



УНИВЕРЗИТЕТ У БАЊОЈ ЛУЦИ
UNIVERSITY OF BANJA LUKA
ТЕХНОЛОШКИ ФАКУЛТЕТ
FACULTY OF TECHNOLOGY



ЗАВРШНИ РАД ДРУГОГ ЦИКЛУСА СТУДИЈА

**ВАЛОРИЗАЦИЈА ЛЕТЕЋЕГ ПЕПЕЛА ИЗ
ТЕРМОЕЛЕКТРАНЕ „СТАНАРИ“ У
ГРАЂЕВИНСКОЈ ИНДУСТРИЈИ У ФУНКЦИЈИ
СМАЊЕЊА ЕМИСИЈА ГАСОВА СТАКЛЕНЕ
БАШТЕ**

Ментор:

Проф. др Драженко Бјелић, ван. проф.

Кандидат:

Милица Говедарица, дипл. инж.

Бања Лука, март 2026. године



УНИВЕРЗИТЕТ У БАЊОЈ ЛУЦИ
UNIVERSITY OF BANJA LUKA
ТЕХНОЛОШКИ ФАКУЛТЕТ
FACULTY OF TECHNOLOGY



FINAL WORK OF THE SECOND CYCLE OF STUDIES

VALORIZATION OF FLY ASH FROM THE "STANARI" THERMAL POWER PLANT IN THE CONSTRUCTION INDUSTRY IN THE FUNCTION OF REDUCING GREENHOUSE GAS EMISSIONS

Mentor:

PhD Draženko Bjelić

Candidate:

Milica Govedarica, B.Sc.

Banja Luka, March 2026.

Информације о ментору и мастер раду

Ментор: Проф. др Драженко Бјелић
Доктор техничких наука из области хемијског инжењерства
Универзитет у Бањој Луци, Технолошки факултет

Назив мастер рада: Валоризација летећег пепела из термоелектране „Станари“ у грађевинској индустрији у функцији смањења емисија гасова стаклене баште

Резиме: У условима појачаних глобалних еколошких изазова и потребе за смањењем емисија гасова са ефектом стаклене баште, одрживо управљање индустријским отпадом постаје један од кључних елемената заштите животне средине. Летећи пепео, као нуспроизвод сагоријевања угља у термоелектранама, представља значајан секундарни ресурс са израженим потенцијалом примјене у грађевинској индустрији. Предмет овог мастер рада је валоризација летећег пепела из Термоелектране „Станари“ кроз његову употребу у грађевинарству, са циљем смањења емисија гасова стаклене баште.

Истраживање обухвата анализу физичко-хемијских особина летећег пепела, дефинисање и разраду различитих сценарија његове примјене у грађевинској индустрији, као и процјену еколошких ефеката у односу на базни сценарио депоновања. Посебна пажња посвећена је примјени летећег пепела као супститута клинкера у производњи цемента, дијела цемента у бетону, као и замјени природних агрегата у путној изградњи. Процјена емисија гасова са ефектом стаклене баште извршена је примјеном анализе животног циклуса (LCA) и фактора емисије у складу са IPCC методологијом.

Резултати истраживања показују да избор начина управљања летећим пепелом има значајан утицај на укупне емисије посматраног система. Базни сценарио потпуног депоновања оцијењен је као еколошки најнеповољнији, јер не обезбјеђује материјалну валоризацију пепела. Насупрот томе, сценарији супституције клинкера у цементу и дијела цемента у бетону остварују највећи потенцијал за смањење емисија гасова са ефектом стаклене баште, захваљујући избегавању емисија повезаних са производњом примарних везивних материјала. Примјена летећег пепела у путној изградњи показује мањи климатски ефекат по јединици масе, али представља значајну опцију у погледу смањења експлоатације природних ресурса.

Закључује се да валоризација летећег пепела из Термоелектране „Станари“ представља ефикасан приступ унапређењу принципа циркуларне економије, смањењу количина отпада који се депонује и ублажавању климатских промјена, уз истовремено јачање индустријске симбиозе између енергетског и грађевинског сектора.

Кључне ријечи: летећи пепео; валоризација отпада; грађевинска индустрија; емисије гасова стаклене баште; анализа животног циклуса (LCA); циркуларна економија.

Ужа научна област: Инжењерство и технологија

Научно поље: Хемијско инжењерство

Класификациона ознака: Т350 – Хемијска технологија и инжењеринг

Тип одабране лиценце: ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)

Mentor and master thesis information

Mentor: PhD Draženko Bjelić
Doctor of technical sciences in the field of chemical engineering
University of Banja Luka, Faculty of Technology

Master thesis: Valorisation of fly ash from the Stanari thermal power plant in the construction Industry for the purpose of reducing greenhouse gas emissions

Summary: In the context of increasing global environmental challenges and the growing need to reduce greenhouse gas emissions, sustainable management of industrial waste has become one of the key components of environmental protection. Fly ash, as a by-product of coal combustion in thermal power plants, represents a significant secondary resource with considerable potential for application in the construction industry. The subject of this Master's thesis is the valorisation of fly ash from the Stanari Thermal Power Plant through its utilisation in construction, with the aim of reducing greenhouse gas emissions.

The research includes an analysis of the physical and chemical properties of fly ash, the development and assessment of different scenarios for its application in the construction sector, and the evaluation of environmental impacts in comparison with the baseline scenario of disposal. Particular attention is given to the use of fly ash as a substitute for clinker in cement production, partial replacement of cement in concrete, and substitution of natural aggregates in road construction. The assessment of greenhouse gas emissions is carried out using the Life Cycle Assessment (LCA) approach and emission factors in accordance with the IPCC methodology, ensuring comparability with relevant international studies and practices.

The results indicate that the choice of fly ash management strategy has a significant influence on the overall emissions of the analysed system. The baseline scenario of complete disposal is identified as the least environmentally favourable option, as it does not provide any material valorisation. In contrast, scenarios involving clinker substitution in cement and partial cement replacement in concrete show the highest potential for greenhouse gas emission reductions, due to the avoidance of emissions associated with the production of primary binding materials. The use of fly ash in road construction shows a lower climate benefit per unit mass; however, it remains a justified option under conditions of shorter transport distances and higher utilisation rates, particularly from the perspective of reducing pressure on natural resources.

It is concluded that the valorisation of fly ash from the Stanari Thermal Power Plant represents an effective approach to promoting the principles of the circular economy, reducing the amount of waste disposed of in landfills, and mitigating climate change, while simultaneously strengthening industrial symbiosis between the energy and construction sectors.

Keywords: fly ash; waste valorisation; construction industry; greenhouse gas emissions; life cycle assessment (LCA); circular economy

Narrow Scientific Field: Engineering and technology

Scientific Area: Chemical Engineering

Classification Code: T350 – Chemical technology and engineering

Selected License Type: Autorship – noncommercial (CC BY-NC)

Захвалница

Велику захвалност, прије свега, дугујем ментору овог завршног рада, проф. др Драженку Бјелићу. Хвала му за савјете, сугестије, указано повјерење и спремност на заједнички рад.

Захваљујем се и осталим професорима и асистентима, мојим колегама, драгим пријатељима и кумовима који су били уз мене.

Посебну захвалност упућујем и предузећу "ЕЛЕКТРАНЕ СТАНАРИ" д.о.о. Станари на пруженој подршци, конструктивној сарадњи и подацима који су значајно допринијели изради овог рада.

На крају бих жељела да изразим посебну и најискренију захвалност својој мајци Бранки, брату Милошу, сестри Маји, зету Жељку, мојим драгим дјевојчицама Ирини и Исидори, као и тетקי Јели. Без ваше безрезервне подршке, стрпљења и љубави, овај рад не би био могућ.

Милица Говедарица

САДРЖАЈ:

1. УВОД	1
2. ТЕОРИЈСКИ ДИО	3
2.1 Термoeлектрана "Станари"	5
2.2. Електрофилтерски пепео термoeлектрана-особине и подјела.....	8
2.2.1. Тешки метали у летећем пепелу	15
2.2.2. Утицај летећег пепела на околину и људско здравље	15
2.3. Примјена летећег пепела	15
2.4. Међувладино тијело за климатске промјене	17
2.5. Емисије гасова са ефектом стаклене баште	18
2.6 Законодавни оквир	20
3. ХИПОТЕЗЕ И ЦИЉ РАДА	22
4. МАТЕРИЈАЛИ И МЕТОДЕ РАДА	23
4.1. Анализа физичко-хемијских својстава летећег пепела	23
4.2. Разрада и анализа сценарија валоризације	23
4.3. Процјена емисија гасова стаклене баште	24
4.4. Евалуација доприноса циркуларној економији	24
4.5. Систематизација релевантне литературе	25
5. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА	26
5.1. Анализа физичко-хемијских својстава летећег пепела	26
5.2. Резултати процјене емисије гасова стаклене баште	32
5.3. Допринос циркуларној економији.....	40
6. ЗАКЉУЧЦИ	42
7. ЛИТЕРАТУРА	43

1. УВОД

У условима савремених глобалних изазова, међу којима се издвајају климатске промјене, повећана емисија гасова стаклене баште, као и прекомјерно коришћење природних ресурса, неопходно је истражити могућности одрживог управљања отпадним материјалима. Летећи пепео, као нуспроизвод процеса сагоријевања угља у термоелектранама, представља један од најзначајнијих секундарних материјала који има потенцијал за примјену у грађевинској индустрији.

Термоелектрана „Станари“, као први новоизграђени енергетски објект у Босни и Херцеговини у посљедњих неколико деценија, користи технологију циркулационог флуидизованог слоја која омогућава високу ефикасност сагоријевања, али истовремено производи значајне количине летећег пепела. У досадашњој пракси, највећи дио овог пепела депонује се на посебно изграђену депонију, што представља оптерећење за животну средину, повећава трошкове управљања летећим пепелом и губи се могућност искориштења овог материјала у корисне сврхе.

Минералне материје присутне у угљу, које не подлијежу сагоријевању, остају након процеса као чврсти остаци у облику пепела. Унутар постројења Термоелектране „Станари“, пепео се раздваја на двије фракције: пепео са дна котла и летећи пепео. Пепео са дна котла уклања се из ложишта, те се затим транспортује у силос намијењен за његово складиштење. Летећи пепео, захваљујући систему за пречишћавање димних гасова, у највећој мјери се задржава у врећастом филтеру, након чега се пнеуматским транспортом усмјерава у силосе предвиђене за његово складиштење. Испод силоса за пепео налази се опрема за пражњење која омогућава раздвајање даљег транспорта у два система: један за суви транспорт, који подразумијева утовар пепела у камионе ради комерцијалне употребе, и други за влажни транспорт, у оквиру којег се пепео навлажује водом прије транспорта на депонију која се налази у непосредној близини термоелектране (ETF, 2016).

Назив рада „Валоризација летећег пепела из Термоелектране „Станари“ у грађевинској индустрији у функцији смањења емисија гасова стаклене баште“ одражава кључне аспекте истраживања. Првенствено, фокус ће бити на валоризацији летећег пепела кроз његову употребу као секундарног ресурса, чиме се омогућава интеграција отпадних материјала у нове производне токове. Истовремено, истраживање је усмјерено на испитивање примјене летећег пепела у грађевинској индустрији, посебно у производњи цемента, бетона и инфраструктурним пројектима, са посебним нагласком на цестоградњу, гдје се овакви материјали све чешће користе у складу са европском праксом. Трећи, најзначајнији акценат ставља се на процјену еколошких ефеката, прије свега на могућност смањења емисија гасова стаклене баште. Ово је посебно важно у контексту обавеза које произилазе из међународних климатских споразума, али и све строжијих европских директива и политика у области заштите животне средине.

Истраживање обухвата анализу постојећих података о физичко-хемијским особинама летећег пепела из Термоелектране „Станари“, развој и опис сценарија валоризације у грађевинској индустрији, као и процјену потенцијалног смањења емисија гасова стаклене баште у поређењу са основним сценаријем у коме се пепео депонује. За процјену емисија примјењује се приступ анализе животног циклуса (LCA) и фактори емисије у складу са IPCC методологијом, чиме се осигурава упоредивост резултата са релевантним истраживањима и међународном праксом.

Резултати процјене емисија гасова са ефектом стаклене баште показују да избор модела управљања летећим пепелом из Термоелектране „Станари“ има пресудан утицај на укупне емисије посматраног система, при чему је базни сценарио потпуног депоновања еколошки најнеповољнија опција, јер не обезбјеђује никакву материјалну валоризацију. Сценарији супституције клинкера у цементу и дијела цемента у бетону издвајају се као најповољнији са

аспекта смањења емисија гасова са ефектом стаклене баште, јер омогућавају избјегавање значајног дијела емисија повезаних са производњом везива и стога се могу сматрати приоритетним правцем валоризације пепела. Сценарио замјене природног агрегата у путној изградњи има мањи климатски ефекат по јединици масе, али се може сматрати оправданим у условима мањих транспортних удаљености и већег степена искоришћења пепела, при чему његов значај посебно долази до изражаја са аспекта смањења притиска на природне ресурсе.

Истовремено, анализирани сценарији валоризације доприносе успостављању циркуларне економије, јер летећи пепео трансформишу из отпада у секундарну сировину која замјењује енергетски и ресурсно интензивне материјале као што су клинкер, цемент и природни агрегати. На овај начин се смањују количине отпада које се трајно одлажу на депоније, умањује се потреба за експлоатацијом примарних минералних ресурса и омогућава развој индустријске симбиозе између енергетског и грађевинског сектора, са посебним освртом на потенцијал затварања круга материјала („closing the loop“).

2. ТЕОРИЈСКИ ДИО

Термоелектранама се називају постројења у којима се топлотна енергија претвара у механичку енергију, а механичка у електричну енергију. Термоелектране се класификују на основу различитих критеријума: врсте погонских постројења, начина коришћења водене паре, типа употребљеног горива и начина хлађења кондезатора. (Bubic, 2017).

Према врсти погонских постројења, термоелектране се могу класификовати на следеће типове:

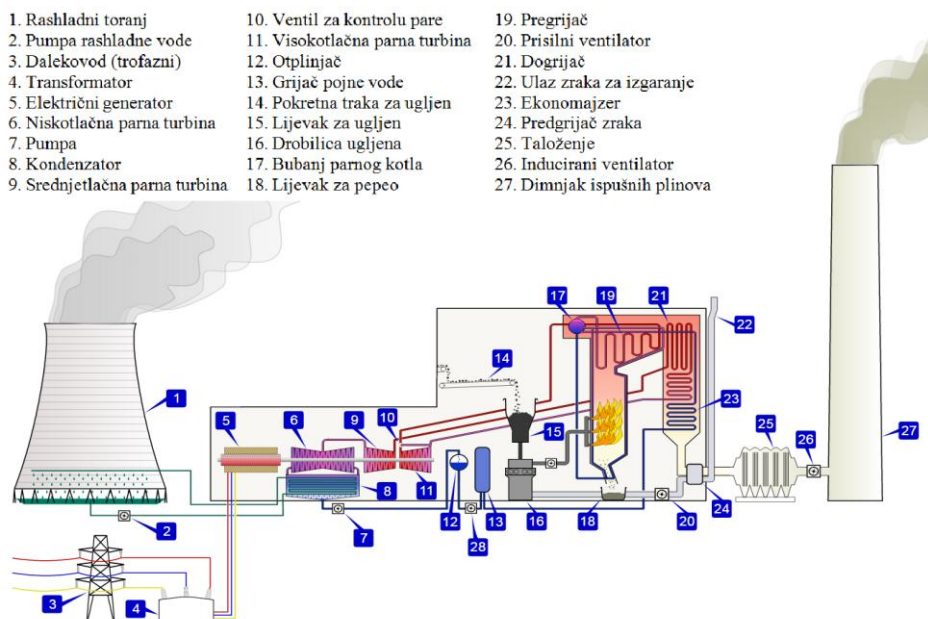
1. Парне термоелектране у којима је погонски агрегат парна турбина;
2. Термоелектране са гасним турбинама у којима гориво, обично природни гас, сагорева у комори за изгарање, а погонски агрегат представља гасна турбина;
3. Дизелске термоелектране, гдје погонски агрегат чини дизел мотор, а гориво може бити дизел или биодизел;
4. Термоелектране са мотором на гасно гориво, у којима се као гориво користи природни гас или биоplin, а мотор служи као погонски агрегат.

Термоелектране у којима се као погонски агрегат користе парне турбине могу се, у зависности од начина коришћења паре, класификовати на следеће типове:

1. Кондензацијске термоелектране, намјењене искључиво за производњу електричне енергије;
2. Комбиноване термоелектране (топлане и индустријске термоелектране), у којима се, поред производње електричне енергије, пара користи и за технолошке процесе или гријање.

Према врсти употребљеног горива, термоелектране се могу класификовати на следеће типове:

1. Парне термоелектране, које могу користити чврста горива (биомаса), течна горива (нафта, биогорива) и гасна горива (природни гас, биоplin);
2. Термоелектране са гасним турбинама, које користе течна и гасна горива;
3. Дизелске термоелектране, које раде искључиво на течна горива (дизел или биодизел).



Слика 2.1. Основни приказ термоелектране

Према начину хлађења кондензатора термоелектране се дијеле на (Jozsa, 2005):

1. Термоелектране са проточним хлађењем
2. Термоелектране са повратним хлађењем

Угаљ представља најзаступљенији енергетски ресурс који се данас користи у Републици Српској. Разлог за његову употребу као извора енергије је широка распрострањеност и задовољавајући квалитет доступних лежишта. Највећи дио експлоатисаног угља користи се у термоелектранама за производњу електричне енергије, док се мање количине примјењују у другим секторима, прије свега у индустрији и топланама. Резерве угља на којима ће се одвијати будућа експлоатација релативно су равномерно распоређене на цијелој територији Републике Српске, од Љешљана на западу до Гацка на југоистоку. Тренутно се експлоатација угља обавља на три локације: Гацко (лигнит), Угљевик (мрки угаљ) и Станари (лигнит).

Рудници Гацко и Угљевик производе угаљ углавном за потребе термоелектрана (98% пласмана), али и за широку потрошњу. Капацитет рудника Гацко износи 2,1 милион тона угља годишње, док рудник Угљевик има капацитет од 1,75 милиона тона годишње. С обзиром на то да су постојећи површински копови скоро исцрпили резерве, очекује се потреба за отварањем нових лежишта у наредних 3–5 година, као и за обновом рударске механизације. У табели 2.1. приказане су резерве угља у Републици Српској.

Табела 2.1. Резерве угља у Републици Српској

Ред. број	Назив производног капацитета и врста угља	РЕЗЕРВЕ (000)t					Hd GJ/t	Влага (%)	Пепео (%)	Укупни сумпор (%)
		Билансне (A+B+C1)	Ванбилансне (A+B+C1)	Потенцијалне (C2+D1+D2)	Укупне геолошке	Експлоатационе				
РЕПУБЛИКА СРПСКА										
1.	Рудник Угљевик (М)	247409	17792	114558	265201	206507	13,28	26	19,4	4,59
2.	Рудник Станари (Л)	82559	34668	9595	126823	73271	9,646	50,75	5,74	0,17
3.	Рудник Гацко (Л)	269958	37862	/	307320	245662	10,276	37,45	15,78	1,48
4.	Рудник Миљевина (М)	21200	15800	40100	77100	19080	11,7-14,8	24,9	24,83	2,2
5.	Котор Варош (М)*	16410		1359			14,5	26,21	26,06	1,4
6.	Љешљани (М)*	8843	195	10000			14,39	24,89	28,04	1,53
7.	Рапићи (Л)*	37596			37596	33836,4	9,68	42,86	15,82	3,88
Укупно лигнит		390113	72530	9596	471739	352769				
Укупно мрки угаљ		293862	33787	166017	342301	225587				
Укупно РС		683975	106317	175613	814040	578356				

2.1 Термоелектрана "Станари"

Термоелектрана „Станари“, са капацитетом од 300 MW, изграђена је у непосредној близини површинског копа Рашковац. Користи технологију сагоријевања угља у циркулационом флуидизованом слоју (CFS), уз примјену директног сувог расхладног система. За њен рад, потребно је да се из површинских копова Рашковац у почетној фази, а касније и из ПК Остружња, обезбиједи годишње количина угља од 2 до 2,4 милиона тона лигнита, у зависности од квалитета угља и потрошње електричне енергије (ETF, 2016).



Слика 2.2. Термоелектрана Станари

Основни подаци о блоку су:

• Гарантована временска расположивост	90%
• Годишња производња електричне енергије на бази 7500 радних сати GWh	2.000
• Часовна потрошња пројектног угља	304 t
• Специфична вриједност CO ₂ за гориво	1,01kg/kg
• Годишња потрошња пројектног угља	2315000t
• Сопствена потрошња блока	27MW
• Снага на прагу ТЕ	273MW
• Специфична потрошња топлоте	9.365KJ/kg
• Степен корисности блока-брuto	38,5%
• Степен корисности-нето	34%

Предвиђени опсег квалитета угља за Термоелектрана „Станари“ предсављен је у табели 2.2.

Табела 2.2. Предвиђени опсег квалитета угља за Термоелектрана „Станари“ (ETF, 2016)

Редни број	Параметар квалитета угља (са влагом – „as received)	Једин.	Грантовани квалитет угља	Пројектовани опсег варирања квалитета угља	Најнижи квалитет угља
1.	Угљеник (органски)	%	27,55	22,0-33,0	22,72
2.	Водоник	%	2,46	2,1-2,9	2,16
3.	Кисеоник (биласнсиран)	%	13,1	10,0-15,4	10,08
4.	Азот	%	0,25	0,20-0,33	0,32
5.	Укупан сумпор	%	0,13	0,10-0,20	0,20
6.	Хлор+ Флуор	%	0,009	0,004-0,0182	0,0182
7.	Пепео (815°C)	%	7,5	6,0-12,0	12
8.	Укупна влага	%	49,0	46,0-53	52,5
9.	Доња топлотна вриједност	kJ/kg	9100	7500-10500	7500
10.	Хардгрове индекс	HGI	40	35-43	
11.	Испарљиве материје	%	26,1	21-28,8	21,3

Термоелектрана „Станари“ је пројектована за рад у базном режиму, уз могућност функционисања на техничком минимуму од 50%. Изабран је котао са сагоријевањем у циркулационом флуидизованом слоју (ЦФС), који посједује бубањ, природну циркулацију и подкритичне параметре паре. Котао је постављен на челичну конструкцију у затвореном објекту, са компактним, слободно стојећим ложиштем. (ETF, 2016).

Циркулациони флуидизовани слој (ЦФС) као чиста технологија сагоријевања угља успјешно се примјењује широм свијета од 1960-их година. Основне карактеристике ЦФС процеса укључују ефикасно сагоријевање различитих типова горива уз одржавање ниских нивоа емисија.

Предности ЦФС котлова у поређењу са котловима који користе класично сагоријевање су сљедеће (ETF, 2016):

1. Могућност ефикасног и економичног сагоријевања угља различитог квалитета, гдје није потребна претходна припрема (мљевање и хомогенизација). Издробљене честице угља које се убацују у ложиште имају величину која износи од 0 до 15 mm;
2. Самљевени кречњак (CaCO_3) као сорбент може се директно додати у ложиште котла чији је задатак да реагује и везује сумпордиоксид из димних гасова и тако ствара калцијум сулфат, и за одсумпоравање димног гаса нису потребна посебна постројења;
3. Температура сагоријевања у ложишту је релативно ниска и износи од 800°C до 900°C, чиме се смањује могућност настанка азотних оксида и нису потребне посебне мјере.

До котловских бункера, којих има пет, припрема и транспорт угља се врши транспортерима преко три дробилична постројења и крајња гранулација угља износи 0-15 mm, затим се преко система дозатора и вентилатора угаљ убацује у ложиште преко десет горионика. Преко четири ротациона хладњака са дна ложишта врши се одвод пепела континуирано. Летећи пепео из димних гасова се издваја помоћу врећастих филтера.

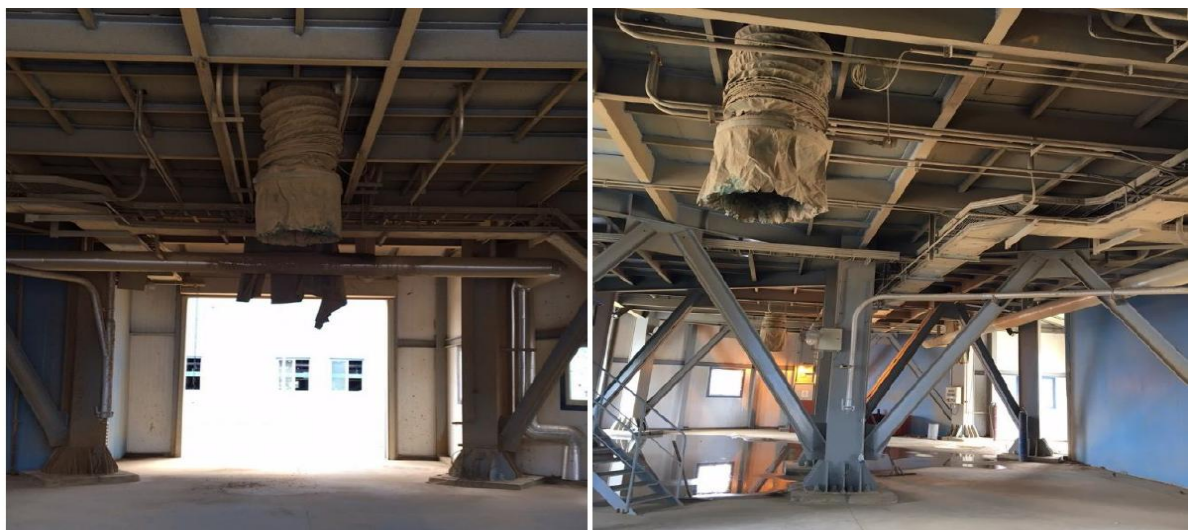
Из овог типа котла врши се испитивање особина пепела у којем сагоријева угаљ крупноће 100% - 15(25)+ 0 mm (95% - 15mm). У бившој Југославији, у односу на остале термоелектране на угаљ, Термоелектрана „Станари“ је прва термоелектрана која сагоријева издробљени, а не пулверизовани угаљ и прва ТЕ која сагоријева угаљ у флуидизованом слоју и то на нижој температури (850-870°C), од температура ложишта за пулверизовани угаљ. Од самог почетка пробног рада Термоелектране „Станари“ вршено је испитивање особина летећег пепела који се сакупља на врећастим филтерима, а затим депонује у одговарајуће силосе. Пепео са дна

котла одваја се специјалним системом елеватора, хлади и складишти у силосу за пепео са дна котла, прије него што се транспортује камионима на депонију (слика. 2.3) (ETF, 2016).



Слика 2.3. Утовар летећег пепела у камионе покривене церадом (ETF, 2016)

Замјена оваквом начину утовара и одвоза пепела јесте утовар пепела у камионе цистерне директно из силоса пепела са дна котла или силоса летећег пепела што је приказано на слици 2.4.



Слика 2.4. Уређај за утовар летећег пепела у камионе-цистерне намјењен транспортном одвозу пепела (ETF, 2016)

За депоновање пепела обезбијеђен је простор у коме је изграђена касета намјењена одлагању пепела. Касета је пројектована у складу са свим важећим европским стандардима за заштиту животне средине и природне околине. Планирани капацитет простора омогућава складиштење свих количина пепела током читавог радног вијека термоелектране, укључујући експлоатацију угља са сјеверног дијела басена (ПК Рашковац и КОП 2) и јужног дијела басена (ПК Остружња).

На слици 2.5. приказана је Касета број 1, прва је у низу, а њена изградња представља прву фазу. Следеће касете ће бити изграђене у фазама, при чему ће динамика изградње зависити од количине пепела који се одлаже из Термоелектрана „Станари“ (ETF, 2016).



Слика 2.5. Касета за одлагање пепела и њен положај у односу на Термоелектрану „Станари“

Пројекат изградње Термоелектране „Станари“ представља изузетну прилику за подстицање економског развоја Босне и Херцеговине кроз значајне инвестиције, стварање додате вриједности и отварање нових радних мјеста. Са укупном вриједношћу инвестиције од 500 милиона евра, развој Рудника и Термоелектране „Станари“ представља највећу инвестицију у енергетском сектору Босне и Херцеговине у посљедњих 25 година. Кључне користи ове инвестиције укључују:

- Отварање нових радних мјеста у фази изградње;
- У Руднику и Термоелектрани „Станари“ створено је више од 900 сталних радних мјеста;
- Значајан дио средстава инвестиције остаје у домаћој економији;
- Кроз директне и индиректне приходе од пореза и доприноса остварује се позитиван утицај;
- Стимулисање страних инвеститора да улажу у регион;
- На регион имају значајан утицај секундарни економски фактори.

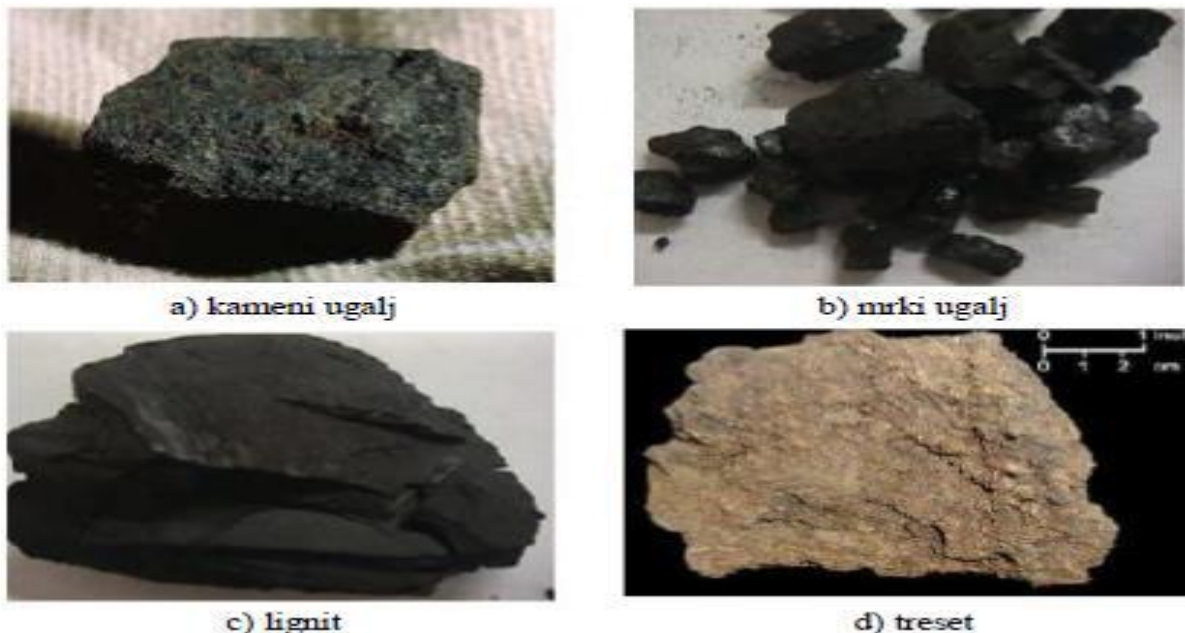
2.2. Електрофилтерски пепео термоелектрана-особине и подјела

Летећи пепео представља фини прашкасти материјал који настаје као нуспроизвод током сагоријевања чврстих горива, најчешће прашкастог угља, у индустријским пећима. Након формирања, овај материјал се сакупља у електростатичким филтерима или механичким сепараторима, због чега се често назива и електрофилтерски пепео (Wesche, 2005).

У индустријској пракси под појмом „пепео“ подразумијева се чврсти несагориви остатак који се издваја при сагоријевању угља у котловима топлана и термоелектрана. Угаљ је запаљива црна или браонкасто-црна седиментна стијена са великом количином угљоводоника и угљеника. Угаљ је класификован као необновљиви извор енергије јер су му потребни милиони година да се формира. Угаљ садржи енергију која се налази у биљкама које су живјеле прије стотину милиона година у мочварним шумама. Слојеви прљавштине и стијена прекривали су биљке милионима година и под утицајем притиска и топлоте претворили биљке у супстанцу коју називамо угаљ.

Најчешћа подјела чврстих фосилних горива је на (Milovanović, 2011):

1. Камени угаљ – овај угаљ садржи мало влаге, садржај пепела му је различит у широким границама, и потиче из старијих геолошких формација;
2. Мрки угаљ – потиче из новијих терцијарних геолошких формација и има различит садржај влаге и пепела;
3. Лигнит – представља најмлађу врсту угља и има велики садржај пепела и влаге;
4. Тресет – је најмлађе фосилно гориво и због тога се не може сматрати угљем.



Слика 2.6. Чврста фосилна горива – угаљ (Milovanović, 2011).

Приликом производње електричне струје, после сагоревања угља највећи дио неорганске материје из угља заостаје као пепео. Постоји више врста пепела, а према мјесту њиховог настајања најчешће се дијеле на:

- *Шљаку* (енгл. *bottom ash*), која представља најкрупнији несагориви остатак настао током сагоријевања угља и који се таложи на дну котла;
- *Котловски пепео* (енгл. *boiler ash*), обухвата веће честице које се заједно са димним гасовима издвајају из котла, али се гравитацијски таложе на путу до електрофилтера;
- *Електрофилтерски пепео* (енгл. *fly ash*), је најситнија фракција пепела, која се издваја електростатичким сепарацијама у електрофилтерима из струје димних гасова.

Честице електрофилтерског пепела представљају фини прах који се углавном састоји од сферичних стакластих честица величине мање од 100 μm (Krgović, 2015). Због своје лагане природе, електрофилтерски пепео је познат и као „*лебдећи*“ или „*летећи*“ пепео. Летећи пепео карактерише лагана текстура, релативно велика специфична површина која се креће у опсегу од 170 до 1000 m^2/kg , као и изузетно добра пропустљивост воде. Он представља остатак који остаје након сагоријевања угља и углавном се састоји од несагоривих супстанци присутних у самом угљу. Генерално, 95–99% пепела чине елементи типични за стијене и земљишта, као што су алуминијум (Al), жељезо (Fe), силицијум (Si), калцијум (Ca), уз присуство још око 25–30 других елемената (Krgović, 2015).

Наведени елементи се углавном налазе у облику силиката (SiO_2), оксида магнезијума и калцијума (MgO и CaO), сулфида (FeS_2), оксида тровалентних метала (Al_2O_3 , Fe_2O_3), карбоната (CaCO_3 , MgCO_3) и сулфата (CaSO_4 , MgSO_4). С обзиром на различите хемијске саставе угљева, хемијски састав летећих пепела такође варира. Међутим, на састав летећег пепела значајан утицај имају температура сагоријевања угља, брзина хлађења, као и тип и

конфигурација уређаја за контролу загађења ваздуха. Ови уређаји садрже материјале на бази креча који гасовити SO_2 претварају у CaSO_4 . Летећи пепео се често додаје цементу, јер су његове пуцоланске особине већ дуго познате. Пуцолани представљају алумино-силикатне материје које, у присуству влаге, хемијски реагују са калцијум-хидроксидом на собној температури и формирају једињења са својствима сличним цементу (Tasić, 2016).

Од италијанске вароши Рисуолі потиче ријеч „пуцолани“, и у њој се налази значајно налазиште ових материја.

Класификација пепела, заснована на хемијском саставу, минералној структури, врсти угља од којег настаје, условима депоновања и другим факторима варира, тако да свака институција која се систематски бави пепелом има своју властиту класификацију (Tasić, 2016).

Подјела електрофилтерских пепела може се вршити према њиховој алкалности, на киселе и базне пепеле, у зависности од тога какву реакцију показују у контакту с водом. Кисели пепели настају сагоријевањем камених угљева и хемијски садрже 50–80% SiO_2 и 15–35% Al_2O_3 . Базни пепели, који се добијају сагоријевањем мрког угља и лигнита, имају као основну компоненту CaO у опсегу од 20–50%.

Према врсти угља из којег настаје, летећи пепео може бити:

1. Кречњачки,
2. Силикатни

Обје врсте пепела садрже исту групу оксида (Si , Al и Fe). Разлика између њих је у присуству кречњака, код кречњачких пепела удио је већи од 10%, док је код силикатних пепела мањи од 10% (Heidrich, Feuerborn, & Weir, 2013).

Према хемијском саставу електрофилтерски пепели се различито категоришу у УСА, али је најзаступљенија класификација пепела према америчком стандарду ASTM C618-17а, гдје се летећи пепео дијели у двије класе (ASTM, 2017).

- Класа F, и
- Класа C.



Слика 2.7. Класе летећег пепела – F (лијево) и C (десно) према ASTM C618-17а (Karličić, 2018).

Према америчком стандарду (ASTM C618—17а) подјела летећих пепела на основу хемијског састава и пуцоланских карактеристика представљена је у табели 2.4.

Табела 2.4. Хемисјски састав пепела према ASTM C618 (ASTM, 2017).

Састав	Класа F	Класа C
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ , min (%)	70,0	50,0
SO ₃ , max (%)	5,0	5,0
Влага, max (%)	3,0	3,0
Губитак жарењем, max (%)	6,0	6,0

Основна разлика између летећег пепела класе F и класе C је у садржају калцијума. У класи F укупан удио калцијума креће се између 1% и 12% и налази се у облику Ca(OH)₂, CaSO₄, као и стакланих компонената у комбинацији са SiO₂ и Al₂O₃. У класи C, калцијум се јавља у облику CaO, са удјелом од 30-40%, а овај пепео карактерише веће присуство алкалија (Na, K) и сулфата (Ahmaruzzaman, 2010).

У руској литератури најчешће се примјењује класификација летећих пепела на основу садржаја CaO. Класа C садржи више од 20% CaO, уз присуство вишка алкалија и сулфата, и стврдњава се у присуству воде. Ова класа настаје сагоријевањем лигнита и млађих мрких угљева. Супротно томе, класа F има мање од 7% CaO, при чему преовладавају силицијум и алуминијум. Летећи пепео из класе F посједује пуцоланска својства и добија се сагоријевањем старијег антрацита (Krgović, 2015). Често се ове двије класификације комбинују у једну интерпретацију подјеле летећих пепела, што је уочљиво и у литератури (Ristic, 2015).

Подјела електрофилтерских пепела према стандардима EN 197-1 и ASTM C618 приказана је у табели 2.5.

Табела 2.5. Подјела електрофилтерских пепела према EN 197-1 и ASTM C618 (Bustalic i sar., 2014).

Подјела пепела	Нискокалцијумски електрофилтерски пепео	Висококалцијумски електрофилтерски пепео
Поријекло електрофилтерског пепела	Битуминозни угаљ и антрацит	Суб-битуминозни угаљ и лигнит
Принцип реакције	Пуцоланкса	Пуцоланска и хидрауличка
Дефиниција према EN 197-1	Силицијумски електрофилтерски пепео, ознака V	Калцијумски електрофилтерски пепео, ознака W
Реактивни CaO	<10%	≥10%
Дефиниција према ASTM C618	Класа F	Класа C
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	≥70%	≥50%

RIMEL комитет (Удружење за истарживање материјала и конструкција) TC 67-FAB разврстао је летећи пепео у IV типа (Tasić, 2016).

- Тип I: кисели пепео са израженом пуцоланском активношћу и садржајем SiO₂ изнад 50%, уз Al₂O₃ (25%), Fe₂O₃ (7-9%), CaO (5-7%) и SO₃ (1-3,3%).

- Тип II: алумо-силикатни пепео са нижим садржајем SiO_2 (40-50%), Al_2O_3 (17-25%), Fe_2O_3 (8-12%), CaO (9-22%) и SO_3 (0,5-5%). И овај пепео поседује пуцоланску активност.
- Тип III: базни пепео са високим садржајем CaO (40-50%, од чега је 10% слободног CaO), уз SiO_2 (1-5%), Al_2O_3 (7-8%), Fe_2O_3 (6-8%) и SO_3 (9%). Овај тип пепела не припада пуцоланима.
- Тип IV: високо-сулфатни и високо-базични пепео са високим садржајем SO_3 (26%) и CaO (33%, од чега је 23% слободног CaO), уз садржај SiO_2 који је нижи него код базног пепела, као и Al_2O_3 (4%), SO_3 (8%) и MgO (4%). Ова врста пепела нема пуцоланска својства.

Уобичајена боја електрофилтерског пепела је сива. Боја пепела представља важан показатељ садржаја креча. Свјетлија боја указује да је присутан већи садржај креча (CaO), док тамнија боја летећег пепела указује да су присутне веће количине органских материја, углавном несагорелог угља.

Поред хемијских карактеристика за утврђивање индустријске примјене битну улогу игра и минерални састав. Минерални састав електрофилтерског пепела је разноврстан и зависи од стјенског слоја из којег је угаљ првобитно експлоатисан (Madlool i sar., 2011). Захваљујући присуству аморфних облика силицијум-диоксида и алуминијум-оксида, он има способност да на собној температури реагује са калцијум-хидроксидом, што му даје пуцолански карактер. Ова својства га чине погодним за примјену као минерални додатак у грађевинарству (Jevtić i sar., 2013; Šešlija i sar., 2016).

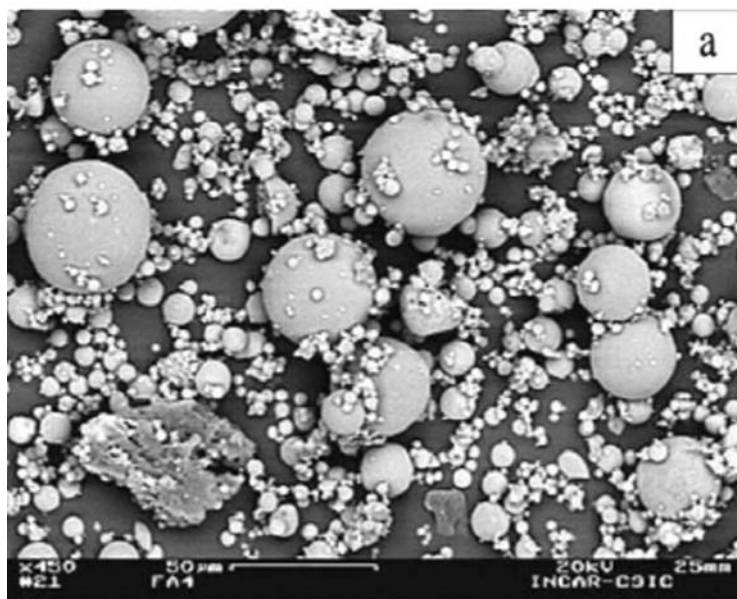
Кварц и мулит чине главну кристалну фазу електрофилтерског пепела, који садржи релативно мали удио калцијума. Минерални састав пепела зависи од геолошких фактора повезаних са формирањем и таложењем угља, али и од начина руковања и депоновања. Доминантне минералне фазе су кварц, каолинит, илит и сидерит, док су у мањем обиму присутни калцит, пирит и хематит. Са друге стране, пепели са високим садржајем калцијума, поред кварца, доминирају три-калцијум алуминат (C_3A) и тетра-калцијум-алумо-силикат (C_4AS) (Ahmaruzzaman, 2010).

Минерали и фазе у летећим пепелима могу се, према начину настанка, класификовати као примарни, секундарни и терцијарни. Примарни минерали представљају изворне минерале угља који нису претрпјели трансформацију, а карактерише их висока температура топљења; у ову групу спадају одређени силикати, оксиди, сулфати, фосфати и карбонати. Током процеса сагоријевања настају секундарни минерали, који обухватају различите силикате, оксиде, сулфате, карбонате, сулфиде, стаклене фракције и коксни остатак. Терцијарни минерали формирани су током транспорта и складиштења и укључују портландит, бруцит, гипс, гвожђе, сулфат, калцит, доломит, хидроксиде гвожђа и алуминијума, као и аморфне материјале (Vassilev i Vassileva, 2007).

Минералне материје из угља у току процеса прелазе у аморфне и кристалне фазе од којих се пепео састоји. У ширем смислу минерални састав пепела обухвата сљедеће компоненте:

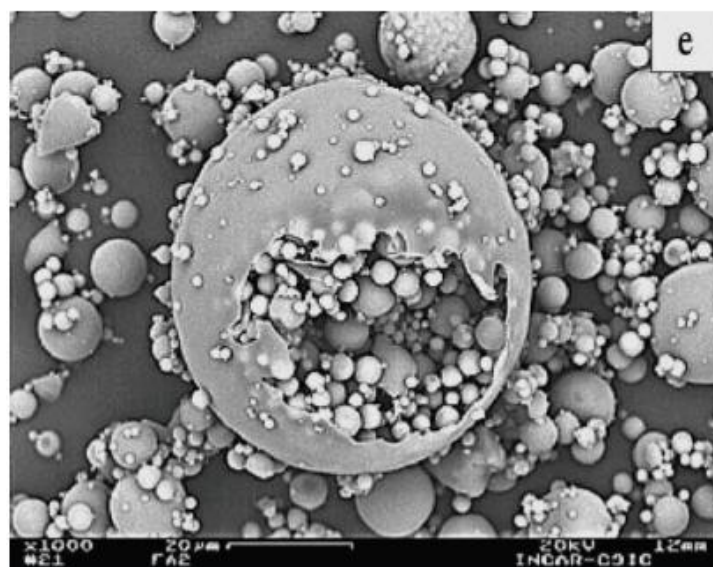
- Органске супстанце које потичу из угља;
- Неорганске супстанце, кристалне и аморфне;
- Гасовите, гасовито-течне и течне инклузије у органској и неорганској компоненти (Adamovic, 2023).

Сферне честице од којих се састоји аморфни (стакласти) дио пепела су шупље, керамичке микросфере, танке и називају се ценосфере (слика 2.8.).



Слика 2.8. Аморфна фаза пепела, састављена од алумо-силикатних сферних честица (Adamovic, 2023; Vassilev i Mendez, 2005).

Њихова чврста кора се састоји од алумосиликатног стакла, кварца, мулита, калцита, сулфата, оксида жељеза и силиката калцијума. Ове сфере настају под специфичним условима, као истопљене капи од глиновитих минерала, фелдспата, кварца и луксина, и ове сфере су напуњене гасовима (CO_2 , N_2 , O_2 и H_2O) који су продукт сагоријевања органске материје, декомпозиције карбоната, дехидратације глиновитих минерала и евапорације воде из пора. Сматра се да ове сфере настају на температури између 1230°C и 1400°C . Плеросферама (слика 2.9.) се називају ценосфере у чијим се шупљинама налазе још мање сферне честице (Adamovic, 2023; Vassilev i Mendez, 2005).



Слика 2. 9. Алумо-силикатна плеросфера у пепелу

Електрофилтерски пепео као отпадни материјал одлаже се коришћењем два основна поступка: „сувог“ и „мокрог“ поступка. Код „сувог“ поступка остаци сагоријевања одлажу се у сувом или благо влажном облику на депонијама, које функционишу по принципу конвенционалног затрпавања. „Мокро“ одлагање обухвата мијешање пепела и шљаке са

водом на локацији електране, након чега се хидраулички транспортују цјевоводом до вјештачке лагуне (Krgović, 2015).

Производња пепела насталог сагорејевањем угља има два значајна утицаја на животну средину:

- Емисија и таложење великих количина пепела, што доводи до загађења воде, ваздуха и земљишта честицама пепела, укључујући проблем депонија пепела.
- Испирање микро и макро-елемената из пепела у атмосферске и површинске воде (Tasić, 2016).

У саставу угља, поред угљеника, влаге и испарљивих материја, налазе се и неорганске материје, укључујући различите врсте минерала. Врста и количина минерала у угљу важни су за анализу летећег пепела, јер ове несагориве компоненте могу значајно утицати на хемијски састав пепела и његове физичке карактеристике (Karličić, 2018). Угљеви који садрже минерале из шкриљаца и каолинских група дају алуминосиликатне пепеле, док угљеви са високим садржајем сулфидних минерала, као што су пирит и марказит, доводе до повећане концентрације гвожђа у пепелу.

У алкалној средини (свјежа вода) настали угљеви утичу на таложење и висок садржај карбоната Са и На у угљу, док барске или слане воде, због разградње воденог живота, повећавају садржај сулфура и тиме доводе до смањења рН вриједности (Grosso, 2017). Различити микроелементи, чији укупни масени удио није већи од 1%, могу се наћи у саставу угља (Nalbandian, 2012). Њихову расподелу у честицама пепела одређује структура ових елемената при чему су углавном чврсто везани и није их лако ослободити (Izquierdo i Querol, 2012).

Сагорејевањем различитих врста угљева (антрацита, мрких угљева и лигнита) настају различите врсте летећих пепела. Према томе, пепели настали сагорејевањем различитих врста угља имају различите физичке и хемијске карактеристике. На слици 2.10. је дат изглед различитих врста летећег пепела.



Слика 2.10. Различите врсте летећег пепела (Karličić, 2018).

2.2.1. Тешки метали у летећем пепелу

Угљеви који се користе у термоелектранама могу садржати елементе у траговима, од којих су неки изузетно токсични. Разумијевање понашања ових елемената током сагоријевања и након њега има велики значај, јер се они, осим што се ослобађају у атмосферу, налазе и у пепелу који се депонује. Због потенцијалне покретљивости у воденој средини, ови елементи могу се излуживати у земљиште, подземне и површинске водене токове (Adamović, 2023).

У пепелима лигнитских угљева присутни су у траговима различити елементи, као што су Ag, As, V, Ba, Be, Cd, Cr, Cs, S, Ga, Ge, Li, Mn, Mo, Nb, Ni, Pb, Rb, Sb, Sc, Sn, Sr, U, Tl, Y, Zn и Zr. Многи од њих су изузетно токсични, али поједини имају значајну економску вриједност и могу се користити, примјерице за екстракцију галија (Ge) из пепела (Font i sar., 2005).

Елементи у траговима могу бити равномјерно распоређени унутар честица пепела, али се такође могу концентрисати на њиховој површини. У стакластој фази обично се налазе елементи као што су V, Su, Zr и Cr, док се на површини честица чешће концентришу As, Su, Pb, Tl, Mo, Se, U, Ga и Ge (Font i sar., 2005; Adamović, 2023).

2.2.2. Утицај летећег пепела на околину и људско здравље

Честице електрофилтерског пепела могу изазвати значајне штетне ефекте на здравље људи и на животну средину. Ове честице могу се преносити вјетром на значајне удаљености од термоелектране и депонија, а могу остати у ваздуху дуже вријеме, што повећава ризик од њиховог удисања. Највећем ризику су изложени запослени у термоелектранама, али због високе мобилности честица угрожени су и становници који живе у близини термоелектрана и депонија пепела. Према неким мјерењима, концентрација инхалативног пепела унутар термоелектрана под нормалним условима рада креће се од 0,1 до 7 mg/m³. Ове честице могу иритирати очи, кожу и слузокожу носа и грла, док дугорочно удисање може довести до озбиљних здравствених проблема, укључујући плућни карцином и хронични бронхитис.. (Adamović, 2023).

Осим што представља опасност по здравље људи путем удисања, честице пепела имају и озбиљан утицај на животну средину. Оне загађују земљиште, површинске и подземне воде, а могу продријети и у дубље слојеве земље. Ово доводи до смањења рН вредности воде, што може негативно утицати на водене екосистеме, нарушавајући процес фотосинтезе код водених биљака и пореметити природни ланац исхране. Такође, летећи пепео може изазвати корозију металних структура са којима дође у контакт, што додатно утиче на инфраструктуру и економски развој региона (Adamović, 2023).

2.3. Примјена летећег пепела

Са све мањим простором за депоновање и све већим трошковима складиштења, летећи пепео, који је некада био један од највећих извора отпада на свијету, данас добија нову перспективу. Строжа законска регулисања у области заштите животне средине, економски фактори, али и напредак технологије, довели су до тога да летећи пепео постане све више прихваћена сировина или корисни отпад. Сходно томе, све већи број термоелектрана прелази на савремене системе пнеуматског транспорта и депоновања пепела. Ова промјена је подстакнута не само стриктнијим мјерама заштите животне средине, већ и растућом потражњом за материјалима који се могу користити као сировине у другим индустријама (Karličić, 2018).

Једна од најзначајнијих предности летећег пепела је његова могућност директне употребе без претходног третмана. Међутим, неке његове компоненте могу се издвојити различитим методама, термичким, хемијским или механичким и користити као кључни адитиви у производњи, као што су пуцолански адитиви за цемент и бетон. Осим у грађевинарству и цементној индустрији, летећи пепео има широк спектар других примјена. Он се примјењује

као покривка, у керамичкој индустрији, као подлога за путеве, за солидификацију и стабилизацију отпада, за производњу лаких агрегата, у металургији, за побољшање квалитета пољопривредног земљишта и воде, као и у многим другим областима. (Ahmaruzzaman, 2010).

Гледано из перспективе коришћења угља електрофилтерски пепео је ресурс који треба у потпуности искористити, док из перспективе производње енергије, електрофилтерски пепео је отпадни материјал. Због тога произвођачи електричне енергије траже начине на који ће што боље да искористе сировину значајне вриједности (Ahmaruzzaman, 2010).

Постоји низ разлога у проналаску могућности за коришћење електрофилтерског пепела а то су: смањивање подручја која су резервисана за одлагање, али исто тако и дјелимична замјена скупих природних или оксидних ресурса и минимизација трошкова збрињавања.

Електрофилтерски пепео је суви прашкасти материјал, сиве до црне боје, лаган, велике специфичне површине, састављен углавном од SiO_2 , Al_2O_3 и Fe_2O_3 уз промјенљив састав калцијума, магнезијума, угљеника и сумпора, са малом вриједношћу процента губитка жарењем, тражење могућности његове примјене је у потпуности оправдано. Због различитих хемијских и физичких својстава није могуће очекивати да се све врсте пепела могу користити за само једну намјену. Да би примјена електрофилтерског пепела била успјешна треба водити рачуна о строгим условима које испитивани материјали морају испунити да би постали сировина за тачно дефинисану намјену (Drljaca, 2020).

Летећи пепео који настаје у термоелектранама на угаљ представља ефикасан супституциони материјал за дио портланд цемента у стандардним бетонским смјешама. Бројна истраживања показала су да замјена 20% до 25% цемента летећим пепеолом доводи до повећања чврстоће, смањења пропустљивости и побољшања трајности финалног бетонског производа. Стога, употреба летећег пепела у ове сврхе умјесто његовог одлагања на депоније или лагун у близини термоелектрана, не само да оптимизује управљање отпадом, већ и значајно смањује емисије угљен-диоксида, доприносећи унапређењу еколошких и техничких перформанси бетона (Larson, 2023).

Према истраживањима (Vargas i Halog, 2015), замјеном дијела клинкера у цементу са летећим пепеолом може се постићи смањење емисије CO_2 и до 300.000 тона годишње у цементари капацитета 5.000 тона дневно. Ово се објашњава чињеницом да је производња клинкера изразито емисионо интензивна, док је летећи пепео формиран у термоелектрани и не захтијева додатну калцинацију.

Према смјерницама Међувладиног тијела за климатске промјене (eng. Intergovernmental Panel on Climate Change-IPCC) за националне инвентаре гасова стаклене баште, производња клинкера као главне компоненте цемента одговорна је за значајне емисије CO_2 , при чему се емитује око 510 kg CO_2 по тони произведеног клинкера као посљедица термичког распада калцијум-карбоната. Укупне емисије у производњи цемента типа CEM I, који садржи високи проценат клинкера, достижу око 850 kg CO_2 по тони цемента (IPCC, 2019).

Употреба летећег пепела као допунског цементног материјала омогућава дјелимичну замјену клинкера, чиме се директно смањују емисије гасова стаклене баште. За цементе типа CEM II, који садрже летећи пепео, укупне емисије износе приближно 670 kg CO_2 по тони, што представља смањење емисија за око 20% у односу на традиционалне цементе без додатка. Летећи пепео налази своју примјену углавном у двије области: као минерални додатак у производњи цемента и као минерални додатак у производњи бетона, а његова употреба строго је регулисана важећим стандардима. Према стандардима BAS EN 197-1:2013, дефинисани су технички захтијеви за примјену калцијумовог и силицијумовог летећег пепела у производњи портланд цемента са додацима (тип CEM II), пуцоланских цемента (тип CEM IV) и мјешовитих портланд цемената (тип CEM V). Са друге стране, стандард BAS EN 450-1:2012 поставља критеријеме које летећи пепео мора испуњава како би био прихватљив за

употребу као минерални додатак у бетонским смјешама. Калцијумов летећи пепео не задовољава критеријуме максимално дозвољеног садржаја реактивног СаО (max. 10%) и то је разлог због чега је њихова примјена као додатак бетону сведена на минимум. Калцијумови летећи пепели, који настају сагорејевањем лигнита и мрког угља, производе се у огромним количинама у термоелектранама широм свијета. То доводи до повећаних притисака на регулаторна тијела да донесу одговарајуће прописе који би омогућили рационалну употребу ових пепела као минералних адитива у производњи бетона. Из тог разлога, проводе се интензивна истраживања која се фокусирају на различите аспекте утицаја калцијумовог летећег пепела на својства цементних композита (Mujkanović i sar., 2018).

Употреба летећег пепела у производњи бетона представља једну од најважнијих стратегија за смањење емисије CO₂ и унапређење одрживости грађевинског сектора. Према Nayak и сарадницима, додавањем летећег пепела као минералног додатка у бетонске смјеше, могуће је значајно смањити употребу портланд цемента, а самим тим и емисије угљен диоксида, с обзиром да производња цемента учествује са око 7% у укупним глобалним емисијама CO₂. Истраживања су показала да замјеном 15-30% цемента летећим пепелом не само да се постиже побољшање обрадиости и дуготрајности бетона, већ се такође смањује топлотна проводљивост, побољшава микроструктура умањује порозност материјала. Додатно аутори истичу да је примјена летећег пепела кључна за смањење депоновања овог материјала, чиме се смањују негативни еколошки утицај на воду, земљиште и ваздух (Nayak i sar., 2022).

Најважније карактеристике летећег пепела за употребу у бетону су финоћа честица. Садржај влаге, губитак при жарењу и хемијски састав. Примјеном летећег пепела у бетону постиже се смањења потреба за водом у односу на портландске цементе, што омогућава стабилан однос вода/везиво и смањује могућност издвајања воде. Истраживања су потврдила да додавање пепела побољшава обрадљивост бетонских смјеша. Највећи недостатак представља спорији пораст чврстоће код већег удјела летећег пепела у бетонској смјеши (Lebo i Wurth, 2016).

Истраживање које су провели El Kanzaoui и сарадници (2021) фокусира се на валоризацији летећег пепела из термоелектране са ултрасуперкритичним условима сагорејевања угља. У раду је развијен нови композитни материјал у којем је као ојачавајућа компонента кориштен летећи пепео. Овај композит показао је одлична механичка и термичка својства: просјечна топлотна проводљивост кретала се од 0,804 W/mK за 50% садржаја пепела до 1.057 W/mK за 60% садржаја пепела, што указује на његов потенцијал као изолационог материјала. Поред тога, композит је показао високу отпорност на ерозију у агресивним срединама, као и повећане вриједности Јунговог модула, што га чини погодним за примјену у грађевинским и инфраструктурним пројектима (El Kanzaoui i sar., 2021).

Сви негативни еколошки утицаји које узрокују летећи пепео и шљака могу бити елиминисани или значајно умањени њиховом примјеном као грађевинског материјала у изградњи путева и других површина изложених саобраћају. Употребом летећег пепела и шљаке као секундарних сировина у изградњи постиже се значајна уштеда стандардних грађевинских материјала као што су камен, шљунак и пијесак, који су необновљиви природни ресурси. На овај начин не само да се смањује притисак на природне ресурсе, већ се и унапређује одрживост грађевинских пројеката, у складу са принципима циркулационе економије и стратегијама за смањење емисије гасова стаклене баште (Šešlija i sar., 2016).

2.4. Међувладино тијело за климатске промјене

Међувладино тијело за климатске промјене (eng. Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC) основали су 1988. године Свјетска метеоролошка организација (WMO) и Програм Уједињених нација за околину (UNEP), као одговор на све већу забринутост научне заједнице и међународне јавности због пораста концентрације гасова стаклене баште (GHG) у атмосфери и њиховог утицаја на глобалну климу (IPCC, 2023). Током осамдесетих година, бројна истраживања показала су забрињавајуће трендове пораста просјечне температуре,

порста нивоа мора и учесталости екстремних временских догађаја, што је довело до потребе за формирањем институционалног оквира који би окупљао релевантна научна сазнања и пружао објективне информације креаторима политика (IPCC, 2007).

IPCC обезбјеђује објективне и свеобухватне научне податке о климатским промјенама изазваним људским дјеловањем, укључујући политичке, економске и природне утицаје и ризике, као и могуће опције реаговања. Сам IPCC не проводи оригинална истраживања нити прати климатски систем, већ периодично врши систематске прегледе релевантне рецензиране литературе и процјене научног стања у области климатологије, што чини основу његових Извјештаја о процјени (IPCC, 2014).

Кључна улога IPCC-а огледа се и у развијању међународно стандардизованих методологија за процјену емисија гасова стаклене баште из различитих сектора, укључујући енергетику, индустријске процесе, пољопривреду, коришћење земљишта и промјене у коришћењу земљишта и шумарству и сектор отпада. У оквиру 2006 IPCC: Упутства за националне инвентаре гасова стаклене баште, IPCC је дефинисао три методолошка нивоа (Ниво 1, Ниво 2 и Ниво 3), који се разликују по сложености, захтјевима за подацима и прецизности обрачуна (IPCC, 2019).

Поред методологија за сектор отпада (Том 5), значајно мјесто у IPCC смјерницама има и Поглавље 3: Индустријски процеси и употреба производа, које обухвата емисије из индустријских активности високог емисијског интензитета. Посебно је релевантно Поглавље 2: Емисије из минералне индустрије, које даје стандардизоване факторе емисије за минералну индустрију, укључујући производњу клинкера, цемента, креча, стакла и других материјала. У овом поглављу дефинисани су процеси декарбонизације кречњака и других карбонатних материјала, као и пратеће енергетске емисије, управо ти механизми који доводе до високих емисија CO₂ у производњи цемента (IPCC, 2006).

Због тога се 2006. Упутства IPCC-а, Том 3, Поглавље 2, широко примјењују у студијама животног циклуса (LCA), у анализама декарбонизације цементне индустрије и у процјенама уштеда које настају замјеном клинкера материјалима као што је летећи пепео. У оквиру овог рада, ово поглавље IPCC смјерница послужило је као основа за дефинисање процесних фактора емисије за клинкер и цемент, који су затим коришћени у процјени могућих уштеда CO₂ у сценаријима валоризације летећег пепела из Термоелектране „Станари“.

2.5. Емисије гасова са ефектом стаклене баште

Главни узрок глобалног загријавања је повећана количина угљен (IV) оксида, али и осталих стакленичких гасова који се ослобађају у атмосферу, као посљедица сагоријевања фосилних горива (нафта, земни и угљен гас), уништавања шума у корист пољопривреде, те осталих људских активности (Vukic i Paruga, 2015).

Молекуле CO₂ у атмосфери понашају се као прозирно тијело када је у питању Сунчево зрачење, али као апсорбер када је у питању инфрацрвено зрачење које се реемитује са Земље. То значи да CO₂ добро пропушта видљиво свјетло које долази од Сунца, али апсорбује инфрацрвено зрачење које Земља емитује. Ово апсорбовано зрачење молекуле CO₂ поново емитују, дјелимично према вишим слојевима атмосфере, али и назад према Земљи. То ствара ефекат који подсјећа на рад стакленика, јер овај процес задржава топлоту и помаже одржавању релативно високих температура на површини Земље. Због овога, овај ефекат се назива "ефект стаклене баште" (Vukic i Paruga, 2015).

Појам ефекта стаклене баште, увео је у осамнаестом вијеку француски математичар и физичар Jean Baptiste-Joseph Fourier. Захваљујући ефекту стаклене баште, просјечна годишња температура површине Земље износи 15°C (288K), а без ефекта стаклене баште износи -18°C (255K), односно 33 степена.

Гасови стаклене баште су уствари гасови, који омогућавају несметан пролаз Сунчеве свјетлости кратких таласних дужина (видљиви и УВ дио спектра), а апсорбују зрачење дужих таласних дужина (инфрацрвено зрачење).

Ипак, најприсутнији, угљен (IV) оксид није једини гас стаклене баште. Ту су још и водена пара (H_2O), озон (O_3), метан (CH_4), азот (I) оксид (N_2O), те неки чисто синтетски гасови којих иначе нема у природи хлорофлуороугљеници (CFC), хидрофлуороугљеници (HFC), перфлуороугљеници (PFC), те сумпор-хексафлуорид (SF_6), ако би се набројали само најважнији. CO_2 заједно са још 39 гасова образује слој који постаје све гушћи и омотавајући Земљу задржава све више топлоте претварајући планету у циновску стаклену башту (Kiehl i Kevin, 1997).

Истраживања показују да ће удружено дејство ових гасова до 2030. године бити једнако или чак веће од дејства CO_2 .

Ради лакшег праћења утицаја емисија и трговине емисијама, међународни договори су увели термин $\text{CO}_2\text{е}$ (еквивалент угљен-диоксида). Овај термин користи се за изражавање утицаја сваког гаса стаклене баште, који се добија тако што се маса одређеног гаса множи са његовим потенцијалом глобалног загревања (GWP — Global Warming Potential). GWP показује колико је одређени гас утицајнији од угљен-диоксида у апсорпцији инфрацрвеног зрачења у одређеном временском периоду. GWP се израчунава као однос ефикасности 1 kg одређеног гаса у апсорпцији инфрацрвеног зрачења у односу на ефикасност 1 kg CO_2 у истом временском периоду. GWP се обично израчунава за временске периоде од 20, 100 или 500 година, што треба бити јасно наведено када се приказују његове вриједности (Vukic i Paruga, 2015).

У табели 2.6. су приказане вриједности GWP-а неких гасова стаклене баште објављене у Четвртом извјештају о климатским промјенама, који издаје IPCC.

Табела 2.6. Животни вијек и GWP вриједности неких гасова стаклене баште

Гас	Животни вијек (године)	GWP (20 година)	GWP (100 година)
CO_2	5-200	1	1
CH_4	12	72	25
N_2O	114	289	298
CCl_3F	45	6730	4750
CHF_3	270	12000	14800
SF_6	3200	16300	22800

Четвртина глобалних емисија гасова стаклене баште повезана је са производњом материјала. Иницијативе за ефикасно коришћење ресурса и циркуларну економију, како оне вођене индустријом, тако и оне вођене потражњом, имају потенцијал да доведу до смањења емисија кроз мању употребу материјала. Већи дио модерног окружења изграђен је од бетона који је на бази цемента и челика. Производња ових најраспрострањенијих индустријских материјала долази са значајним трошковима у погледу енергије и емисије гасова стаклене баште. Цемент и бетон су међу главним произведеним материјалима који се користе, а њихова употреба се доводи у питање (Belaid, 2022).

У научном раду (Ma i sag., 2016) предлажу метод анализе инвентара за процјену гасова емисије стаклене баште из изградње цесте од портланд цементног бетон, на основу пројекта на западу Кине. Процес изградње цесте подијељен је у три фазе, а то су: производња сировине, производња бетона и изградња цесте на лицу мјеста. Резултати показују да је за изградњу 1 km цесте од портланд цементног бетона укупна емисија CO_2 8215.31 тона. На основу добијених резултата процјене, емисија CO_2 из фазе производње сировина износи

7617,27 тона што чини 92,7% укупних емисија гасова стаклене баште; емисија CO₂ из фазе производње бетона је 598.033.10 kg, што чини 7,2% укупних емисија гасова стаклене баште и коначно CO₂ из фазе изградње цесте на лицу мјеста износи 8396,59 kg, што чини 0,1% укупних емисија гасова стаклене баште. Главни гас стаклене баште је CO₂ у свакој фази, који чини више од 98% укупних емисија. Емисије N₂O и CH₄ су релативно безначајне.

2.6 Законодавни оквир

Законом о грађевинским производима („Службени гласник Републике Српске“, број 05/12) уређују се техничке карактеристике грађевинских производа, поступци оцјењивања њихове усаглашености и доказивање употребљивости, као услови за стављање на тржиште, дистрибуцију и употребу. Циљ закона је да се обезбиједи да грађевински производи испуњавају битне захтјеве за објекте и друге прописане услове од значаја.

Грађевински производ мора имати техничке карактеристике које, уз правилну уградњу и одржавање у складу са намјеном објекта, омогућују испуњавање битних захтјева: механичке отпорности и стабилности, заштите од пожара, хигијенске и здравствене заштите, заштите животне средине, заштите од буке, енергетске ефикасности и безбједности током употребе у економски прихватљивом року. Грађевински производ може се ставити у промет и користити само ако је доказана његова употребљивост, прописно означен и праћен техничким упутством. Забрањено је издавање докумената који могу довести у заблуду у погледу техничких карактеристика, усаглашености или доказивања употребљивости грађевинског производа.

Посебан значај за валоризацију летећег пепела има чињеница да Закон омогућава употребу грађевинских производа чије су техничке карактеристике утврђене на основу техничких прописа и стандарда који су усклађени са усаглашеним европским стандардима. На тај начин се ствара правни основ за примјену летећег пепела као секундарне сировине у грађевинској индустрији, под условом да је његова усаглашеност доказана у складу са прописаним поступцима. У случајевима када за одређени грађевински производ не постоји одговарајући национални или европски стандард, Закон предвиђа могућност доношења техничког одобрења Републике Српске. Овај механизам је од посебног значаја за иновативне материјале и алтернативне везивне компоненте, као што је летећи пепео из термоелектрана, јер омогућава њихову контролисану примјену у грађевинарству уз претходно испитивање и оцјену употребљивости.

Закон детаљно уређује поступке оцјењивања усаглашености, који обухватају почетна испитивања, сталну фабричку контролу производње и надзор овлашћених тијела. На тај начин се обезбеђује да грађевински производи, укључујући оне који садрже летећи пепео, задрже стабилне техничке карактеристике током производње, дистрибуције и употребе, што је од кључног значаја за њихову дуготрајност и безбједност. Правилник о техничким захтјевима за грађевинске производе – значај за валоризацију летећег пепела.

Правилник о начину спровођења поступка за оцјењивање усаглашености грађевинских производа (Службени гласник Републике Српске бр. 093/12) уређује поступке и радње оцјењивања усаглашености, укључујући испитивање техничких карактеристика производа и надзор фабричке контроле производње, као и услови за издавање сертификата о усаглашености и изјава о усаглашености. Правилник дефинише различите системе оцјењивања усаглашености, у зависности од врсте и намјене производа, који су усклађени са приступом који се примјењује у регулативи Европске уније. Његова примјена је од посебног значаја за валоризацију летећег пепела, јер омогућава да се грађевински производи који садрже користе у пракси искључиво након доказивања усаглашености са техничким спецификацијама и успостављања адекватне контроле производње. На тај начин се обезбеђује безбједна и контролисана примјена летећег пепела у грађевинској индустрији, уз истовремено смањење потрошње примарних сировина и емисије гасова стаклене баште.

Правилник о техничким захтјевима за грађевинске производе који се уграђују у објекте (Службени гласник Републике Српске бр. 067/25) прописује техничке карактеристике, услове употребе и поступке доказивања усаглашености грађевинских производа који се примјењују у објектима у Републици Српској. Основни циљ правилника је да обезбједи да грађевински производи, током пројектованог вијека трајања објекта, испуњавају основне захтјеве у погледу механичке отпорности, стабилности, безбједности, заштите животне средине и одрживости.

Правилник јасно дефинише да се грађевински производи могу уграђивати у објекте искључиво ако су њихове техничке карактеристике утврђене у складу са важећим стандардима, односно ако је доказана њихова употребљивост кроз поступке оцјењивања усаглашености. Посебан значај за валоризацију летећег пепела има одредба којом се омогућава примјена грађевинских производа који нису у потпуности обухваћени постојећим стандардима, путем техничког одобрења и програма контроле и осигурања квалитета, што ствара правни основ за употребу алтернативних и иновативних материјала. Правилником је предвиђено да се техничке карактеристике грађевинских производа дефинишу на основу BAS стандарда којима су преузети усаглашени европски стандарди, чиме се регулаторни оквир Републике Српске усклађује са регулативом Европске уније. Ова усклађеност је од посебног значаја за примјену летећег пепела у грађевинарству, с обзиром на то да је у Европској унији његова употреба широко регулисана и стандардизована, нарочито у производњи бетона и сродних материјала.

Употреба грађевинских производа који садрже летећи пепео условљена је доказивањем усаглашености, контролом производње и испуњавањем пројектом дефинисаних захтјева, чиме се обезбјеђује поузданост и безбједност њихове примјене. Истовремено, оваква регулаторна рјешења доприносе смањењу потрошње примарних сировина и енергетски интензивних материјала, што има директан утицај на смањење емисије гасова стаклене баште и подршку принципима одрживе и циркуларне градње.

Правилник о техничким карактеристикама грађевинских производа који се уграђују у бетон и бетонске конструкције (Службени гласник Републике Српске бр. 066/25) прописује захтјеве за бетон, армирани и преднапрегнути бетон, као и за све грађевинске производе који се уграђују у бетонске конструкције, укључујући цемент, агрегат и додатке бетону. Правилник дефинише техничке карактеристике, поступке доказивања усаглашености, услове пројектовања, извођења, употребе и одржавања бетонских конструкција у циљу обезбјеђења механичке отпорности, стабилности и отпорности на пожар. Посебан значај има прописивање контроле квалитета и фабричке контроле производње, као и обавезе доказивања употребљивости грађевинских производа. Овим се ствара нормативни оквир за примјену алтернативних материјала, као што је летећи пепео, као додатка бетону, под условом да су испуњени прописани технички захтјеви. Примјена правилника омогућава безбједну и контролисану употребу секундарних сировина у грађевинарству, што доприноси смањењу потрошње цемента и емисије гасова стаклене баште.

3. ХИПОТЕЗЕ И ЦИЉ РАДА

У овом раду су постављене следеће хипотезе:

- 1) Летећи пепео из Термоелектране „Станари“ посједује физичко-хемијска својства која омогућавају његову валоризацију у грађевинској индустрији као секундарне сировине.
- 2) Валоризација летећег пепела у грађевинској индустрији доприноси значајном смањењу емисија гасова стаклене баште у односу на базни сценарио депоновања, што уједно подржава испуњавање обавеза дефинисаних међународним климатским споеазумима.
- 3) Употреба летећег пепела из Термоелектране „Станари“ у грађевинској индустрији доприноси унапређењу одрживог управљања индустријским отпадом у складу са принципима циркуларне економије.

Сврха истраживања је да се, на основу анализа постојећих података и сценарија валоризације, оцјени потенцијал летећег пепела из Термоелектране „Станари“ за примјену у грађевинској индустрији, са аспекта смањења емисија гасова стаклене баште и одрживог управљања отпадом.

Циљеви истраживања су:

- 1) Анализирати физичко-хемијска својства летећег пепела из Термоелектране „Станари“ на основу доступних података, ради процјене његове погодности за употребу у грађевинским материјалима.
- 2) Развити и анализирати различите сценарије валоризације летећег пепела у грађевинској индустрији (употреба као сировина у производњи цемента, као додатак у бетону, и употреба у цестоградњи) у односу на базни сценарио депоновања.
- 3) Прорачунати уштеде у емисијама гасова стаклене баште за сваки сценарио валоризације у поређењу са базним сценаријем.
- 4) Испитати допринос валоризације летећег пепела унапријеђењу одрживог управљања индустријским отпадом и остварењу циљева циркуларне економије.

4. МАТЕРИЈАЛИ И МЕТОДЕ РАДА

Циљ овог истраживања био је да се, на основу постојећих података и провјерених метода, уради свеобухватна анализа могућности коришћења летећег пепела из Термоелектране „Станари“ у грађевинској индустрији. Рад се заснива на приступу који спаја грађевинско инжењерство, заштиту животне средине и принципе кружне економије. У том смјеру примјењене су следеће методе:

4.1. Анализа физичко-хемијских својстава летећег пепела

Као први корак у истраживачком процесу, извршена је анализа доступних резултата физичко-хемијских карактеристика летећег пепела добијених у оквиру лабораторијских испитивања реализованих од стране Термоелектрана „Станари“. Анализирани параметри укључивали су: садржај главних оксида (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO), губитак жарењем, рН вриједност, специфичну тежину, финоћу и морфолошке карактеристике честица.

Добијене вриједности упоређене су са захтјевима стандарда BAS EN 450-1:2013 и ASTM C618, који дефинишу критеријуме квалитета летећег пепела за примјену у производњи цемента и бетона. На основу тога је извршена процјена његове техничке подобности као секундарне сировине у грађевинској индустрији.

4.2. Разрада и анализа сценарија валоризације

С циљем свеобухватне процјене могућности управљања летећим пепелом из Термоелектране „Станари“, дефинисана су четири сценарија која одражавају различите приступе третману овог индустријског нуспроизвода. Сценарији су осмишљени тако да обухвате постојећу праксу, као и потенцијалне правце валоризације у грађевинској индустрији.

Базни сценарио представља полазну основу и одражава стање у којем се све количине пепела одлажу на депонију без даље примјене. Насупрот томе, три алтернативна сценарија разматрају могућности искоришћења пепела као секундарне сировине у производњи цемента, као додатка у бетонским мјешавинама и као материјала у изградњи путне инфраструктуре.

Базни сценарио: Депоновање

У овом сценарију све количине летећег пепела се транспортују и одлажу на депонију у близини термоелектране. Овај приступ не доноси еколошке нити економске користи, већ подразумијева трајно заузимање простора, потребу за дугорочним управљањем депонијом и потенцијалне ризике за животну средину, укључујући загађење земљишта и подземних вода.

Сценарио 1: Употреба у производњи цемента

Летећи пепео се користи као секундарна сировина у процесу производње цемента, гдје замјењује дио клинкера. На овај начин смањују се емисије гасова стаклене баште изазване производњом клинкера, смањује се потрошња енергије и природних ресурса, а истовремено се унапређује одрживост производње цемента. У овом сценарију претпоставља се да 1 t летећег пепела замјењује приближно 1 t клинкера.

Сценарио 2: Употреба у производњи бетона

Летећи пепео се користи као додаток у бетонским мјешавинама, гдје замјењује дио цемента. Претпостављено је да пепео чини 30% масе цемента. Оваква примјена не само да доводи до смањења емисија CO_2 , већ и побољшава одређена техничка својства бетона, као што су дуготрајност, отпорност на агресивне агенсе и лакша обрадивост.

Сценарио 3: Примјена у изградњи путне инфраструктуре

Пепео се користи као грађевински материјал у изградњи и стабилизацији путева, гдје замјењује дио примарних материјала као што су шљунак или кречњак. На овај начин смањује се потреба за експлоатацијом природних ресурса, док се ефекат у погледу смањења емисија CO₂ углавном односи на избјегнуте емисије из производње и транспорта агрегата, које су знатно ниже у односу на производњу клинкера и цемента.

4.3. Процјена емисија гасова стаклене баште

Процјена емисија гасова стаклене баште извршена је за све сценарије дефинисане у поглављу 4.2, са циљем да се утврди њихов еколошки потенцијал у односу на полазни, базни сценарио депоновања.

У базном сценарију израчуната је укупна емисија која настаје када се све количине летећег пепела транспортују и трајно одлажу на депонију у близини термоелектране. У овај прорачун укључене су емисије из транспорта и емисије процеса депоновања, усвојене у износу од 0,02 t CO₂/t пепела, према подацима из релевантне литературе (Habert i sar., 2010; Scrivener i sar., 2018).

За алтернативне сценарије валоризације израчунате су уштеде у емисијама CO₂ у односу на базни сценарио, и то на основу замјене примарних материјала летећим пепелом:

- у производњи цемента (замјена клинкера),
- у производњи бетона (замјена дијела цемента),
- у изградњи путева (замјена дијела примарних материјала).

За алтернативне сценарије урачунате су и емисије транспорта на удаљености од 100 km у једном правцу, при чему је узето у обзир да се транспорт обавља камионима носивости 20 t.

За сваки сценариј развијене су три варијанте степена искориштености пепела, 30%, 50% и 90% укупно расположивих количина, како би се добила реална и упоредива слика могућих ефеката валоризације.

4.4. Евалуација доприноса циркуларној економији

Процјена доприноса циркуларној економији заснована је на анализи више индикатора који су кључни за одрживо управљање ресурсима и смањење негативних утицаја на животну средину. У оквиру ове анализе посматрани су сљедећи аспекти:

- Смањење количине индустријског отпада: валоризација летећег пепела директно смањује потребу за његовим депоновањем, чиме се умањује притисак на простор, ризици за земљиште и подземне воде, као и потреба за дугорочним управљањем депонијама. На тај начин отпад постаје ресурс, што је једно од основних начела циркуларне економије.
- Замјена природних ресурса: употребом пепела у цементу, бетону и путној инфраструктури смањује се експлоатација природних материјала као што су клинкер, агрегати и кречњак. Ова замјена доприноси очувању минералних ресурса и смањењу деградације простора узроковане њиховом експлоатацијом.
- Енергетске уштеде и смањење емисија CO₂: смањена потреба за производњом клинкера и цемента резултира уштедама енергије и мањим емисијама гасова стаклене баште. Еколошки ефекат је посебно изражен у сценарију примјене пепела у производњи цемента, гдје се постижу највеће уштеде у односу на базни сценарио депоновања.
- Интеграција секундарних сировина у индустријске токове: валоризацијом пепела он постаје дио индустријских процеса као што су производња цемента и бетона или изградња инфраструктуре. Овим се затвара материјални ток и стварају предуслови за развој индустријске симбиозе између енергетског и грађевинског сектора.

Посебно је оцијењен и утицај валоризације летећег пепела на остварење циљева ЕУ стратегије „Затварање круга — акциони план ЕУ за циркуларну економију, која наглашава смањење отпада, максимално коришћење секундарних сировина и повећање ефикасности ресурса. Примјена пепела у грађевинским материјалима у потпуности је усклађена са овим циљевима, јер истовремено доприноси смањењу количине отпада и смањењу потребе за експлоатацијом природних ресурса.

4.5. Систематизација релевантне литературе

У циљу обезбјеђивања научно утемељене основе за анализу, извршена је систематска обрада релевантних научних и стручних радова који се баве примјеном летећег пепела у грађевинској индустрији. Преглед литературе обухватио је радове који се односе на цементну и бетонску индустрију, као и на изградњу путне инфраструктуре, при чему су идентификоване следеће тематске области:

- Технолошки аспекти производње цемента са смањеним садржајем клинкера: бројни радови указују на могућности замјене дијела клинкера летећим пепелом, уз задржавање захтијеваних механичких и физичко-хемијских својстава цемента. Стандарди као што су EN 197 и EN 196 дефинишу техничке услове и методе испитивања, што омогућава увођење пепела као признате секундарне сировине.
- Еколошке уштеде при употреби летећег пепела: истраживања показују да се замјеном клинкера или цемента постижу значајне уштеде у емисијама CO₂, као и у потрошњи енергије и природних ресурса. Радови IPCC-а и Европске агенције за заштиту животне средине потврђују да је производња клинкера највећи извор емисија у цементној индустрији, што оправдава примјену летећег пепела као једне од најефикаснијих мјера смањења утицаја на животну средину узрокованих емисијама у цементној индустрији.
- Примјери добре праксе у Европи и региону: у земљама Европске уније већ деценијама се спроводи примјена летећег пепела у цементу, бетону и путевима. У региону постоје позитивни примјери сарадње између термоелектрана и цементара, који показују да се интеграцијом енергетског и грађевинског сектора могу постићи обостране користи – смањење отпада са једне, и смањење трошкова сировина са друге стране.
- Потенцијали за развој геополимерних везива: све већи број истраживања усмјерен је на развој геополимера као алтернативе класичном цементу. Летећи пепео, захваљујући свом хемијском саставу богатом силицијум-диоксидом и алуминијум-оксидом, представља један од најперспективнијих материјала за ову примјену. Геополимери омогућавају додатно смањење емисија CO₂, побољшавају отпорност материјала и омогућавају ширу примјену у одрживој градњи.

Систематизацијом литературе потврђено је да валоризација летећег пепела није само технички изводљива, већ и усклађена са глобалним и европским стратегијама одрживог развоја. Ова сазнања служе као основа за процјену могућности имплементације сличних рјешења у локалном контексту, са посебним освртом на Термоелектрану „Станари“ и потенцијале њене интеграције у грађевинску индустрију региона.

5. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

5.1. Анализа физичко-хемијских својстава летећег пепела

У јануару 2016. године вршено је узорковање пепела за физичко хемијска испитивања. Стручна служба Рудника и Термоелектрана „Станари“ извршила је узорковање и припрему узорака. На слици 5.1.1. приказан је изглед летећег пепела и пепела са дна котла.



Слика 5.1. Летећи пепео (лијево) и пепео са дна котла (десно) (ETF, 2016)

У табели 5.1. приказани су упоредни резултати анализе летећег пепела и пепела са дна котла. Хемијски састав пепела представљен је као средња вриједност добијена на основу два одвојена одређивања.

Табела 5.1. Хемијски састав пепела из Термоелектране „Станари“ (ETF, 2017)

Компонента	Летећи пепео-средњи садржај, %	Пепео са дна котла-средњи садржај, %
SiO ₂	54,81	84,22
Fe ₂ O ₃	7,91	1,71
Al ₂ O ₃	20,50	5,85
CaO	7,65	4,66
MgO	2,20	1,115
SO ₃	2,11	0,835
P ₂ O ₅	0,05	0,02
TiO ₂	1,41	0,037
Na ₂ O	0,51	0,28
K ₂ O	0,825	0,26
Губитак жарењем	3,97	1,27
Реакција	Јако кисела	Јако кисела

Анализом је утврђено да пепео има висок садржај силицијума, са 54,8% SiO₂, што указује на изражено киселу реакцију. Пепео који се прикупља на дну котла показује још већи удио SiO₂, чак 84%. Садржај несагорјелог угљеника (губитак жарењем) у оба узорка је испод 5%, што се сматра прихватљивим. Насипна маса летећег пепела креће се у распону од 0,47 до 0,68 kg/dm³, док је код пепела са дна котла знатно виша – између 1,49 и 1,61 kg/dm³. Према критеријумима стандарда ASTM C618, на основу збирног садржаја оксида SiO₂, Al₂O₃ и Fe₂O₃,

као и удјела SO_3 и губитка жарењем (GŽ), пепео из Термоелектране "Станари" сврстава се у класу F.

Летећи пепео $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3=83,23\%>70\%$ $\text{SO}_3=2,11\%<5\%$ $\text{G}\check{\text{Z}}=3,97\%<6$

Пепео са дна котла	$\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3=91,78\%>70\%$	$\text{SO}_3=0,835\%<5\%$	$\text{G}\check{\text{Z}}=1,27\%<6$
--------------------	---	---------------------------	-------------------------------------

Пробни рад Термоелектране „Станари“ започео је у јануару 2016. године. У периоду од јануара до октобра 2016. године, односно закључно са септембром, Термоелектрана „Станари“ остварила је ефективно вријеме рада на електроенергетској мрежи у трајању од 4.222,57 часова, уз укупну бруто производњу електричне енергије од 2.123.442 MWh. У том периоду потрошено је 1.455.916 тона угља, са просјечним садржајем пепела од 7,5%. Током 2016. године, до краја септембра, у касети 1 депоновано је приближно 109.000 тона пепела. Од укупне количине пепела, 95% чини летећи пепео, док пепео са дна котла учествује са 5%.

Током септембра 2016. године извршена су испитивања узорака летећег пепела у еколошкој лабораторији у Какњу, коју је отворила контролна кућа „Inspekt RGH“ Сарајево. Резултати анализа летећег пепела, заједно са упоредним резултатима испитивања RI Београд, приказани су у табели 5.2

Табела 5.2. Упоредни резултати анализе летећег пепела из Термоелектране „Станари“ (EFT, 2017)

ХЕМИЈСКИ САСТАВ ПЕПЕЛА			
Параметар (%)	Летећи пепео		
	RI Београд Фебруар 2016. године	RGH Inspekt Какањ 10.09.2016.	RGH Inspekt Какањ 30.09.2016.
SiO_2	53,7	52,75	45,97
Fe_2O_3	7,76	8,18	19,96
Al_2O_3	20,09	20,40	14,66
CaO	7,50	8,00	8,40
MgO	2,16	6,20	3,20
SO_3	2,07	2,55	6,44
P_2O_5	0,05	-	-
TiO_2	1,38	0,35	0,35
Na_2O	0,50	0,352	0,341
K_2O	0,81	0,681	0,651
Губитак жарењем	3,97	0,31	0,16

Гранулометријски састав

Гранулометријска анализа летећег пепела указује на изражену финоћу материјала, при чему 91% масе пепела припада фракцији величине од 0,063 до 0,002 mm, док је 9% честица ситније од 0,002 mm. Гранулометријски састав пепела са дна котла показује да фракција величине од 60 до 2 mm учествује са 7%, фракција од 2 до 0,063 mm са 89%, док фракција од 0,063 до 0,002 mm чини 4% укупне масе. Резултати гранулометријског састава летећег пепела и пепела са дна котла приказани су у табели 5.3.

Табела 5.3. Гранулометријски састав летећег пепела и пепела са дна котла

Летећи пепео		Пепео са дна котла	
Отвор сита, mm	Масени удио, %	Отвор сита, mm	Масени удио, %

		60-2	7
0,063-0,002	91	2-0,063	89
0,002-0	9	0,063-0,002	4
Укупно	100	Укупно	100

Стандард EN 450:1 дефинише захтјеве које летећи пепео мора да испуни да би био погодан за употребу као додатни цементни материјал у бетону (посебно као пуцолански додатак). Материјал се класификује на основу два критеријума а то су LOI-губитак жарењем (који показује количину несагорјелих материја) и финоћа (количина честица која пролази кроз сито од 45 μm). Постији пет типова летећег пепела: тип А ($\text{LOI} \leq 5\%$), тип В ($\text{LOI} \leq 7\%$), тип С ($\text{LOI} \leq 9\%$), тип N (до 40% задржано на сити 45 μm) и тип S (до 12% задржано на сити 45 μm). За разлику од америчког стандарда ASTM C168, који класификује пепео према садржају CaO, стандард EN 450:1 заснива своју класификацију на физичким особинама (губитак жарењем и финоћа). У табели 5.4 је приказана упоредна анализа ова два стандарда.

Табела 5.4. Упоредна анализа стандарда EN 450-1:2012 и ASTM C618:2019

Особине	EN 450-1:2012 (Европа)	ASTM C618:2019 (SAD)
Критеријум класификације	LOI и финоћа	Садржај CaO
Број класа	5 (A, B, C, N, S)	2 (F и C)
Хемијски захтјеви	$\geq 70\%$ ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$)	$\geq 50\%$ ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$)
СаО границе	Нема	Класа F $\leq 18\%$, Класа C $> 18\%$
LOI границе	$\leq 5-9\%$	$\leq 6\%$
Финоћа (45 μm)	$\leq 12\%$ или $\leq 40\%$	$\leq 34\%$
Индекс чврстоће (SAI)	$\geq 75\%$ (28 д), $\geq 85\%$ (91д)	$\geq 75\%$ (28д)
Влажност	$\leq 3\%$	$\leq 3\%$
Захтјев за водом	$\leq 95\%$	$\leq 105\%$

Стандард EN 450-1:2012 представља ригорознији и флексиблинији приступ класификацији летећег пепела у односу на стандард ASTM C618:2019. Европски стандард сатвља већи нагласак на перформансе у бетону (реактивност, финоћу, чврстоћу и трајност), док ASTM C618:2019 полази од хемијског састава.

Табела 5.5. Упорјеђивање летећег пепела Термоелектране „Станари“ са класом А, В, С, N и S у стандарду EN 450:1

Садржај, %	Поређење карактеристика	
	Класе А, В, С, N, S	Летећи пепео ТЕ Станари
Сума SiO_2 , Al_2O_3 и Fe_2O_3 min.	> 70	83,23
SO_3 max.	< 3	2,11
Садржај влаге, max.	-	0
Губитак жарењем, LOI , max.	≤ 5 , ≤ 7 , ≤ 9	3,97
Финоћа пепела, тј.остатак на сити отвора 45 микрона	≤ 12 , ≤ 40	28

У табели 5.5. извршено је упоређивање летећег пепела из Термоелектране „Станари“ са табелом стандарда EN 450-1 (класе А, В, С, N и S).

У табели 5.6. извршено је упоређивање летећег пепела из Термоелектране „Станари“ са табелом стандарда ASTM C618 и закључак је, да летећи пепео из Термоелектране „Станари“ припада класи F.

Табела 5.6. Упорјеђивање летећег пепела Термоелектране „Станари“ са класом F у стандарду ASTM C618

Садржај, %	Поређење карактеристика	
	Класа F	Летећи пепео ТЕ Станари
Сума SiO ₂ , Al ₂ O ₃ i Fe ₂ O ₃ min.	70	83,23
SO ₃ max.	5	2,11
Садржај влаге, max.	3	0
Губитак жарењем, Lol, max.	6	3,97
Финоћа пепела, тј.остатак на сити отвора 44 микрона, (No 325), при просијавању, max.	34	28

Садржај тешких метала и металоида у пепелу из Термоелектране „Станари“

Испитивања садржаја тешких метала и металоида (As, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Mo, Ni, Pb, Ti, V, Zn) извршена су у Лабораторији за хуману екологију и екотоксикологију, Градског Завода за јавно здравље у Београду, а резултати изражени у mg/kg дати су у табели 5.7.

Табела 5.7. Садржај метала и металоида у пепелу Термоелектране „Станари“ (EFT, 2017)

Метал или металоид	Летећи пепео (mg/kg)	Пепео са дна котла (mg/kg)
Олово	27,9	7,81
Кадмијум	0,40	0,23
Цинк	37,5	23,2
Бакар	69,2	12,4
Никл	675	220
Хром укупни	409	143
Арсен	16,3	5,0
Баријум	337	83
Берилијум	2,33	0,63
Кобалт	57,3	18,9
Молибден	1,0	0,53
Манган	1033	273
Ванадијум	136	46,6
Титан	867	517

Пуцоланске особине летећег пепела Термоелектране „Станари“

Испитивање пуцоланских особина летећег пепела Термоелектране „Станари“ вршено је у Љубљани у „Заводу за Градбеништво“, Одјељење за материјале и Лабораторија за керамику, цемент и малтер.

У табели 5.8. су приказани резултати испитивања, најприје хемисјки састав пепела.

Табела 5.8. Хемисјки састав летећег пепела

Компонента	Измјерено	Захтјев по стандарду SIST EN 450-1:2013, тачка 5.2
Губитак жарењем, %	0,73	5,0 % категорија А
SiO ₂ čisti, %	51,34	≥70%
SiO ₂ topivi, %	0,34	
Al ₂ O ₃ , %	21,89	
Fe ₂ O ₃ , %	8,82	
SO ₃ , %	1,65	≤3,0 %
Нетопиви остатак, %	23,77	-
CaO slobodni, %	0,29	≥1,5%
SiO ₂ reaktivni, %	31,97	≤25%
CaO reaktivni, %	7,38	≥10%

Када је садржај слободног СаО већи од 1,5%, неопходно је испитати сталност запремине пепела. Уопштено, пожељно је да количина слободног СаО буде што мања, јер овај оксид има штетан утицај на цемент и цементне композите јер изазива накнадно ширење и пуцање тих материјала.

Повећано присуство слободног СаО у клинкеру (више од 1,5%) сматра се веома непожељним. Разлог је што ова супстанца може након одређеног времена, у већ очврслом бетону, да ступи у реакцију са водом и формира Са(ОН)₂.

Ово новоформирано једињење има већу запремину у односу на оригинални СаО, што доводи до појаве напона у бетонској маси, односно до њеног бубрења и на крају – распадања бетона. У табели 5.9. приказани су резултати испитивања физичких и механичких особина летећег пепела.

Табела 5.9. Физичке и механичке особине летећег пепела

Компонента	Измјерено	Захтјев по стандарду SIST EN 450-1:2013, тачка 5.2
Специфична маса, g/cm ³	2,57	-
Специфична површина, cm ² /g	3020	-
Финоћа млива, %	20,7	≤40% категорија N
Стабилност запремине, mm CEM+EF	0,6	≤10 mm
Вода за стандардну конзистенцију, %	25,2	-
-CEM I	39,0	-
-CEM+EF		
Почетак везивања, min	185	-
-CEM I	275	≤2XCEM I (370 min)
-CEM+EF		
Крај везивања, min	215	-
-CEM I	335	-
-CEM+EF		
Индекс активности 28** дана, %	106	≥75%
Индекс активности 90** дана, %	101	≥85%

Ознака EF, коју истраживачи користе за испитивани летећи пепео, односи се на електрофилтерски пепео, иако је у случају Термоелектране „Станари“ ријеч о летећем пепелу добијеном са врећастих филтера.

У табели 5.10. приказани су резултати испитивања чврстоће на савијање и чврстоће на притисак за испитивани цемент CEM I 42,5N, као и за мјешавину цемента и пепела (CEM I + EF).

Табела 5.10. Отпорност на савијање и притисак узорка цемента CEM I 42,5 N (ETF, 2016)

Отпорност МПа	Измјерено							Захтјев по SIST EN 197-1:2011	Метода испитивања
	1		2		3		Просјек		
Свијање 28 дана	7,9		7,7		8,2		7,9	-	SIST EN 196-1:2005
Савијање 90 дана	8,8		8,5		8,9		8,7	-	
Притисак 28 дана	51,5	52,2	52,4	53,0	52,0	49,6	51,8	≥42,5≤62,5	

Притисак 90 дана	58,0	57	58,9	59,5	59,3	58,4	58,5	-	
------------------	------	----	------	------	------	------	------	---	--

Ознака N означава да је почетна чврстоћа 42,5 МПа, док ознака СЕМ I означава портланд цемент.

Резултати физичко-хемијске карактеризације летећег пепела из Термоелектране „Станари“ Термоелектране „Станари“ показују висок удио киселих оксида, прије свега SiO_2 , Al_2O_3 и Fe_2O_3 , чији збир износи 83,23%. Оваква композиција је типична за нискокалцијумске летеће пепеле настале сагоријевањем лигнита и каменог угља и представља кључни предуслов за изражена пуцоланска својства материјала. Према стандардној класификацији ASTM C618, збир наведених оксида већи од 70% сврстава летећи пепео у класу F, што је у складу са добијеним резултатима за пепео из Термоелектране „Станари“ (ASTM C618, 2017). Овај налаз је у потпуности сагласан са бројним прегледним и експерименталним студијама које истичу да су управо SiO_2 и Al_2O_3 носиоци пуцоланске реактивности летећег пепела (Ahmaruzzaman, 2010; Vassilev & Vassileva, 2007; Wesche, 2005).

Низак садржај губитка жарењем (LOI = 3,97%) указује на ограничено присуство несагорјелог угљеника, што је од посебног значаја за технолошку примјену пепела у цементним и бетонским системима. Литература досљедно показује да повишен LOI може негативно утицати на потрошњу воде, ефикасност хемијских адитива и контролу времена везивања бетона, док вриједности LOI испод 5–6% обезбјеђују стабилно понашање у свјежој и очврслој бетонској мјешавини (Wesche, 2005; Amran i sar., 2021). Стога се добијене вриједности LOI за летећи пепео из Термоелектране „Станари“ могу сматрати технолошки прихватљивим и у складу са захтјевима стандарда EN 450-1 и ASTM C618.

Гранулометријски састав летећег пепела, са доминантним учешћем финих честица (91% у распону 0,063–0,002 mm), има значајан утицај на његово понашање као минералног додатка. Висока финоћа повећава специфичну површину и омогућава боље паковање зрна у цементној матрици, смањења капиларне порозности и побољшања трајности бетона. Ови механизми су добро документовани у литератури и представљају један од главних разлога зашто летећи пепео доприноси побољшаној обрадивости и дугорочној чврстоћи бетона (Wesche, 2005; Teixeira i sar., 2016; Amran i sar., 2021).

Повећане вриједности индекса активности чврстоће (SAI), нарочито након 90 дана, додатно потврђују изражену пуцоланску активност испитиваног пепела. Познато је да пуцоланска реакција летећег пепела има спорију кинетику у поређењу са хидратацијом портланд цемента, али да током времена доводи до формирања додатних C-S-H фаза, што резултира порастом чврстоће и побољшањем микроструктуре бетона. Овакво понашање је у складу са бројним експерименталним студијама које показују да бетон са летећим пепелом често достиже или премашује чврстоће референтног бетона након 90 дана њега (Šešlija i sar., 2016; Amran i sar., 2021).

Анализа садржаја тешких метала показује присуство елемената као што су Ni, Cr, Mn и Zn у концентрацијама карактеристичним за летеће пепеле из термоелектрана на угаљ. Иако ови елементи могу представљати потенцијални еколошки ризик уколико су мобилни, бројне студије су показале да се током уградње летећег пепела у цементне системе они углавном инкорпорирају у стабилне минералне фазе, прије свега у C-S-H гелове и алумино-силикатне структуре, чиме се њихова растворљивост и биодоступност значајно смањују (Izquierdo & Querol, 2012; Nalbandian, 2012; Font i sar., 2005).

На основу свеобухватне анализе хемијског састава, физичких особина, пуцоланске активности и садржаја потенцијално опасних елемената, може се закључити да летећи пепео из Термоелектране „Станари“ испуњава кључне захтјеве за примјену као минерални додаток цементу и бетону у складу са стандардима EN 450-1 и ASTM C618. Ови резултати су у сагласности са широм научном литературом која истиче да правилно карактерисан и

контролисан летећи пепео представља технички и еколошки прихватљив материјал, чија примјена доприноси побољшању перформанси бетона и рационалнијем коришћењу индустријских нуспроизвода (Scrivener i sag., 2018; Turk i sag., 2015).

Иако није наведен експлицитни закључак о испитивању летећег пепела на основу добијених резултата испитивања летећег пепела из Термоелектране „Станари“ и њиховог поређења са референтним вриједностима прописаним одговарајућим стандардима, може се закључити да се летећи пепео из Термоелектране „Станари“ може успјешно користити као додаток портланд цементу типа CEM I (ETF, 2016).

Летећи пепео представља минерални додаток бетону типа II и може се примјењивати у производњи бетона у складу са стандардом BAS EN 450-1. На основу извршених испитивања и издатог сертификата о усаглашености, који је издао Центар за пројектовање и консалтинг д.о.о, ПЈ ЦПК Институт – Сертификационо тијело, утврђено је да летећи пепео за бетон испуњава све прописане услове за примјену као додатак бетону типа II. На основу извршених испитивања и издатог сертификата о усаглашености, летећи пепео се може користити као дјелимична замјена цемента, чиме се постиже побољшање обрадивости свјеже бетонске мјешавине, смањење топлоте хидратације и повећање трајности очврслог бетона. Његова примјена доприноси смањењу порозности и пропустљивости бетона, као и повећању отпорности на дејство агресивних средина, што је од посебног значаја код масивних и дуготрајних бетонских конструкција. Употреба летећег пепела дозвољена је под условом да материјал испуњава прописане физичко-хемијске захтјеве, уз обезбијеђену фабричку контролу производње и примјену одговарајуће пројектоване рецептуре бетона, у складу са важећим техничким прописима.

5.2. Резултати процјене емисије гасова стаклене баште

Анализа емисија гасова стаклене баште представља кључни корак у оцјени различитих приступа управљању летећим пепелом из Термоелектране „Станари“, као једног од значајних индустријских нуспроизвода са потенцијалом за корисну примјену. Циљ анализе је да се квантитативно процијени утицај различитих модела управљања на укупне емисије изражене као CO₂-eq и да се на основу тога идентификују сценарији који могу допринијети смањењу емисија, уштеди ресурса и преласку ка циркуларним моделима производње.

У том контексту развијена су четири сценарија: базни сценарио депоновања (C0), у којем се цијела количина пепела одлаже на депонију, и три алтернативна сценарија у којима се пепео валоризује као секундарна сировина у производњи клинкера, цемента или у путној инфраструктури. Сценарији валоризације анализирају се при три степена искориштености 30%, 50% и 90%, чиме се обухвата широк распон реалистичних оперативних услова и индустријских потреба. Преостали дио пепела у сваком од ових сценарија транспортује се и одлаже на депонију, што омогућава реалну процјену комбинованих система управљања.

Методолошка поставка анализе заснива се на приступу проширених системских граница, у складу са стандардом ISO 14044 за процјену животног циклуса. Процесне уштеде емисија које настају замјеном клинкера, цемента или агрегата утврђене су према IPCC (2006), који представља званични извор фактора емисије за минералну индустрију. На овај начин, укупне емисије анализирају се као збир директних емисија (транспорт и преостало депоновање) и избјегнутих емисија (смањена производња клинкера, цемента или примарних агрегата).

У базном сценарију цијела годишња количина летећег пепела трајно се одлаже на депонију у близини термоелектране, без икакве даље употребе или валоризације. Емисије гасова стаклене баште у овом случају настају искључиво од процеса депоновања, при чему је усвојен емисиони фактор депоновања EF_{деп}=0,002 t CO₂-eq/t пепела (IPCC, 2006; EEA, 2019). EF_{деп} представља оперативне емисије (транспорт + руковање/разастирање), док се биогене емисије депоније не разматрају јер је материјал инертан.

Укупна емисија базног сценарија израчунава се према изразу:

$$E_0 = M_{FA} \cdot EF_{\text{деп}}$$

Гдје су:

E_0 – укупне годишње емисије базног сценарија депоновања, при коме се сва количина летећег пепела одлаже на депонију ($tCO_2\text{-eq/год}$).

M_{FA} – укупна годишња количина летећег пепела која настаје у термоелектрани ($t/\text{год}$);

Базни сценарио (сва количина пепела иде на депонију) има годишње емисије $500 tCO_2\text{-eq/год}$.

Сценарио 1: употреба у производњи цемента

У Сценарију 1 летећи пепео се користи као супститут клинкера у производњи цемента, уз претпоставку да $1 t$ пепела замјењује $1 t$ клинкера у цементу (на масеној основи) у оквиру дозвољеног клинкер-фактора (Scrivener i sar., 2018; UNEP, 2018).

За сваки степен искориштења x (30%, 50% и 90%) количина пепела која се користи у цементари дефинише се као:

$$M_{FA, \text{иск}(x)} = x \cdot M_{FA}$$

док се преостали дио и даље депонује:

$$M_{FA, \text{деп}(x)} = (1-x) \cdot M_{FA}$$

Емисије депоновања преосталог пепела у овом сценарију рачунају се из:

$$E_{\text{деп},1(x)} = M_{FA, \text{деп}(x)} \cdot EF_{\text{деп}}$$

Емисије транспорта пепела до цементаре рачунају се на основу специфичног фактора транспорта $EF_{\text{тр}}=0,00804 t CO_2/t$, који је изведен из претпостављене удаљености од $100 km$ у једном правцу, потрошње камиона од $30 l/100 km$ и емисионог фактора дизела од $2,68 kg CO_2/l$ (IPCC, 2006; ЕЕА, 2019):

$$E_{\text{тр},1(x)} = M_{FA, \text{иск}(x)} \cdot EF_{\text{тр}}$$

Избјегнуте емисије производње клинкера одређују се на основу (IPCC, 2006; UNEP, 2018):

$$E_{\text{изб},cl(x)} = M_{FA, \text{иск}(x)} \cdot EF_{cl}$$

Гдје је:

EF_{cl} – “комбиновани фактор емисија (0,85) у производњи клинкера

Укупне емисије Сценарија 1 при степену искориштења x добијају се као:

$$E_{S1(x)} = E_{\text{деп},1(x)} + E_{\text{тр},1(x)} - E_{\text{изб},cl(x)}$$

Смањење емисија у односу на базни сценарио износи рачуна се према изразу:

$$\Delta E_{S1(x)} = E_0 - E_{S1(x)}$$

У табели 5.11. приказани су резултати емисија за сценарио 1, у којем се летећи пепео користи у фабрици цемента као додатак који замјењује дио клинкера у производњи цемента. Табела обухвата количине пепела које се користе у фабрици цемента и које се депонују за три разматрана степена искоришћења, као и израчунате емисије депоновања, емисије транспорта, избјегнуте емисије од производње клинкера, нето годишње емисије сценарија 1 и уштеде у односу на базни сценарио потпуног депоновања

Табела 5.11. Резултати емисија за сценарио 1

Степен искоришћења	Пепео у цементари (t/год)	Пепео на депонији (t/год)	$E_{\text{деп},1}$ (t CO ₂ -eq/год)	$E_{\text{тр},1}$ (t CO ₂ -eq/год)	$E_{\text{изб},\text{cl}(x)}$ (t CO ₂ -eq/год)	$E_{\text{S}1}$ (t CO ₂ -eq/год)	$\Delta E_{\text{S}1}$ (t CO ₂ -eq/год)
30%	75 000	175 000	350	603	-63 750	-62 797	63 297
50%	125 000	125 000	250	1 005	-106 250	-104 995	105 495
90%	225 000	25 000	50	1 809	-191 250	-189 391	189 891

Сценарио 2: употреба у производњи бетона

У оквиру другог сценарија анализирана је употреба летећег пепела као замјена цементу пепелом 1:1 по маси, при чему у референтној рецептури пепео чини 30% укупног везива, (Turk и сар., 2015). Полази се од претпоставке да се на годишњем нивоу генерише 250 000 t летећег пепела, те да се он, у зависности од степена искоришћења, дјелимично уграђује у бетон, а преостали дио и даље одлаже на депонију (Richhariya и сар., 2020). Размотрена су три степена искоришћења пепела у бетону (30%, 50% и 90%), како би се квантификовао ефекат повећања употребе пепела на укупне годишње емисије стакленичких гасова и уштеде CO₂-еквивалента у односу на базни сценарио у којем се цијела количина пепела депонује.

За сваки степен искориштења x (30%, 50% и 90%) количина пепела која се користи у производњи бетона дефинише се као:

$$M_{\text{ФА,иск}(x)} = x \cdot M_{\text{ФА}}$$

док се преостали дио и даље депонује:

$$M_{\text{ФА,деп}(x)} = (1-x) \cdot M_{\text{ФА}}$$

Емисије депоновања преосталог пепела у овом сценарију рачунају се из:

$$E_{\text{деп},2(x)} = M_{\text{ФА,деп}(x)} \cdot EF_{\text{деп}}$$

Емисије транспорта пепела до бетонаре рачунају се као и у првом сценарију:

$$E_{\text{тр},2(x)} = M_{\text{ФА,иск}(x)} \cdot EF_{\text{тр}}$$

Избјегнуте емисије замјене дијела цемента са пепелом у производњи бетона рачунате су као избјегнуте емисије у производњи цемента (Climate Accountability Institute, 2023; Energy Transitions Commission, 2020):

$$E_{\text{изб,сеп}(x)} = M_{\text{ФА,иск}(x)} \cdot EF_{\text{сеп}}$$

Гдје је:

$EF_{\text{сеп}}$ – фактор емисија у производњи цемента

Укупне емисије Сценарија 2 при степену искориштења x добијају се као:

$$E_{\text{S}2(x)} = E_{\text{деп},2(x)} + E_{\text{тр},2(x)} - E_{\text{изб,сеп}(x)}$$

Смањење емисија у односу на базни сценарио износи рачуна се према изразу:

$$\Delta E_{S2(x)} = E_0 - E_{S2(x)}$$

У табели 5.12. приказани су резултати емисија за сценарио 2, у којем се летећи пепео користи у производњи бетона као замјена дијела цемента у референтној мјешавини. Табела обухвата количине пепела које се користе у бетону и које се депонују за три разматрана степена искоришћења, као и израчунате емисије депоновања, емисије транспорта, избјегнуте емисије од производње цемента, нето годишње емисије сценарија 2 и уштеде у односу на базни сценарио потпуног депоновања.

Табела 5.12. Резултати емисија за сценарио 2

Степен искоришћења	Пепео у бетону (t/год)	Пепео на депонији (t/год)	$E_{\text{деп},2}$ (t CO ₂ -eq/год)	$E_{\text{тр},2}$ (t CO ₂ -eq/год)	$E_{\text{изб,сеп}}$ (t CO ₂ -eq/год)	E_{S2} (t CO ₂ -eq/год)	ΔE_{S2} (t CO ₂ -eq/год)
30%	75 000	175 000	350	603	-56 250	-55 297	55 797
50%	125 000	125 000	250	1 005	-93 750	-92 495	92 995
90%	225 000	25 000	50	1 809	-168 750	-166 891	167 391

Сценарио 3: употреба у изградњи путева (замјена дијела примарних материјала)

У трећем сценарију анализира се употреба летећег пепела у изградњи путева, при чему се пепео користи као материјал за насипе, стабилизацију тла и замјену дијела природног агрегата у слојевима подлоге, а преостали дио се и даље одлаже на депонију. Полази се од годишње количине летећег пепела од 250 000 t/год и три степена искоришћења у путевима $x=0,3; 0,5; 0,9$, при чему количина пепела која се користи у путним конструкцијама износи $M_{\text{ФА,пут}(x)}=x \cdot M_{\text{ФА}}$, а количина која се депонује $M_{\text{ФА,деп}(x)}=(1-x) \cdot M_{\text{ФА}}$. На овај начин сценарио 3 омогућава процјену потенцијала за смањење емисија кроз замјену примарних агрегата и смањење депоновања пепела.

Емисије у овом сценарију описују се кроз три доприноса: емисије депоновања преосталог пепела, емисије транспорта пепела који се уграђује у путеве и избјегнуте емисије од производње природног агрегата који се супституише пепелом. Емисије депоновања и транспорта до градилишта рачунате су са истим емисионим факторима који су већ примјењени у сценаријима 1 и 2, тако да су резултати међусобно упоредиви на нивоу функционалне јединице 1 t пепела и годишње количине од 250 000 t. Производња природног агрегата описана је емисионим фактором $EF_{\text{ар}}=0,0078 \text{ t CO}_2/\text{t агрегата}$, који потиче из Владињих конверзионих фактора за извјештавање о емисијама гасова са ефектом стаклене баште намијењених кориштењу организацијама из Уједињеног Краљевства и међународних организација ради извјештавања о појединим емисијама ових гасова (Department for Energy Security, 2025). Према извјештају National Stone Sand & Gravel Association (2021) наводи се да су емисије за пијесак $5,51 \text{ kg CO}_2\text{-eq/t}$ и $6,18 \text{ kg CO}_2\text{-eq/t}$ за дробљени камен, што потврђује да се емисије производње агрегата крећу у распону $5\text{--}8 \text{ kg CO}_2\text{-eq/t}$ и да је усвојени фактор $7,8 \text{ kg CO}_2\text{-eq/t}$ репрезентативан за потребе ове анализе.

Количина пепела која се депонује у трећем сценарију износи $M_{\text{ФА,деп}(x)}=(1-x) \cdot M_{\text{ФА}}$, па се емисије депоновања описују изразом:

$$E_{\text{деп},3(x)} = M_{\text{ФА,деп}(x)} \cdot EF_{\text{деп}} = (1-x) \cdot M_{\text{ФА}} \cdot EF_{\text{деп}}$$

Количина пепела која се користи у путевима је $M_{\text{ФА,пут}(x)}=x \cdot M_{\text{ФА}}$, а емисије транспорта тог пепела добијају се као

$$E_{\text{тр},3(x)} = M_{\text{ФА,пут}(x)} \cdot EF_{\text{тр}} = x \cdot M_{\text{ФА}} \cdot EF_{\text{тр}}$$

Избјегнуте емисије од производње природног агрегата у трећем сценарију рачунају се на основу количине агрегата који је замијењен пепелом и емисионог фактора производње агрегата. Полази се од претпоставке да 1 t летећег пепела супституише 1 t природног агрегата, па је количина избјегнутог агрегата једнака количини пепела који се користи у путевима, односно $M_{\text{агр,изб}(x)} = x \cdot M_{\text{ФА}}$ гдје је x степен искоришћења пепела, а $M_{\text{ФА}}$ укупна годишња количина пепела.

На основу тога, избјегнуте емисије од производње агрегата изражавају се формулом:

$$E_{\text{изб,агр}(x)} = M_{\text{агр,изб}(x)} \cdot EF_{\text{агр}} = x \cdot M_{\text{ФА}} \cdot EF_{\text{агр}}$$

У табели 5.13. приказани су резултати емисија за сценарио 3, у којем се летећи пепео користи у путној изградњи као замјена дијела природног агрегата у насипима и слојевима подлоге. Табела обухвата количине пепела које се користе у путевима и које се депонују за три разматрана степена искоришћења, као и израчунате емисије депоновања, емисије транспорта, избјегнуте емисије од производње агрегата, нето годишње емисије сценарија 3 и уштеде у односу на базни сценарио потпуног депоновања.

Резултати процјене емисија гасова стаклене баште показују да избор модела управљања летећим пепелом из Термоелектране „Станари“ има пресудан утицај на укупни угљенични отисак система, нарочито када се пореди базни сценарио потпуног депоновања са сценаријима валоризације као секундарне сировине.

Табела 5.13. Резултати емисија за сценарио 3

Степен искоришћења	Пепео у путевима (t/год)	Пепео на депонији (t/год)	$E_{\text{деп,3}}$ (t CO ₂ -eq/год)	$E_{\text{тр,3}}$ (t CO ₂ -eq/год)	$E_{\text{изб,агр}}$ (t CO ₂ -eq/год)	$E_{\text{с3}}$ (t CO ₂ -eq/год)	$\Delta E_{\text{с3}}$ (t CO ₂ -eq/год)
30%	75 000	175 000	350	603	-300	653	153
50%	125 000	125 000	250	1 005	-500	755	255
90%	225 000	25 000	50	1 809	-900	959	449

Резултати процјене емисија гасова стаклене баште јасно показују да избор модела управљања летећим пепелом из Термоелектране „Станари“ има пресудан утицај на емисије система. Поређење базног сценарија потпуног депоновања (C0) са сценаријима валоризације (C1–C3) указује да депоновање представља еколошки најнеповољнију опцију, док примјена пепела као секундарне сировине омогућава значајно смањење укупних емисија CO₂-еквивалената.

У базном сценарију, гдје се цјелокупна количина летећег пепела депонује, добијена вриједност од 500 t CO₂-eq/год проистиче искључиво из оперативних активности транспорта и руковања, при чему су биогене емисије занемарене с обзиром на инертну природу материјала. Овај приступ је у складу са смјерницама IPCC (2006), које за депоније минералних материјала не дефинишу процесе настанка CH₄, као и са ЕЕА (2019), које емисије код немоторизованих и неметаболичких токова везују првенствено за потрошњу дизел горива у механизацији. Сличан методолошки приступ за депоновање летећег пепела примјењује и Adamović (2023) у анализи животног циклуса депоновања пепела у Србији, гдје се показује да су емисије по тони материјала релативно ниске, али акумулирају значајан утицај на годишњем нивоу..

У сценарију 1, у којем се летећи пепео користи као супститут клинкера у производњи цемента, добијене уштеде емисија ($\Delta E_{\text{с1}}$) сагласне су налазима научних студија које указују да је смањење клинкер-фактора једна од најефикаснијих мјера за редукцију емисија CO₂ у цементној индустрији (Scrivener i sar., 2018; Shah i sar., 2022). Анализе показују да замјена

клинкера секундарним минералним додацима, као што је летећи пепео, доводи до значајног смањења емисија CO₂ по тони произведеног цемента. Негативне нето емисије представљају резултат супституције, тј. одбитка избјегнутих емисија од алтернативне производње клинкера/цемента, а не физичке "негативне емисије" постројења (ISO, 2006).

Резултати сценарија 1 такође су у складу са радовима који показују да повећано учешће минералних додатака, укључујући летећи пепео, у цементу значајно смањује специфичне емисије CO₂ по тони произведеног цемента, без нарушавања, а често и уз побољшање дуготрајних перформанси бетона (Scrivener i sar., 2018; Teixeira i sar., 2016). Orozco i sar. (2023) наводе да супституција 50% цемента летећим пепелом може резултирати смањењем емисија CO₂ за чак 44–51%, док Teixeira i sar. (2016) потврђују да коришћење летећег пепела као замјене за цемент пружа јасне еколошке бенефите кроз минимизацију употребе сировина и побољшање еколошког профила бетона. што се поклапа са редом величине уштеда од око 64 600–193 900 t CO₂-eq/год добијених у овом сценарију.

Упоредна анализа показује да модели који максимизирају супституцију клинкера секундарним материјалима досљедно дају највеће укупне уштеде на нивоу система, што је у потпуности у складу са добијеним трендом пада нето емисија E_{S1(x)} са порастом степена искоришћења пепела (Shah i sar., 2022; Amran i sar., 2021). Ови резултати потврђују да интеграција летећег пепела у производњу цемента представља приоритетну мјеру са становишта смањења емисија гасова стаклене баште и подржава закључак да сценарио 1 има највећи потенцијал смањења емисија у односу на остале разматране опције управљања пепелом.

Сценарио 2, у којем се летећи пепео користи као додатак у производњи бетона (замјена 30% масе цемента), такође има значајно смањење укупних емисија гасова стаклене баште у односу на базни сценарио. Иако су остварене уштеде (ΔE_{S2}) нешто ниже у поређењу са директном супституцијом клинкера (Сценарио 1), оне и даље доводе до негативних нето емисија система при свим разматраним степенима искоришћења. Ови налази су у потпуности сагласни са резултатима LCA студија које потврђују да употреба летећег пепела као парцијалне замјене за портланд цемент представља једну од најефикаснијих стратегија за смањење угљеничног отиска бетонске индустрије (Teixeira i sar., 2016; Turk i sar., 2015).

Добијени резултати, који показују раст уштеда са повећањем степена искоришћења пепела, сагласни су са истраживањима Orozco i sar. (2023), који наводе да повећање удјела летећег пепела у бетонским мјешавинама директно смањује потенцијал глобалног загријавања бетонских конструкција. Њихова анализа указује да замјена цемента летећим пепелом не само да смањује процесне емисије од производње цемента, већ и минимизира еколошке штете повезане са одлагањем пепела на депоније, што је идентичан механизам приказан у овом сценарију кроз смањење емисија депоновања (Orozco i sar., 2023).

Такође, претпоставка сценарија о замјени 30% цемента технички је оправдана и подржана литературом. Amran i sar. (2021) у свом свеобухватном прегледу наводе да бетони са удјелом летећег пепела од 20% до 50% показују задовољавајуће, а често и побољшане механичке карактеристике и трајност, уз истовремено значајно смањење потрошње енергије и емисија CO₂ (Amran i sar., 2021). Слично томе, Teixeira i sar. (2016) су кроз компаративну анализу животног циклуса показали да бетони у којима пепео замјењује дио везива имају знатно повољнији еколошки профил од референтних бетонских мјешавина чистог портланд цемента, при чему су уштеде емисија упоредиве са вриједностима добијеним у овој анализи.

Анализа сценарија 2 указује на то да примјена летећег пепела у процесу производње бетона представља ефикасну стратегију за ублажавање емисија гасова стаклене баште. Иако је остварено смањење емисија по јединици масе пепела ниже у поређењу са сценаријем супституције клинкера, масовна примјена бетона у грађевинској индустрији чини овај приступ изузетно значајним за постизање глобалних циљева декарбонизације, што је у складу са пројекцијама релевантних модела одрживог развоја материјала (Shah i sar., 2022).

Сценарио 3, у којем се пепео користи као замјена природног агрегата у путној изградњи, показује битно другачију слику, јер су емисије производње агрегата много ниже од емисија производње клинкера или цемента. Усвојени фактор за агрегат $E_{Fagr}=0,0078 \text{ t CO}_2/\text{t}$ налази се у распону 5–8 kg $\text{CO}_2\text{-eq}/\text{t}$ који извјештаји за пијесак и дробљени камен наводе као типичне емисије индустрије агрегата, што значи да избјегнуте емисије по тони пепела остају мале у поређењу са емисијама транспорта на 100 km. Као последица тога, укупне нето емисије у Сценарију 3 су позитивне, што значи да овај сценарио благо повећава емисије $\text{CO}_2\text{-eq}$ у односу на потпуно депоновање при задатој транспортној удаљености.

Резултати сценарија 3 показују да укупне емисије гасова стаклене баште значајно зависе од удаљености транспорта пепела од термоелектране до градилишта, при чему управо транспорт учествује са највећим дијелом у укупном емисионом билансу овог сценарија. За разлику од сценарија у којима пепео замјењује клинкер или цемент, гдје доминирају избјегнуте емисије производње материјала, код замјене природног агрегата релативно мали емисиони фактор производње агрегата чини да чак и умјерене транспортне удаљености постану кључни извор емисија.

Због тога је за сценарио 3 спроведена анализа осјетљивости на транспортне удаљености, са циљем да се испита како промјена растојања (100 km, 50 km и 20 km) утиче на нето годишње емисије сценарија 3 и да се идентификују услови под којима ова опција постаје климатски оправдана у односу на базни сценарио потпуног депоновања.

У табелама 5.14. и 5.15. приказани су резултати анализе осјетљивости када се транспорт уградње пепела смањи на 50 km, односно на 20 km.

Табела 5.14. Анализа осјетљивости за трансподт до 50 km

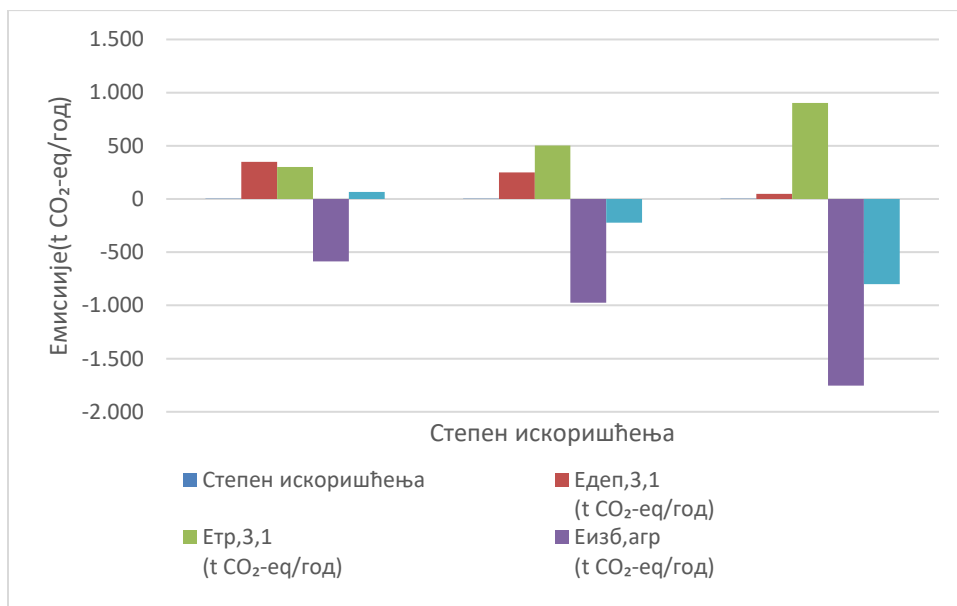
Степен искоришћења	Пепео у путевима (t/год)	Пепео на депонији (t/год)	$E_{\text{деп},3,1}$ (t $\text{CO}_2\text{-eq}/\text{год}$)	$E_{\text{тр},3,1}$ (t $\text{CO}_2\text{-eq}/\text{год}$)	$E_{\text{изб},\text{агр}}$ (t $\text{CO}_2\text{-eq}/\text{год}$)	$E_{\text{с3},1}$ (t $\text{CO}_2\text{-eq}/\text{год}$)	$\Delta E_{\text{с3},1}$ (t $\text{CO}_2\text{-eq}/\text{год}$)
30%	75 000	175 000	350	301,5	-585,0	66,5	433,5
50%	125 000	125 000	250	502,5	-975,0	-222,5	722,5
90%	225 000	25 000	50	904,5	-1 755	-800,5	1 300,5

Табела 5.15. Анализа осјетљивости за трансподт до 20 km

Степен искоришћења	Пепео у путевима (t/год)	Пепео на депонији (t/год)	$E_{\text{деп},3,2}$ (t $\text{CO}_2\text{-eq}/\text{год}$)	$E_{\text{тр},3,2}$ (t $\text{CO}_2\text{-eq}/\text{год}$)	$E_{\text{изб},\text{агр}}$ (t $\text{CO}_2\text{-eq}/\text{год}$)	$E_{\text{с3},2}$ (t $\text{CO}_2\text{-eq}/\text{год}$)	$\Delta E_{\text{с3},2}$ (t $\text{CO}_2\text{-eq}/\text{год}$)
30%	75 000	175 000	350	120,6	-585,0	-114,4	614,4
50%	125 000	125 000	250	201,0	-975,0	-524	1 024
90%	225 000	25 000	50	361,8	-1 755	-1 343,2	1 843,2

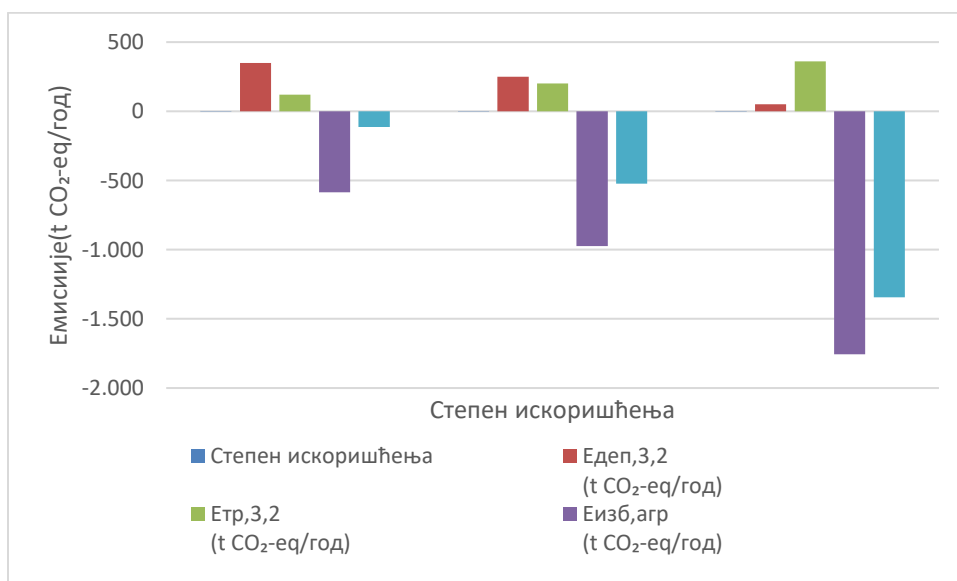
Резултати анализе осјетљивости сценарија 3 показују да је утицај транспортних удаљености један од кључних фактора који одређују укупан биланс емисија гасова стаклене баште при употреби летећег пепела у путној инфраструктури. Пошто је емисиони фактор производње природног агрегата релативно низак, укупни ефекат замјене агрегата пепелом осјетљив је на промјене у емисијама транспорта, које с растојањем могу преузети доминантну улогу у структури емисија.

За удаљеност до 50 km, анализа показује да се већ при 30% искоришћења пепела годишње емисије сценарија 3 свODE на 66,5 t CO₂-eq, што одговара уштеди од 433,5 t CO₂-eq у односу на базни сценарио потпуног депоновања од 500 t CO₂-eq/год. При вишим степенима искоришћења (50% и 90%) сценарио 3 остварује негативне нето емисије (-222,5 t и -800,5 t CO₂-eq/год), са уштедама од 722,5 t и 1 300,5 t CO₂-eq/год, што указује да смањење транспортне удаљености до 50 km, у комбинацији са већим искоришћењем пепела, доводи до јасно изражених климатских користи (Слика 5.2.).



Слика 5.2. Емисије за сценарио 3 за транспорт до 50 km

Услови су још повољнији за транспортне удаљености до 20 km, гдје и при 30% искоришћења пепела сценарио 3 остварује негативне нето емисије од -114,4 t CO₂-eq/год и уштеду од 614,4 t CO₂-eq/год у односу на базни сценарио. За степене искоришћења од 50% и 90% нето емисије износе -524 t и -1 343,2 t CO₂-eq/год, а уштеде достижу 1 024 t и 1 843,2 t CO₂-eq/год, што показује да у условима кратких транспортних рута избјегнуте емисије производње агрегата долазе до пуног изражаја, док емисије транспорта остају релативно мале (Слика 5.3.).



Слика 5.3. Емисије за сценарио 3 за транспорт до 20 km

Ови резултати указују да оцјена сценарија 3 мора бити условљена просторним и логистичким оквиром, а не посматрана независно од транспортних параметара. Удаљене локације, са дужим транспортним рутама, носе већи терет емисија и могу ограничити климатске користи од замјене агрегата пепелом, док пројекти у ближем радијусу од термоелектране (до 50 km, а посебно до 20 km) омогућавају остваривање значајних уштеда CO₂-еквивалента, нарочито када је степен искоришћења пепела висок.

На основу тога, сценарио 3 се може оцијенити као условно повољна опција управљања летећим пепелом, при чему његова климатска оправданост зависи од оптимизације транспортних удаљености и од обезбјеђивања довољно високог степена примјене пепела у путним конструкцијама. У контексту планског управљања, ови налази могу послужити као основа за препоруку да се путни пројекти који користе летећи пепео приоритетно развијају у непосредном окружењу термоелектране, како би се максимизирао ефекат смањења емисија гасова стаклене баште.

Добијени резултати за сва три сценарија показују да валоризација летећег пепела има јак климатски смисао само када његова употреба омогућава избјегавање енергетски и карбонски интензивних производа, као што су клинкер и цемент, док замјена материјала ниског угљеничног отиска (агрегат) може бити оправдана прије свега са аспекта очувања природних ресурса, а не нужно са становишта смањења емисија. С друге стране, и у сценарију изградње путева климатски биланс постаје повољнији уколико се транспортне раздаљине смање, што потврђују и анализе осјетљивости које указују да је транспорт кључни параметар који одређује оправданост употребе пепела у нискоугљеничним примјенама.

Посебно је важно истаћи да литература препознаје техничку оправданост овакве примјене. Летећи пепео, посебно када се стабилизује, може побољшати механичка својства тла, као што су носивост и отпорност на слијегање, што додатно оправдава његову употребу у путним конструкцијама (Вега i sag., 2007). Ипак, са аспекта стриктне CO₂ билансне анализе, аутори попут Orozco i sag. (2023) сугеришу да би приоритет требало дати примјенама у цементу и бетону гдје је потенцијал декарбонизације већи, док употреба у путевима остаје оптимално рјешење за количине пепела које не задовољавају строге стандарде за примјену у везивним материјалима.

5.3. Допринос циркуларној економији

Евалуација резултата показује да валоризација летећег пепела из Термоелектране „Станари“ има јасан допринос циркуларној економији, посебно у сценаријима замјене клинкера и цемента, гдје се истовремено смањују емисије CO₂ и потрошња примарних ресурса. Ови ефекти директно подржавају и циљеве Агенде 2030 у областима одрживе производње, одговорне потрошње и борбе против климатских промјена кроз:

1. Смањење отпада и притиска на депоније

Валоризацијом летећег пепела смањује се количина индустријског отпада која се трајно одлаже на депоније, што значајно умањује потребу за новим депонијским капацитетима и дугорочним управљањем депонијама. Смањен притисак на простор, ризици за земљиште и подземне воде, као и смањење потенцијалних трошкова санације, у складу су са принципом да отпад постаје ресурс, што је једно од кључних начела циркуларне економије и директно доприноси циљу одрживог развоја SDG 12 (одговорна потрошња и производња).

2. Замјена природних ресурса

У сценаријима у којима пепео замјењује клинкер у цементу, дио цемента у бетону или природни агрегат у путним структурама, долази до смањења експлоатације кречњака, глине и агрегата. На тај начин се смањују физички обими копања, ерозије, деградације пејзажа и

локалних еколошких притисака, што је у складу са циљевима ЕУ акционог плана за циркуларну економију „Closing the loop“ и са SDG 15 (живот на копну), јер се ублажавају негативни утицаји на екосистеме.

3. Смањење емисија и енергетске уштеде

Сценарији замјене клинкера и цемента показују највеће уштеде емисија CO₂-еквивалента у односу на базни сценарио депоновања, јер се избјегава енергетски интензивна производња клинкера и дијела цемента. Ово доводи до смањене потрошње фосилних горива, нижег угљеничног отиска по јединици производа и директно подржава циљеве SDG 7 (доступна и чиста енергија) и SDG 13 (очување климе), као и правце декарбонизације индустрије на нивоу ЕУ.

4. Индустријска симбиоза и материјални токови

Интеграцијом летећег пепела у производњу цемента, бетона и путне инфраструктуре успоставља се индустријска симбиоза између енергетског и грађевинског сектора. Овим се затварају дијелови материјалног тока: нуспроизвод са краја енергетског ланца постаје улазна сировина у грађевинским процесима, што је у потпуности у складу са концептом „closing the loop“ и са SDG 9 (индустрија, иновације и инфраструктура).

Примјена летећег пепела у грађевинским материјалима директно одговара приоритетима ЕУ стратегије циркуларне економије: смањење отпада, повећање учешћа секундарних сировина и побољшање ефикасности ресурса. Истовремено, резултати показују допринос више циљева одрживог развоја до 2030. године, од одговорне производње, преко заштите климе, до очувања природних ресурса, чиме валоризација летећег пепела постаје важан елемент транзиције ка одрживим и циркуларним моделима производње у региону.

6. ЗАКЉУЧЦИ

На основу анализе резултата физичко-хемијске карактеризације летећег пепела, испитивања његових пуцоланских својстава и анализе различитих сценарија управљања овим материјалом, могу се формулисати следећи закључци:

- Летећи пепео Термоелектране „Станари“ може се успјешно користити као минерални додатак портланд цементу типа СЕМ I и бетону, уз поштовање релевантних стандарда и прописаних рецептура.
- Употреба летећег пепела као секундарне сировине захтијева континуирану фабричку контролу квалитета и досљедно придржавање техничких прописа, али под тим условима представља технички и еколошки прихватљиво рјешење.
- Базни сценарио потпуног депоновања пепела (C0) показује да је депоновање еколошки најнеповољнија опција, јер генерише око 500 t CO₂-eq годишње без икакве материјалне валоризације.
- Сценарији валоризације кроз супституцију клинкера у цементу и дијела цемента у бетону (C1 и C2) доводе до значајног смањења емисија гасова стаклене баште и могу резултирати негативним нето емисијама на нивоу система, што их чини приоритетним опцијама са аспекта смањења емисија гасова са ефектом стаклене баште.
- Сценарио замјене природног агрегата у путној изградњи (C3) има мањи климатски ефекат по јединици масе, али при мањим транспортним удаљеностима и већем степену искоришћења пепела може обезбиједити уштеде CO₂-eq.
- Валоризација летећег пепела доприноси смањењу количине отпада који се трајно одлаже на депоније, смањењу потребе за новим депонијским капацитетима и смањењу негативног утицаја на животну средину.
- Замјеном дијела природних сировина (кречњак, глина, агрегат) летећим пепелом смањују се експлоатација минералних ресурса, деградација пејзажа и локални еколошки притисци, у складу са циљевима одрживог развоја и принципима одговорне потрошње и производње.
- Интеграција летећег пепела у производњу цемента, бетона и путне инфраструктуре успоставља индустријску симбиозу између енергетског и грађевинског сектора и представља важан корак ка циркуларним и нискоугљеничним моделима развоја.

7. ЛИТЕРАТУРА

- Adamovic, O. (2023). Procjena zivotnog ciklusa deponovanjaleteceg pepela iz procesa sagorijevanja lignita u termoelektrama u Srbiji. Beograd, 1-126.
- Ahmaruzzaman. (2010). A review on the utilization of fly ash" *Progress in Energy Combustion*. 36 br. 3 pp 327-363. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.11.003>
- Amran, M. Y. H., Fediuk, R., Murali, G., Avudaiappan, S., Ozbakkaloglu, T., Vatin, N., Karelina, M., Klyuev, S., & Gholampour, A. (2021). Fly ash-based eco-efficient concretes: A comprehensive review of the short-term properties. *Materials*, 14(15), 4264. <https://doi.org/10.3390/ma14154264>.
- ASTM. (2017). ASTM C618-17 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.
- Belaid, F. (2022). How does concrete and cement industry transformation contribute to mitigating climate change challenges? 2022.200084, 15. <https://doi.org/10.1016/j.rcradv>.
- Bubic, I. (2017). Tehno-ekonomska analiza novih tehnologija termoelektrana na ugljen. Osijek: Diplomski rad .
- Bustalic, I., Bustalic, N., Merdic, N., & Halilovic, A. (2014). Uticaj dodataka kalcijuskog elektrofilterskog pepela na toplotu hidratacije portland cementa. *Univerzitet u Zenici, Fakultet za metalurgiju i materijale*, 1-10.
- Climate Accountability Institute. (2023). Cement production – Industry data sheet. Climate Accountability Institute. <https://climateaccountability.org/wp-content/uploads/2023/10/IndustryData-6p.pdf>. <https://climateaccountability.org/wp-content/uploads/2023/10/IndustryData-6p.pdf>.
- Drljaca, D. (2020). Karakterizacija i primjena leteceg pepela u gradjevinarstvu i za sintezu zeolita za adsorpciju amonijum jona iz vode. Banja Luka: Doktorska disertacija.
- European Environment Agency. (2019). EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019: 1.A.4 Non-road mobile machinery. European Environment Agency. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/emep-eea-guidebook-2019>
- El Kanzaoui, M., Ennawaoui, C., Eladaoui, S., Hajjaji, A., & Guenbour, A. &. (2021). Study of the Physical Behavior of a New Composite Material Based on Fly Ash from the Combustion of Coal in an Ultra-Supercritical Thermal Power Plant. *Journal of composites Science*. 151.
- EFT - Rudnik i Termoelektrana Stanari d.o.o. (2016). Fizičko-hemijske karakteristike pepela iz TE Stanari. Stanari
- Energy Transitions Commission. (2020). Mission Possible: Reaching net-zero carbon emissions from harder-to-abate sectors by mid-century – Sectoral focus: Cement. Energy Transitions Commission.
- Font, O., Querol, X., Huggins, F. E., Chimenos, J. M., Fernández, A. I., & Peña., S. B. (2005). Speciation of major and selected trace elements in IGCC fly ash. 1364-1371. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.06.039>.

- Grosso, J. (2017). An introduction to the nature of coal,“ y Coal Combustion Products (CCPs): Characteristics, Utilization and Benefication, Woodhead publishing. 3-18.
- Heidrich, C., Feuerborn, H., & Weir, A. (2013). Coal Combustion Products: a Global Perspective,“ y World of Coal Ash (WOCA) Conference.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Volume 3 – Industrial Processes and Product Use. Chapter 2: Mineral Industry Emissions. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. IGES, Japan. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol3.html>
- Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC. (2007). Climate Change 2007: Synthesis Report. Geneva, Switzerland: IPCC.
- Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC. (2014). AR5 Synthesis Report: Climate Change 2014. Geneva, Switzerland: IPCC.
- Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC. (2019b). Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Chapter 5: Waste. Geneva, Switzerland: IPCC.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2019). *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Volume 2 – Energy*. IPCC. Retrieved from Intergovernmental Panel on Climate Change <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/vol2.html>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). *IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023*. Retrieved from IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023.: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>
- International Organization for Standardization. (2006). Environmental management—Life cycle assessment—Requirements and guidelines (ISO Standard No. 14044:2006). International Organization for Standardization.
- Izquierdo, M., & Querol, X. (2012). Leaching behaviour of elements from coal combustion fly ash: An overview, τ. 94, *International Journal of Coal Geology* 54-66.. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2011.10.006>.
- Jozsa, L. (2005). Energetski procesi i elektrane . Elektrotehnicki fakultet, Osijek.
- Jevtić, D., Savić, A., & Radević, A. (2013). Fly ash influence on concrete composites – Contribution to sustainable construction. In *Proceedings of the 15th YuCorr Conference* (pp. 235–238). Tara, Serbia: Proceedings
- Karličić, N. (2018). Doktorska disertacija: Svojstva pepela iz termoelektrana značajna za odlaganje i primenu. (pp. 1-208). Beograd: Univerzitet u Beogradu: Mašinski fakultet.
- Kiehl, J., & Kevin, E. (1997). Earth's Annual Global Mean Energy Budget. *Bulletin of the American Meteorological Society* 78, 197-208.
- Krgović, R. (2015). Mobilizacija i biodostupnost marko i mikro elemenata iz Termoelektrane "Kolubara". Beograd: Doktorska disertacija.
- Larson, A. (2023). How coal fly ash is reducing CO₂ emissions and improving concrete. *POWER Magazine*.

- Lebo, Ž., & Wurth, D. (2016). Primjena letećeg pepela kao dodatka betonu i tlu. *Sabor hrvatskih graditelja 2016, Hrvatski savez građevinskih inženjera*, Cavtat, 17–18. listopada 2016.
- Madloul, N. A., Saidur, R., Hossain, M. S., & Rahim, N. A. (2011). A critical review on energy use and savings in the cement industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(4), 2042–2060. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.01.005>
- Ma, F., Sha, A., Yang, P., & Huang, Y. (2016). The Greenhouse Gas Emission from Portland Cement Concrete Pavement Construction in China. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 13(7), 632. <https://doi.org/10.3390/ijerph13070632>.
- Milovanovic, Z. (2011). O Termoeenergetskim postrojenjima za proizvodnju energije. In Z. Milanovic, Termoeenergetska postrojenja-teoretske osnove (pp. 85-198). Banja Luka: Univerzitet u Banjoj Luci, Masinski fakultet.
- Mujkanović, A., Jovanović, M., & Zahirović, A. (2018). Povećanje efikasnosti primjene kalcijskog letećeg pepela u cementnim kompozitima putem mehaničke pripreme. *I Međunarodna konferencija „Cjeloviti pristup okolišu“*, Sisak, Hrvatska, 13–14. rujna 2018.
- Nalbandian, H. (2012). Trace element emissions from coal. *ISBN 978-92-9029-523-5*, 1-89.
- National Stone Sand & Gravel Association. (2021). The aggregates industry greenhouse gases: Low emissions, high resiliency. NSSGA. Retrieved from <https://www.nssga.org/sites/default/files/2021-05/NSSGAGreenhouseGasEmissionsReport04-26-21.pdf>
- Nayak, D. K., Abhilash, P. P., Singh, R., Kumar, R., & Kumar, V. (2022). Fly ash for sustainable construction: A review of fly ash concrete and its beneficial use case studies. *Cleaner Materials*, <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100143>
- Orozco, C. R., Miller, S. A., & John, V. M. (2023). Examining the endpoint impacts, challenges, and opportunities of fly ash utilization for sustainable concrete construction. *Scientific Reports*, 13(1), 18196. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-45632-z>.
- Ristic, N. (2015). Hirdo-abrazivna otpornost betona spravljenog sa recikliranim materijalima i ojacanog mikrovlaknima. *Gradjevinsko-Arhitektonski fakultet, Nis*, 1-239.
- Richhariya, G., Singh, S. K., Sharma, P., Sharma, A., Vani, G. D., & Srinivasu, C. (2020). Experimental investigation of CO₂ sequestration in fly ash and hydrated lime composites (Chapter 2). NTPC Energy Technology Research Alliance, NTPC Ltd., Greater Noida, India.
- Saride, S., Puppala, A. J., & Chikyala, S. R. (2013). Swell-shrink and strength behaviors of lime and cement stabilized expansive organic clays. *Applied Clay Science*, 85, 39-45. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2013.09.008>.
- Scrivener, K. L., John, V. M., & Gartner, E. M. (2018). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and concrete research*, 114, 2-26. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>.
- Shah, I. H., Miller, S. A., & Myers, R. J. (2022). Cement substitution with secondary materials can reduce annual global CO₂ emissions by up to 1.3 gigatons. *Nature Communications*, 13(1), 5758. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33289-7>.
- Šešlija, M., Rosić, A., Radović, N., Vasić, M., Đogo, M., & Jotić, M. (2016). Properties of fly ash and slag from power plants. *Geologia Croatica*, 69 (3), 317-324. <https://doi.org/10.4154/gc.2016.26>

- Tasić. (2016). *Unapređenje metoda ekstrakcije i određivanja konstituentnih i zagađivačkih elemenata u uglju i elektrofilterskom pepelu*. Beograd: Doktorska disertacija.
- Teixeira, E. R., Camões, A., Branco, F. G., & Aguiar, J. B. (2016). Comparative environmental life-cycle analysis of concretes with fly ash from coal and biomass as cement replacement. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2210-2220. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.124>
- Turk, J., Cotič, Z., Mladenović, A., & Šajna, A. (2015). Environmental evaluation of green concretes versus conventional concrete by means of LCA. *Waste Management*, 45, 194–205. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.06.035>
- Vargas, J., & Halog, A. (2015). Effective carbon emission reductions from using upgraded fly ash in the cement industry. *Journal of Cleaner Production*, 103, 353-361. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.136>
- Vassilev, S., & Vassileva, C. (2007). A new approach for the classification of coal fly ashes based on their origin, composition, properties, and behaviour. 1490-1512. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.11.020>
- Vassilev, S.V. & Mendez, R. (2005). 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. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.11.021>
- Wesche, K. (Ed.). (2005). *Fly ash in concrete: Properties and performance (RILEM Report 7)*. Taylor & Francis

БИОГРАФИЈА

Лични подаци

Име и презиме: Милица Говедарица

Датум рођења: 02.10.1998.

Адреса: Алексе Шантића бб, Гацко

Број телефона: 065/045-392

е-mail: milica.govedarica@student.tf.unibl.org

Образовање

2022 – у току II циклус студија студија на Универзитету у Бањој Луци, Технолошки факултет, Студијски програм: Хемијско инжењерство и технологије, Модул: Неорганске хемијске технологије.

2017 – 2022 Универзитет у Бањој Луци, Технолошки факултет; студијски програм: хемијско инжењерство и технологије, смјер: општи;

Звање: дипломирани инжењер хемијске технологије (240 ECTS);

Назив дипломског рада: „Поређење ефикасности електрооксидације и електро-фентона“

2013 – 2017 СШЦ „Перо Слијепчевић“ Гацко, Гимназија, смјер: општи

Додатне информације

Познавање енглеског језика. Возачка дозвола: Б категорија.

Радно искуство:

12/2023 – 12/2024 – Зависно предузеће „Рудник и Термоелектрана Гацко“ А.Д. Гацко –
приправнички стаж

01/2026 – у току СШЦ „Перо Слијепчевић“ Гацко – професор хемије

УНИВЕРЗИТЕТ У БАЊОЈ ЛУЦИ
ТЕХНОЛОШКИ ФАКУЛТЕТ

Комисија за оцјену и одбрану завршног рада II циклуса студија

Primljeno: 02.02.2026.			PRILOGA:
ORG. JED.	BROJ	ARH. ŠIFRA	
15/3	148	26	VRHODNOST:

НАУЧНО - НАСТАВНОМ ВИЈЕЋУ

ПРЕДМЕТ: Извјештај Комисије о оцјени урађеног мастер рада кандидаткиње Милице Говедарице, дипл. инж.

Одлуком Научно - наставног вијећа Технолошког факултета Универзитета у Бањој Луци, број: 15/3.53-11/26 од 15.01.2026. године, именована је Комисија за оцјену и јавну одбрану завршног (мастер) рада на другом циклусу студија, кандидаткиње Милице Говедарице, дипл. инж. хемијске технологије, под називом „Валоризација летећег пепела из термоелектране „Станари“ у грађевинској индустрији у функцији смањења емисија гасова стаклене баште“, у сљедећем саставу:

1. Проф. др Дијана Дрљача, предсједник, Технолошки факултет,
2. Проф. др Драженко Бјелић, ментор, Технолошки факултет,
3. Проф. др Борислав Малиновић, члан, Технолошки факултет.

Комисија је у предвиђеном року прегледала достављени завршни рад II циклуса (мастер) кандидаткиње Милице Говедарице и Научно - наставном вијећу Технолошког факултета Универзитета у Бањој Луци подноси сљедећи

ИЗВЈЕШТАЈ

Мастер рад кандидаткиње Милице Говедарице, дипл. инж. хем. технологије, написан је ћириличним писмом (фонтом „Arial“, величином слова 10 и проредом 1,15) прегледно и јасно на 49 страница текста А4 формата, илустрованог са 13 слика и 21 табелом. У раду је кориштено 52 литературна навода. Рад је написан прегледно кроз сљедећа поглавља: **Увод, Теоријски дио, Хипотезе и циљ рада, Материјали и методе рада, Резултати и дискусија, Закључци и Литература.**

УВОД И ТЕОРИЈСКИ ДИО

Уводни дио рада је јасно структуриран и тематски смјешта истраживање у контекст климатских промјена, пораста емисија гасова са ефектом стаклене баште и прекомјерног коришћења природних ресурса. Кроз наглашавање потребе за одрживим управљањем отпадним материјалима и преласком ка моделу циркуларне економије, летећи пепео се већ у уводном дијелу препознаје као значајан секундарни ресурс са великим потенцијалом за примјену у грађевинској индустрији, а не искључиво као проблематичан отпад.

Уводно образложење циља и предмета истраживања досљедно наглашавају три кључне димензије: валоризацију летећег пепела као секундарног ресурса, његову

примјену у грађевинској индустрији (са акцентом на цемент, бетон и путну инфраструктуру) и процјену утицаја на емисије гасова са ефектом стаклене баште. Увод јасно указује да је истраживање усмјерено на поређење различитих сценарија управљања пепелом у односу на базни сценарио депоновања.

Теоријски дио рада започиње приказом основних појмова везаних за термоелектране и угља као доминантан енергент у Републици Српској, чиме се успоставља енергетски и технолошки контекст у оквиру којег настаје летећи пепео. Објашњен је процес његовог настанка и сакупљања, као и основна подјела чврстих фосилних горива из којих настаје. ЗУ овом дијелу се представља рад Термоелектране „Станари“, описује се начин настанка и раздвајања пепела, као и организација система сакупљања, транспорта и складиштења, чиме се јасно приказују техничке и логистичке карактеристике управљања овим материјалом.

Посебна пажња посвећена је физичким и хемијским карактеристикама пепела, гдје се истиче његова фина, прашкаста структура, облик честица, као и садржај оксида силицијума, алуминијума и гвожђа, који су кључни за његово понашање у контакту са цементним везивима. Наглашена су и његова пуцоланска својства као основни предуслов за примјену у везивним системима, при чему се указује на утицај минералног састава, финоће и губитака при жарењу на развој чврстоће и трајности композита.

У наставку је дат детаљан преглед најважнијих система класификације летећег пепела, чиме се обезбјеђује јасан нормативни и технички оквир за његову примјену. Посебно је истакнута подјела према америчком стандарду ASTM C618, који дефинише двије основне класе пепела са различитим карактеристикама и областима примјене: класу F, која настаје сагоријевањем антрацита или битуменског угља, и одликује се израженим пуцоланским својствима и нижим садржајем калцијум-оксида, те класу C, која настаје сагоријевањем лигнита или суб-битуменског угља и која поред пуцоланских, показује и одређена самостална хидрауличка својства. Наглашени су и минимални захтјеви у погледу збирног садржаја оксида силицијума, алуминијума и гвожђа, који служе као оријентир за процјену подобности пепела за употребу у цементним композитима. Поред тога, објашњена је класификација према европском стандарду EN 197-1, као и подјела према RIMEL комитету, чиме се приказују различити, али комплементарни приступи категоризацији овог материјала у међународној пракси.

У наставку поглавља детаљно се разматра двоструки карактер летећег пепела, посматрајући га истовремено као потенцијални отпад и вриједан ресурс. Детаљно су описани негативни утицаји дуготрајног депоновања пепела, укључујући могућност загађења ваздуха, воде и земљишта, као и ризик од испирања тешких метала и других токсичних елемената у траговима и утицај финих честица на здравље људи. Насупрот овим еколошким ризицима, представљен је широк спектар могућности примјене летећег пепела. Највећи фокус је стављен на његову валоризацију у грађевинској индустрији, гдје се користи као минерални додатак у производњи цемента, служећи као дјелимична замјена за клинкер, енергетски најинтензивнију компоненту цемента, чиме се директно смањују емисије CO₂. Такође се користи као минерални додатак у производњи бетона, као замјена за дио портланд цемента, што побољшава одређена

својства бетона као што су обрадивост, дуготрајност и отпорност, уз истовремено смањење трошкова и еколошког отиска. Надаље, примјењује се и као материјал у изградњи путева, гдје замјењује дио примарних материјала као што су шљунак или кречњак.

Теоријски дио адекватно повезује тему са глобалним напорима за смањење емисија гасова са ефектом стаклене баште и транзицију ка нискоугљеничном грађевинском сектору. Објашњена је улога Међувладиног тијела за климатске промјене (IPCC) и његових методолошких смјерница за процјену емисија, са посебним освртом на емисије из производње цемента као једног од најзначајнијих извора процесних емисија CO₂. На тај начин се јасно показује како супституција дијела клинкера и цемента летећим пепелом може допринијети ублажавању климатских промјена кроз смањење директних и индиректних емисија.

На крају поглавља, дат је темељан преглед законодавног и стандардизацијског оквира у Републици Српској и ширем регулаторном контексту који регулише употребу грађевинских производа и секундарних сировина. Анализирани су кључни закони, правилници и технички прописи који дефинишу услове за стављање на тржиште и употребу производа који садрже летећи пепео, уз нагласак на неопходност доказивања усаглашености са релевантним стандардима и захтјевима заштите животне средине и здравља људи. Овај дио потврђује да постоји јасан правни и институционални основ за безбједну и контролисану валоризацију летећег пепела, те да је његова примјена у грађевинарству ускладива са начелима одрживог развоја и циркуларне економије..

ХИПОТЕЗЕ И ЦИЉЕВИ РАДА

У овом дијелу рада, кандидаткиња је прецизно дефинисала истраживачки оквир кроз постављање јасних хипотеза и циљева, који су међусобно повезани и усмјерени ка рјешавању дефинисаног проблема. Постављене су три кључне хипотезе које представљају окосницу истраживања и чије ће се потврђивање или оповргавање извршити кроз анализу добијених резултата, и то:

- Летећи пепео из Термоелектране „Станари“ посједује физичко-хемијска својства која омогућавају његову валоризацију у грађевинској индустрији као секундарне сировине;
- Валоризација летећег пепела у грађевинској индустрији доприноси значајном смањењу емисија гасова стаклене баште у односу на базни сценарио депоновања, што уједно подржава испуњавање обавеза дефинисаних међународним климатским споеазумима;
- Употреба летећег пепела из Термоелектране „Станари“ у грађевинској индустрији доприноси унапређењу одрживог управљања индустријским отпадом у складу са принципима циркуларне економије.

Циљеви истраживања су јасно формулисани и међусобно логички повезани са постављеним хипотезама:

- Први циљ односи се на анализу физичко-хемијских својстава летећег пепела из Термоелектране „Станари“ на основу доступних података, са намјером да се процјени његова погодност за употребу у грађевинским материјалима;

- Други циљ је развој и анализа различитих сценарија валоризације пепела у грађевинској индустрији (употреба као сировине у производњи цемента, као додатак у бетону и употреба у цестоградњи) у односу на базни сценарио депоновања;
- Трећи циљ обухвата прорачун уштеда у емисијама гасова стаклене баште за сваки сценарио валоризације у поређењу са полазним сценаријем;
- Четврти циљ усмјерен је на испитивање доприноса оваквог начина управљања летећим пепелом унапређењу одрживог управљања индустријским отпадом и остварењу циљева циркуларне економије.

Кроз ове циљеве, рад настоји да пружи јасне и научно утемељене одговоре на истраживачка питања постављена кроз хипотезе.

На основу структуре рада и представљених резултата може се закључити да су сви наведени циљеви у потпуности реализовани, тј. извршена је детаљна карактеризација пепела, разрађени су и упоређени релевантни сценарији валоризације, квантитативно су одређене уштеде у емисијама гасова са ефектом стаклене баште, а кроз дискусију је јасно показано да предложени модели валоризације доприносе принципима одрживог управљања отпадом и циркуларне економије.

РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА СА ДИСКУСИЈОМ

У овом поглављу систематски су представљени и анализирани резултати истраживања, при чему се јасно прате постављене хипотезе и циљеви рада. На основу расположивих лабораторијских и документованих података о физичко-хемијским својствима, утврђено је да летећи пепео из Термоелектране „Станари“ задовољава критеријуме за класу F према стандарду ASTM C618, укључујући висок збир садржаја SiO_2 , Al_2O_3 и Fe_2O_3 и прихватљив ниво губитака при жарењу, што потврђује његову подобност за употребу у грађевинским материјалима и директно подржава полазну хипотезу о техничкој употребљивости овог материјала. У раду је додатно показано да се посматрани пепео уклапа и у захтјеве релевантних европских стандарда за употребу у цементу и бетону, што даје чврсту основу за разраду сценарија валоризације.

У наставку поглавља дата је компаративна анализа четири сценарија управљања летећим пепелом, укључујући базни сценарио потпуног депоновања и три сценарија валоризације. У наставку поглавља посебно мјесто заузима компаративна анализа четири сценарија управљања летећим пепелом, укључујући базни сценарио потпуног депоновања и три сценарија валоризације. Базни сценарио депоновања оцијењен је као еколошки најнеповољнији, док сценарији који обухватају супституцију клинкера у цементу, дијела цемента у бетону и замјену природног агрегата у путној изградњи показују различит, али у свим случајевима позитиван ефекат на смањење емисија гасова са ефектом стаклене баште и на рационалније коришћење ресурса.

Дискусија резултата је темељна и добро аргументована. Кандидаткиња јасно повезује добијене резултате са постављеним хипотезама и циљевима, те их ставља у шири контекст циркуларне економије. Наглашава се да валоризација летећег пепела не само да смањује емисије CO_2 , већ и доприноси смањењу количине отпада, очувању

природних ресурса и успостављању индустријске симбиозе између енергетског и грађевинског сектора. Резултати су поткријељени релевантном литературом и стандардима, што дискусији даје додатну тежину.

ЗАКЉУЧАК И ПРИЈЕДЛОГ КОМИСИЈЕ

Имајући у виду све наведено, Комисија је једногласно дала своје позитивно мишљење о мастер раду кандидаткиње Милице Говедарице, дипл. инж., под насловом **„Валоризација летећег пепела из термоелектране „Станари“ у грађевинској индустрији у функцији смањења емисија гасова стаклене баште“** и и предлаже Научно - наставном вијећу Технолошког факултета Универзитета у Бањој Луци да **одобри** јавну одбрану рада.

У Бањој Луци, 02.02.2026. године

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ:

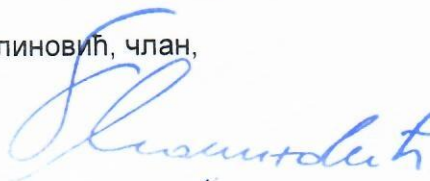
1. Проф. др Дијана Дрљача, предсједник,
Технолошки факултет



2. Проф. др Драженко Бјелић, ментор,
Технолошки факултет



3. Проф. др Борислав Малиновић, члан,
Технолошки факултет



УНИВЕРЗИТЕТУ У БАЊОЈ ЛУЦИ ПОДАЦИ О АУТОРУ ОДБРАЊЕНОГ МАСТЕР РАДА

Име и презиме аутора мастер рада: Милица Говедарица

Датум, мјесто и држава рођења аутора: 02.10.1998. Требиње, БиХ

Назив завршеног факултета и година дипломирања: Технолошки факултет Универзитета у Бањој Луци, 2022.

Датум одбране завршног рада аутора: 07.10.2022.

Наслов завршног рада аутора: „Поређење ефикасности електрооксидације и електрофентона“

Академско звање које је аутор стекао одбраном завршног рада: Дипломирани инжењер хемијске технологије

Академско звање које је аутор стекао одбраном мастер рада: Мастер хемијског инжењерства

Назив факултета на коме је мастер рад одбрањен: Технолошки факултет Универзитета у Бањој Луци

Наслов мастер рада и датум одбране: „Валоризација летећег пепела из термоелектране „Станари“ у грађевинској индустрији у функцији смањења емисија гасова стаклене баште“.

Научна област мастер рада према CERIF шифрарнику: T350 – Хемијска технологија и инжењерство

Имена ментора и чланова Комисије за одбрану мастер рада:

- Проф. др Дијана Дрљача, предсједник,
- Проф. др Драженко Бјелић, ментор,
- Проф. др Борислав Малиновић, члан.

У Бањој Луци, 02.03.2026.

Проф. др Борислав Малиновић, декан



Изјава 1

ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Изјављујем да је мастер рад

Наслов рада: „Валоризација летећег пепела из термоелектране „Станари“ у грађевинској индустрији у функцији смањења емисија гасова стаклене баште“

Наслов рада на енглеском језику: „Valorization of fly ash from the thermal power plant "Stanari" in the construction industry in the function of reducing greenhouse gas emissions".

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да мастер рад, у целини или у дијеловима, није био предложен за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршила ауторска права и користила интелектуалну својину других лица.

У Бањој Луци, 20.02.2026.

Потпис кандидата:

Габријела Милић

Изјава 2

Изјава којом се овлашћује Технолошки факултет Универзитета у Бањој Луци да мастер рад учини јавно доступним

Овлашћујем Технолошки факултет Универзитета у Бањој Луци да мој мастер рад, под насловом „Валоризација летећег пепела из термоелектране „Станари“ у грађевинској индустрији у функцији смањења емисија гасова стаклене баште“ који је моје ауторско дјело, учини јавно доступним.

Мој мастер рад са свим прилозима предала сам у електронском формату, погодном за трајно архивирање.

Мој мастер рад, похрањен у дигитални репозиторијум Универзитета у Бањој Луци, могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons), за коју сам се одлучила.

1. Ауторство
2. Ауторство – некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – дијелити под истим условим
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – дијелити под истим условима

У Бањој Луци, 20.02.2026

Потпис кандидата:

Телегарица Милану

Изјава 3

Изјава и идентичности штампане и електронске верзије мастер рада

Име и презиме аутора: Милица Говедарица

Наслов рада: „Валоризација летећег пепела из теромелектране „Станари“ у грађевинској индустрији у функцији смањења емисија гасова стаклене баште“.

Ментор: Проф. др Драженко Бјелић

Изјављујем да је штампана верзија мог мастер рада идентична електронској верзији коју сам предала за дигитални репозиторијум Универзитета у Бањој Луци.

У Бањој Луци, 20.02.2026.

Потпис кандидата:

Говедарица Милица