је резултирало стандардима ISO 14040, 14041, 14042 и 14043 [68]. Стандард ISO 14040 је 2006. године ревидиран и представљен је нови стандард ISO 14044. Формалне промене новог стандарда обухватају смањен број стандарда, смањен број анекса и смањен број страница које садрже захтеве. Све промене имају за циљ да стандард учине читљивијим и приступачнијим [69].

Група стандарда ISO 14000 се првенствено бави управљањем животном средином, које се првенствено фокусира на минимизирање утицаја на животну средину и стално побољшање утицаја на животну средину [70].

Међутим, пошто LCA разматра еколошке аспекте и потенцијалне утицаје производа или система услуга током читавог животног циклуса, LCA постаје веома користан метод за истраживања која се односе на проблем одржибог развоја, чистије производње, уштеде енергије, и заштите животне средине. LCA може бити од велике помоћи и у побољшању еколошких аспеката производа у различитим фазама његовог животног циклуса, као подршка у доношењу одлука у индустрији, владиним, или невладиним организацијама [71].

Постоје четири фазе у LCA студији (слика 6.1) [72]:

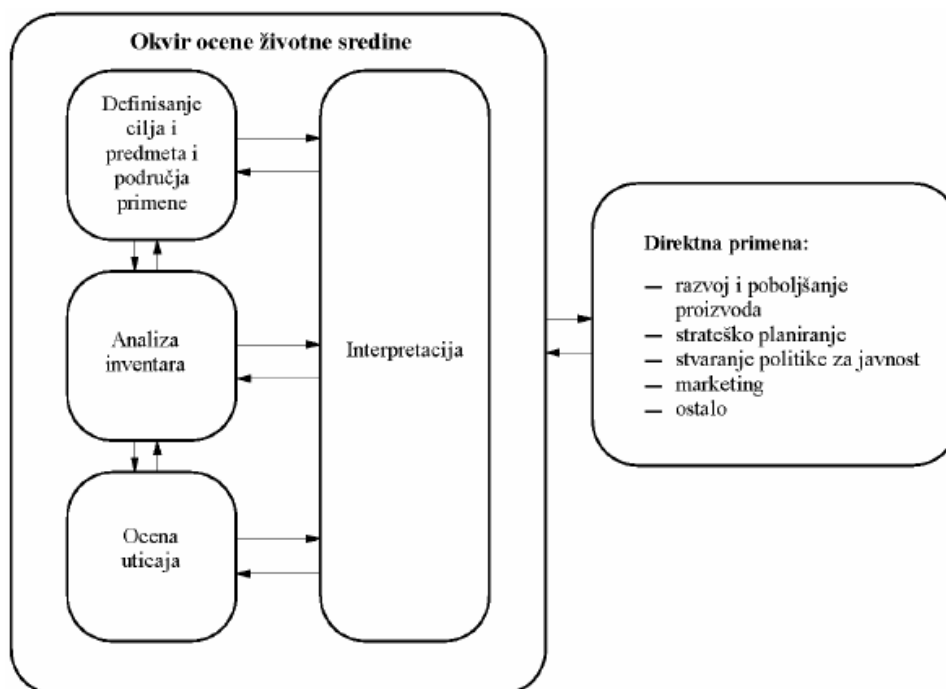
1. Фаза дефинисања циља, предмета и подручја примене
2. Фаза анализе инвентара (LCI³)
3. Фаза оцењивања утицаја (LCIA⁴)
4. Фаза интерпретације

² LCA – Life Cycle Assessment

³ LCI – Life Cycle Inventory

⁴ LCIA – Life Cycle Impact Assessment

Дефинисање циља и подручја примене је најважнија компонента LCA. Он даје опис система производа у смислу граница система и функционалне јединице [73]. Фаза анализе инвентара је квалитативна и/или квантитативна анализа утрошених ресурса и произведених емисија у животном циклусу производа [71]. Фаза процене утицаја пружа индикаторе и основу за анализу потенцијалног доприноса екстракције ресурса и отпада/емисија у инвентару, и дели их на неколико потенцијалних утицаја [73]. Ови утицаји се деле у три опште категорије: људско здравље, здравље животне средине, и утрошак ресурса [71]. Интерпретација животног циклуса је систематска техника за идентификацију, квантификацију, проверу и процену информација добијених као резултат фазе оцењивања утицаја [74].



Слика 6.1 Фазе и оквир LCA [72]

6.1 Основа за израду LCA

LCA модел направљен је на основу процеса добијања ретких земаља из летећег пепела који је предложен у раду који су објавили Wang и остали [75] 2019. године.

Електрфилтерски пепео састоји се од аморфне стакласте фазе, која је заступљена у проценту од 50-90% [76]. Остатак представља кристална фаза коју обично чине кварц, оксиди гвожђа, мулит, кречњак и периклас [77], [78]. Због своје разлике у хемијској реактивности, аморфна стакласта фаза и кристална фаза у пепелу могу бити одвојене флуороводоничном киселином [79], [80]. У већ поменутом раду [75], коришћен је раствор 4% флуороводоничне киселине како би се раздвојиле аморфна и кристална фаза. Растварање пепела у флуороводоничној киселини показало је да је ~90% свих ретких земаља у летећем пепелу везано за аморфну фазу.

Иако је флуороводонична киселина ефективна у растварању аморфне фазе, што за последицу има издвајање преко 90% REY⁵ из летећег пепела у течност која се може екстраховати, ова киселина није идеална за практичну екстракцију из два разлога [75]:

1. Високе концентрације Si и Al ће разблажити течност богату REY и негативно утицати на њихову екстракцију и одвајање
2. Флуороводонична киселина је веома корозивна течност и снажан контактни отров, због чега је њена примена великих размера у индустрији ограничена.

Због тога је као сигурнија алтернатива као екстрактант изабрана хлороводонична киселина (HCl). Пре лужења хлороводоничном киселином изведена је и процедура десиликације, лужење коришћењем натријум хидроксида (NaOH), како би се уклонио реактивни SiO₂ и пепео додатно обогатио са ретким земљама. Експерименти лужења натријум хидроксидом и хлороводоничном киселином оптимизовани су дизајнирањем ортогоналних низова од 4 фактора на 3 нивоа, узимајући у обзир 4 главна фактора утицаја: концентрацију екстрактанта, однос течности и чврсте материје, температуру лужења и време лужења (табеле

⁵ У овој студији [75] аутори су користили скраћеницу REY (Rare earths and yttrium)

6.1 и 6.2). Тестиране су различите комбинације и урађене анализе како би се дошло до оптималне комбинације ова 4 фактора [75].

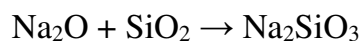
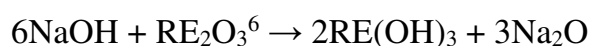
Табела 6.1 Поставка фактора и нивоа за тестове луђењења NaOH [75]

Фактор Ниво	Концентрација NaOH (%)	Однос NaOH:пепео (ml:g)	Температура (°C)	Време (h)
Ниво 1	20	2:1	90	2
Ниво 2	30	6:1	120	4
Ниво 3	40	10:1	150	6

Табела 6.2 Поставка фактора и нивоа за тестове луђењења HCl [75]

Фактор Ниво	Концентрација HCl (M)	Однос HCl:пепео (ml:g)	Температура (°C)	Време (h)
Ниво 1	4	20:1	40	2
Ниво 2	6	30:1	60	4
Ниво 3	8	40:1	80	6

Луђење натријум хидроксидом које служи у сврху десиликације одвија се према следећим упрошћеним хемијским реакцијама [75]:



Као што се може видети на основу реакција, NaOH је уведен како би конвертовао ретке земље у нерастворљиве чврсте материје (хидроксиде ретких земаља), док се SiO₂ уклања претварањем у растворљиво стање (натријум силикате).

⁶ RE₂O₃ у реакцији представља оксид ретких земаља

Анализама дошло се до резултата да је оптимална комбинација фактора који утичу на лужење натријум хидроксидом следећа [75]:

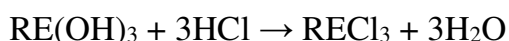
- Концентрација екстрактанта (NaOH) – 40%
- Однос NaOH : пепео – 10 ml : 1 g
- Температура лужења – 150 °C
- Време лужења – 2 h

Оваква комбинација доводи до уклањања SiO₂ у проценту од 41,10%. У поређењу са пепелом пре десиликације, у појединачним концентрацијама ретких земаља, укупно обогаћење износи 39,43% што је веома близу ефикасности уклањања SiO₂. Битно је напоменути и да су концентрације ретких земаља у низу од лантана до холијума више у пепелу након десиликације у односу на онај пре десиликације, док су концентрације елемената у низу од ербијума до лутецијума нешто ниже у пепелу након десиликације [75]. У табели 6.3 дате су концентрације ретких земаља у пепелу пре и после десиликације.

Табела 6.3 Садржај ретких земаља ($\mu\text{g/g}$) и SiO_2 (%) у пепелу пре и после десиликације [75]

Елемент	Пепео пре десиликације	Пепео након десиликације
La	149,6	239,0
Ce	234,0	356,3
Pr	32,70	46,28
Nd	120,8	157,7
Sm	22,84	28,65
Eu	4,286	5,085
Gd	25,55	26,49
Tb	3,474	4,047
Dy	20,81	21,22
Y	110,1	138,4
Ho	3,987	4,033
Er	11,91	11,51
Tm	1,649	1,601
Yb	11,21	10,50
Lu	1,547	1,474
REE	754,5	1052
SiO_2	43,56	25,66
Укоњен SiO_2	-	41,10
Обогаћење REY	-	39,43

Пепео који је прошао десиликацију, односно лужење натријум хидроксидом даље иде на лужење хлороводоничном киселином. Дата је поједностављена хемијска реакција лужења [75]:



Као што се може видети из реакције, HCl се користи како би растворио нерастворљиве хидроксиде ретких земаља и произвео растворљиве хлориде ретких земаља [75].

Анализама дошло се до резултата да је оптимална комбинација фактора који утичу на лужење хлороводоничном киселином следећа:

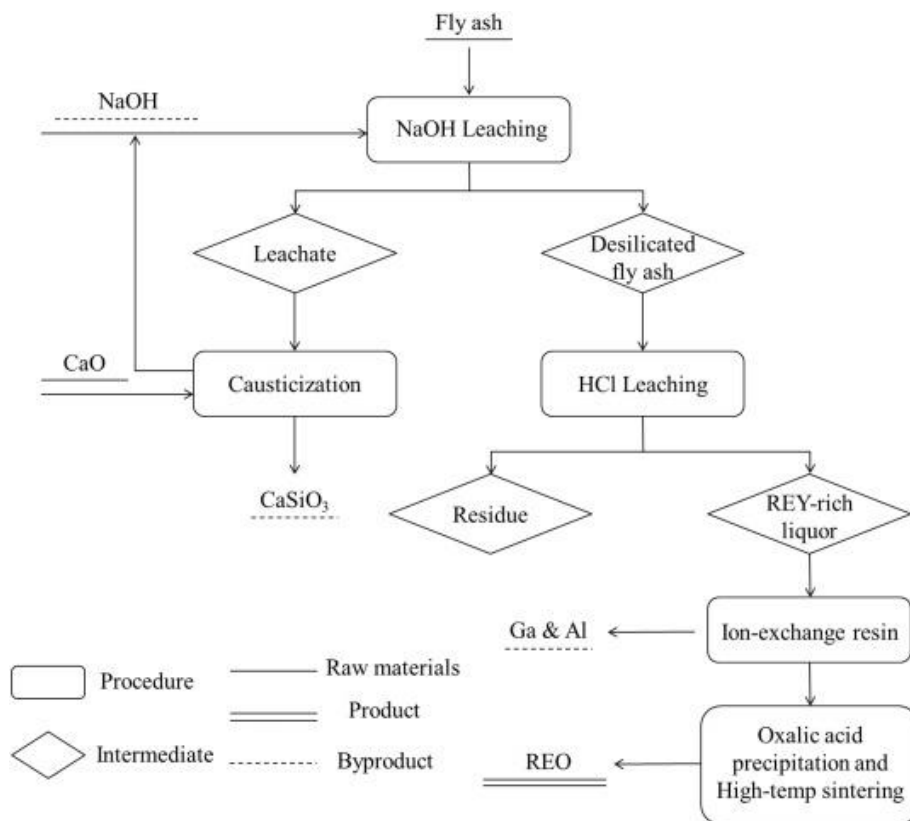
- Концентрација екстрактанта (HCl) – 8M^7

⁷ 8M представља моларну концентрацију хлороводоничне киселине

- Однос HCl : пепео – 30 ml : 1 g
- Температура лужења – 60 °C
- Време лужења – 2 h

Оваква комбинација фактора доводи до успешности лужења пепела који је прошао десиликацију у проценту од 88,15%. У поређењу са овим, највећи проценат успешности на пепелу који није претходно прошао десиликацију износи 32,36% [75]. Ово указује да сама хлороводонична киселина није довољна да у доброј мери раствори компоненте у пепелу које садрже ретке земље [81]. Међутим, третман натријум хидроксидом пре хлороводоничне киселине може у великој мери побољшати перформансе лужења хлороводоничном киселином.

На основу резултата екстракције, у раду [75] предложен је комплетан процес екстракције ретких земаља из летећег пепела, у коме се разматра и рециклажа још неких сировина (слика 6.2). Како је пепео из угља Луцоу (Luzhou) богат не само ретким земљама, него и другим вредним металима као што су галијум (Ga) и алуминијум (Al), који су такође део нечистоћа у течности богатој ретким земљама након лужења хлороводоничном киселином. Галијум и алуминијум се могу екстраховати заједно са ретким земљама јонском изменом, због својих сличних хемијских својстава [75]. Што се тиче одвајања појединачних ретких земаља. Могу се користити уобичајене металуршке методе као што су преципитација оксалном киселином и високотемпературно синтеровање [82]. Иако ефикасност екстракције ретких земаља може значајно да варира у зависности од различитих извора пепела, предлаже се комплетна процедура екстракције како би се обезбедила референца за будуће примене.



Слика 6.2 Комплетан процес екстракције ретких земаља из летећег пепела [75]

6.2 Циљ, предмет и подручје примене

Лигнит представља главни и стратешки енергент у Републици Србији, због својих великих геолошких резерви [8], [9]. На њему се заснивао и засниваће се енергетски и економски развој у наредном периоду [13]. Због високог садржаја влаге и ниске топлотне моћи [10], није га исплативо транспортовати и углавном се користи у близини места производње, за добијање електричне енергије, у чијој производњи учествује са 65-70% [13]. Поред проблема загађења ваздуха, воде, земљишта, ефекта стаклене баште, и директног утицаја на људско здравље којем доприносе како само сагоревање угља, тако и нуспродукти сагоревања, велики проблем су и велике количине пепела које настају као отпад услед сагоревања [2], [3], [7], [16].

У Србији се годишње произведе око 6 милиона тона пепела [10]. Занемарљиво мале количине пепела буду искоришћене у цементној индустрији док највећи део буде депонован у близини места настанка [42]. Овакав „третман“ пепела има за последицу

заузимање више од 1500 ha обрадивог земљишта [13], док се на депонијама у Србији налази око 250 милиона тона пепела [48], [49], [50], [51], [52], [53].

Многа истраживања у свету показују да пепео осим у грађевинској индустрији може да се користи и за валоризацију критичних елемената као што су елементи ретких земаља. [75], [83], [84], [85], [86]. Валоризација и искоришћење ових елемената је и данас предмет великог броја истраживања кроз разне пројекте какав је и RECO2MAG (<https://reco2mag.rgf.bg.ac.rs/>). Употребом пепела у сврху екстракције ових критичних сировина повећава се економски потенцијал овог рударског отпада. Осим тога, постоје и еколошки и социјални ефекат који се огледају у смањењу утицаја рударског отпада на животну средину и стварању нових радних места за локално становништво.

Циљ овог мастер рада је да се процени утицај депоније летећег пепела и третмана летећег пепела на животну средину. У раду је обрађен сценарио за екстракцију ретких земаља из летећег пепела. Сврха рада је да пружи референцу за нека будућа истраживања, као и да испитани сценарио у будућности може да се упореди са неким другим сценаријима екстракције или третмана пепела.

6.2.1 Функција и функционална јединица

Функције система који се проучава морају јасно да буду описане, а функционална јединица мора да буде у складу са циљем и предметом студије. Функционална јединица је квантитативно исказан учинак система производа који се користи као референтна јединица. Првенствена сврха функционалне јединице је да обезбеди референцу у односу на коју ће се подаци о улазу и излазу нормализовати. Из тог разлога функционална јединица мора бити јасно дефинисана и мерљива [87].

Функција испитана у овој LCA студији је екстракција елемената ретких земаља из депонованог пепела насталог сагоревањем лигнита. Функционална јединица одабрана за ову студију је **екстракција ретких земаља из 1 килограма летећег пепела**. Ова функционална јединица је одабрана како би била упоредива са масом ретких земаља добијеном из неких других процеса екстракције.

6.2.2 Границе система

Границе система дефинишу јединичне процесе које треба укључити у оцењивање животног циклуса. Избор границе система мора бити у складу са циљем студије. Критеријуми коришћени за постављање границе система морају се утврдити и објаснити [87].

Границе система дефинисане су на основу већ поменутог дијаграма процеса екстракције ретких земаља (слика 6.2). Међутим, у овом раду неће бити узети у обзир сви кораци у процесу. Како се ради о пепелу на депонијама у Србији а не о пепелу у Луцоу у Кини, сам састав пепела је другачији. Пошто анализе о количинама критичних елемената у пепелу у Србији још увек нису урађене, па тако није позната ни количина галијума (Ga), поступак јонске измене за екстракцију галијума неће бити узет у разматрање. Такође, због недовољно података неће се разматрати третман процедурне воде након лужења натријум хидроксидом, као ни процес раздвајања појединачних ретких земаља. Према томе, процеси који ће се узети у разматрање су:

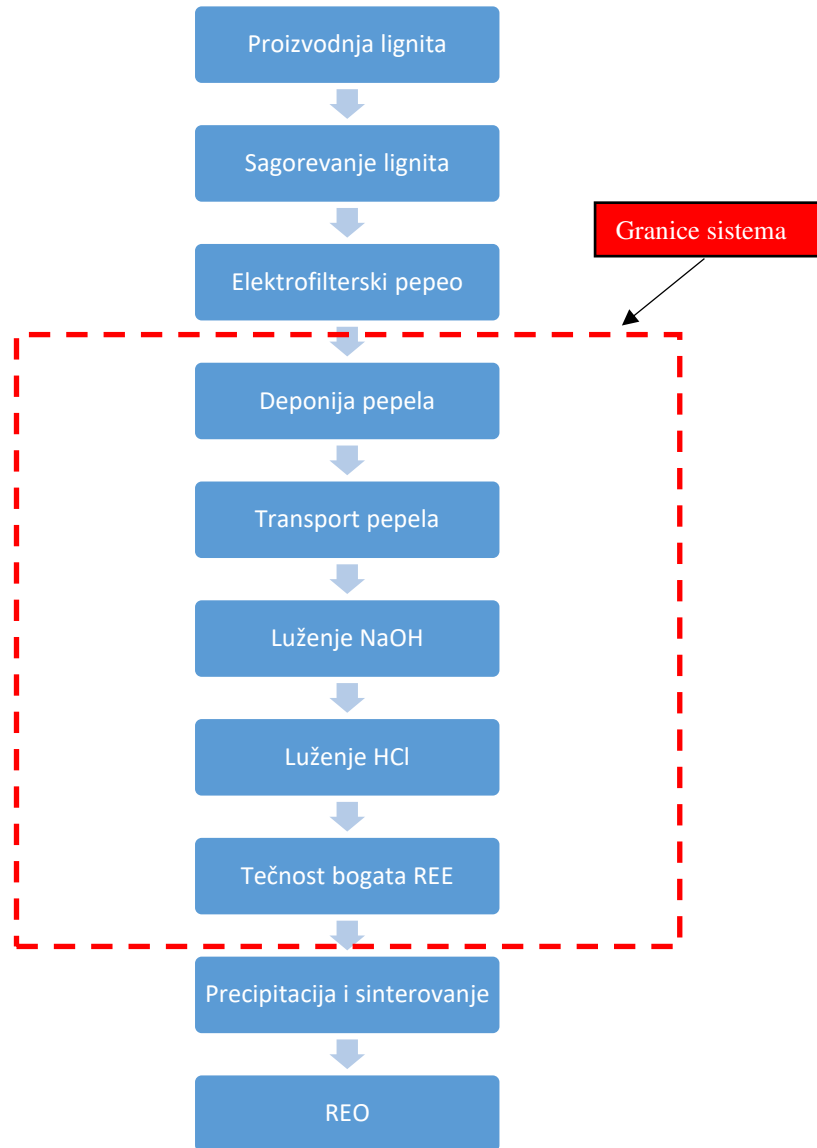
- Почетна тачка биће пепео одложен на депонију
- Транспорт пепела камионима од депоније до постројења где ће се вршити екстракција ретких земаља
- Лужење натријум хидроксидом (NaOH)
- Лужење хлороводоничном киселином (HCl)
- Крајња тачка биће течност богата ретким земљама након лужења
- Производња хлороводоничне киселине (HCl)
- Производња натријум хидоксида (NaOH)

Процеси који се неће узимати у обзир су:

- Производња лигнита
- Транспорт лигнита од рудника до термоелектране
- Процес сагоревања лигнита у термоелектрани где настаје пепео
- Депоновање пепела

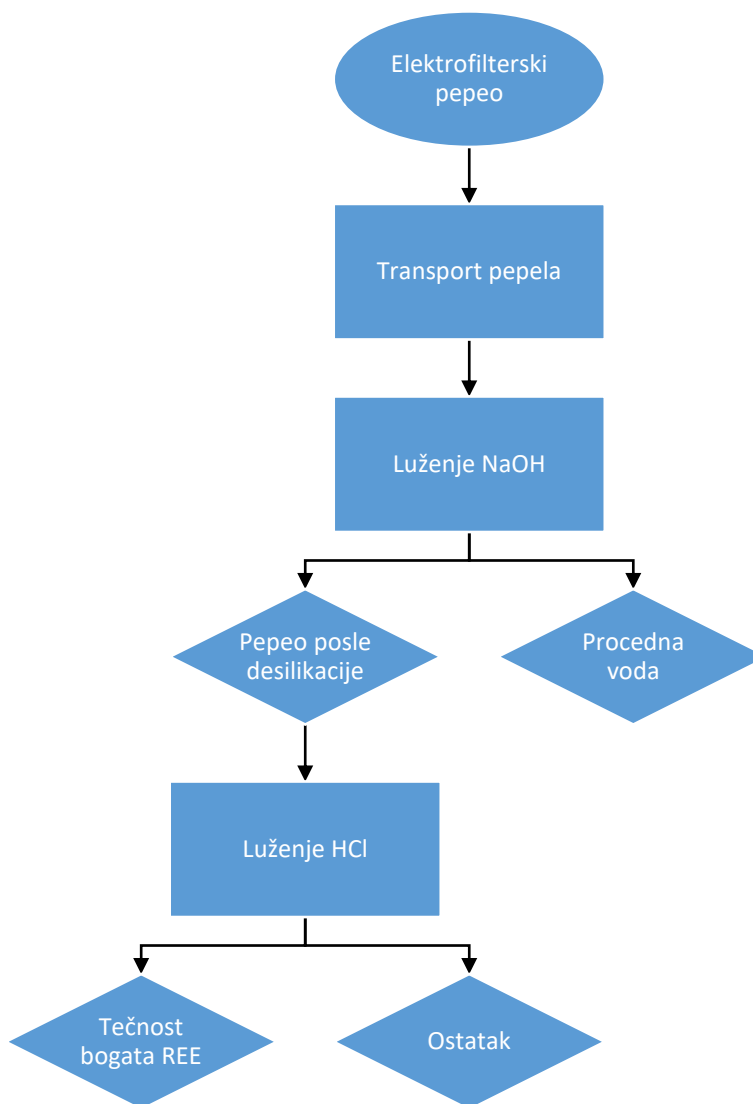
- Третман процедурне воде након лужења натријум хидроксидом, односно процес каустицизације, у којем би се рециклирао натријум хидроксид
- Јонска измена у циљу екстракције галијума и алуминијума
- Процес раздвајања појединачних ретких земаља методама преципитације уз помоћ оксалне киселине и високотемпературним синтерованем
- Производња инфраструктуре (транспортна средства, путеви, машине и уређаји који се користе у процесу екстракције) и њихово одржавање (резервни делови)

На следећој слици (слика 6.3) поједностављени процесни дијаграм даје илустрацију граница система које се разматрају за процес екстракције ретких земаља.



Слика 6.3 *Границе система*

Узимајући у обзир комплетан процес екстракције ретких земаља (слика 6.2) и претходно одређене границе система (слика 6.3) направљен је процесни дијаграм који приказује процесе обрађене у овој LCA студији (слика 6.4).



Слика 6.4 Процесни дијаграм

6.3 Квалитет података

Екстракција ретких земаља из летећег пепела није до сада коришћена у пракси на индустријском нивоу. Такође, у базама података нису пронађени подаци о процесима екстракције ретких земаља из летећег пепела. Узимајући ове две ствари у обзир, процеси који се тичу екстракције креирани су на основу података из литературе.

6.3.1 Географски оквир

У погледу географског оквира, овај ЛЦА рад се фокусира на екстракцију ретких земаља из летећег пепела које би се одвијало у Србији, због саме количине пепела који се налази на депонијама. Према томе, за податке који су потребни за екстракцију тражено је да одговарају географском простору Републике Србије где год је то било могуће. Где то није било могуће, узети су подаци на глобалном нивоу, с тим да што прецизније одговарају потребним условима из литературе.

6.3.2 Временски оквир

За референтни период тражени су подаци што ближи данашњем времену. За већину података референтни период је за до 3-4 године уназад. Где није било могуће наћи ове податке, узети су најновији могући подаци.

6.4 Анализа инвентара животног циклуса (LCI)

Подаци о процесима за екстракцију ретких земаља прикупљени су из база података Ecoinvent и ELCD. Такође, креирани су нови процеси коришћењем података из ових база. У табели 6.4 дат је преглед података искоришћених у овом раду.

Табела 6.4 Инвентар животног циклуса за процес екстракције ретких земаља

Materijal/Proces	Izvor	Referentni period
Сировине		
Hlorovodonična kiselina, HCl, proizvodnja – GLO	Ecoinvent	1997-2020
Natrijum-hidroksid, NaOH, proizvodnja – GLO	Ecoinvent	2002-2019
Proizvodnja		
Luženje natrijum-hidroksidom, NaOH – RS	Proces kreiran kombinovanjem podataka iz Ecoinvent i ELCD 3.2 baza podataka	2023
Luženje hlorovodoničnom kiselinom, HCl – RS	Proces kreiran kombinovanjem podataka iz Ecoinvent i ELCD 3.2 baza podataka	2023
Dodatni podaci		
Električna energija, lignit – RS	Ecoinvent	1980-2019
Transport elektrofilterskog pepela sa deponije, kamion – RS	Proces kreiran korišćenjem podataka iz ELCD 3.2	2005-2010

6.4.1 Хлороводонична киселина (HCl) – производња

Овај процес представља производњу 1 kg хлороводоничне киселине. Процес укључује сагоревање гаса водоника и хлора у гасној комори за сагоревање, при чему се производи гас хлороводоник. Гас хлороводоника затим пролази кроз хладњак до апсорбера где се уводи процесна вода, стварајући водени раствор хлороводоничне киселине.

Пошто нису постојали подаци за производњу 26% хлороводоничне киселине која је потребна према литератури, узети су најприближнији могући подаци, односно подаци за раствор 30% киселине.

6.4.2 Натријум хидроксид (NaOH) – производња

Овај процес представља производњу 1 kg раствора натријум хидроксида у хлор-алкалној електролизи. Пошто нису пронађени подаци о производњи 40 % натријум хидроксида, узети су најприближнији могући подаци, односно подаци за раствор 50 % натријум хидроксида.

6.4.3 Производња електричне енергије из лигнита

Овај процес представља производњу електричне енергије високог напона у термоелектранама на угаљ у Србији.

6.4.4 Транспорт летећег пепела са депоније – камион

Овај процес представља транспорт 1 kg летећег пепела са депоније до постројења где би се вршила екстракција ретких земаља из пепела. Удаљеност депоније од постројења за екстракцију где би пепео требало да се транспортује узета је да буде 1 km. Узети су подаци за камион укупне масе 40 тона а максималне носивости 27 тона.

6.4.5 Лужење натријум хидроксидом (NaOH)

Овај процес је представља лужење летећег пепела транспортованог са депоније коришћењем натријум хидроксида у сврху десиликације. Процес је креиран на основу података из литературе, уз помоћ података из база података Ecoinvent и ELCD 3.2. Улазни подаци за овај процес су натријум хидроксид, транспортовани пепео са депоније и електрична енергија добијена из лигнита.

6.4.6 Лужење хлороводоничном киселином (HCl)

Овај процес је представља лужење летећег пепела након десиликације коришћењем хлороводоничне киселине. Процес је креиран на основу података из

литературе, уз помоћ података из база података Ecoinvent и ELCD 3.2. Улазни подаци за овај процес су хлороводонична киселина, пепео након десиликације и електрична енергија добијена из лигнита.

6.5 Прорачун

Како је функционална јединица одабрана за ову студију „екстракција ретких земаља из 1 килограма летећег пепела“, потребно је урадити прорачун како би се знало колико је сировина, енергије и супстанци које учествују у екстракцији потребно за овај процес.

Како концентрације ретких земаља у пепелу на депонијама у Србији још нису познате, за потребе прорачуна узете су просечне светске концентрације. Просечна концентрација ретких земаља за пепео настао од лигнита се у раду [88], а који се позива на рад [89], наводи да је 378 ppm, што је исто као и 378 mg/kg. Ово значи да 1 kg пепела садржи 378 mg ретких земаља.

6.5.1 Прорачун за лужење натријум хидроксидом (NaOH)

Лужење натријум хидроксидом служи да би се урадила десиликација пепела, односно да би се уклонио SiO₂. Пепео на депонијама у Србији садржи у просеку 52% SiO₂, а за потребе прорачуна је усвојено да је то 50%, што значи да је од 1 kg пепела 0,5 kg SiO₂. Након лужења уклоњено је 41,10% од укупне количине SiO₂. Ово значи да пепео након десиликације има мању масу за количину SiO₂ која је уклоњена. Резултати су дати у наставку:

- Маса пепела – 1 kg
- Процент SiO₂ у пепелу пре десиликације – 50%
- Маса SiO₂ у пепелу – 0,5 kg
- Процент SiO₂ који је уклоњен из пепела – 20.55%
- Процент SiO₂ у пепелу после десиликације – 29,45%
- Маса SiO₂ која је уклоњена из пепела – 0,2055 kg
- Маса пепела након десиликације – 0,7945 kg

На основу најоптималније комбинације фактора за лужење натријум хидроксида која је дата раније у раду [75], комбинација фактора за лужење количине пепела од 1 kg је следећа:

- Концентрација екстрактанта (NaOH) – 40%
- Количина NaOH – 10 l
- Температура лужења – 150 °C
- Време лужења – 2 h

Потребно је израчунати масу екстрактанта, у овом случају натријум хидроксида. Маса ће се израчунати помоћу података о количини и концентрацији екстрактанта. Информација о концентрацији натријум хидроксида од 40% може да послужи да се на сајту неког од произвођача натријум хидроксида пронађе информација о густини раствора те концентрације (<https://www.fishersci.pt/shop/products/sodium-hydroxide-solution-40-5/11954004>).

Прорачун је дат у наставку:

$$V = 10 \text{ l}$$

$$\omega = 40 \%$$

$$\rho = 1,43 \frac{\text{g}}{\text{ml}} = 1,43 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

$$\rho = \frac{m}{V}$$

$$\omega = \frac{m_s}{m_r} \times 100$$

$$\omega = \frac{m_{\text{NaOH}}}{\rho \times V} \Rightarrow m_{\text{NaOH}} = \omega \times \rho \times V = 0,4 \times 1,43 \frac{\text{kg}}{\text{l}} \times 10 \text{ l}$$

$$m_{\text{NaOH}} = 5,72 \text{ kg}$$

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = \omega \times \rho \times V = 0,6 \times 1,43 \frac{\text{kg}}{\text{l}} \times 10 \text{ l}$$

$$m_{H_2O} = 8,58 \text{ kg}$$

Према томе, маса раствора натријум хидроксида који се користи за лужење износи:

$$m_r = m_{NaOH} + m_{H_2O} = 5.72 \text{ kg} + 8.58 \text{ kg}$$

$$m_r = 14.3 \text{ kg}$$

Такође треба израчунати и потрошњу електричне енергије у току овог процеса лужења. Електрична енергија потребна за извођење овог процеса је сума енергије потребне да се маса натријум хидроксида загреје од собне температуре (20 °C) на потрених 150 °C и енергије потребне да се одржава иста температура у току 2 h колико процес треба да траје ($Q = Q_z + Q_o$; где Q_z представља енергију потребну за загревање а Q_o енергију потребну за одржавање). Специфични топлотни капацитет ($c = 3424 \text{ J/kgK}$) потребан за прорачун енергије узет је из књиге о особинама водених раствора [90]. Прорачун је дат у наставку:

$$Q = Q_z + Q_o$$

$$Q_z = c \times m \times \Delta T$$

$$c = 3424 \frac{\text{J}}{\text{Kg} \text{ } ^\circ\text{C}}$$

$$m = 14,3 \text{ kg}$$

$$Q_z = c \times m \times \Delta T = c \times m \times (T_2 - T_1) = 3424 \frac{\text{J}}{\text{Kg} \text{ } ^\circ\text{C}} \times 14,3 \text{ kg} \times (150 - 20)^\circ\text{C}$$

$$Q_z = 6365216 \text{ J}$$

Енергија потребна за одржавање масе екстрактанта од 14,3 kg на температури 150 °C у току 2 сата колико треба да траје процес лужења израчуната је од стране професорке термодинамике Марије Живковић, и та енергија износи приближно:

$$Q_o = 825950 \text{ J}$$

Укупна енергија према томе износи:

$$Q = Q_z + Q_o = 6365216 \text{ J} + 825950 \text{ J}$$

$$Q = 7191166 \text{ J} = 7,2 \text{ MJ}$$

6.5.2 Прорачун за лужење хлороводоничном киселином

HCl се користи како би растворио нерастворљиве хидроксиде ретких земаља и произвео растворљиве хлориде ретких земаља. Након процеса десиликације, односно уклањања одређене количине SiO₂ из пепела, у процес лужења хлороводоничном киселином улази преостала маса пепела од 0,7945 kg. Узимајући у обзир најоптималнију комбинацију фактора за лужење хлороводоничном киселином и масу пепела која улази у процес, комбинација фактора у овом случају је следећа:

- Концентрација екстрактанта (HCl) – 8M
- Количина HCl – 23,835 l
- Температура лужења – 60 °C
- Време лужења – 2 h

Потребно је израчунати масу екстрактанта, у овом случају хлороводоничне киселине. Маса ће се израчунати помоћу података о количини и концентрацији екстрактанта. Информација о концентрацији хлороводоничне киселине од 8M може да послужи да се на сајту неког од произвођача натријум хидроксида пронађе информација о густини раствора те концентрације (<https://www.fishersci.nl/shop/products/hydrochloric-acid-8-m-for-laboratory-use-tritrations-chem-lab/12675925#?keyword=>). Одмах је на основу моларне концентрације и густине израчуната и процентна концентрација, како би могла да се одреди маса сваког једињења у раствору. Прорачун је дат у наставку:

$$V = 23,835 \text{ l}$$

$$\rho = 1,12 \frac{g}{ml} = 1,12 \frac{kg}{l}$$

$$Mr(HCl) = 36,46 \text{ g/mol}$$

$$\omega = \frac{M \times Mr}{\rho} \times 100\% = \frac{8 \frac{mol}{l} \times 0,03646 \text{ kg/mol}}{1,12 \text{ kg/l}} \times 100\%$$

$$\omega = 26\%$$

$$\omega = \frac{m_{HCl}}{\rho \times V} \Rightarrow m_{HCl} = \omega \times \rho \times V = 0,26 \times 1,12 \frac{kg}{l} \times 23,835 \text{ l}$$

$$m_{HCl} = 6,94 \text{ kg}$$

$$m_{H_2O} = \omega \times \rho \times V = 0,74 \times 1,12 \frac{kg}{l} \times 23,835 \text{ l}$$

$$m_{H_2O} = 19,75 \text{ kg}$$

Према томе, маса раствора хлороводоничне киселине који се користи за лужење износи:

$$m_r = m_{HCl} + m_{H_2O} = 6,94 \text{ kg} + 19,75 \text{ kg}$$

$$m_r = 26,69 \text{ kg}$$

Такође треба израчунати и потрошњу електричне енергије у току овог процеса лужења. Електрична енергија потребна за извођење овог процеса је сума енергије потребне да се маса хлороводоничне киселине загреје од собне температуре (20 °C) на потрених 60 °C и енергије потребне да се одржава иста температура у току 2 h колико процес треба да траје ($Q = Q_z + Q_o$; где Q_z представља енергију потребну за загревање а Q_o енергију потребну за одржавање). Специфични топлотни капацитет ($c = 2738 \text{ J/kgK}$) потребан за прорачун енергије узет је из књиге о особинама водених раствора [90].

$$Q = Q_z + Q_o$$

$$Q_z = c \times m \times \Delta T$$

$$c = 2738 \frac{J}{kg \text{ } ^\circ C}$$

$$m = 26,69 \text{ kg}$$

$$Q_z = c \times m \times \Delta T = c \times m \times (T_2 - T_1) = 2738 \frac{J}{kg \text{ } ^\circ C} \times 26,69 \text{ kg} \times (60 - 20)^\circ C$$

$$Q_z = 2923089 \text{ J}$$

Енергија потребна за одржавање масе екстрактанта од 26,69 kg на температури 40 °C у току 2 сата колико треба да траје процес лужења израчуната је од стране професорке термодинамике Марије Живковић, и та енергија износи приближно:

$$Q_o = 330380 \text{ J}$$

Укупна енергија према томе износи:

$$Q = Q_z + Q_o = 2923089 \text{ J} + 330380 \text{ J}$$

$$Q = 3253469 \text{ J} = 3,25 \text{ MJ}$$

Успешност лужења хлороводоничном киселином након десиликације 88,15%. Када се узме у обзир просечна светска концентрација ретких земаља од 378 mg/kg, на крају овог процеса из 1 kg пепела би требало да се издвоји 333 mg од укупних 378 mg.

6.6 Процена утицаја животног циклуса (LCIA)

Метод који је коришћен за процену утицаја у овом раду је CML 2001. Овај метод је развио Универзитет у Лајдену 2001. године. Метод је подељен на основни (baseline) и неосновни (non-baseline), а сновни метод је категорија утицаја која се најчешће користи у процени животног циклуса [91]. У овом раду су коришћене категорије утицаја CML 2001 baseline. У табели 29 су дате категорије утицаја за које је рађен прорачун.

Табела 6.5 *Kamegoruje ymuцаја* (https://www.researchgate.net/figure/Impact-categories-for-the-CML-2001-baseline-life-cycle-impact-assessment-LCIA-method_tbl1_339339156)

Kategorija uticaja	Skraćenica	Jedinica
Abiotic depletion (elements)	ADPe	kg Sb eq.
Abiotic depletion (fossil fuels)	ADPf	MJ
Acidification	AP	kg SO ₂ eq.
Eutrophication	EP	kg PO ₄ eq.
Freshwater aquatic ecotoxicity	FAETP	kg DCB eq.
Global warming potential	GWP	kg CO ₂ eq.
Human toxicity	HTP	kg DCB eq.
Marine aquatic ecotoxicity	MTP	kg DCB eq.
Ozone layer depletion	ODP	kg R11 eq.
Photochemical ozone creation potential	POCP	Kg C ₂ H ₄ eq.
Terrestrial ecotoxicity	TETP	kg DCB eq.

У наставку су дате табеле са резултатима категорија утицаја за сваки појединачни процес релевантан у екстракцији ретких земаља из летећег пепела.

Табела 6.6 Резултати за категорије утицаја за процес производње електричне енергије из лигнита.

Proces	Proizvod	Količina
Električna energija, lignit	Električna energija	3,6 MJ
Kategorija uticaja	Rezultat	Jedinica
Abiotic Depletion (elements)	3.13E-07	kg Sb eq.
Abiotic Depletion (fossil)	18.57386843	MJ
Acidification Potential	0.020270183	kg SO2 eq.
Eutrophication Potential	0.011545732	kg Phosphate eq.
Freshwater Aquatic Ecotoxicity Pot.	1.961757277	kg DCB eq.
Global Warming Potential (GWP 100 years). excl biogenic carbon	1.339562138	kg CO2 eq.
Human Toxicity Potential	1.359047857	kg DCB eq.
Marine Aquatic Ecotoxicity Pot.	5584.597883	kg DCB eq.
Ozone Layer Depletion Potential	1.56E-09	kg R11 eq.
Photochem. Ozone Creation Potential	0.000851679	kg Ethene eq.
Terrestrial Ecotoxicity Potential	0.003910617	kg DCB eq.

Табела 6.7 Резултати за категорије утицаја за процес производње натријум хидроксида

Proces	Proizvod	Količina
Natrijum-hidroksid, NaOH, proizvodnja	Natrijum-hidroksid	1 kg
Kategorija uticaja	Rezultat	Jedinica
Abiotic Depletion (elements)	3.16E-05	kg Sb eq.
Abiotic Depletion (fossil)	17.38385085	MJ
Acidification Potential	0.006398449	kg SO2 eq.
Eutrophication Potential	0.002636164	kg Phosphate eq.
Freshwater Aquatic Ecotoxicity Pot.	0.840911468	kg DCB eq.
Global Warming Potential (GWP 100 years). excl biogenic carbon	1.263650323	kg CO2 eq.
Human Toxicity Potential	1.527363631	kg DCB eq.

Marine Aquatic Ecotoxicity Pot.	2224.229249	kg DCB eq.
Ozone Layer Depletion Potential	7.87E-07	kg R11 eq.
Photochem. Ozone Creation Potential	0.00039262	kg Ethene eq.
Terrestrial Ecotoxicity Potential	0.012864184	kg DCB eq.

Табела 6.8 Резултати за категорије утицаја за процес производње хлороводоничне киселине

Proces	Proizvod	Količina
Hlorovodonična kiselina, HCl, proizvodnja	Hlorovodonična kiselina	1 kg
Kategorija uticaja	Rezultat	Jedinica
Abiotic Depletion (elements)	3.53E-05	kg Sb eq.
Abiotic Depletion (fossil)	13.10603119	MJ
Acidification Potential	0.004825135	kg SO2 eq.
Eutrophication Potential	0.010812623	kg Phosphate eq.
Freshwater Aquatic Ecotoxicity Pot.	0.999548022	kg DCB eq.
Global Warming Potential (GWP 100 years). excl biogenic carbon	0.874506305	kg CO2 eq.
Human Toxicity Potential	1.741378672	kg DCB eq.
Marine Aquatic Ecotoxicity Pot.	1950.858209	kg DCB eq.
Ozone Layer Depletion Potential	5.74E-07	kg R11 eq.
Photochem. Ozone Creation Potential	0.000295714	kg Ethene eq.
Terrestrial Ecotoxicity Potential	0.018497268	kg DCB eq.

Табела 6.9 Резултати за категорије утицаја за процес транспорта летећег pepела са депоније

Proces	Proizvod	Količina
Transport elektrofilterskog pepela sa deponije, kamion	Elektrofilterski pepeo	1 kg
Kategorija uticaja	Rezultat	Jedinica
Abiotic Depletion (elements)	6.42E-16	kg Sb eq.
Abiotic Depletion (fossil)	0.00083	MJ
Acidification Potential	2.76E-07	kg SO ₂ eq.
Eutrophication Potential	5.46E-08	kg Phosphate eq.
Freshwater Aquatic Ecotoxicity Pot.	4.22E-08	kg DCB eq.
Global Warming Potential (GWP 100 years). excl biogenic carbon	6.03E-05	kg CO ₂ eq.
Human Toxicity Potential	2.41E-06	kg DCB eq.
Marine Aquatic Ecotoxicity Pot.	0.00202	kg DCB eq.
Ozone Layer Depletion Potential	7.80E-13	kg R11 eq.
Photochem. Ozone Creation Potential	1.87E-08	kg Ethene eq.
Terrestrial Ecotoxicity Potential	6.79E-09	kg DCB eq.

Табела 6.10 Резултати за категорије утицаја за процес лужења натријум хидроксиdom

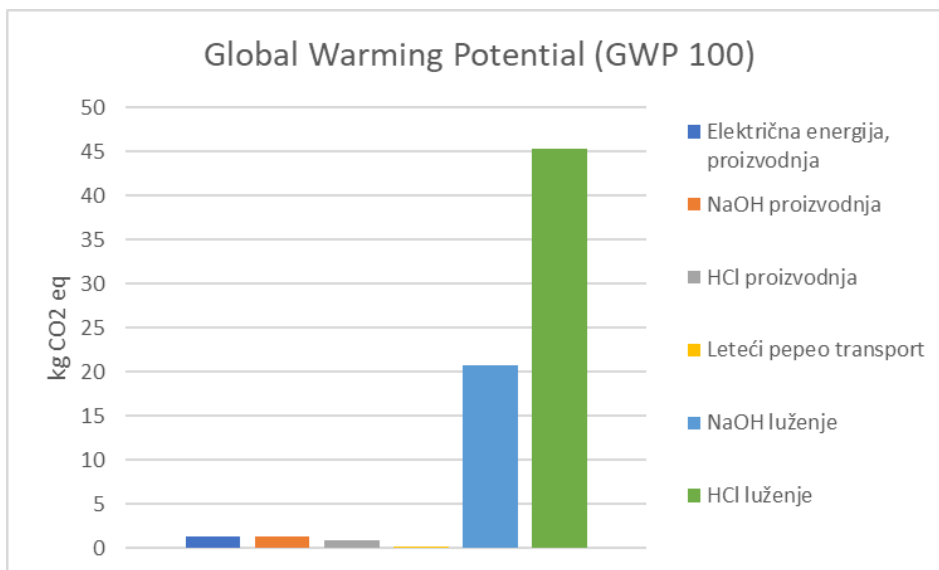
Proces	Proizvod	Količina
Luženje natrijum-hidroksidom, NaOH	Desilikovan pepeo	0,7945 kg
Kategorija uticaja	Rezultat	Jedinica
Abiotic Depletion (elements)	4.53E-04	kg Sb eq.
Abiotic Depletion (fossil)	2.86E+02	MJ
Acidification Potential	1.32E-01	kg SO ₂ eq.
Eutrophication Potential	6.08E-02	kg Phosphate eq.
Freshwater Aquatic Ecotoxicity Pot.	1.59E+01	kg DCB eq.
Global Warming Potential (GWP 100 years). excl biogenic carbon	2.07E+01	kg CO ₂ eq.

Human Toxicity Potential	2.46E+01	kg DCB eq.
Marine Aquatic Ecotoxicity Pot.	4.30E+04	kg DCB eq.
Ozone Layer Depletion Potential	1.13E-05	kg R11 eq.
Photochem. Ozone Creation Potential	7.32E-03	kg Ethene eq.
Terrestrial Ecotoxicity Potential	1.92E-01	kg DCB eq.

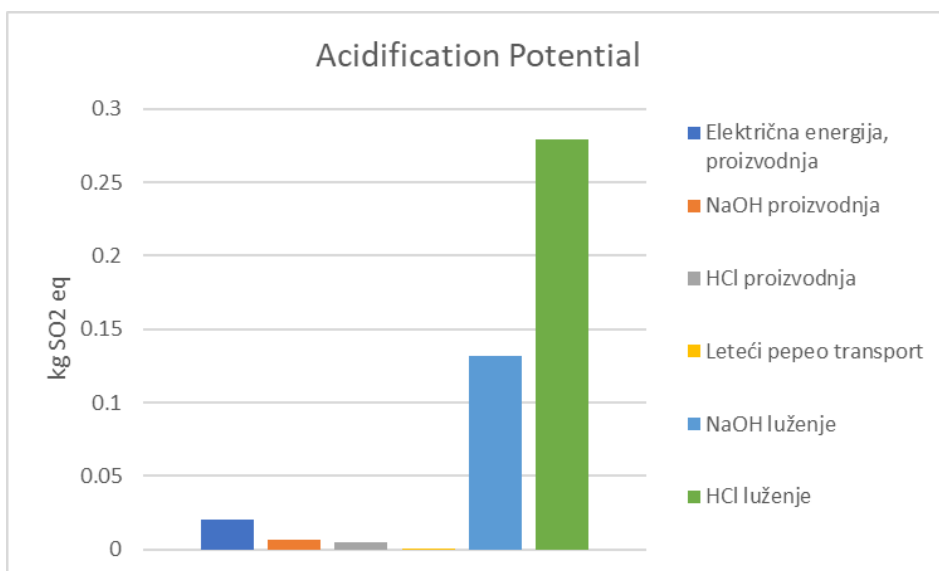
Табела 6.11 Резултати за категорије утицаја за процес лужења хлороводоничном киселином

Proces	Proizvod	Količina
Luženje hlorovodoničnom kiselinom, HCl	Elementi retkih zemalja	333 mg
Kategorija uticaja	Rezultat	Jedinica
Abiotic Depletion (elements)	1.39E-03	kg Sb eq.
Abiotic Depletion (fossil)	6.52E+02	MJ
Acidification Potential	2.79E-01	kg SO ₂ eq.
Eutrophication Potential	3.60E-01	kg Phosphate eq.
Freshwater Aquatic Ecotoxicity Pot.	4.44E+01	kg DCB eq.
Global Warming Potential (GWP 100 years). excl biogenic carbon	4.53E+01	kg CO ₂ eq.
Human Toxicity Potential	7.23E+01	kg DCB eq.
Marine Aquatic Ecotoxicity Pot.	1.00E+05	kg DCB eq.
Ozone Layer Depletion Potential	2.66E-05	kg R11 eq.
Photochem. Ozone Creation Potential	1.60E-02	kg Ethene eq.
Terrestrial Ecotoxicity Potential	6.89E-01	kg DCB eq.

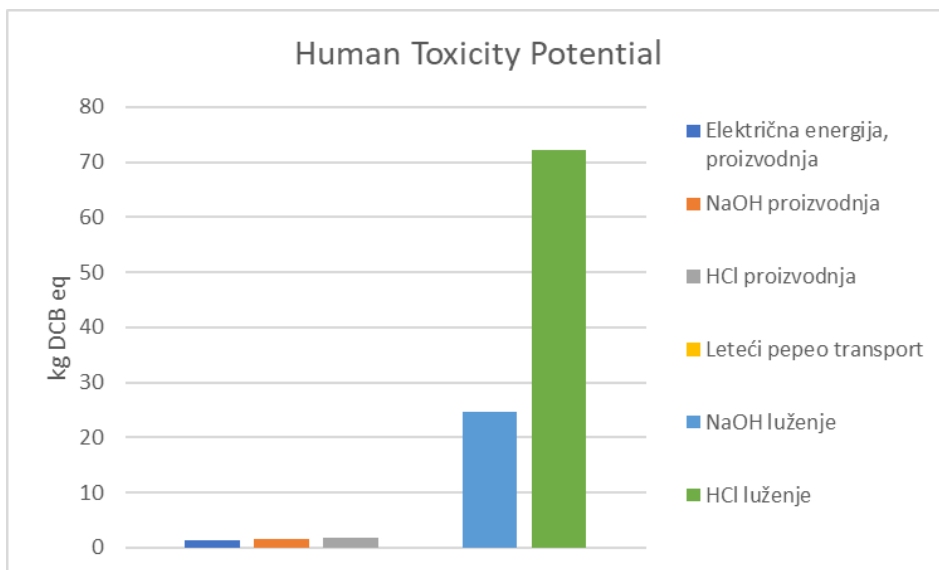
У циљу боље презентације добијених резултата за категорије утицаја, дат је и графички приказ у виду дијаграма. На следећим графицима су приказани утицаји различитих процеса у оквиру истих категорија утицаја.



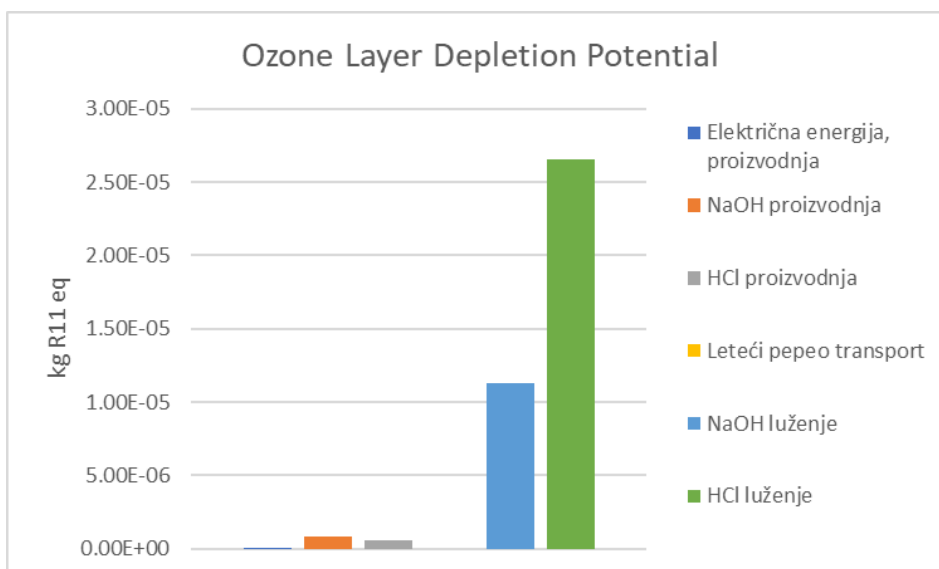
Слика 6.5 График за категорију утицаја „Global Warming Potential“



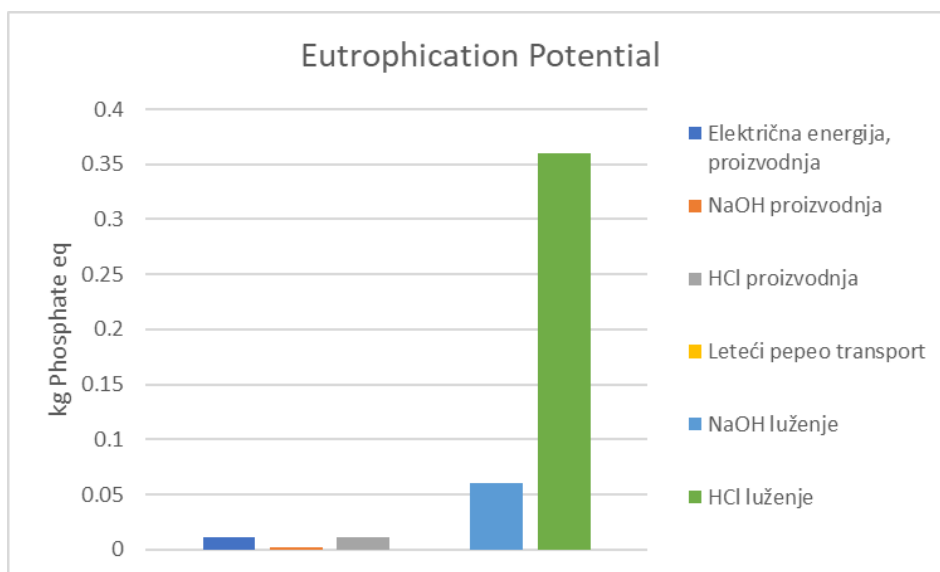
Слика 6.6 График за категорију утицаја „Acidification Potential“



Слика 6.7 График за категорију утицаја „Human Toxicity Potential“



Слика 6.8 График за категорију утицаја „Ozone Layer Depletion Potential“



Слика 6.9 График за категорију утицаја „Eutrophication Potential“

Са графика се може видети да највеће утицаје у свакој категорији имају процеси лужења хлороводоничном киселином (HCl) и лужење натријум-хидроксидом (NaOH), респективно, што је и логично у овом случају јер као улазне податке користе излазне податке осталих процеса. Занемарљиво мали утицај у односу на остале у свим категоријама утицаја има транспорт летећег пепела. Разлог томе је што је за овај случај узето да је потребна раздаљина за транспорт само 1 km. Производња хлороводоничне киселине, натријум-хидоксида и електричне енергије у свим категоријама имају сличан утицај.

У свакој студији процене утицаја, па тако и у овој треба узети у обзир ограничења у виду квалитета података и резултате узимати са резервом. У овом конкретном случају ограничење је везано за непотпуност података и непостојање података у вези процеса за екстракцију ретких земаља из електрофилтерског пепела.

7 ЗАКЉУЧАК

Тренутно стање елемената ретких земаља на светском тржишту и тренутни степен развоја, као и брзина развоја технологије већ сада захтева алтернативне изворе ових елемената. Један од таквих извора је и летећи пепео који настаје као отпад сагоревањем угља у термоелектранама.

Узимајући у обзир количине ретких земаља које су показане да се налазе у овом отпаду, као и количине ове врсте отпада на светском нивоу, јасно је да је летећи пепео велики потенцијал за валоризацију елемената ретких земаља.

Србија на свим депонијама пепела има количине од око 250 милиона тона. Ова количина пепела је велики потенцијал за валоризацију елемената ретких земаља и самим тим и велики потенцијал за развој државе Србије, поготово ако би се комплетан процес екстракције ретких земаља одвијао баш у Србији.

Како екстракција елемената ретких земаља из летећег пепела још увек нема толику индустријску примену, овај рад је дао неку основу и генерални поглед на процену животног циклуса једног од начина екстракције. У будућности, како се примена буде развијала и подаци на индустријском нивоу буду повећавали, моћи ће да се дође до прецизнијих анализа и резултата.

8 ЛИТЕРАТУРА

- [1] „Coal explained,“ 19 October 2022. [На мрежи]. Available: <https://www.eia.gov/energyexplained/coal/>. [Последњи приступ 5 February 2023].
- [2] Z. N. Milovanović, *Termoenergetska postrojenja - Teoretske osnove*, Banja Luka: Univerzitet u Banjoj Luci, Mašinski fakultet Banja Luka, 2011.
- [3] Health and Environment Alliance (HEAL), „Lignite coal - health effects and recommendation from the health sector,“ Health and Environment Alliance (HEAL), Brussels, 2018.
- [4] O. C. Kopp, J. P. Rafferty и R. Pallardy, „Lignite,“ *Encyclopedia Britannica*, 5 December 2016. [На мрежи]. Available: <https://www.britannica.com/science/lignite>. [Последњи приступ 8 February 2023].
- [5] S. P. Schweinfurth и R. B. Finkelman, „Coal - A Complex Natural Resource : An overview of factors affecting coal quality and use in the United States,“ *United States Geological Survey*, 2002.
- [6] BGR, *BGR Energy Study 2017 - Data and Developments Concerning German and Global Energy Supplies*, Hannover, 2017.
- [7] HEAL, CAN, WWF, Sandbag, „Europe's Dark Cloud - How coal-burning countries are making their neighbours sick,“ 2016.
- [8] Ministarstvo rudarstva i energetike Vlade Republike Srbije, *Strategija razvoja energetike Republike Srbije do 2015. godine*, Srbija: „Službeni glasnik RS” br. 57/11, 80/11 - ispravka, 93/12 i 124/12, 2015, 2015, pp. 1-87.
- [9] World Energy Council, „World energy resources 2016,“ 2016.
- [10] D. M. Kisić, . S. R. Miletić, V. D. Radonjić, S. B. Radanović, J. Z. Filipović и I. A. Gržetić, „Prirodna radioaktivnost uglja i letećeg pepela u termoelektrani "Nikola Tesla B",“ *Hemijska Industrija*, т. 67, бр. 5, pp. 729-738, 2 12 2013.
- [11] European Association for Coal and Lignite (EURACOAL), „Serbia,“ [На мрежи]. Available: <https://euracoal.eu/info/country-profiles/serbia/>. [Последњи приступ 12 February 2023].
- [12] D. Životić, K. Stojanović, I. Gržetić, B. Jovančićević, O. Cvetković, A. Šajnović, V. Simić, R. Stojaković и G. Scheeder, „Petrological and geochemical

composition of lignite from the D field, Kolubara basin (Serbia),“ *International Journal of Coal Geology*, т. 111, pp. 5-22, 2013.

- [13] N. V. Karličić, Doktorska disertacija: Svojstva pepela iz termoelektrana značajna za odlaganje i primenu, Beograd: Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, 2018.
- [14] M. O. Obradović, Doktorska disertacija: Istraživanje i komparacija uticaja karakteristika ugljeva niske toplotne vrednosti na njihovu meljivost i parametre procesa mlevenja, Beograd: Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, 2015.
- [15] C. Ramakrishna, T. Thenepalli, S. Y. Nam, C. Kim и J. W. Ahn, „The brief review on Coal origin and distribution of rare earth elements various Coal Ash Samples,“ *Journal of Energy Engineering*, т. 27, pp. 61-69, 30 June 2018.
- [16] T. Milošević, Master rad: Uporedna hemijska analiza tragova metala u pepelu termoelektrane Kostolac, Niš: Univerzitet u Nišu, Prirodno-matematički fakultet, 2015.
- [17] J. C. Ramesh и R. P. Lohita, Fly ash in concrete: production, properties and uses, CRC Press, 1997.
- [18] C. Heidrich, H.-J. Feuerborn и A. Weir, „Coal Combustion Products: a Global Perspective,“ у *World of Coal Ash (WOCA) Conference*, Lexington, KY, 2013.
- [19] R. S. Blissett и N. A. Rowson, „A review of the multi-component utilisation of coal fly ash,“ *Fuel*, т. 97, pp. 1-23, 2012.
- [20] D. Osborne, The Coal Handbook: Towards Cleaner Production, Elsevier, 2013.
- [21] J. Groppo, „1 - An introduction to the nature of coal,“ у *Coal Combustion Products (CCPs): Characteristics, Utilization and Benefication*, Woodhead publishing, 2017, pp. 3-18.
- [22] H. Nalbandian, Trace element emissions from coal, IEA Clean Coal Centre, 2012.
- [23] M. Izquierdo и X. Querol, Leaching behaviour of elements from coal combustion fly ash: An overview, т. 94, *International Journal of Coal Geology*, 2012, pp. 54-66.
- [24] W. R. Roy, R. G. Thiery, R. M. Schuller и J. J. Suloway, Coal fly ash: a review of the literature and proposed classification system with emphasis on environmental impacts, 1981.
- [25] S. V. Vassilev и C. G. Vassileva, „A new approach for the classification of coal fly ashes based on their origin, composition, properties, and behaviour,“ *Fuel*, т. 86, бр. 10, pp. 1490-1512, 2007.

- [26] M. Ahmaruzzaman, „A review on the utilization of fly ash,“ *Progress in Energy and Combustion Science*, т. 36, бр. 3, pp. 327-363, June 2010.
- [27] A. Sakar, R. Rano, G. Udaybhanu и A. K. Basu, „A comprehensive characterisation of fly ash from a thermal power plant in Eastern India,“ *Fuel Processing Technology*, т. 87, бр. 3, pp. 259-277, February 2006.
- [28] S. V. Vassilev и C. G. Vassileva, „Mineralogy of combustion wastes from coal-fired power stations,“ *Fuel Processing Technology*, т. 47, бр. 3, pp. 261-280, 1996.
- [29] O. Bayat, „Characterisation of Turkish fly ashes,“ *Fuel*, т. 77, бр. 9-10, pp. 1059-1066, July-August 1998.
- [30] M. Ilic, C. Cheeseman, C. Sollars и J. Knight, „Mineralogy and microstructure of sintered lignite coal fly ash,“ *Fuel*, т. 82, бр. 3, pp. 331-336, February 2003.
- [31] V. Sakorafas, K. Michailidis и F. Burrigato, „Mineralogy, geochemistry and physical properties of fly ash from the Megalopolis lignite fields, Peloponnese, Southern Greece,“ *Fuel*, т. 75, бр. 4, pp. 419-423, March 1996.
- [32] S. V. Vassilev и R. Mendez, „Phase-mineral and chemical composition of coal fly ashes as a basis for their multicomponent utilization. 4. Characterization of heavy concentrates and improved fly ash residues,“ *Fuel*, т. 84, бр. 7-8, pp. 973-991, May 2005.
- [33] O. Font, X. Querol, F. E. Huggins, J. M. Chimenos, A. I. Fernández, S. Burgos и F. G. Peña, „Speciation of major and selected trace elements in IGCC fly ash,“ *Fuel*, т. 84, бр. 11, pp. 1364-1371, August 2005.
- [34] ASTM, ASTM C618-17 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM, 2017.
- [35] R. P. Kelly, „Parallels and Nonconformities in Worldwide Fly Ash Classification: The Need for a Robust, Universal Classification System for Fly Ash,“ у *World of Coal Ash (WOCA)*, Nashville, TN, 2015.
- [36] EN 450-1: Fly Ash for Concrete-Part 1: Definitions, specifications and conformity criteria, 2012.
- [37] The National Standards Body of India, S 3812-1, Pulverized Fuel Ash - Part 1 : For Use as Pozzolana in Cement, Cement Mortar and Concrete, Bureau of Indian Standards, 2013.
- [38] The National Standards Body of India, IS 3812-2, Pulverized Fuel Ash - Part 2 : For Use as Admixture in Cement Mortar and Concrete, Bureau of Indian Standards, 2013.

- [39] European Coal Combustion Products Association, „Production of CCPs in Europe (EU 15) in 2016,“ 2016. [На мрежи]. Available: <https://www.ecoba.com/ecobaccpprod.html>. [Последњи приступ 20 February 2023].
- [40] American Coal Ash Association (ACAA), „Coal Ash Production and Use 2019,“ American Coal Ash Association (ACAA), 2019.
- [41] Central Electricity Authority, „Report on Fly Ash Generation at Coal/Lignite Based Thermal Power Stations and It's Utiliyation in the Country For the Year 2021-22,“ 2022.
- [42] Serbia Energy, „Leteći pepeo minimalno iskorišćen u Srbiji,“ 7 November 2011. [На мрежи]. Available: <https://serbia-energy.eu/sr/letei-pepeo-minimalno-iskorien-u-srbiji/>. [Последњи приступ 20 February 2023].
- [43] D. Knežević, S. Torbica, Z. Rajković и M. Nedić, Odlaganje industrijskog otpada, Beograd: Rudarsko-geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu, 2014.
- [44] D. D. Nišić, D. N. Knežević, U. R. Pantelić и A. Đ. Tomašević, „Klasifikacija deponije pepela Termoelektrane "Nikola Tesla - B" po stepenu,“ *Tehnika*, т. 70, бр. 5, pp. 769-776, 2015.
- [45] Agencija za zaštitu životne sredine, Katalog otpada - Uputstvo za određivanje indeksnog broja, Beograd, 2010.
- [46] Agencija za zaštitu životne sredine, „Izveštaj o stanju životne sredine u Republici Srbiji za 2020. godinu,“ Republika Srbija, Ministarstvo zaštite životne sredine, Beograd, 2021.
- [47] Rudarski institut, Studija procene konačne vrednosti zatvaranja deponija pepela i šljake termoelektrana Kostolac, Kolubara, Morava, Nikola Tesla A i Nikola Tesla B, Beograd, 2021.
- [48] Rudarski institut, „Sveska 1: Procena konačne vrednosti zatvaranja deponije TE Kostolac - Srednje kostolačko ostrvo,“ y *Studija procene konačne vrednosti zatvaranja deponija pepela i šljake termoelektrana Kostolac, Kolubara, Morava, Nikola Tesla A i Nikola Tesla B*, Beograd, 2021.
- [49] Rudarski institut, „Sveska 2: Procena konačne vrednosti zatvaranja deponije TE Kostolac - PK Ćirikovac,“ y *Studija procene konačne vrednosti zatvaranja deponija pepela i šljake termoelektrana Kostolac, Kolubara, Morava, Nikola Tesla A i Nikola Tesla B*, 2021.
- [50] Rudarski institut, „Sveska 3: Procena konačne vrednosti zatvaranja deponije TE Kolubara A,“ y *Studija procene konačne vrednosti zatvaranja deponija pepela i*

šljake termoelektrana Kostolac, Kolubara, Morava, Nikola Tesla A i Nikola Tesla B, 2021.

- [51] Rudarski institut, „Sveska 4: Procena konačne vrednosti zatvaranja deponije TE Morava,“ y *Studija procene konačne vrednosti zatvaranja deponija pepela i šljake termoelektrana Kostolac, Kolubara, Morava, Nikola Tesla A i Nikola Tesla B, 2021.*
- [52] Rudarski institut, „Sveska 5: Procena konačne vrednosti zatvaranja deponije TE Nikola Tesla A,“ y *Studija procene konačne vrednosti zatvaranja deponija pepela i šljake termoelektrana Kostolac, Kolubara, Morava, Nikola Tesla A i Nikola Tesla B, 2021.*
- [53] Rudarski institut, „Sveska 6: Procena konačne vrednosti zatvaranja deponije TE Nikola Tesla B,“ y *Studija procene konačne vrednosti zatvaranja deponija pepela i šljake termoelektrana Kostolac, Kolubara, Morava, Nikola Tesla A i Nikola Tesla B, 2021.*
- [54] J. H. Voncken, *The Rare Earth Elements - An Introduction*, SpringerNature, 2016.
- [55] F. Wall, „Rare earth elements,“ y *Critical Metals Handbook*, Nottingham, British Geological Survey, 2013, pp. 312-339.
- [56] C. K. Gupta и N. Krishnamurthy, *Extractive Metallurgy of Rare Earths*, CRC Press, 2005.
- [57] G. B. Haxel, J. B. Hedrick и G. J. Orris, „Rare Earth Elements—Critical Resources for High Technology,“ U.S. Geological Survey, 2002.
- [58] P. Z. Dabić, Doktorska disertacija: Sinteza i strukturna karakterizacija novih cezijumskih i kalijumskih silikata sa elementima retkih zemalja, Beograd: Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, 2021.
- [59] S. B. Castor и J. B. Hedrick, „Rare Earth Elements,“ *Industrial minerals and rocks*, т. 7, pp. 769-792, 2006.
- [60] R. K. Taggart, *Recovery of Rare Earth Elements from Coal Combustion Ash: Survey, Extraction, and Speciation*, Duke University, 2017.
- [61] V. V. Seredin и S. Dai, „Coal deposits as potential alternative sources for lanthanides and yttrium,“ *International Journal of Coal Geology*, т. 94, pp. 67-93, 2012.
- [62] D. Klyucharev, N. M. Volkova и M. F. Comyn, „The problems associated with using non-conventional rare-earth minerals,“ *Journal of Geochemical Exploration*, т. 133, pp. 138-148, October 2013.

- [63] B. C. McLellan, G. D. Corder и S. H. Ali, „Sustainability of Rare Earths - An Overview of the State of Knowledge,“ *Minerals*, pp. 304-317, 2013.
- [64] N. A. Mancheri, „World trade in rare earths, Chinese export restrictions, and implications,“ *Resources Policy*, т. 46, pp. 262-271, December 2015.
- [65] S. Massari и M. Ruberti, „Rare earth elements as critical raw materials: Focus on international markets and future strategies,“ *Resources Policy*, т. 38, бр. 1, pp. 36-43, March 2013.
- [66] V. V. Seredin, „Rare earth element-bearing coals from the Russian Far East deposits,“ *International Journal of Coal Geology*, т. 30, бр. 1-2, pp. 101-129, June 1996.
- [67] D. B. Mayfield и A. S. Lewis, „Environmental Review of Coal Ash as a Resource for Rare Earth and Strategic Elements,“ у *World of Coal Ash (WOCA) Conference*, Lexington, KY, 2013.
- [68] J. Pryshlakivsky и C. Searcy, „Fifteen years of ISO 14040: a review,“ *Journal of Cleaner Production*, т. 57, бр. 15, pp. 115-123, October 2013.
- [69] C. J. Koroneos и E. A. Nanaki, „Life cycle environmental impact assessment of a solar water heater,“ *Journal of Cleaner Production*, т. 37, pp. 154-161, December 2012.
- [70] I. V. Murali Krishna и V. Manickam, *Environmental Management: Science and Engineering for Industry*, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017.
- [71] I. S. Arvanitoyannis, „ISO 14040: Life Cycle Assessment (LCA) – Principles and Guidelines,“ у *Waste Management for the Food Industries*, Cambridge, Academic Press, Elsevier Inc., 2008, pp. 97-132.
- [72] SRPS ISO 14040:2008 - Upravljanje zaštitom životne sredine - Ocenjivanje životnog ciklusa - Principi i okvir, Institut za standardizaciju Srbije, 2008.
- [73] G. Rebitzer, T. Ekvall, R. Frischknecht, D. J. Hunkeler, G. A. Norris, T. Rydberg, W. P. Schmidt, S. Suh, B. P. Weidema и D. W. Pennington, „Life cycle assessment: Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications,“ *Environment International*, т. 30, бр. 5, pp. 701-720, July 2004.
- [74] F. Asdrubali и U. Desideri, *Handbook of Energy Efficiency in Buildings - A Life Cycle Approach*, Butterworth-Heinemann, 2018.
- [75] Z. Wang, S. Dai, J. Zou, D. French и I. T. Graham, „Rare earth elements and yttrium in coal ash from the Luzhou power plant in Sichuan, Southwest China: Concentration, characterization and optimized extraction,“ *International Journal of Coal Geology*, т. 203, pp. 1-14, 2 February 2019.

- [76] C. R. Ward и D. French, „Determination of glass content and estimation of glass composition in fly ash using quantitative X-ray diffractometry,“ *Fuel*, т. 85, бр. 16, pp. 2268-2277, November 2006.
- [77] D. M. Roy, K. Luke и S. Diamond, „Characterization of Fly Ash and Its Reactions in Concrete,“ у *MRS Online Proceedings Library (OPL)*, 1984.
- [78] R. T. Hemmings и E. E. Berry, „On the Glass in Coal Fly Ashes: Recent Advances,“ у *MRS Online Proceedings Library (OPL)*, 1987.
- [79] J. Henry, M. Towler, K. T. Staton и X. Querol, „Characterization of the glass fraction of a selection of European coal fly ashes,“ *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, т. 79, бр. 5, pp. 540-546, April 2004.
- [80] S. Dai, L. Zhao, S. Peng, C.-L. Chou, X. Wang, Y. Zhang, D. Li и Y. Sun, „Abundances and distribution of minerals and elements in high-alumina coal fly ash from the Jungar Power Plant, Inner Mongolia, China,“ *International Journal of Coal Geology*, т. 81, бр. 4, pp. 320-332, 1 April 2010.
- [81] J. C. Hower, J. G. Groppo, P. Joshi, S. Dai, D. P. Moecher и M. N. Johnston, „Location of Cerium in Coal-Combustion Fly Ashes: Implications for Recovery of Lanthanides,“ *Coal Combustion and Glasification Products*, т. 5, pp. 73-78, November 2013.
- [82] S. Sinha, P. Meshram и B. D. Pandey, „Metallurgical processes for the recovery and recycling of lanthanum from various resources—A review,“ *Hydrometallurgy*, т. 160, pp. 47-59, March 2016.
- [83] W. Franus, M. M. Wiatros-Motyka и M. Wdowin, „Coal fly ash as a resource for rare earth elements,“ *Environmental Science and Pollution Research*, т. 22, p. 9464–9474, 2015.
- [84] Z. Huang, M. Fan и H. Tian, „Rare earth elements of fly ash from Wyoming's Powder River Basin coal,“ *Journal of Rare Earths*, т. 38, бр. 2, pp. 219-226, 2020.
- [85] R. S. Blisset, N. Smalley и N. A. Rowson, „An investigation into six coal fly ashes from the United Kingdom and Poland to evaluate rare earth element content,“ *Fuel*, т. 119, pp. 236-239, March 2014.
- [86] J. C. Hower, J. G. Groppo, H. Hsu-Kim и R. K. Taggart, „Distribution of rare earth elements in fly ash derived from the combustion of Illinois Basin coals,“ *Fuel*, т. 289, April 2021.
- [87] SRPS ISO 14044:2009 - Upravljanje zaštitom životne sredine - Ocenjivanje životnog ciklusa - Zahtevi i uputstva za primenu, Institut za standardizaciju Srbije, 2009.

- [88] W. Zhang, A. Noble, X. Yang и R. Honaker, „A Comprehensive Review of Rare Earth Elements Recovery from Coal-Related Materials,“ *Minerals*, т. 10, бр. 5, p. 451, 2020.
- [89] M. P. Ketris и Y. E. Yudovich, „Estimations of Clarkes for Carbonaceous biolithes: World averages for trace element contents in black shales and coals,“ *International Journal of Coal Geology*, т. 78, бр. 2, pp. 135-148, 1 April 2009.
- [90] I. D. Zaytsev и G. G. Aseyev, *Properties of Aqueous Solutions of Electrolytes*, CRC Press, 1992.
- [91] A. P. Acero, C. Rodríguez и A. Ciorth, „LCIA methods - Impact assessment methods in Life Cycle Assessment and their impact categories,“ 11 May 2016. [На мрежи]. Available: <https://www.openlca.org/wp-content/uploads/2016/08/LCIA-METHODS-v.1.5.5.pdf>. [Последњи приступ 14 April 2023].

ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ ЗАВРШНОГ РАДА

Име и презиме студента Огњен Адамовић

Број индекса Р516/21

Изјављујем

да је завршни рад под насловом

Процена животног циклуса дисонија летелиг пепела из
процеса сагоревања лигнита у термоелектранама у Србији

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да завршни рад у целини ни у деловима није био предложен за стицање друге дипломе на студијским програмима Рударско-геолошког факултета или других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

У Београду, 4. Мај 2023.

Потпис студента

ИЗЈАВА
О ИСТОВЕТНОСТИ ШТАМПАНЕ И ЕЛЕКТРОНСКЕ ВЕРЗИЈЕ
ЗАВРШНОГ РАДА

Име (име родитеља) и презиме студента Огњен Симића Аџаковић

Број индекса Р516/21

Студијски програм Инжењерство заштите животне средине

Наслов рада Процена животног циклуса депонија летећег пепела
из процеса сагоревања лигнита у термоелектранама
у Србији

Ментор Проф. др. Ивица Ристовић

Изјављујем да је штампана верзија мог завршног рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради одлагања у Дигиталном репозиторијуму Рударско-геолошког факултета.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити у електронском каталогу и у публикацијама Рударско-геолошког факултета.

У Београду, 4. Мај 2023.

Потпис студента

ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ ЗАВРШНОГ РАДА

Овлашћујем библиотеку Рударско-геолошког факултета да у Дигитални репозиторијум унесе мој завршни рад под насловом:

Процеза животног циклуса депонија летећег пепела
из процеса сагоревања лигнита у термоелектранима у Србији

који је моје ауторско дело.

Завршни рад са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Мој завршни рад одложен у Дигиталном репозиторијуму Рударско-геолошког факултета је (заокружити једну од две опције):

I. редуковано доступан кроз наслов завршног рада и резиме рада са кључним речима;

II. јавно доступан у отвореном приступу, тако да га могу користити сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се уз сагласност ментора 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)

(Заокружите само једну од шест понуђених лиценци. Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве.)

У Београду, 4. Мај 2023.

Потпис ментора

Потпис студента

1. **Ауторство.** Дозвољава се 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.** Дозвољава се 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.** Дозвољава се 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.** Дозвољава се 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.** Дозвољава се 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.** Дозвољава се 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.
-