

Влезен материјал е повторно отпадот, додека излезни се производот во форма на цемент, емисиите преку стакленичките гасови кои се генерираат и пепелта како нус производ. Вредностите за овие параметри може да се најдат во Табела 3.4.

Емисии

Главните емисии кои се земаат во предвид се емисии од јаглерод диоксид и се пресметани со примена на Равенка 3.16.

$$E_{CO_2} = RDF \cdot EF_{RDF} \quad \left[\frac{kt}{\text{год.}} \right] \quad (3.16)$$

RDF – количина на RDF произведена од цврст отпад $\left[\frac{kt}{\text{год.}} \right]$

$EF_{RDF} = 1,91$ – емисионен фактор за RDF $\left[\frac{kt \text{ } CO_2}{kt \text{ } MSW} \right]$

Вредноста за емисиониот фактор за RDF е добиена преку употреба на Равенка 3.17.

$$EF_{RDF} = \frac{\eta_{conv} \cdot 3,667 \cdot CC_{RDF}}{100} \quad (3.17)$$

$\eta_{conv} = 0,98$ - фактор на ефикасност на конверзија (оксидација) на јаглерод $[-]$

$CC_{RDF} = 53,12$ – концентрација на јаглерод во RDF (carbon concentration) $[\%]$ (пресметано лабораториски во Поглавје 4.3.3)

Во овие пресметки од Сценарио 4 е земено дека од 1 t цврст отпад се добиваат 0,4 t RDF.

Цврсти остатоци

При производството на цемент поголем дел од пепелта која се таложи се инкорпорира во произведениот цемент и затоа таа вредност е занемарлива. Поради тоа, во пресметката ќе биде претставена само количината летечка пепел која се создава во цементната печка при ко-согорување отпад со варовник. Таа количина на летечка пепел е добиена со примена на Равенка 3.18.

$$FA = SW \cdot A \cdot FA_{\%}/100 \quad \left[\frac{kt}{\text{год.}} \right] \quad (3.18)$$

$A = 0,089$ – концентрација на пепел во гориво (цврст отпад) $[-]$ (одредена лабораториски)

$FA_{\%} = 10$ - процент од вкупна пепел која е летечка пепел (flying ash) $[\%]$

Цемент

Во процесот на согорување отпад заедно со варовник во цементната печка се произведува цемент. Главна компонента која има удел во формирањето цемент е пепелта од отпадот. Во пресметката на количеството произведен цемент од процесот се зема предвид пепелта која се таложи која е најголем процент од вкупната пепел содржана во отпадот и одредена лабораториски. Равенката која се користи за пресметка на создадениот цемент е Равенка 3.19.

$$CEM = CLN/(C/C) \quad \left[\frac{kt}{\text{год.}} \right] \quad (3.19)$$

CLN – произведен клинкер од цврст отпад $\left[\frac{kt}{\text{год.}} \right]$

C/C – однос на клинкер со цемент (clinker to cement ratio) $[-]$

$$CLN = SW \cdot A \cdot BA_{\%}/100 \quad \left[\frac{kt}{год.} \right]$$

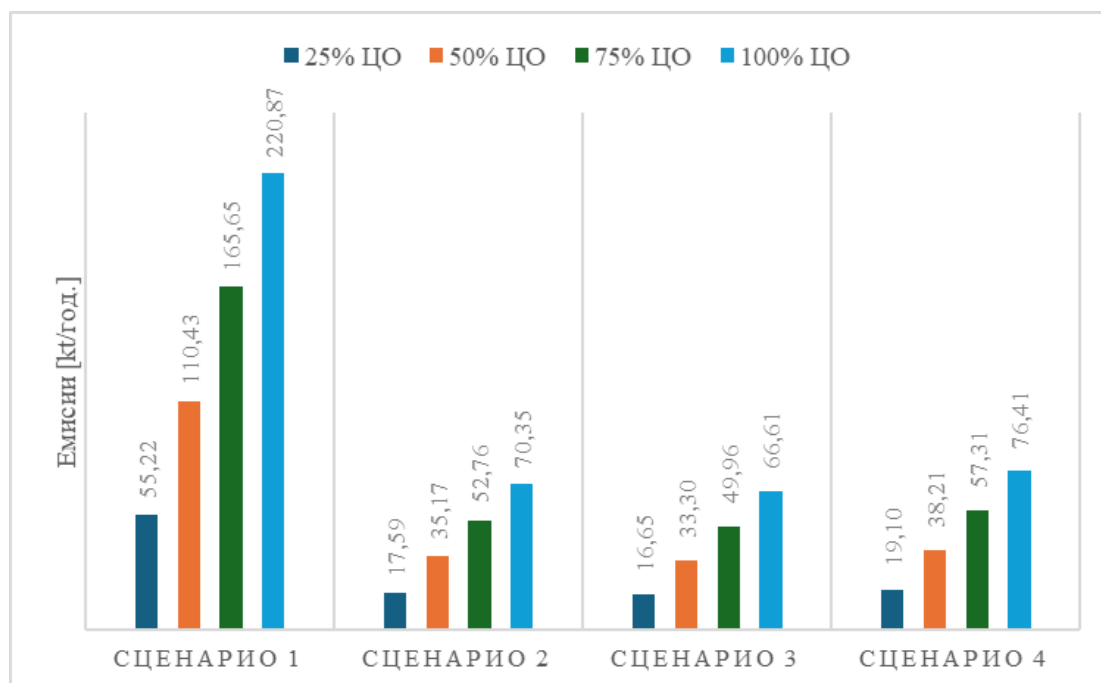
$BA_{\%} = 90$ - процент од вкупна пепел која се таложи (згура, шљака) [%]

Табела 3.4. Материјални текови во Сценарио 4

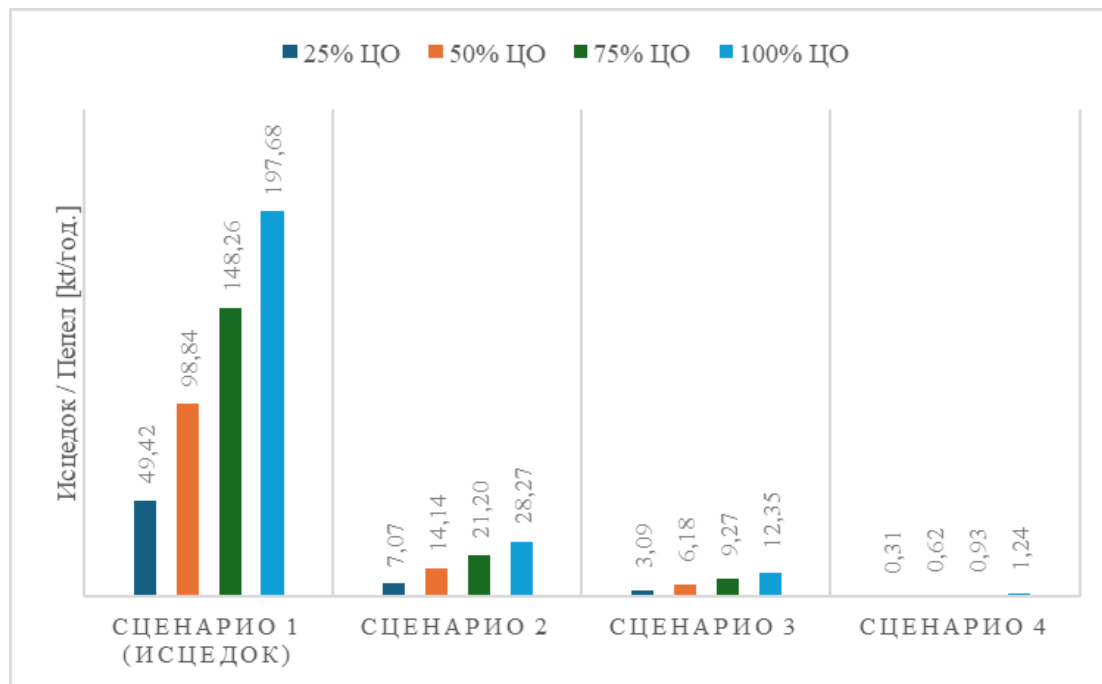
Процентуален удел на цврст отпад кој би се депонирал [%]	Депониран цврст отпад [kt/год.]	Емисии [kt/год.]	Цврсти остатоци [kt/год.]	Цемент [kt/год.]
0% ЦО	-	-	-	-
25% ЦО	39,80	19,10	0,31	3,71
50% ЦО	79,60	38,21	0,62	7,41
75% ЦО	119,40	57,31	0,93	11,12
100% ЦО	159,20	76,41	1,24	14,82

3.1.5. Сумарно

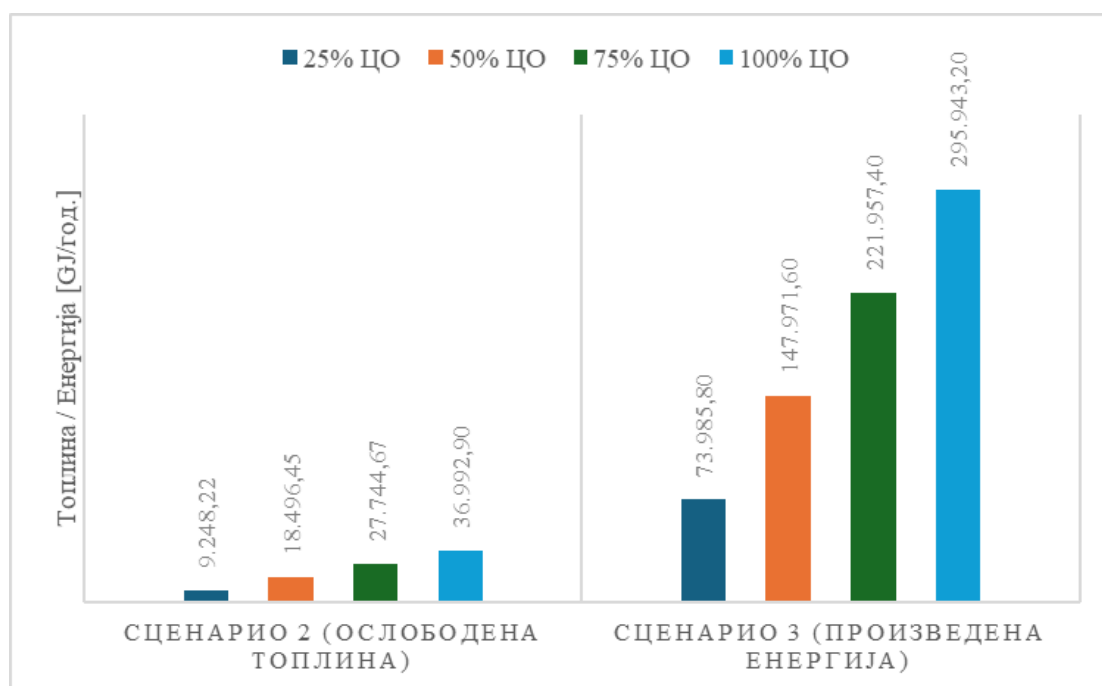
Резултатите од емисиите на стакленички гасови од секое сценарио се дадени во дијаграмот на Слика 3.1. Како што може да се забележи (и да се очекува) најголеми се емисиите при депонирање на отпадот, по што следат емисиите од ко-согорување на отпадот во цементни печки. Најниски емисии на стакленички гасови има при контролирано согорување на отпад во постројки за производство на енергија. Протокот на материјали во форма на нус производи е претставен на Слика 3.2, додека генерираната енергија од секое сценарио е дадена на Слика 3.3.



Слика 3.1. Анализа на проток на материјали – емисии за сите сценарија



Слика 3.2. Анализа на проток на материјали – нус производи за сите сценарија



Слика 3.3. Анализа на проток на енергија – енергија за сите сценарија

Кај емисиите, Сценарио 1 генерира највисоки вредности кои растат со зголемување на отпадот, од 55,22 kt при 25% до 220,87 kt при 100%. Ова сценарио се издвојува како најнеповолно од еколошки аспект. Сценарија 2 и 3 покажуваат значително пониски емисии. Кај Сценарио 2 тие се движат од 17,59 kt до 70,35 kt, додека кај Сценарио 3 се од 16,65 kt до 66,61 kt. Сценарио 4 има умерени емисии, повисоки од Сценарија 2 и 3, но сепак пониски од Сценарио 1, со опсег од 19,10 до 76,41 kt.

Кај создадениот остаток, повторно Сценарио 1 има највисоки вредности, кои се зголемуваат со нивото на отпад, од 49,42 kt до 197,68 kt годишно. Сценаријата 2 и 3 создаваат помалку остаток, со Сценарио 2 во опсег од 7,07 kt до 28,27 kt и Сценарио 3 од 3,09 kt до 12,35 kt. Сценарио 4 има најмала количина остаток, која се движи од само 0,31 kt до 1,24 kt годишно, што го прави исклучително поволен избор од аспект на минимален физички отпад по третманот. Ова е очекувано, бидејќи поголем дел од цврстите нус-производи се инкорпорираат во финалниот производ, односно цементот.

Третиот график ја прикажува одлободената или произведената енергија. Во првото и последното сценарио не се произведува енергија и поради тоа не се вклучени во пресметките, ниту во графикот. Сценарио 2 произведува ослободена топлина во опсег од 9.248,22 GJ/год. до 36.992,90 GJ/год., што е значително помалку во споредба со Сценарио 3, каде што енергијата произведена се движи од 73.985,80 GJ/год. до 295.943,20 GJ/год. Ова е очекувано со оглед на тоа дека при контролираното согорување условите за согорување се оптимизирани; температурата е стабилна и висока, има контролирано снабдување со кислород, како и се обезбедува доволен престој на отпадот во зоната на согорување. Кај неконтролираното согорување температурите се пониски и нестабилни, често има недоволно кислород, а отпадот не согорува целосно при што дел од органските материи остануваат неразложени. Ова се главните причини зошто во Сценарио 2 има значително помалку ослободена топлина од процесот.

3.2. Методологии за донесување одлуки

Методологијата за донесување одлуки и Методологијата за анализа на одлуки се тесно поврзани концепти со суптилни разлики во нивниот опсег и примена. Методологијата за донесување одлуки се однесува на поширокото поле на одлучување кое вклучува повеќе, често конфликтни критериуми, кои вообичаено се користат во оперативното истражување, како инженерство, бизнис и креирање политики за поддршка на компромисни одлуки. Опфаќа широк опсег на пристапи, вклучувајќи оптимизација (на пример, оптимизација со повеќе цели) и техники за анализа на одлуки. Таа може успешно да интегрира ставови од различни засегнати страни или носители на одлуки кои имаат различни приоритети и цели. Спротивно на тоа, Методологијата за анализа на одлуки е подполе во рамките на Методологијата за донесување одлуки што се фокусира конкретно на аналитички методи за евалуација и споредување на повеќе алтернативи. Почесто се применува во рамки за квалитативна и структурирана анализа на одлуки, особено во управувањето со животната средина, здравството и јавната политика. Методите на Методологијата за анализа на одлуки вклучуваат: AHP (Analytic Hierarchy Process), TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution), ELECTRE (ELimination Et Choix Traduisant la REalite), PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations), MAUT (Multi-Attribute Utility Theory) и други алатки кои се користат за рангирање или приоретизирање на алтернативите. Клучната разлика е што Методологијата за донесување одлуки е поширока дисциплина која вклучува и оптимизација и анализа, додека Методологијата за анализа на одлуки е построкурирана подгрупа која се фокусира на евалуација и рангирање. Методологијата за анализа на одлуки има флексибилен пристап и потенцијал за хармонична соработка со други алатки, како што се анализата на животниот циклус, анализата на еколошкиот отпечаток и еколошките индикатори.

Analytic Hierarchy Process (AHP) е структурирана алатка за донесување одлуки во рамките на мултикритериумската методологија за анализа на одлуки, развиена од

Томас Саати во 1970-тите. Овој метод е дизајниран да решава сложени проблеми со донесување одлуки преку нивно разделување на хиерархиски подпроблеми. Процесот започнува со дефинирање на целта, потоа се идентификуваат критериумите што влијаат на одлуката и алтернативите што се разгледуваат. АНР се потпира на споредбени проценки во парови, при што носителите на одлуки ги споредуваат критериумите и алтернативите користејќи ја Саатиовата фундаментална скала (од 1 до 9) за да ги изразат своите преференции. Оваа скала е клучна за поедноставување на процесот на споредување на различни критериуми. Скалата се движи од 1 до 9, при што секој број има специфично значење. Кога два критериуми или алтернативи добиваат тежина од 1, тие имаат еднаква важност во процесот на одлучување. Оценка од 3 означува блага предност на еден критериум или алтернатива во однос на друг. Оценка од 5 укажува на умерена предност, при што критериумот или алтернативата со повисока оценка е умерено поважен/на. Вредност од 9 претставува силна предност на еден критериум или алтернатива, односно оној со повисока оценка е значително поважен. Вредностите помеѓу овие, како 2, 4, 6 и 8, можат да се користат за изразување на меѓуфазии на преференции. Оваа скала од 1 до 9 им овозможува на донесувачите на одлуки да ги квантифицираат своите субјективни проценки за релативната важност на критериумите или алтернативите. Ваквата квантификација го олеснува процесот на споредување на паровите и пресметување на тежинските оценки за подобро информирано одлучување.

Откако ќе се направат споредбите, приоритетните вредности се пресметуваат со помош на сопствените вредности или методот на геометриска средина, со цел да се рангираат критериумите и алтернативите. За да се осигура логичката конзистентност на проценките, се пресметува коефициент на конзистентност. Доколку учествуваат повеќе носители на одлуки, нивните проценки може математички да се агрегираат, односно да се комбинираат индивидуалните одлуки во групна одлука. АНР наоѓа широка примена во различни области, вклучувајќи бизнис и финансии за избор на проекти и инвестициони одлуки, инженерство и производство за избор на добавувачи и проценка на ризик, здравство за избор на третмани и распределба на ресурси, како и урбанистичко планирање за избор на локации и евалуација на политики. Овој метод е ценет поради неговата способност да интегрира и квалитативни и квантитативни фактори, што го прави ефикасен алат за сложени процеси на донесување одлуки [95].

Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) е исто така метод од мултикритериумската анализа на одлуки, развиен од Хванг и Јун во 1981 година. Овој метод се користи за рангирање на алтернативи врз основа на нивното геометриско растојание од идеалното решение. Основната идеја е дека најдобрата опција треба да има најкратко растојание од идеалното решение (најдоброто можно сценарио) и најголемо растојание од негативно-идеалното решение (најлошото можно сценарио). Процесот започнува со конструирање на матрица на одлуки, каде што секоја алтернатива се оценува според повеќе критериуми. Потоа, вредностите на критериумите се нормализираат за да се овозможи нивна споредливост. По нормализацијата, се доделуваат тежински вредности што ја одразуваат релативната важност на секој критериум. Идеалното и негативно-идеалното решение се одредуваат со избирање на најдобрите и најлошите вредности за секој критериум. Се пресметува Евклидово растојание на секоја алтернатива од идеалното и негативно-идеалното решение. Конечно, се пресметува релативна блискост и алтернативите се рангираат соодветно. TOPSIS е широко користен поради неговата едноставност, ефикасност и способност да обработува и квалитативни и квантитативни критериуми [96]. Најчесто се применува во бизнис, инженерство, финансии, здравство и управување со синџири на снабдување, каде што носителите на одлуки треба објективно да оценат повеќе алтернативи.

ELimination Et Choix Traduisant la REalite (ELECTRE) припаѓа во методите од мултикритериумската анализа на одлуки, развиен во 1960-тите од Бернар Рој. Се користи за решавање на сложени проблеми со донесување одлуки каде што треба да се евалуираат повеќе спротивставени критериуми. За разлика од други методи како АНР или TOPSIS, ELECTRE се базира на приод на надредување, што значи дека не генерира строга ранг-листа, туку идентификува најдобри алтернативи преку нивна споредба во парови. Ова се прави преку пресметување на конкордантен и дискордантен индекс. Конкордантен индекс го мери степенот до кој една алтернатива е барем исто толку добра како друга. Дискордантен индекс проверува колку една алтернатива е полоша од друга според одредени критериуми. Врз основа на овие индекси се формира релација на надредување, а алтернативите што не ги исполнуваат условите се елиминираат. Оние што остануваат ги претставуваат најдобрите можни решенија [97]. ELECTRE се применува во различни области како урбанистичко планирање, управување со животната средина, транспорт, финансии и инженерство, каде што носителите на одлуки треба да се справат со спротивставени критериуми и неизвесни податоци. Овој метод е особено корисен кога не е неопходно рангирање, туку елиминирање на послабите алтернативи.

Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations (PROMETHEE) е дел од мултикритериумската анализа на одлуки, развиен од Жан-Пјер Бранс во 1980-тите. Се користи за рангирање и избор на алтернативи кога треба да се земат предвид повеќе спротивставени критериуми. Тој се заснова на приод на надредување и обезбедува јасно рангирање на алтернативите, наместо само елиминирање на послабите. Методот започнува со конструирање на матрица на одлучување, каде што алтернативите се оценуваат според различни критериуми. Носителите на одлуки дефинираат функции на преференција, кои го опишуваат степенот на предност на една алтернатива во однос на друга за секој критериум. Овие преференции се комбинираат со тежини, кои ја одразуваат важноста на секој критериум. Потоа, се пресметуваат позитивните и негативните индекси на надредување, позитивниот индекс (Φ^+) мери колку една алтернатива е поповолна во однос на другите, негативниот индекс (Φ^-) мери колку една алтернатива е доминирана од другите. Нето индексот (Φ) се добива со одземање на негативниот индекс од позитивниот. Алтернативите се рангираат врз основа на нивните нето индекси, при што повисоките вредности укажуваат на подобар избор [98].

Multi-Attribute Utility Theory (MAUT) е метод од мултикритериумската анализа на одлуки што се користи за носење рационални одлуки кога се вклучени повеќе спротивставени критериуми. Тој се базира на теоријата на корисност, која ги квантифицира преференциите на носителите на одлуки за различни исходи преку доделување на нумерички вредности (корисности). Ова овозможува структуриран и конзистентен процес на одлучување, особено кога се работи со неизвесност и ризик. Основната идеја е да се додели функција на корисност на секој критериум, која ги трансформира почетните податоци во стандардизирана скала, обично помеѓу 0 и 1. Процесот започнува со идентификување на критериумите за одлучување, при што се наведуваат сите релевантни атрибути што влијаат врз одлуката. Потоа, се одредуваат функциите на корисност, кои дефинираат како секој критериум придонесува кон вкупната корисност, често користејќи математички функции што ги одразуваат ризичните преференции на носителите на одлуки. Следно, се доделуваат тежини за да се распореди релативната важност на секој критериум според неговото значење во одлуката. Откако ќе се утврдат вредностите на корисност и тежините, тие се комбинираат со адитивен или мултипликативен модел на агрегирање за да се пресмета

вкупниот резултат на корисност за секоја алтернатива. Конечно, алтернативата со највисока вредност на корисност се смета за најпрефериран избор [99].

Од повеќе причини, погоренаведените методи за анализа на одлуки се клучни во управувањето со начините и техниките за справување со комуналниот цврст отпад. Техниките кои се поврзани со третман на комуналниот цврст отпад се поврзани со трошоци, влијанија врз животната средина и јавното здравје. Методологијата за анализа на одлуки овозможува истовремено разгледување на овие различни критериуми, обезбедува организиран и објективен пристап, ги квантифицира критериумите и ги минимизира субјективните пристрасности со доделување тежиниски фактори. Често, одлуките поврзани со оваа проблематика вклучуваат компромиси, како што е трошокот наспроти влијанието врз животната средина, а Методологијата за донесување одлуки систематски ги истражува овие компромиси. Донесувачите на одлуки можат да ги проценат последиците од различни стратегии под различни услови, со што се олеснува информираното одлучување. Процесот на управување со комунален цврст отпад вклучува повеќе засегнати страни, а наведените методи ги ангажираат, ги вклучуваат преференците и го поттикнуваат инклузивно донесување одлуки. Со растечките проблеми поврзани со справување со отпадот, Методологијата за донесување одлуки може да искористи аналитика на податоци и моделирање за подобрување на процесот на одлучување [100].

Методологијата за донесување одлуки во стратегиите за добивање “енергија-од-отпад” бара мултикритериумски пристап кој главно ги интегрира еколошките, економските, социополитичките и технолошките критериуми. **Еколошкото** влијание се однесува на оценката на влијанието на системот за управување со комунален цврст отпад врз животната средина. Тоа ги опфаќа потенцијалните ефекти врз квалитетот на воздухот, водата и почвата, како и емисијата на стакленички гасови и придонесот кон климатските промени. Тука спаѓаат енергетската ефикасност, односно повратот на електрична и/или топлинска енергија; намалувањето на количините на отпад или негово пренасочување од депониите со примена на конкретната технологија; повратот на ресурси, како рециклирање материјали и искористување на создадените цврсти остатоци; потрошувачка на вода и други ресурси. **Економското** влијание се однесува на избраната технологија за добивање енергија од отпад во однос на почетен инвестициски трошок; трошоци за работа и одржување, познати како оперативни трошоци; генерирање приход преку продажба на енергија или нуспроизводи; достапност и цена на сировини за функционирање и работа на постројката; период на поврат на инвестицијата; цена по единица произведена енергија. **Социјалното** влијание го претставува ефектот на системот за управување со отпадот врз заедницата, вклучувајќи аспекти како што се јавното прифаќање и перцепција; ризиците по здравјето и безбедноста; отворање работни места и локално вработување; влијание врз општиот квалитет на живот; социјалната еднаквост и правда, односно фер распределбата на придобивките/ризиците. **Технолошките** критериуми се однесуваат на зрелоста и доверливоста на технологијата, кое е докажано наспроти новите технологии; ефикасноста на конверзија на енергија; флексибилноста на сировини, односно видовите отпад кои може да се преработат; скалирање и приспособливост за различни региони и големини; управување со остатоци и нус-производи, како пепел и згура; автоматизација и дигитализација преку употреба на вештачка интелигенција, интернет на нештата, паметен мониторинг [101] и [102].

Значајно методолошко прашање при спроведување на овој мултикритериумски пристап за “енергија-од-отпад” е изведбата на анализа на сензитивност. Ова е од клучно значење, имајќи предвид дека влезните податоци и вредностите на параметрите во реални случаи произлегуваат од дискутабилни евалуации, како што се тежинските

фактори, евалуацијата на критериумите, критичните вредности и праговите. Анализата на сензитивност го оценува добиеното решение со промена на главните параметри за одлучување и набљудување на соодветните влијанија врз решението. Споредбата на различните резултирачки рангирања на решенијата овозможува добивање на робустно решение или повторно моделирање на проблемот [101].

3.2.1. Примена на техниката АНР за оценка на сценаријата

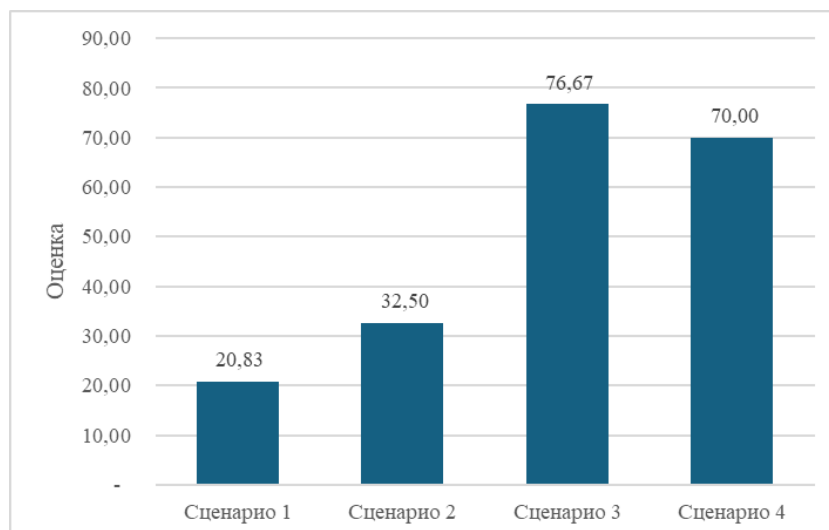
Повторно ги разгледуваме четирите (4) различни сценарија во управувањето со отпадот кои ќе ги категоризираме според АНР. Во првото сценарио нема промени во начинот на третирање на отпадот, односно целиот отпад се носи на депонија. Во второто сценарио се смета дека отпадот се согорува, меѓутоа на отворено при неконтролирани услови. Во третото сценарио отпадот исто така се согорува, но во постројка за добивање енергија со следење на процесот и параметрите. Во последното, четврто сценарио отпадот се ко-согорува во печка за производство на цемент заедно со друго фосилно гориво. Овие сценарија ќе бидат оценети според следниве критериуми: 1. Еколошкото влијание, односно влијанието врз животната средина, 2. Економското влијание, 3. Технолошкото влијание и 4. Социјалното влијание. Еколошкото влијание ќе се оцени согласно критериумите: емисии во воздух, емисии во вода и ширење непријатна миризба. Економското влијание ќе се процени според тоа какви капитални и оперативни инвестиции и трошоци има разгледуваната технологија, како и дали од истата се генерира приход и дали суровините за нејзина работа се достапни. Технолошкото влијание ќе се определи според тоа дали третманот на отпадот кој се анализира применува некаква технологија, дали истата е позната или нова, дали постои можност за скалирање на енергијата, дали има конверзија на енергија во процесот и управување со нус производите. Социјалното влијание ќе се дефинира со анализа на тоа дали разгледуваната постапка има јавно прифаќање, дали има ризици по здравјето и безбедноста на луѓето, дали генерира вработувања и какво е општото влијание врз квалитетот на живот. Сите наведени критериуми согласно нивното влијание се дадени во Табела 3.5.

Табела 3.5. Критериуми за оценка на сценаријата со примена на алатката АНР

Сценарио	Назив	Критериуми			
		Еколошко влијание	Економско влијание	Технолошко влијание	Социјално влијание
C1	Депонирање отпад	има емисии во воздух има емисии во вода има непријатен мирис	нема CAPEX нема OPEX нема приход има достапни суровини	нема технологија нема конверзија на енергија има скалирање и приспособливост нема управување со остатоци	нема јавно прифаќање има ризици по здравје и безбедност нема бројни вработувања има негативно влијание врз квалитет на живот
оценка		9	1	3	9
C2	Согорување отпад во неконтролирани услови	има емисии во воздух	нема CAPEX нема OPEX нема приход	нема технологија нема конверзија на енергија има скалирање и	нема јавно прифаќање има ризици по здравје и

			има достапни сировини	приспособливост нема управување со остатоци	безбедност нема вработувања има негативно влијание врз квалитет на живот
оценка		6	1	3	9
C3	Согорување отпад во контролирани услови	има емисии во воздух, но има третман на истите	има CAPEX има OPEX има приход има достапни сировини	има технологија (позната) има конверзија на енергија нема скалирање има управување со остатоци	има делумно прифаќање има мало влијание по здравје и безбедност има вработувања има средно влијание врз квалитет на живот
оценка		3	9	9	6
C4	Согорување отпад во цементна печка	има емисии во воздух, но има третман на истите	има CAPEX има OPEX има приход има достапни сировини	има технологија (позната) има конверзија на енергија (во производ) нема скалирање има управување со остатоци	има делумно прифаќање има мало влијание по здравје и безбедност има вработувања има средно влијание врз квалитет на живот
оценка		3	9	6	6

Тежинскиот фактор на наведените критериуми е следен: еколошко влијание 35%, економско влијание 15%, технолошко влијание 20% и социјалното влијание 30%. Согласно погоренаведените критериуми и нивните тежински фактори добиено е следново рангирање на сценаријата, дадено на Слика 3.4.

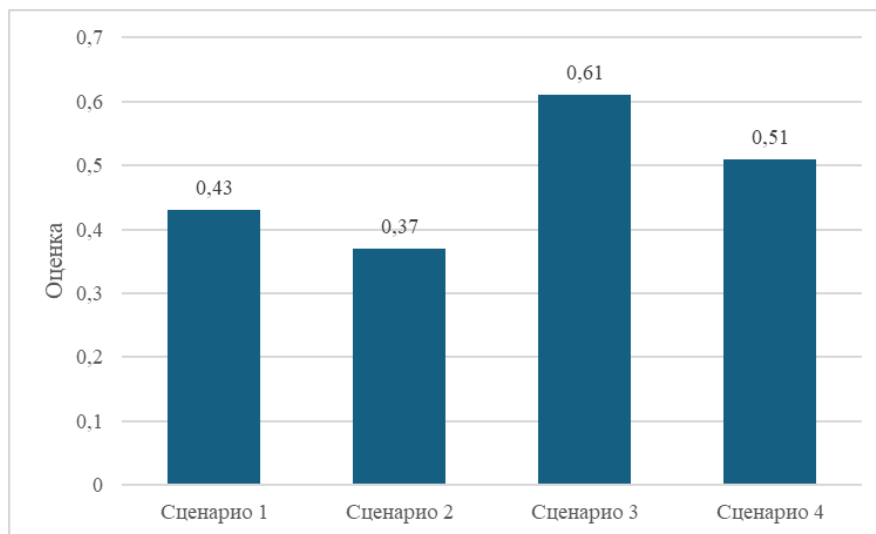


Слика 3.4. Оценка на сценаријата согласно алатката АНР

Согласно резултатите добиение од моделот АНР најпосакуван избор на технологија за третман на отпадот е негово согорување во контролирани услови (76,67%), кое го претставува Сценариото 3, што укажува на неговата висока ефикасност и одржливост според дефинираните критериуми. Потоа следува согорување отпад во цементна печка (Сценарио 4) со оценка од 70,00%, кое исто така претставува еколошки и технички прифатливо решение, особено поради можноста за инкорпорирање на остатоците во финалниот производ. Сценаријата за депонирање и неконтролирано согорување добиле најниски оценки (20,83% и 32,50% соодветно), што ја рефлектира нивната ограничена еколошка и енергетска вредност, како и потенцијалното негативно влијание врз животната средина [103]. Овие резултати ја потврдуваат предноста на термичките технологии со контролирани услови како поефикасни решенија за управување со отпад.

3.2.2. Примена на техниката TOPSIS за оценка на сценаријата

На основа на истите критериуми направена е и споредба и оценка на сценаријата според TOPSIS моделот и таа е дадена на Слика 3.5. Добиеени се слични резултати, односно најповолно сценарио по однос на наведените критериуми е третото, каде отпадот се согорува во постројка за инсенерација и производство на енергија [104].



Слика 3.5. Оценка на сценаријата согласно алатката TOPSIS

Согласно резултатите добиени преку примената на методот TOPSIS, сценариото за контролирано согорување (Сценарио 3) повторно се издвојува како најповолна опција, со највисока оценка од 0,61, што укажува на неговата најголема близина до идеалното решение според дефинираните критериуми. Сценариото за ко-согорување во цементна печка (Сценарио 4) зазема второ место со вредност од 0,51, што исто така го позиционира како одржливо решение, особено во случаи кога постои инфраструктура за индустриско согорување. Депонирањето (Сценарио 1) и неконтролираното согорување (Сценарио 2)

добиваат пониски оценки, 0,43 и 0,37 соодветно, што укажува на нивната релативна неповолност според анализираните технички, еколошки и економски аспекти.

3.3. Стратегии и планирање за енергетско користење на отпадни материи

Европската Унија има воспоставено сеопфатна стратегија за управување со отпад која се темели на принципите на одржливост, циркуларна економија и заштита на животната средина. При стратегиското планирање се следат чекорите воспоставени во „хиерархијата на управување со отпад“, превенција → повторна употреба → рециклирање → енергетско искористување (валоризација) → депонирање.

Првиот чекор е превенција на создавање отпад, односно спречување или намалување на создавањето отпад уште на самиот извор. Клучни стратегии кои ја поддржуваат оваа активност се Директивата за отпад 2008/98/ЕС, подоцна заменета со Директивата 2018/851, Европскиот зелен договор COM/2019/640, Акциониот план за циркуларна економија COM/2020/98 и Иницијативата за одржливи производи. Директивата за отпад ги обврзува земјите членки да донесат национални програми за превенција на отпад. Европскиот зелен договор предвидува раздвојување на економскиот раст од употребата на ресурси, со акцент на намалување на отпадот. Акциониот план за циркуларна економија поттикнува еко-дизајн, трајни производи, повторна употреба и споделување ресурси. Додека, на иницијатива за одржливи производи целта е производите да бидат подолготрајни и полесни за поправка, наместо постојано да се заменуваат со нови.

Вториот чекор е селекција и сортирање на отпад, со цел подобрување на примарната селекција на отпадот кај граѓаните и стопанството за полесно понатамошно справување и рециклирање. Тука клучните мерки се одредени согласно Директивата за отпад, кои вклучуваат задолжителна селекција на хартија, метал, пластика и стакло до 2015, био-отпад до крајот на 2023 и текстил и опасен отпад од домаќинствата до 2025 година. Дополнително, тука е значајна новата Регулатива за еко-дизајн која предвидува дигитален пасош на производи, кој помага во следење на материјалите и поефикасна селекција.

Третиот чекор се однесува на рециклирање и материјално искористување на отпадните материи. Целта е враќање на материјалите во производствениот циклус, наместо нивно фрлање. Според Директивата за отпад и Директивата за пакување и отпад од пакување 2018/852 се предвидува рециклирање на комунален отпад во вредности од 55% до 2025, 60% до 2030 и 65% до 2035 година; рециклирање отпад од пакување, и тоа пластика 55%, дрво 30%, метали 80%, алуминиум 60%, стакло 75% и хартија и картон 85%.

Четвртиот чекор е енергетската валоризација на отпадот, за кој се зборува во овој докторски труд, односно добивање енергија од отпад, најдобро оној кој не може да се рециклира. Тука водилки се Директивата за енергетска ефикасност 2023/1791/EU и Директивата за индустриски емисии 2010/75/EU, која поставува гранични вредности за емисиите од постројките за согорување отпад.

Последниот чекор кој се наоѓа најниско во хиерархијата на управување со отпад е отстранување, односно депонирање на отпадот. Целта е депонирањето да се сведе само на неопходниот минимум. Референтен документ е Директивата за депонии 1999/31/ЕС согласно која до 2035 година, биоразградливиот отпад кој оди на депонии треба да се

намали на 35% од нивото во 1995 година. Исто така, од 2030 година се забранува депонирање на отпад кој е селектиран за посебно собирање.

Клучните наоди од сите наведени стратешки документи, заедно со нивните референци се дадени во Табела 3.6.

Табела 3.6. Стратешки документи за управување со отпад во Европска Унија

Документ / Директива	Полн наслов	Година	Главен фокус / наод	Главни цели / одредби	Реф.
Директива 2008/98/ЕС	Директива за отпад	2008	Воспоставува хиерархија на отпад и рамка за управување со отпад низ цела ЕУ	- Хиерархија на отпад: Превенција > Повторна употреба > Рециклирање > Обновување > Отстранување - Обврска за одделно собирање - 55% рециклирање на комуналниот отпад до 2025 година, 60% до 2030 година, 65% до 2035 година	[15]
Директива 2018/851/EU	Измена на Директива 2008/98/ЕС за отпад	2018	Ја зајакнува превенцијата од отпад, повторната употреба, рециклирањето и следењето на податоците	- Задолжителна сепарација на биоотпадот до 2023 година - Проширени шеми за одговорност на производителот за сите текови на отпад	[105]
Директива 94/62/ЕС	Директива за пакување и отпад од пакување	1994	Поставува правила за материјалот за пакување и обврските за враќање на материјалот	- Превенција на отпад од пакување - Основни барања за повторна употреба и преработка на пакување	[106]
Директива 2018/852/EU	Измена на Директива 94/62/ЕС за пакување и отпад од пакување	2018	Ги ажурира целите за рециклирање отпад од пакување	- Цели за рециклирање до 2030 година: Пластика 55%, Дрво 30%, Црни метали 80%, Алуминиум 60%, Стакло 75%, Хартија/картон 85% - Задолжителни шеми за одговорност на производителот до крајот на 2024 година	[107]
Директива 1999/31/ЕС	Директива за депонии	1999	Поставува правила за намалување на	- Биоразградив комунален отпад за	[108]

			депонирањето и неговото влијание врз животната средина	депонирање ≤ 35% од нивоата од 1995 година до 2035 година - Забрана за депонирање на сепариран отпад од 2030 година	
Директива 2010/75/EU	Директива за индустриски емисии, вклучително од согорување на отпад	2010	Ги контролира емисиите од постројките за добивање енергија од отпад (и други објекти)	- Задолжителна примена на најдобри достапни техники (BAT) - Строги ограничувања на емисиите за загадувачи на воздухот, водата и почвата	[109]
Директива 2023/1791/EU	Директива за енергетска ефикасност	2023	Воспоставување обврзувачки цели за подобрување на енергетската ефикасност и намалување на потрошувачката на енергија	- Намалување на енергетска потрошувачка за најмалку 11,7% до 2030 (според проекции за 2020) - Годишна енергетска заштеда од 1,49% до 2030 (од 2024) - Обврска за големи компании да воведат системи за енергетски менаџмент	[110]
Акционен план за циркуларна економија COM/2020/98	Стратегија на ЕУ за циркуларна економија	2020	Стратешка политика за затворање на јамките на ресурсите и намалување на отпадот	- Промовира екодизајн, повторна употреба, поправка и одржлива потрошувачка - Воведува дигитален пасош за производи	[111]
Стратегија на ЕУ за пластика COM/2018/028	Европска стратегија за пластика во циркуларна економија	2018	Фокусиран на повторна употреба на пластика, рециклирање и намалување на морскиот отпад	- Целата пластична амбалажа да биде рециклирана или повторно употреблива до 2030 година - Ограничувања за пластика за еднократна употреба	[112]
Европски зелен договор COM/2019/640	Комуникација од Европската комисија: Европскиот зелен договор	2019	Општа стратегија за климатска неутралност и ефикасност на ресурсите	- Повикува на нулто загадување и одвојување на растот од користењето на ресурсите - Овозможува законодавство за	[113]

				циркуларна економија	
Иницијатива за одржливи производи (според предлогот за регулатива за еко-дизајн)	Идно законодавство за одржлив дизајн на производи	Во подготовка	Ќе наложи издржливост, обновување и циркуларност во дизајнот на производот	- Го проширува екодизајнот на повеќе производи - Ќе вклучува дигитални пасоши на производи	[114]

Следно, ќе биде разгледана поврзаноста на овие директиви со постапката на енергетска валоризација на отпадот, преку инсенерција во постројки за добивање енергија од отпад.

Во Директивата за отпад 2008/98/ЕС енергетската валоризација на отпадот е поставена како опција подолу во хиерархијата на отпадот, веднаш по превенцијата, подготовката за повторна употреба и рециклирањето. Согорувањето на отпад се смета за оправдано само доколку постои реална енергетска корист (на пример, кога се користи во постројки со задоволителен коефициент на полезно дејство). Директивата дополнително нагласува дека овој тип на искористување на отпадот не треба да ги попречува превенцијата и рециклирањето.

Директивата за индустриски емисии 2010/75/EU ја регулира работата на постројките „енергија-од-отпад“, особено инсенераторите, преку воведување строги стандарди за емисии на штетни гасови (диоксини, фуранни, тешки метали, NO_x, SO₂, PM-честички). Потребно е користење на најдобри достапни техники за да се минимизира негативното влијание врз животната средина.

Во Стратегијата за циркуларна економија COM/2020/98 се нагласува дека енергетското искористување отпад е последна опција по рециклирањето и повторната употреба, бидејќи главната цел е да се намали количината отпад што се создава и депонира. Сепак, постројките за добивање енергија од отпад се признаени како неопходен дел од менаџментот на отпадот, особено за оние фракции што не може ефикасно да се рециклираат, со цел да се добие енергија и да се намали депонирањето.

Директивата за депонии 1999/31/ЕС ги охрабрува земјите-членки да го намалат одлагањето на биоразградлив отпад на депонии. Технологиите за „енергија-од-отпад“ се споменуваат како алтернативи кои помагаат во остварувањето на овие цели, преку согорување и добивање енергија од отпадот, наместо негово депонирање.

Република Северна Македонија

Северна Македонија има направено значителни чекори кон усогласување на својата правна рамка со европската легислатива за управување со отпад. Дел од директивите се веќе транспонирани преку постојни закони и подзаконски акти, додека други се предмет на тековни реформи и подготовка на нови законски решенија.

На Директивите за отпад 2008/98/ЕС и 2018/851/EU одговара **Законот за управување со отпад** (Службен Весник бр.09/11, изменет 31/20). Овој закон ја воспоставува хиерархијата на управување со отпад, дефинира основни поими, како повторна употреба, рециклирање, отстранување, и ја утврдува институционалната рамка. Сепак, законот не е целосно усогласен со целите за рециклирање коишто се наведени во Директивата, каде се пропишува рециклирање од 65% до 2035 година.

Законот за управување со пакување и отпад од пакување (Службен Весник бр. 215/21) ја транспонира Директивата за пакување и отпад од пакување 94/62/ЕС и

2018/852/EU, како и Стратегијата на ЕУ за пластика COM/2018/028. Овој закон е еден од најусогласените со европската регулатива во оваа област, каде е целосно транспонирана директивата со дефинирани цели за рециклирање, обврска за селекција, воведување на EPR-системи, како и мерки за намалување на потрошувачката на пластични кеси. Предвиден е и депозитно-враќачки систем.

Директна корелација со Директивата за депонии 1999/31/ЕС нема во Македонија. Главните барања се регулирани со Закон за управување со отпадот и неговите подзаконски акти. Тука спаѓа **Правилникот за количеството на биоразградливи состојки во отпадот што смее да се депонира** (Службен Весник бр. 108/09), согласно кој поставени се национални цели за ограничување на биоразградлив отпад што се депонира, со предвидено намалување за 65% до 2027 година.

На Директивата за индустриски емисии 2010/75/EU одговара **Правилник за гранични вредности за емисии и услови за согорување на отпад** (Службен Весник 123/09), кој обезбедува рамка за контрола на емисии од инсенерација и ко-инсенерација на отпад, во согласност со европските најдобри достапни техники. Иако донесен пред Директивата, правилникот ги покрива клучните технички аспекти на истата.

Директен документ кој ја транспонира Директивата за енергетска ефикасност 2023/1791/EU, меѓутоа постојат активности преку **Законот за енергетика** (Службен Весник 96/18), **Законот за енергетска ефикасност** (Службен Весник 32/20), **Стратегијата за развој на енергетиката до 2040 година** и **долгорочната Стратегија за климатска акција со акциски план**. На овој начин ускладеноста е делумна преку стратески документи за енергетска ефикасност, но без закон со обврзувачки енергетски цели.

Акциониот план за циркуларна економија COM/2020/98 не е директно транспониран со локална регулатива, меѓутоа е применет преку **A Roadmap towards Circular Economy of North Macedonia** од 2024 година. Тој покрива пет приоритетни области: циркуларни бизнис модели, градежништво, храна/биомаса, текстил и рударство. Содржи над 40 препорачани политики, меѓу кои и интеграција на проширена одговорност на производителот, селекција на отпад, финансиски инструменти, зелени јавни набавки.

Принципите на Европскиот Зелен Договор COM/2019/640 се интегрирани низ повеќе национални стратегии, како **Национална стратегија за одржлив развој 2009-2030**, **Националниот план за управување со отпад 2020-2030**, **долгорочната Стратегија за климатска акција со акциски план** и **Стратегијата за развој на енергетиката**.

Македонија се обидува да усвои основни принципи на ЕУ политика, особено во области како отпад, климатски акција и енергетска ефикасност, преку рамковни стратегии и планови. Меѓутоа, има некои предизвици со кои се соочува, како недостаток на квантитативни и мерливи цели, недоволна имплементација на проширена одговорност на производителот и примена на технологии за добивање енергија од отпад. Потребна е законска рамка со обврзувачки принципи од Европскиот Зелен Договор и Акциониот план за циркуларна економија. Сите погореспоменати документи се наведени во Табела 3.7.

Табела 3.7. Регулотива за управување со отпад во Македонија

Име на документот	Година	Кратки поенти / фокус	Реф.
-------------------	--------	-----------------------	------

Закон за управување со отпад	2021	Воведува хиерархија на отпад, цели за рециклирање, поддршка за технологиите „енергија-од-отпад“ и циркуларни практики.	[115]
Закон за управување со пакување и отпад од пакување	2021	Воспоставува имплементација на проширена одговорност на производителот, системи за собирање, цел за рециклирање до 60%.	[116]
Закон за енергетика	2018	Уредува либерализација на пазарот, интеграција на обновливи извори, зголемување на ефикасност.	[117]
Закон за енергетска ефикасност	2020	Воведува национални цели за енергетска ефикасност, обврски за големи потрошувачи, и мерки за енергетска обнова на згради.	[118]
Правилник за количеството на биоразградливи состојки во отпадот што смее да се депонира	2009	Определува максимални дозволени количини на биоразградлив отпад кој може да се депонира на депонии со цел намалување на негативното влијание врз животната средина.	[119]
Правилник за гранични вредности за емисии и услови за согорување на отпад		Уредува лимити за емисии на загадувачи од постројки за согорување на отпад и поставува услови за нивно безбедно и еколошко работење.	[120]
Национален план за управување со отпад 2020–2030	2020	Стратегија за намалување на депонии, подобрување на селекција и поддршка на технологии „енергија-од-отпад“. Вклучува долгорочна визија за циркуларна економија.	[121]
Национална стратегија за одржлив развој 2009-2030	2009	Определува долгорочни приоритети и насоки за одржлив економски, социјален и еколошки развој на земјата.	[122]
Долгорочна Стратегија за климатска акција со акциски план	2021	Ја поставува рамката за намалување на емисиите на стакленички гасови и адаптација кон климатските промени преку конкретни активности и мерки.	[123]
Стратегијата за развој на енергетиката до 2040 година	2021	Прецизира визија и планови за развој на енергетскиот сектор, вклучувајќи обновливи извори и енергетска ефикасност до одреден временски период.	[124]

3.3.1. Патеки за планирање и развој

Во последната деценија, Европската Унија има воспоставено јасни и амбициозни патеки за одржлив развој, базирани на концептите на циркуларна економија, зелена енергија и дејствување против климатски промени. Главни столбови во тоа се Европскиот Зелен Договор кој има визија за климатски неутрална Европа до 2050 година, со економија базирана на одржливи ресурси и минимални емисии. Потоа, Стратегијата за циркуларна економија и за пластика во циркуларна економија со фокус на редизајн, повторна употреба и рециклирање, со намалување на отпадот како ресурс. Тука спаѓаат и Директивите за депонии, за индустриски емисии и за еко-дизајн кои создаваат регулаторна рамка за минимизирање на влијанието врз животната средина.

Во согласност со овие политики, планирањето во Европската Унија се води низ интегрирано и координирано поставување на цели со меѓусекторска соработка, транспарентност и системи за мониторинг и известување. Секоја стратегија поставува јасни патеки и индикатори за напредок, што овозможува континуирана адаптација. Таквите патеки се резултат на аналитичко моделирање и опфаќаат повеќе можни сценарија, како: брза електрификација, зголемување на обновливи извори, зелена индустрија или циркуларна економија. Тие служат како насочувачи за носителите на одлуки, укажувајќи на последиците од различни избори на политики и технологии. Европската комисија ги користи овие патеки во процесот на изработка на политики и усогласување на националните планови за енергија и клима со заедничките цели.

Македонија, како земја-кандидат за членство во Европската Унија, започна процес на усогласување со европската легислатива преку транспонирање на клучни директиви во националното законодавство. Овој процес вклучува донесување на повеќе значајни закони и стратегии кои ја рефлектираат европската рамка во домените на животната средина, управување со отпад и енергетика. Така, Законот за управување со отпад го следи концептот на европската Директива за депонии и ги вградува основните принципи за одржливо управување со отпад. Законите за енергетика и за енергетска ефикасност се насочени кон постигнување усогласеност со европските барања за ефикасно користење на енергијата и зголемена употреба на обновливи извори. Националниот план за управување со отпад 2020–2030 година поставува приоритети и фази за подобрување на третманот на отпадот, вклучително и примена на технологии за добивање енергија од отпад. Покрај тоа, Националната стратегија за одржлив развој претставува сеопфатен документ кој ги опфаќа аспектите на климатските промени, рационално користење на ресурсите и потребата од зголемена јавна свест.

Иако на ниво на документи и стратегии постои силна усогласеност со европските приоди, нивната практична реализација сè уште е делумна. Главните предизвици со кои се соочува земјата се поврзани со институционалната неусогласеност, односно слабата координација меѓу релевантните институции како што се министерствата за животна средина, енергетика и економија. Дополнително, постои недоволно развиена техничка и логистичка инфраструктура, особено во делот на селекција и третман на отпадот и примена на технологиите за добивање енергија од отпад. Учеството на јавноста и општините во процесите на планирање и имплементација е ограничено, што го намалува нивото на транспарентност и ефективност на мерките. Исто така, иако во законите е вградена обврска за проширена одговорност на производителите, во пракса нејзината имплементација е слаба и недоволно систематизирана.

Енергетско искористување на отпад

Планирањето и развојот на системите за енергетско искористување на отпадот бараат системски и комплексен пристап, кој почнува со детална анализа и мапирање на отпадните фракции. Првиот чекор е да се идентификуваат и квантитативно да се анализираат видовите отпад кои се достапни за третман, органски отпад, пластични материјали, биомаса и други. Ова овозможува правилен избор на технологија која најдобро одговара на карактеристиките на отпадот и локалните услови.

Во рамките на развојот на технологиите за добивање енергија од отпад, најчесто се применуваат термички процеси како што се согорување, гасификација и пиролиза, но важна улога има и биолошката обработка преку анаеробна дигестија. При планирањето се зема предвид технолошката зрелост, финансиската исплатливост и еколошките аспекти на секоја од овие технологии.

Практичниот развој на овие системи најчесто започнува со изградба на пилот-постројки кои служат за тестирање и демонстрирање на технолошката изводливост и стабилноста на процесите. Таквите постројки овозможуваат собирање на оперативни податоци, следење на емисиите и оптимизација на процесот пред масовна комерцијална примена. Истовремено, соработка со индустриски капацитети, како што се цементарниците каде што отпадот се користи како алтернативно гориво, претставува успешен модел за трансфер на технологијата во практиката.

Клучна компонента во патеката на развој е обезбедувањето регулаторна и финансиска поддршка. Јасните и транспарентни законски критериуми за емисии, безбедност и управување со отпадот создаваат сигурна основа за инвеститорите. Воедно, државните и регионалните субвенции, како и фондовите од Европската Унија, можат

значително да го олеснат почетниот финансиски товар и да ја поттикнат иновацијата и усвојувањето на нови технологии.

За да се овозможи максимална ефикасност и да се интегрира системот за енергетско искористување на отпадот во пошироките концепти на циркуларна економија, неопходно е да се планира и искористување на топлината од согорување или други термички процеси. Инсталациите за когенерација и дистрибуција на топлинска енергија можат да го подобрат вкупниот енергетски биланс и да обезбедат дополнителна вредност на проектите.

Долгорочната одржливост на овие системи зависи и од инвестирањето во обука и развој на човечките ресурси. Стручниот кадар е клучен за правилно и безбедно управување со постројките, како и за следење на технолошките новитети. За таа цел, се препорачува соработка и размена на искуства со земји кои имаат повеќе искуство во оваа област.

Конечно, квалитетното планирање треба да вклучи и континуиран мониторинг и анализа на постигнатите резултати. Тоа овозможува навремени корекции и адаптирање на технологиите и стратегиите според тековните потреби и технолошки напредок.

Со овие чекори — од мапирање и избор на технологии, преку пилотирање, регулаторна и финансиска поддршка, обука и мониторинг — се отвора патот кон ефикасно и одржливо искористување на отпадните материји за производство на енергија.

3.3.2. Предизвици при инсталирање постројка за енергетско искористување отпад

Бариерите претставуваат пречки кои го отежнуваат спроведувањето или усвојувањето на одредена технологија или стратегија. Тие мора да се надминат за имплементацијата на одредена технологија да биде успешна.

Ризиците се однесуваат на потенцијални негативни исходи или несигурности кои би можеле да се појават доколку некој проект се имплементира. За ризиците не е гарантирано дека ќе се случат, но мора да се предвидат и да се управуваат. Ризиците вклучуваат веројатности и последици.

Постојат повеќе алатки за евалуација на бариерите кои значително влијаат врз развојот на проектите “енергија-од-отпад”. Тие алатки вклучуваат: Interpretive Structural Model (ISM), Cross-Impact Matrix Multiplication Applied to Classification (MICMAC), Bayesian theory with Best Worst Method (BWM) и други. Првите две ќе бидат објаснети на реален пример во текстот подолу. BWM се интегрира со најдобар-најлош метод за да се подобри донесувањето одлуки и управувањето со несигурностите при сложени проблеми со повеќе критериуми, како што се оценување на бариери или ризици во системите “енергија-од-отпад”. BWM претставува варијација на најдобриот-најлошиот метод, каде група елементи (како проблеми, барања и алтернативи) може да се приоритизираат според нивната согледана вредност или релевантност. Таа приоритизација се прави од страна на експерти кои ги идентификуваат „најдобрите“ и „најлошите“ критериуми од дадена група. Овие избрани елементи потоа се користат како референтни точки за правење споредби за време на анализата. Моделот вклучува и неодреденост со што се зголемува прецизноста на резултатите со користење на Бејзови статистички пристапи за да се процени релативната тежина на ставките врз основа на повратни информации од експертите [125].

Анализа на пречки со ISM и MICMAC методологија

Interpretive Structural Model (ISM) е широко користена методологија за анализа на сложени прашања преку хиерархиски структури. Тоа помага да се идентификуваат односите меѓу променливите во системот, нудејќи систематски пристап за решавање на проблемите. Таа е особено корисна во одлучувањето и планирањето на проекти, каде разбирањето на меѓузависноста е од клучно значење.

Cross-Impact Matrix Multiplication Applied to Classification (MICMAC) е метод на структурна анализа што се користи за проучување на односите помеѓу променливите во сложените системи. Тоа помага да се идентификуваат клучните движечки фактори и зависни фактори кои влијаат на донесувањето одлуки. MICMAC често се користи во комбинација со ISM за да се анализираат бариерите, ризиците или факторите на влијание во системот.

Првиот чекор во ISM вклучува препознавање на клучните фактори кои влијаат на системот што се проучува. Во контекст на изградба на постројка „енергија-од-отпад“ за градот Скопје идентификувани се 6 типови предизвици: оперативни (ОП), технички (ТП), финансиски (ФП), регулаторни (РП), социјални (СП) и еколошки (ЕП). Секоја од овие групи содржи во себе дополнителни подгрупи и истите се анализирани за градот Скопје и се дадени во Табела 3.8.

Следен чекор е развој на матрица за структурна самоинтеракција, која ги доловува односите помеѓу различни фактори. Природата на овие односи се одредува врз основа на логично расудување. Понатаму матрицата за структурна самоинтеракција се трансформира во матрица за достапност. Овој чекор ги претвора квалитативните податоци во математичка рамка за одредување на директното и индиректното влијание на променливите. Следно, ISM ги организира променливите на различни хиерархиски нивоа, прикажувајќи структуриран модел кој го прикажува нивното влијание и зависност. На крај се црта моделот преку структурирано претставување на односите меѓу факторите, што им помага на креаторите на политиките и засегнатите страни да донесуваат информирани одлуки [126].

Во Табела 3.8 се претставени идентификуваните предизвици кои може да се појават при инсталирање и управување постројка за енергетско искористување на отпадни материи со примена на метод на инсенерација за добивање енергија.

Табела 3.8. Идентификувани предизвици за енергетско користење на отпадни материи

Оперативни предизвици	ОП1	Несоодветна селекција и поделба на отпадот во моментот на негово создавање
	ОП2	Потешкотии при собирање и транспортирање на отпад
	ОП3	Несоодветни методи за искористување на отпадот (депонирање и горење на отворено)
	ОП4	Хетерогена природа на отпадот на депониите
	ОП5	Управување со нус производи како пепел и талог
Технички предизвици	ТП1	Недоволно напредни и модерни технологии
	ТП2	Отсуство на обучен и свесен оперативен персонал
	ТП3	Помала топлинска моќ на горивото споредено со конвенционални горива
	ТП4	Недостаток на интегрирани информации за отпад
Финансиски предизвици	ФП1	Висока капитална инвестиција (CAPEX)
	ФП2	Долг период на поврат на инвестиција
	ФП3	Конкурентни цени на енергијата (од обновливи извори)

Регулаторни предизвици	РП1	Планот за управување со отпад за 2021-2031 година дава приоритет на повторната употреба и рециклирањето на отпадот пред WtE
	РП2	Планот за спречување на создавање на отпад за 2022-2028 година приоритизира намалено создавање отпад пред примена на технологии за “енергија-од-отпад”
	РП3	Непостоечка регулатива за изградба и управување со работата на постројки за добивање енергија од отпад
Социјални предизвици	СП1	Недоволна свест на населението и одбивност за изградба на вакви постројки
	СП2	Недоверба во институциите за раководење на постројката поради корупција
	СП3	Потенцијални здравствени ризици (загадување на воздух, токсични емисии и долгорочни здравствени ефекти)
Еколошки предизвици	ЕП1	Загадување на воздухот (диоксини, тешки метали и цврсти честички)
	ЕП2	Справување со остатоци од согорување (пепел и талог)
	ЕП3	Загадување на вода (од системите за ладење и филтрирање)

Следно, применета е матрица за структурна самоинтеракција со која се анализираат односите помеѓу предизвиците користејќи ги следниве критериуми:

- V → Факторот на редот влијае на факторот на колоната
- A → Факторот на колона влијае на факторот на ред
- X → Взаемно влијание
- O → Нема директна врска

Во табелите подолу од Табела 3.9 до

Табела 3.14 даден е приказ на анализата на секои од идентификуваните предизвици поединечно согласно односите на зависност и движење помеѓу нив.

Табела 3.9. Идентификација и анализа на оперативните предизвици за енергетско користење на отпадни материји

Оперативни предизвици	ОП1	ОП2	ОП3	ОП4	ОП5
ОП1	-	O	V	V	O
ОП2	O	-	V	V	O
ОП3	X	A	-	O	V
ОП4	X	A	V	-	O
ОП5	A	O	A	O	-

Табела 3.10. Идентификација и анализа на техничките предизвици за енергетско користење на отпадни материји

Технички предизвици	ТП1	ТП2	ТП3	ТП4
ТП1	-	O	O	O
ТП2	O	-	O	O
ТП3	O	O	-	O
ТП4	O	V	O	-

Табела 3.11. Идентификација и анализа на финансиските предизвици за енергетско користење на отпадни материји

Финансиски предизвици	ФП1	ФП2	ФП3
ФП1	-	X	O
ФП2	X	-	A
ФП3	O	V	-

Табела 3.12. Идентификација и анализа на регулаторните предизвици за енергетско користење на отпадни материји

Регулаторни предизвици	РП1	РП2	РП3
РП1	-	X	O
РП2	X	-	O
РП3	O	O	-

Табела 3.13. Идентификација и анализа на социјалните предизвици за енергетско користење на отпадни материји

Социјални предизвици	СП1	СП2	СП3
СП1	-	A	A
СП2	V	-	V
СП3	V	A	-

Табела 3.14. Идентификација и анализа на еколошките предизвици за енергетско користење на отпадни материји

Еколошки предизвици	ЕП1	ЕП2	ЕП3
ЕП1	-	A	V
ЕП2	V	-	V
ЕП3	A	A	-

Потоа, овие корелации се трансформираат во бинарна матрица со примена на алатката MISMACS. Со 1 се обележуваат полињата каде постои одредена зависност помеѓу предизвиците, додека со 0 кога не постои никаква зависност.

Последната колона ја дава **движечката моќ** на одреден предизвик како збир на редови, а тоа покажува колку одреден предизвик влијае на другите. Додека, последниот ред претставува **моќ на зависност** на одреден предизвик преку збирот на колоните, а таа мери колку предизвикот е под влијание на другите предизвици. Во табелите од Табела 3.15 до

Табела 3.20 преставена е оценката на сите идентификувани предизвици поединечно и дефинирана е движечката моќ и моќта на зависност помеѓу нив.

Табела 3.15. Оценка на оперативните предизвици за енергетско користење на отпадни материји

Оперативни предизвици	ОП1	ОП2	ОП3	ОП4	ОП5	Движечка моќ
ОП1	1	0	1	1	0	3
ОП2	0	1	1	1	0	3
ОП3	1	1	1	0	1	4
ОП4	1	1	1	1	0	4
ОП5	1	0	1	0	1	3
Моќ на зависност	4	3	5	3	2	-

Табела 3.16. Оценка на техничките предизвици за енергетско користење на отпадни материји

Технички предизвици	ТП1	ТП2	ТП3	ТП4	Движечка моќ
ТП1	1	0	0	0	1
ТП2	0	1	0	0	1
ТП3	0	0	1	0	1
ТП4	0	1	0	1	2
Моќ на зависност	1	2	1	1	-

Табела 3.17. Оценка на финансиските предизвици за енергетско користење на отпадни материји

Финансиски предизвици	ФП1	ФП2	ФП3	Движечка моќ
ФП1	1	1	0	2
ФП2	1	1	1	3
ФП3	0	1	1	2
Моќ на зависност	2	3	2	-

Табела 3.18. Оценка на регулаторните предизвици за енергетско користење на отпадни материји

Регулаторни предизвици	РП1	РП2	РП3	Движечка моќ
РП1	1	1	0	2
РП2	1	1	0	2
РП3	0	0	1	1
Моќ на зависност	2	2	1	-

Табела 3.19. Оценка на социјалните предизвици за енергетско користење на отпадни материји

Социјални предизвици	СП1	СП2	СП3	Движечка моќ
СП1	1	1	1	3
СП2	1	1	1	3
СП3	1	1	1	3
Моќ на зависност	3	3	3	-

Табела 3.20. Оценка на еколошките предизвици за енергетско користење на отпадни материји

Еколошки предизвици	ЕП1	ЕП2	ЕП3	Движечка моќ
ЕП1	1	1	1	3
ЕП2	1	1	1	3
ЕП3	1	1	1	3
Моќ на зависност	3	3	3	-

МИСМАС вклучува и графичко прикажување на бариерите според нивната движечка и зависна моќност во четири кластери на променливи: автономни, зависни, поврзани и независни. Тој графички приказ е даден на сликите од Слика 3.6 до Слика 3.8, каде може да се забележат четири квадранти. Квадрант 1 ги содржи автономните

фактори, кои имаат слаба движечка моќ и слаба моќ на зависност; квадрантот 2 содржи зависни фактори, односно такви кои имаат силна моќ на зависност, но слаба движечка моќ; квадрантот 3 содржи фактори кои се поврзани, односно кои имаат силна моќ на зависност и силна движечка моќ; квадрантот 4 содржи независни фактори кој имаат силна движечка моќ, но слаба моќ на зависност.



Слика 3.6. Графички приказ на оперативни предизвици според МАСМАС алатка

На Слика 3.6 направено е прикажување на Оперативните предизвици во соодветни квадранти. Од тука може да се заклучи дека нема предизвици кои се целосно автономни, односно такви кои имаат слаба движечка и слаба моќ на зависност. Исто така, нема целосно независни фактори кои имаат силна движечка моќ и слаба моќ на зависност. Оперативните предизвици 1, 2 и 5 се со средна движечка моќ, при што ОП1 има поголема моќ на зависност, ОП2 има средна моќ на зависност, а ОП5 има најслаба моќ на зависност. Средна моќ на зависност исто така има и ОП4, но има поизразена движечка моќ. Најизразена моќ има ОП3 кој се наоѓа во областа на поврзани фактори и има изразена моќ на зависност и висока движечка моќ.



Слика 3.7. Графички приказ на технички предизвици според МАСМАС алатка

Техничките предизвици се претставени на Слика 3.7 и сите се наоѓаат во Квадрант 1 каде се наоѓаат автономните фактори, односно сите имаат слаба движечка моќ и слаба моќ на зависност.



Слика 3.8. Графички приказ на финансиски, регулаторни, социјални и еколошки предизвици според MICMAC алатка

На Слика 3.8 се претставени сите преостанати, анализирани предизвици, односно финансиските, регулаторните, социјалните и еколошките, бидејќи се анализирани во ист размер на матрица. Може да се забележи дека само РПЗ се наоѓа во Квадрант 1 каде се автономните фактори, односно тие со слаба движечка моќ и слаба моќ на зависност. На средина со умерена движечка моќ и моќ на зависност се ФП1 и ФП3, како и РП1 и РП2. Сите останатие предизвици се наоѓаат во Квадрант 3 на поврзани фактори, кои имаат силна моќ на зависност и силна движечка моќ.

3.3.3. Стратегија за намалување на предизвиците при енергетско користење на отпадните материи

Процесите поврзани со енергетското искористување на отпадните материи, и покрај нивниот потенцијал за производство на енергија и намалување на депонирањето, носат со себе низа предизвици. Препознавањето, анализата и системското управување со овие ризици се клучни за успешно и одржливо имплементирање на избраните сценарија. Во ова поглавје се разработува стратегиски пристап за намалување или елиминирање на постоечките предизвици кои беа идентификувани и анализирани во претходното поглавје, со цел обезбедување стабилен, безбеден и прифатлив развој на системите за енергетско користење на отпадот.

Со цел формирање стратегија за намалување на предизвиците кои се детектирани и анализирани по однос на инсталирање постројка за согорување отпад потребно е тие да се рангираат според нивното влијание кое ќе даде приоритет по кои истите треба да се третираат.

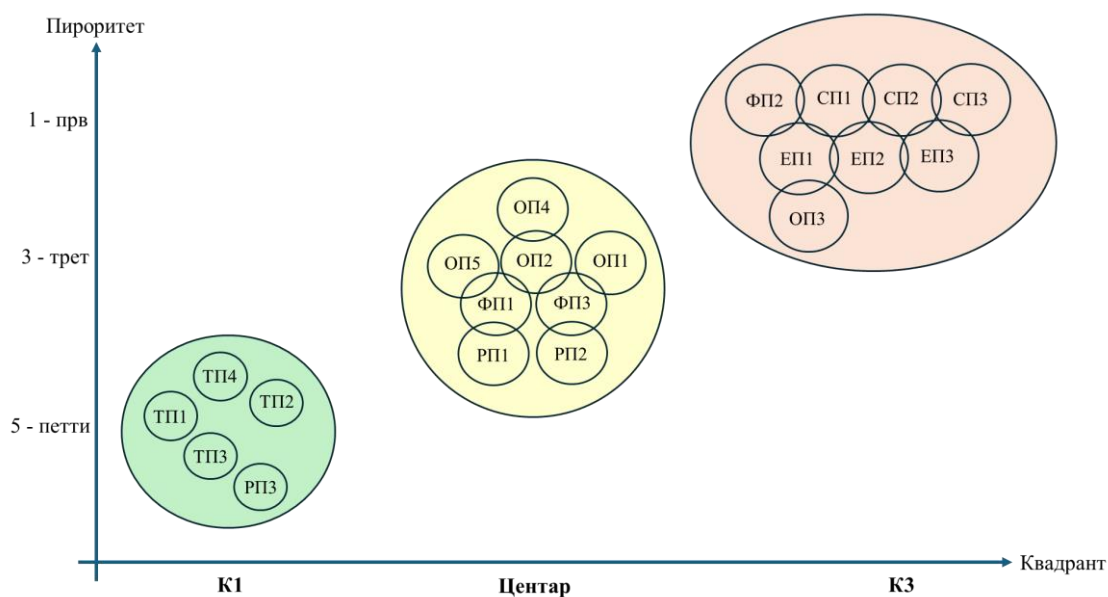
За подобро разбирање на комплексноста и меѓузависностите меѓу идентификуваните и класифицирани предизвици, тие се поделени во пет групи, подредени според приоритет, почнувајќи од највисок кон најнизок. Рангот на групите е прикажан во Табела 3.21.

Табела 3.21. Рангирање на квадранти според приоритет

Ранг	Квадрант	Тип на фактори	Причина за приоритет
1	Квадрант 3	Поврзани фактори	Имаат висока движечка и зависна моќ; критични и чувствителни; можат да го дестабилизираат или зацврстат системот
2	Квадрант 4	Независни фактори	Претставуваат силни двигатели на системот; нивното адресирање помага во справување со суштинските причини
3	Неутрална зона (средина на матрица)	Фактори со умерено влијание	Претставуваат поддржувачки структури; доколку се занемарат, можат да прераснат во фактори со поголемо влијание
4	Квадрант 2	Зависни фактори	Претставуваат последици од други фактори; обично се третираат индиректно, преку решавање на суштинските причини
5	Квадрант 1	Автономни фактори	Имаат слабо влијание и зависност; најнизок приоритет при интервенции на системско ниво

Оваа класификација нуди значаен увид во тоа кои предизвици треба да се приоритизираат и како различните фактори меѓусебно влијаат, формирајќи основа за стратешко носење одлуки и насочени интервенции при планирање на проектите за добивање енергија од отпад. **Поврзаните фактори** имаат висока моќ на поттикнување и на зависност, што ги прави критични и чувствителни елементи кои можат или да го дестабилизираат или да го зацврстат целиот систем. **Независните фактори** силно влијаат врз системот и треба да бидат високо приоритетни, бидејќи нивното адресирање помага во решавање на суштинските причини. **Факторите со умерено влијание** обично претставуваат поддржувачки структури и можат да станат повлијателни со текот на времето, доколку бидат занемарени. **Зависните фактори** претставуваат последици од влијанието на други и обично се третираат индиректно, преку справување со основните поттикнувачи. **Автономните фактори** имаат минимално влијание и зависност и затоа претставуваат најнизок приоритет за интервенции на системско ниво [127].

Предизвиците категоризирани според приоритет се прикажани на Слика 3.9.



Слика 3.9. Предизвици категоризирани според приоритет

Врз основа на спроведената приоретизација на идентификуваните предизвици, направен е стратешки пристап за нивно намалување или елиминирање. Оваа стратегија вклучува препишани мерки за намалување на ризиците поврзани со инсталацијата на постројки „енергија-од-отпад“. Стратешкиот пристап за намалување или елиминирање на постојните предизвици, со цел обезбедување стабилен, безбеден и прифатлив развој на системите за добивање енергија преку согорување на отпад, треба да се спроведува според утврдените приоритети. Овие предлог стратегии се претставени во Табела 3.22.

Табела 3.22. Предлог стратегии за намалување на предизвиците при енергетско користење на отпадни материји

Приоритет на предизвикот	Шифра	Опис	Стратегија
Прв	ОПЗ	Несоодветни методи за искористување на отпадот (депонирање и горење на отворено)	Забрана за отвореното палење со строго спроведување Развој на санитарно уредени депонии Промовирање технологии “енергија-од-отпад” како метод за контролирана обработка на отпад
	ФП2	Долг период на поврат на инвестиција	Воспоставување долгорочни договори за набавка на електрична енергија Воведување повластени тарифи за енергија добиена од отпад Обезбедување финансирање со ниски камати од развојни банки
	СП1	Недоволна свест на населението и одбивност за изградба на вакви постројки	Спроведување ангажман во заедницата и кампањи за информирање Обезбедување транспарентност за емисиите и влијанијата врз здравјето Компензација или бенефиции за заедниците каде е изградена постројката
	СП2	Недоверба во институциите за раководење на постројката поради корупција	Формирање независни надзорни тела Спроведување антикорупциски мерки за транспарентност Овозможување јавен мониторинг на работењето на постројката
	СПЗ	Потенцијални здравствени ризици (загадување на воздух, токсични емисии и долгорочни здравствени ефекти)	Примена на напредни технологии за контрола на емисиите Спроведување континуиран мониторинг на квалитетот на воздухот Обезбеден јавен пристап до податоци за загадувањето во реално време
	ЕП1	Загадување на воздухот (диоксини, тешки метали и цврсти честички)	Инсталирање најсовремени системи за третман на издувни гасови Усвојување на регулативите за емисии според стандардите на ЕУ Редовен мониторинг на влијанието врз животната средина
	ЕП2	Справување со остатоци од согорување (пепел и талог)	Воведување техники за рециклирање на пепел (во патишта, цементна индустрија) Обезбедување безбедно депонирање на пепелта Спроведување на техники за зацврстување/стабилизација

	ЕПЗ	Загадување на вода (од системите за ладење и филтрирање)	Примена на затворени (кружни) системи за вода за минимизирање на испуштањето Третман на отпадните води пред испуштање Следење на квалитетот на водата да е во рамки на стандардите
Втор	/	/	
Трет	ОП1	Несоодветна селекција и поделба на отпадот во моментот на негово создавање	Спроведување строги политики за сегрегација на отпад Кампањи за подигање на јавната свест за сортирање Воведување финансиски стимулации за поделба на отпадот во моментот на негово создавање
	ОП2	Потешкотии при собирање и транспортирање на отпад	Инвестиции во модерни возила за собирање отпад Оптимизирање на патишта за собирање отпад користејќи просторно-географски податоци Поттикнување на јавно-приватни партнерства за логистика
	ОП4	Хетерогена природа на отпадот на депониите	Формирање собирни центри и пред-сортирање на отпад Користење механичко-биолошки третман пред внес на отпад во постројка за добивање “енергија-од-отпад” Спроведување студии за карактеризација на отпадот
	ОП5	Управување со нус производи како пепел и талог	Воведување техники за рециклирање на пепел (во патишта, цементна индустрија) Обезбедување безбедно депонирање на пепелта Спроведување на техники за зацврстување/стабилизација
	ФП1	Висока капитална инвестиција	Формирање јавно-приватни партнерства Аплицирање на ЕУ и меѓународни фондови за зелена енергија Овозможување владини субвенции и даночни ослободувања
	ФПЗ	Конкурентни цени на енергијата добиена од обновливи извори	Развој на хибридни модели на “енергија-од-отпад” и обновливи извори на енергија Воведување стимулации на пазарот на капацитети “енергија-од-отпад” Обезбедување флексибилни механизми за цени
	РП1	Планот за управување со отпад за 2021-2031 година дава приоритет на повторната употреба и рециклирањето на отпадот пред технологиите “енергија-од-отпад”	Поставување на технологиите “енергија-од-отпад” на исто рамниште со рециклирањето Интегрирање на политиките на “енергија-од-отпад” во рамките на циркуларната економија Спроведување проценки за влијанието на постројките “енергија-од-отпад” за да се оправда потребата
	РП2	Планот за спречување на создавање на отпад за 2022-2028 година приоритизира намалено создавање отпад пред “енергија-од-отпад”	Постапките “енергија-од-отпад” да постојат како опција Фокусот да биде на високоефикасно обновување на енергијата Развој на комбинирани стратегии со рециклирање и превенција
Четврти	/	/	

Петти	ТП1	Недоволно напредни и модерни технологии	Поттикнување трансфер на технологии од искусни земји Обезбедување даночни олеснувања за приватни инвестиции во модерни технологии Спроведување пилот проекти за тестирање на иновации
	ТП2	Отсуство на обучен и свесен оперативен персонал	Спроведување програми за градење капацитети за операторите Формирање специјализирани центри за обука за технологии “енергија-од-отпад” Стимулации за задржување на квалификуван кадар
	ТП3	Помала топлинска моќ на горивото споредено со конвенционални горива	Подобрување на претходна обработка на отпадот (сушење, производство на RDF) Заедничко палење со биомаса или други горива Прилагодување на дизајнот на постројката за “енергија-од-отпад” за справување со својствата на локалниот отпад
	ТП4	Недостаток на интегрирани информации за отпад	Развој на национална база на податоци за управување со отпад Интегрирање паметни системи за следење на протокот на отпад Задолжително известување од страна на создавачите на отпад
	РП3	Непостоечка регулатива за изградба и управување со работата на постројки за добивање енергија од отпад	Примена на регулаторни рамки усогласени со директивите на ЕУ за “енергија-од-отпад” Развивање на национални стандарди за емисии и мониторинг на “енергија-од-отпад” Воведување строги барања за добивање лиценци

Предизвиците со **највисок приоритет** се најкритични и бараат итно внимание. Неприфатливите методи за управување на отпадот, како што се отвореното горење и неконтролираното депонирање, се идентификувани како основен проблем. Овие практики не само што го попречуваат враќањето на ресурсите, туку придонесуваат и за сериозни ризици по животната средина и јавното здравје. Преминот кон контролирана обработка преку инсенератори за отпад со добивање енергија, поддржани со строги забрани за отворено горење и развој на санитарни депонии, е од суштинско значење [128]. Ова значи дека успешното создавање заедничка вредност на постројките „енергија-од-отпад“ зависи од цврсти политики и регулативи.

Близу поврзани се финансиските и социјалните бариери. Долгите периоди за враќање на инвестициите значително ги одвраќаат приватните инвеститори од вложување во ваков тип постројки. Стратегии како долгорочни договори за откуп на електрична енергија, тарифи за приклучување и пристап до развојно финансирање можат да ја подобрат економската одржливост на овие проекти. Социјалната прифатеност е исто така клучен фактор, каде ниската јавна свест и отпорот од заедниците беа рангирани како еден од најитните проблеми. Дополнително, длабоката недоверба во институциите кои ги управуваат постројките претставува загрижувачки фактор. Решавањето на овие проблеми бара транспарентна комуникација, кампањи за вклучување на јавноста и механизми за независен надзор и мониторинг од страна на граѓаните за враќање на довербата и легитимитетот.

Здравствените загрижености, реални и перципирани, дополнително го комплицираат прифаќањето од страна на општеството. Загадувањето на воздухот, токсичните емисии и ракувањето со пепелта и загадените отпадни води се идентификувани како значајни бариери поврзани со животната средина и здравјето. За да се намалат овие ризици, неопходно е применување напредни системи за третман на димни гасови, усвојување на стандарди за емисии според ЕУ и спроведување на мониторинг во реално време на квалитетот на воздухот и водата. Овие мерки не само што обезбедуваат усогласеност со регулативите, туку и го зајакнуваат јавниот кредибилитет во безбедноста на инснераторите на отпад.

Групата со **втор приоритет** не содржи предизвици кои бараат посебен третман и справување.

Предизвиците од **третата група** според приоритет се нешто помалку итни, но сепак претставуваат значајни бариери за имплементација. Тие вклучуваат недоволна селекција на отпадот на изворот на негово создавање, неефикасност во собирањето отпад и хетерогеноста на општинскиот комунален отпад. Овие оперативни проблеми влијаат на конзистентноста и квалитетот на суровината, што директно влијае на ефикасноста на постројката и емисиите. Интервенции како политики за селекција на отпадот при негово создавање, инвестиции во оптимизација на логистика и воспоставување на претселекција и механичко-биолошки третман можат значително да го подобрат квалитетот на суровината, а со тоа и перформансите на системот.

Дополнително, високите почетни капитални трошоци остануваат бариера, иако помалку значајна од долгорочната финансиска неизвесност. Јавно-приватните партнерства и пристапот до фондови за зелена енергија на ЕУ можат да ги намалат овие пречки. Исто така, беше идентификувано несоодветно усогласување на регулативите, каде националните стратегии за отпад претпочитаат повторна употреба и рециклирање пред добивање енергија. Потребен е поворамнотежен пристап во политиките, кој ги признава постројките „енергија-од-отпад“ како комплементарна опција во рамките на пошироката циркуларна економија, особено за останати отпадни струи кои не можат да се рециклираат.

Предизвиците со **најнизок приоритет**, вклучувајќи технолошка подготвеност, недостиг на обучен кадар, низок калоричен капацитет на локалниот отпад и отсуство на интегрирани системи за податоци за отпад, не се директни бариери. Нивното решавање може значително да ја подобри долгорочната ефикасност и одржливост. Овие аспекти можат да се адресираат преку програми за јакнење на капацитетите, стимулации за пренос на технологии и развој на паметни системи за податоци кои ќе поддржуваат следење и планирање на отпадот во реално време.

Во заклучок, успешната имплементација на постројка за когенерација со согорување отпад во Скопје бара повеќеслоен стратешки пристап кој ќе одговори на системските и контекстуалните предизвици. Приоритет треба да им се даде на решавање на основните прашања како што се јавното перципирање, финансискиот ризик и безбедноста на животната средина, со истовремено градиње долгорочен оперативен и регулаторен капацитет. Наодите од ISM-MICMAC методологијата нудат структуриран пристап за идентификација на клучните точки за влијание и усогласување на техничките, финансиските, социјалните и политичките мерки кои ќе го поддржат одржливиот развој на системите за добивање енергија од отпад.

4. МЕТОДОЛОГИЈА НА ИСТРАЖУВАЊЕТО

Во истражувањето применети се следните научно-истражувачки методи: метод на преглед, индуктивно-дедуктивен метод, експериментален метод и математички метод. Прв е спроведен методот на преглед на теоретски истражувања, при што направен е детален преглед на научната и стручната литература во областа на карактеризација на цврст отпад и неговата примена како енергетски ресурс. На основа на пребарувањето извлечени се информации за трендовите во менаџирањето со отпадните материји и нивното користење за генерирање енергија, како и сите достапни технологии за енергетска конверзија на отпадните материјали, вклучувајќи ги најдобрите достапни техники во процесот на согорување на отпад. Во индуктивно-дедуктивен метод се користи индуктивното расудување како почетна постапка за извлекување работни хипотези, а потоа дедуктивен пристап за тестирање на хипотезите. Експерименталниот метод опфаќа лабораториски анализи за дефинирање на составот и карактеристиките на градскиот цврст отпад според важечки стандарди и норми. Тој е опишан во текстот подолу, при што направени се испитувања на густина, пропустливост на вода, содржина на испарливи органски соединенија, влага, минерална маса, pH вредност, содржина на јаглерод, водород, азот и сулфур, како и топлинската моќ на отпадот. Последен е математичкиот метод, каде преку статистичка анализа на експерименталните податоци користејќи софтвери за статистичка обработка и анализа, се овозможува организирање и структурирање на податоците од елементарната и техничката анализа на градскиот цврст отпад, претставени во форма на графикони и табели.

4.1. Вовед и истражувачка рамка

Ова поглавје ја прикажува методолошката рамка според која е спроведено истражувањето за карактеризација на градскиот цврст отпад со цел оценка на неговите физичко-хемиски својства и енергетски потенцијал. Истражувањето се темели на експериментален пристап кој опфаќа повеќестепени лабораториски анализи спроведени согласно релевантни европски и национални стандарди и технички норми.

Методолошката рамка е структурирана во неколку фази. Најнапред е опфатен техничкиот опис на експерименталната инсталација и опис на мерната опрема, каде детално се разработени принципите и карактеристиките на инструментите за мерење на: густина, водопропустливост, испарливи материји, пепел, влага, pH вредност, како и на елементарниот состав (C, H, N, S) и топлинската моќ. Во делот за реализација на експерименталното истражување, опфатена е подготовката на отпадот за анализа, а потоа самите постапки на испитување на параметрите, физички и хемиски.

Целта на истражувачката рамка е не само да се добијат точни податоци за карактеристиките на отпадот, туку и да се постави основа за стратешка проценка на неговиот потенцијал за термичка конверзија, влијанието врз животната средина и можностите за негово вклучување во системите за енергетска транзиција. Преку оваа методолошка поставеност, трудот има за цел да понуди објективна и применлива основа за одлуки во областа на управување со отпад и одржлива енергетика.

4.2. Експериментално истражување

Експерименталниот метод вклучува повеќе лабораториски анализи кои се однесуваат на дефинирање на составот и карактеристиките на градскиот цврст отпад спроведени согласно важечки стандарди и норми. Направени беа лабораторски анализи на густината, пропустливоста на вода, содржината на испарливи органски соединенија, содржината на влага, присуството на минерална маса, рН вредноста, содржината на јаглерод, водород, азот и сулфур, како и топлинската моќ на цврст отпад. Анализираниот цврст отпад потекнува од градот Скопје, а за споредба на параметрите се испита и цврст отпад од градот Краков, Полска. Отпадот од Скопје беше земен како репрезентативен примерок од депонијата Дрисла, додека отпадот од Краков беше земен од влезот на отпадот во постројката за согорување отпад (Ekospalarnia), двата од страна на стручни лица.

Густината на примерокот од градски цврст отпад беше одредена со употреба на гасен пикнометар, конкретно АссуРус II 1340 од Micromeritics. Овој инструмент користи поместување на хелиум за мерење на волуменот на цврсти примероци со неправилни форми, пресметувајќи ја густината со мерење на промената на притисокот во калибрирана комора. Процесот започна со тест на прецизност со користење на стандардизирани топчиња за да се обезбеди точност. За време на тестирањето, примерокот беше ставен во комора, прочистен со хелиум и подложен на повторени мерења за прецизно евидентирање на волуменот. Потоа, густината се пресмета со делење на масата на примерокот со неговиот волумен.

За одредување на пропустливоста на вода потребна е дополнителна подготовка на отпадот. Односно, претходно иситнетиот и исушениот цврст отпад беше подложен на постапка на компактирање со употреба на проктор апарат со тест калап во форма на цилиндар и компактор во вид на чекан поставен на вратило. Процесот започна со формирање на цилиндарот (поставување на сидовите и нивно поврзување) во кој се внесува отпад претходно помешан со вода. Оваа смеса од отпад и вода се додава во слоеви, при што секој слој се удира со чекан, се додека не се исполни цилиндарот до неговата висина. Потоа, формируваниот калап се внесува во гумена обвивка, по што се поставува во притисна комора. Притисната комора се поврзува со апаратот Frowag typ 2.924 со користење на триаксијален систем за притисок за тестирање на водопропустливоста на примерокот. Триаксијалниот апарат за компресија со работен притисок од 2,5 бари се состои од резервоар кој го снабдува системот со вода, комора за притисок во која се става примерокот, извор на вода, две бирети и манометри кои овозможуваат подесување на хидростатичкиот притисок и регулација на притисокот на течноста на влезот и излезот од примерокот. Вредноста на коефициентот на пропустливост се зема како аритметичка средина на резултатите од мерењето добиени за двете насоки на проток на вода низ примерокот. За време на експериментот, температурата на водата беше контролирана и беше евидентирана разликата на нивоата во биретите.

Содржината на влага во примерокот беше одредена со употреба на лабораториска машина за сушење од производителот Zalmed SML 32/250 со максимална температура од 250°C, моќност од 1.000 W и висина 60 cm. Процесот започна со подесување на температурата во сушилницата на 105°C. Потоа, во сад за мерење беше додаден иситнет отпад и поставен во сушилницата во период од 24 часа. Односот помеѓу разликата во масата на отпадот пред и по мерењето и масата на внесен отпад ја даде процентуална вредност за содржина на влага во анализираниот примерок.

Присуството на испарливи материји беше испитано со помош на печка од типот на Neoterm NT 1313 со волумен на грејна комора од 4,5 dm³ и максимална температура

на загревање од 1.100°C. Постапката започна со внесување иситнет отпад во сад со капак кој беше поставен во печката која претходно беше загреана до температура од 900°C. Времето на задржување на садот со отпадот изнесува 7 минути. Потоа, садот беше изваден од печката и беше оставен да се стабилизира до собна температура. Односот помеѓу разликата во масата на отпадот пред и по мерењето и масата на внесен отпад од кој се одзема содржината на влага (претходно одредена) ја даде содржината на испарливи материи во примерокот.

За определување на содржината на пепел, односно органски материи во примерокот од градски цврст отпад, се употреби истата печка Neoterm NT 1313 меѓутоа со примена на различна постапка. Температурата во печката беше подесена на 800°C и во неа беше внесен сад со примерок од отпадот. Садот беше оставен во печката во времетраење од 1 час, а потоа беше изваден и оставен да се стабилизира на собна температура по што беше измерен. Постапката беше повторувана до постигнување на константна маса. Содржината на пепел беше одредена со одземање на односот на разликата на масите пред првиот час сушење и n-тиот час и разликата на масите пред првиот час сушење и празниот сад од целината – 1.

Вредноста на pH беше измерена со помош на pH метар од марката Elmetron CP-411 кој содржи електрода од типот ERH-11S со мерен распон 0 ÷ 14 pH и ранг на температура 0 ÷ 60°C. Анализата беше изведена со внесување иситнет отпад во пластичен сад и негово мешање со вода, по што тој беше оставен 24 часа да се стабилизира. По 24 часа настана сепарација на честичките, при што во средината имаше реалтивно “чиста” вода. Електродата беше потопена и оставена во растворот во времетраење од 1 минута, по што се сметаше дека добиена е стабилна вредност на pH.

Содржината на јаглерод, водород и азот беше одредена со примена на инструментот LECO анализатор од моделот Truspec CHN 628 со степен на детекција на јаглерод е од 0,02 mg до 175 mg, водород 0,1 mg до 12 mg и азот 0,02 mg до 100 mg, со време на анализа од околу 4,5 минути по примерок. Процесот беше реализиран со внесување на иситнет и исушен отпад во комора за согорување каде тој согори во присуство на чист кислород при температура од 950°C. При согорувањето јаглеродот од примерокот се конвертира во CO₂, водородот во водена пареа и азотот во азотен гас и NO_x. Количината на јаглерод и водород се одредуваат на основа на произведените гасови CO₂ и H₂O. Од мерењата, процентите на јаглерод, водород и азот во примерокот беа пресметани со користење на стехиометриски односи.

Топлинската моќ на иситнетиот цврст отпад беше одредена со помош на LECO AC500 калориметриската бомба. Примерокот беше внесен во сад за согорување кој беше поставен внатре во калориметриската бомба, која претставува поголем сад соодветно вакумиран (затворен) кој не дозволува присуство на надворешни влијанија врз примерокот. Оваа бомба беше потопена во кофа претходно наполнета со омекната вода која преставува дел од анализаторот. На секои 6 секунди се мереше температурата на водата во кофата со помош на високопрецизен термистор. Првата фаза од анализата беше воспоставување рамнотежа во времетраење од 3 минути, а потоа втората фаза беше анализа на примерокот во времетраење од 5 минути. Фазата на рамнотежа се однесуваше на постигнување температурна рамнотежа помеѓу водата во кофата и калориметриската бомба. Фазата на анализа од 5 минути беше доволна за целосно согорување на отпадот што беше направено во контролирана средина. Количината на топлина ослободена од процесот на согорување се пресмета од топлинската рамнотежа на системот.

За лабораториско испитување на сулфур во примерокот од иситнет цврст отпад беше применет LECO анализаторот од моделот S832 со стапка на детекција на сулфур

0,008 до 30 mg и време на анализа од 60 до 120 секунди. Анализата започна со внесување мала количина иситнет отпад во печката во која имаше чист кислород и која беше претходно загреана до температура од 1.450°C. Примерокот согори при што се ослободи јаглерод во форма на CO₂ гас и сулфур во форма на SO₂ гас.

4.2.1. Технички опис на инсталацијата за експериментално истражување

Инсталацијата за експериментално истражување се состоеше од една инсталација за подготовка на отпадот до посакувана форма спремна за анализа, како и друга инсталација за испитување на параметрите на отпадот во чиишто состав влегуваа различни мерни инструменти. Опремата за третман и подготовка на отпадот пред негово испитување се наоѓаше во термичката станица за третман на отпад (Ekospalarnia) во Краков. Додека, еден дел од лабораториските инструменти кои беа применети за карактеризација на отпадот се наоѓаа во Полската Академија на Науки, а другиот дел на Академијата за рударство и металургија, двете со седиште во Краков. Опремата која ја користевме во Полската Академија на Науки беше дел од Институтот за механика на карпи, а таа од Академијата за рударство и металургија припаѓаше на Факултетот за инженерство на метали и индустриски компјутерски науки.

Првата инсталација за претходна подготовка на отпадот се состоеше од постројка за мерење, транспортирање и мелење на отпадот до големина на парчињата од 30 mm. Во нејзин состав влегуваа вага во форма на платформа Radwag C315, транспортна лента и мелница Testchem модел LKW-2. Понатаму, дел од инсталацијата беа уште неколку посебни елементи, една дробилка за ситнење на отпадот до големина на парчињата до 10 mm, Testchem модел LMN-240, печка за сушење на отпадот и уште една дробилка за ситнење на отпадот до големина од 2 mm, Testchem модел LMN-100.

Втората инсталација која беше дел од Полската Академија на Науки се состоеше од повеќе лабораториски инструменти кои беа одделно поставени и вклучуваше: гасен пикнометар Micromeritics Accu Pyc II 1340, компресионен апарат Frowag 2.924, сушилица Zalmed SML 32/250, печка Neoterm NT 1313 и pH метар Elmetron CP-411.

Останатиот дел од втората инсталација за одредување на карактеристиките на отпадот која беше дел од Академијата за рударство и металургија се состоеше од: LECO анализатор од моделот Truspec CHN 628, LECO AC500 калориметриската бомба и LECO анализаторот од моделот S832.

4.2.2. Опис и карактеристики на мерната опрема

Во рамките на експерименталното истражување е користена специјализирана лабораториска опрема дизајнирана за точно и доверливо определување на физичките и хемиските параметри на градскиот цврст отпад. Опремата е избрана врз основа на усогласеност со релевантните стандарди и методологии, со цел да се обезбеди прецизност, повторливост и сигурност на добиените резултати. Вклучува инструменти за мерење на густина, водопропустливост, содржина на испарливи материи, влага, pH вредност, како и елементарен состав на отпадот (јаглерод, водород, азот, сулфур) и неговата топлинска моќ. Деталните технички карактеристики и принципите на работа на секој инструмент се дадени во соодветните подточки подолу.

Опис и карактеристики на мерната опрема за определување густина

Гасен пикнометар. Густината на примерокот од комуналниот отпад беше одредена со употреба на гасен пикнометар, конкретно AccuPyc II 1340 од Micromeritics, претставен на Слика 4.1.



Слика 4.1. Гасен пикнометар Micromeritics AccuPyc II 1340



Слика 4.2. Три големини на челични контејнери

Користениот гас за анализа беше хелиум, конкретно боцата Helium 5.0 снабдена од Linde Gaz Polska, класифициран со UN број 1046 кој се однесува на потрошен материјал за заварување – гасови за заварување со фузија и сродни процеси. За спроведување на тестот за прецизност, стандардна топка наречена уште прецизна топка, се става во комора за примерок (челичен контејнер). Комплетот на овој инструмент вклучуваше три големини на челични контејнери со волумени 1, 10 и 100 cm³ (Слика 4.2.) и три стандардни топчиња: број 644 со волумен 3,186135 cm³, број 489 со волумен 16,756766 cm³ и број 227 со волумен 51,085527 cm³. Техничките карактеристики на инструментот се дадени во Табела 4.1 [129].

Табела 4.1. Технички карактеристики на гасниот пикнометар Micromeritics AccuPyc II 1340

Карактеристика	Спецификација
Технологија	Гасно поместување – мери вистинска густина на цврсти материјали користејќи инертен гас (хелиум)
Точност	$\pm 0,03\%$ од читачот, плус $\pm 0,03\%$ од номиналниот капацитет на примерокот
Прецизност	Типично $\pm 0,01\%$ од граничниот волумен; гарантирана до $\pm 0,02\%$ за чист, термички изедначен примерок користејќи хелиум во температурен опсег 15–35°C
Работна температура	Од +15°C до +35°C
Работна влажност	20–80% (да не дојде до кондензација)
Напојување	90–264 VAC, 50–60 Hz, 30 VA
Димензии	Висина: 17,9 cm; Ширина: 22,2 cm; Длабочина: 36,2 cm
Тежина	7,9 kg
Комора за примерок	1 cm ³ (Ø 1,15 × 1,1 cm), 10 cm ³ (Ø 1,8 × 3,93 cm), 100 cm ³ (Ø 4,62 × 6,17 cm)
Гасови	Препорачлив: хелиум (истражувачки квалитет); алтернативно може да се користат аргон, азот, или сув воздух; достапна е мулти-гас конфигурација
Интерфејси	Контролен модул со тастатура/екран; USB (за принтер, тастатура); Ethernet / MIC мрежа; RS-232 за баланс
CPU / SW барања	Не е потребен компјутер; но ако се користи со Windows: Pentium ≥ 333 MHz, ≥ 128 MB RAM, ≥ 1 GB диск, монитор 1024 × 768; Windows XP/2000+

Големината на избраниот контерјнер беше со волумен од 100 cm^3 , а во случај на потреба за користење стандардно топче се земаше тоа со најголем волумен од околу 51 cm^3 . Отворот во кој се поставува контејнерот е прикажан на Слика 4.3, додека капакот со кој се затвора истиот е даден на Слика 4.4.



Слика 4.3. Отвор за челичен контејнер



Слика 4.4. Капак на челичен контејнер

Аналитичка вага. Axis ALN 120G е аналитичка вага дизајнирана за високопрецизно мерење во лабораториски услови и е претставена на Слика 4.5.



Слика 4.5. Аналитичка вага Axis ALN 120G

Нуди максимален капацитет од 120 грама со точност на отчитување од $0,1\text{ mg}$, што ја прави погодна за апликации кои бараат прецизно мерење. Опремена е со RS232C, USB-B и PS2 интерфејси за поврзување со печатачи, компјутери, печатачи за етикети или читачи на баркодери. Достапни се опции за поврзување со локална или wi-fi конекција. Се одликува со автоматска внатрешна калибрација за да се обезбеди постојана точност со текот на времето. Има голем графички дисплеј за јасни и лесно читливи мерења, како и голем капак/заштита од провев за да се минимизира влијанието на воздушните струења врз мерењата. Од дополнителни карактеристики вклучени се функции за процентуално мерење, броење парчиња и мерење на густина. Сите технички карактеристики се претставени во Табела 4.2 [130].

Табела 4.2. Технички карактеристики на аналитичката вага Axis ALN 120G

Карактеристика	Спецификација
Капацитет	120 g (максимален)
Минимално мерлива маса	10 mg
Единица на мерење	0,1 mg (0,0001 g)
Грешка при верификација	1 mg
Класа на прецизност	I класа (OIML E2)
Повторливост / линеарност	$\leq 0,1 \text{ mg} / \pm 0,2 \text{ mg}$
Работна температура	Од +18°C до +35°C
Време на мерење	< 5 s
Формулација на единици	mg, g, ct, lb, oz, ozt, gr, dwt
Димензии	Висина: 215 mm; Ширина: 345 mm; Длабочина: 350 mm (вклучувајќи ногарки: 235 × 345 × 350 mm)
Дијаметар на плоча	Ø 90 mm
Електрично снабдување	AC 230 V 50 Hz 6 VA / DC 12 V 1.2 A
Тежина	6,5 kg
Калибрација	Внатрешна калибрација
Интерфејси	RS-232C, USB-B, PS/2; опции: LAN или Wi-Fi, часовник

Опис и карактеристики на мерната опрема за определување пропустливост на вода

Проктор апарат. Тестот за компактирање на отпадот беше спроведен со проктор апарат составен од два дела: цилиндричен тест капал и компактор.

Цилиндричниот тест калап беше составен од отстранлива челична основа/ плоча во која се поставуваше и прицврстуваше челичен цилиндар составен од два дела (два полуцилиндри) со мазна завршница на внатрешната страна. Дијаметарот на калапот (на дводелниот цилиндар) беше 100 mm, висината изнесуваше 120 mm, а дебелината на сидот 7,5 mm. Дебелината на долната плоча (основа) изнесуваше 11 mm, со целосен волумен од 7.850 mm³. Наведените технички параметри се претставени во Табела 4.3.

Табела 4.3. Технички карактеристики на цилиндричен тест калап

Карактеристика	Спецификација
Тип	Дводелен челичен цилиндар (два полуцилиндри)
Внатрешен дијаметар	100 mm
Висина	120 mm
Дебелина на сидот	7,5 mm
Основна плоча (дебелина)	11 mm
Материјал	Челик
Внатрешна површина	Мазна
Обемен капацитет на калапот	7.850 mm ³

Компакторот се состоеше од чекан кој беше оставен слободно да паѓа од висина на точно определен дел од горната површина на смесата од отпад поставена во калапот. Масата на чеканот изнесуваше 2,50 kg со дијаметар на дното од 50,0 mm. Висината на падот изнесуваше 305 mm, а бројот на удари на еден одреден дел (слој) од смесата беше 25. Овие податоци се наведени во Табела 4.4.

Табела 4.4. Технички карактеристики на чекан

Карактеристика	Спецификација
Маса на чеканот	2,50 kg
Дијаметар на дното	50,0 mm
Висина на падот	305 mm
Број на удари по слој	25 удари
Начин на дејство	Слободен пад на чеканот врз површината на смесата

Цилиндарот во кој се формира компактираната смеса е даден на Слика 4.6, додека чеканот е претставен на Слика 4.7.



Слика 4.6. Елементи на компакторот – цилиндар



Слика 4.7. Елементи на компакторот – чекан

Опрема за определување пропустливост на вода. Опремата од типот Frowag 2.924 е претставена на Слика 4.8, додека елементите се дадени на Слика 4.29 [7]. Триаксијалниот апарат за компресија со работен притисок од 2,5 бари се состоеше од резервоар кој го снабдува системот со вода, комора за притисок во која се става примерокот, извор на вода, две бирети и манометри кои овозможуваат подесување на хидростатичкиот притисок и регулација на притисокот на течноста на влезот и излезот од примерокот.



Опис и карактеристики на мерната опрема за определување содржина на испарливи материи и присуство на пепел

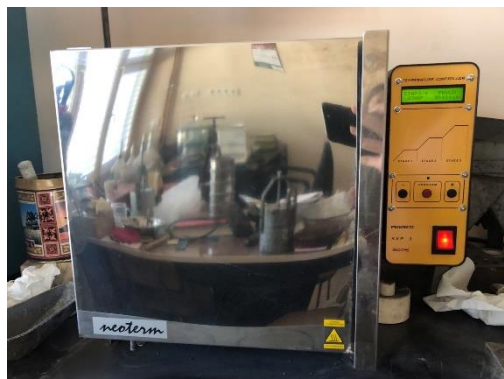
Печка. Присуството на испарливи материи и содржината на пепел беа испитани со помош на печка од типот на Neoterm NT 1313 со волумен на грејна комора од 4,5 dm³ и максимална температура на загревање до 1.100°C со димензии на комората: ширина 150 mm, висина 140 mm и длабочина 210 mm. Истата е произведена од компанија со седиште во Вроцлав, Полска. Таа вообичаено се користи за високо-температурни третмани, како калцинација и термичка декомпозиција (распаѓање), за различни научни и индустриски апликации, вклучително во науката за материјали, хемијата и инженерството за животна средина. Таа има робусна конструкција со висококвалитетна изолација за да се обезбеди температурна стабилност и енергетска ефикасност. Печката е претставена на Слика 4.9, додека техничките карактеристики се дадени во Табела 4.5 [131].

Табела 4.5. Технички карактеристики на печка Neoterm NT 1313

Карактеристика	Спецификација
Тип	Лабораториска муфелна печка
Терморегулатор	KXP3 (програмабилен, микропроцесорски)
Максимална температура	1.100°C
Капацитет на комората	4,5 dm ³
Внатрешни димензии	Ширина: 150 mm; Висина: 140 mm; Длабочина: 210 mm
Надворешни димензии	Ширина: 390 mm; Висина: 325 mm; Длабочина: 335 mm
Маса	16,5 kg
Мокност	1.400 W
Напон / Фреквенција	230 V / 50 Hz
Изолација	Влакнести материјали отпорни на високи температури
Обвивка	Нерѓосувачки челик
Термопар	Пламенски, NiCr-NiAl

Температурен контролер. Температурниот контролер кој се користеше за одржување на саканата температура со контролирање на грејните елементи беше Neoterm Progress KXP 3. Тоа е програмабилен контролер на температура базиран на микропроцесор дизајниран за прецизно термичко управување во лабораториски печки. Се одликува со алфанумерички екран со позадинско осветлување и звучни аларми за зголемена интеракција и безбедност на корисникот. Опсегот на подесување на температурата е 50°C – 1.100°C, што го прави погоден за широк спектар на термички процеси. Стапката на загревање е програмабилна од 1°C/мин до 20°C/мин, што нуди флексибилност за различни термички третмани. Времето на одржување на температурата може да се прилагоди од 0 минути до 9 часа и 59 минути, обезбедувајќи прецизна контрола на термичката изложеност. Точноста на температурата е во рамките на $\pm 0,5\% \pm 1$ единица, обезбедувајќи сигурна контрола на температурата, додека точноста на времето има основна грешка од ± 1 минута за доследно времетраење на процесот.

Потрошувачката на енергија е приближно 5 VA, што придонесува за енергетска ефикасност. Наведената спецификација е претставена во Табела 4.6 [131].



Слика 4.9. Печка Neoterm NT 1313

Табела 4.6. Технички карактеристики на температурен контролер Neoterm Progress KXP 3

Карактеристика	Спецификација
Тип	Микропроцесорен програмабилен терморегулатор со алфанумерички дисплеј и звучен сигнал
Опции на програми	Програми со 1 до 5 температурни етапи, со зададена брзина на загревање и време на задржување
Време на одржување на температура	Време од 0 минути до 9 часа 59 минути
Температурен опсег	Од +50°C до +1.100°C
Програмирана брзина на загревање	Од 1 до 20°C/мин
Точност на температура	Грешка во основните покажувања: 0,5% ± 1 единица
Време на основна грешка во мерење на време	±1 минута
Потрошувачка на енергија без оптоварување	5 VA
Дополнителни функции	Звучен сигнал, одложено вклучување на печката

Сад со капак. За внесување на отпадот и мерење на испарливите материи се користеше сад со капак со цилиндрична форма изработен од силициум диоксид. Масата на садот беше 15,18 g, а димензиите беа: висина 38 mm, надворешен дијаметар 25 mm, внатрешен дијаметар 22 mm и дебелина на сидот 1,5 mm. Садот е претставен на Слика 4.10.

Аналитичка вага. За мерење на тежината на примероците беше користена аналитичка вага AJ-3200CE VIBRA која е претставена на Слика 4.11.



Слика 4.10. Цилиндричен сад со капак



Слика 4.11. Аналитичка вага AJ-3200CE VIBRA

Максималното оптоварување е 3,2 kg, има прецизност на отчитување до 0,01 g, работна температура 10°C – 30°C и димензии на садот 180 x 160 mm. Серијата AJ обезбедува четири начини на мерење: едноставно мерење на тежината, броење делови, процентуално мерење и каратно мерење (carat measurement), што ги олеснува различните потреби за мерење. Опремена е со LCD дисплеј со позадинско осветлување што обезбедува јасна видливост на мерењата, дури и во услови на слаба осветленост. Интерфејсот RS232C е вклучен како стандардна карактеристика, што овозможува поврзување со надворешни уреди како што се компјутери или печатачи за пренос и анализа на податоци. Вагата овозможува надворешна калибрација, што обезбедува точни мерења. Уредот има димензии 265×192×87 mm и тежи приближно 2,8 kg, што го прави компактен и погоден за различни лабораториски поставувања (подесувања). Вагата работи на наизменична струја, со опционална батерија на полнење за пренослива употреба. Техничкиот опис со наведените податоци е даден во Табела 4.7 [132].

Табела 4.7. Технички карактеристики на аналитичка вага AJ-3200CE VIBRA

Карактеристика	Спецификација
Максимален капацитет	3.200 g (максимален)
Минимален капацитет	0,5 g (минимална)
Чувствителност	0,01 g
Време на стабилизација	2,5 секунди
Клас на точност	Висока (II) по OIML R 76-1:2011
Калибрација	Внатрешна (самокалибрација)
Дисплеј	LCD со позадинско осветлување
Големина на платформа	180 × 160 mm
Интерфејс	RS-232C
Димензии	Ширина: 265 mm; Длабочина: 192 mm; Висина: 87 mm
Тежина на уредот	2,8 kg
Напојување	АС адаптер (12V DC) / опција за батерија
Работна температура	Од +10°C до +30°C

Опис и карактеристики на мерната опрема за определување содржина на влага

Сушилница. Содржината на влага во примерокот беше одредена со употреба на лабораториска машина за сушење (сушилница) од производителот Zalmed SML 32/250

со максимална температура на загревање до 250°C, моќност од 1.000 W и висина 60 cm, која е претставена на Слика 4.12.



Слика 4.12. Сушилница Zalmed SML 32/250

Оваа сушилница е дизајнирана за ефикасно сушење на различни материјали во лабораториски услови. Има комора за сушење со капацитет од 32 литри, обезбедувајќи сместување на различни големини на примероци. Опремена е со висококвалитетни грејни елементи за да обезбеди рамномерна распределба на температурата низ комората. Располага со контролна табла која е прифатлива за корисникот за поставување и следење на температурата и времето на сушење. Вклучува заштита од прекумерна температура и функција за автоматско исклучување за да се спречи прегревање. Конструирана со издржливи материјали за да ги издржи напорите при лабораториска употреба. Техничките карактеристики на сушилницата се претставени во [133].

Табела 4.8. Технички карактеристики на сушилница Zalmed SML 32/250

Карактеристика	Спецификација
Модел	Zalmed SML 32/250
Тип	Лабораториска сушилница (термичка сушилница)
Капацитет на комора	32 l
Температурен опсег	Од +40°C до +250°C
Точност на контрола на температура	±1°C
Температурна стабилност	±2°C
Внатрешни димензии	Ширина: 320 mm; Длабочина: 320 mm; Висина: 320 mm
Надворешни димензии	Ширина: 520 mm; Длабочина: 480 mm; Висина: 520 mm
Напојување	230 V, 50/60 Hz
Моќност	Околу 1,2 kW
Регулатор на температура	Микропроцесорен контролер со дигитален дисплеј
Вентилатор	Внатрешен вентилатор за циркулација на воздух
Материјал на комора	Нерѓосувачки челик

Безбедносни функции	Прекумерна заштита од прегревање
Опции	Тајмер, автоматско исклучување, аларм
Тежина	Околу 25-30 kg

Дополнително, за мерење и сушење на примероците од отпад се користеше плиток сад, изработен од метал отпорен на корозија кој е претставен на Слика 4.13.



Слика 4.13. Сад користен за мерење и сушење на примероците

Опис и карактеристики на мерната опрема за определување pH вредност

pH метар. Вредноста на pH беше измерена со помош на pH метар од марката Elmetron CP-411 кој содржеше електрода од типот ERH-11S со мерен распон $0 \div 14$ pH и ранг на температура $0 \div 60^\circ\text{C}$. Техничките параметри на pH метарот и електродата се дадени во Табела 4.9 и Табела 4.10 [134, 135].

Табела 4.9. Технички карактеристики на pH метар Elmetron CP-411

Карактеристика	Спецификација
Мерна функција	pH, ORP (редокс/mV), температура
Опсег на pH	0,00 – 14,00 pH, резолуција 0,01 pH, точност $\pm 0,01$ pH
Температурен опсег	Од $-50,0^\circ\text{C}$ до $+199,9^\circ\text{C}$, резолуција $0,1^\circ\text{C}$, точност $\pm 0,1^\circ\text{C}$
Температурна компензација	Автоматска (со Pt-1000 сензор); опционално и рачна
Калибрација	Автоматска, 1–3 точки
Хидроизолација	IP-66 – заштита од прашина и силна струја на вода
Внатрешна меморија	До 50 мерења
Електронски читлив LCD дисплеј	Големина 55×45 mm
Извор на напојување	9 V батерија (тип 6F22) или 12 V/100 mA адаптер
Потрошувачка на енергија	Околу 27 mW
Работна температура	Од -5°C до $+45^\circ\text{C}$
Димензии	Висина: 149 mm; Ширина: 82 mm; Длабочина: 22 mm
Тежина	210 g (220 g со опрема)
Време на работа	Околу 700 часа на една батерија

pH метарот е водоотпорен и дизајниран за мерење на pH, редокс потенцијал (mV) и температура, со димензии 149 mm (должина) x 82 mm (ширина) x 22 mm (висина) и тежина од 210 g. Има голем LCD екран, лесен за читање кој истовремено ги прикажува

мерните функции и температурата. Поддржува калибрација од 1 до 3 точки со автоматско препознавање на бафер за рН вредности од 4,00, 7,00 и 9,00. Има автоматска компензација за да обезбеди точни отчитувања на различни температури. Работи на батерија од 9 V или опционален адаптер за напојување од 12 V/100 mA, погоден и за теренска и за лабораториска употреба. Складира до 50 резултати од мерењето за лесно отповикување. Го зачувува животниот век на батеријата со исклучување на уредот по периоди на неактивност. рН метарот е даден на Слика 4.14.



Слика 4.14. рН метар Elmetron CP-411

Табела 4.10. Технички карактеристики на електрода ERH-11S

Карактеристика	Спецификација
Тип	Комбинирана рН електрода со стаклена мембрана
Опсег на мерење рН	0 – 14 рН
Опсег на температура	0 – 60°C (80°C за краткотрајна употреба)
Резистенција на мембрана	100 – 200 MΩ при 20°C
Резистенција на дијафрагма	< 5 kΩ
Нулта точка (потенцијал при рН 7)	0 ± 30 mV
Референтен електроден систем	Ag/AgCl со 3 M KCl (гел)
Димензии на телото	Дијаметар Ø12 mm; должина 120 ± 5 mm
Дијапазон на пенетрација	Минимален: 30 mm; Максимален: 105 mm
Кабел и конектор	Околу 1 m кабел со BNC-50 конектор
Намена	За „тешки“ примероци: дестилирана/котловска вода, емулзии (>5%), козметика, храна, раствори со висока соленост, сл.

Опис и карактеристики на мерната опрема за определување содржина на јаглерод, водород и азот

Анализатор за С, Н и N.
Содржината на јаглерод, водород и азот беше одредена со примена на инструментот LECO анализатор од моделот Truspec CHN 628 даден на Слика 4.15. Серијата LECO CHN628 е дизајнирана за брзо и прецизно одредување на содржината на јаглерод, водород и азот во различни органски материјали, вклучувајќи храна и горива.



Слика 4.15. LECO Truspec CHN 628 анализатор на јаглерод, водород и азот

Оваа серија нуди флексибилни конфигурации за задоволување на различни аналитички потреби. Методот на детекција на јаглерод и водород користи не-дисперзивни инфрацрвени детектори за апсорпција за прецизно мерење, додека за азот содржи ќелија за топлинска спроводливост за негова прецизна квантификација. Инструментот е компатибилен и со хелиум и со аргон како носечки гасови, обезбедувајќи флексибилност врз основа на лабораториските преференции и достапноста на ресурсите. Способен за анализа на приближно 4 примероци на час, зголемувајќи ја лабораториската ефикасност. Сместува маси на примероци до 3 грама, што овозможува широк опсег на типови и големини на примероци. Степенот на детекција на јаглерод е од 0,02 mg до 175 mg, водород 0,1 mg до 12 mg и азот 0,02 mg до 100 mg, со време на анализа од околу 4,5 минути по примерок, што го олеснува брзото стекнување податоци. Печката работи на температури до 1.100°C, обезбедувајќи целосно согорување на примероците. Прецизноста на детекција на јаглерод и водород е 0,5%, а за азот е 0,5% релативна стандардна девијација. Димензиите на уредот се 79 cm во висина, 69 cm во ширина и 71 cm во длабочина, а тежината изнесува околу 107 kg. Детална техничка спецификација за инструментот е приложена во Табела 4.11 [136]. Тој е дизајниран да обезбеди сигурна и ефикасна елементарна анализа, што го прави вредна алатка за лаборатории фокусирани на карактеризација на органски материјали.

Табела 4.11. Технички карактеристики на LECO анализатор Truspec CHN 628

Карактеристика	Спецификација
Метод на анализа	Целосно согорување во чист кислород; CO ₂ /H ₂ O преку инфрацрвено зрачење, N ₂ преку топлинска спроводливост
Време на анализа	5 минути
Маса на примерок	до 250 mg
Ранг на детекција	C: од 0,02 до 175 mg H: од 0,1 до 12 mg N: од 0,02 до 100 mg
Прецизност	C: ±0,01 mg или 0,5% RSD H: ±0,05 mg или 1% RSD N: ±0,02 mg или 0,5% RSD
Печка	Резистивна, вертикална; до 1.050°C
Гас	Хелиум, чистота 99,99% при 2,4 bar ±10%

Автоматски полнач	30 позиции, проширување до 120 позиции
Детектори	NDIR IR за CO ₂ & H ₂ O; TC за N ₂
Работни услови	Работна температура: од +15°C до +30°C; влажност: 20°C до 80°C (без да дојде до кондензација)
Електрично напојување	230 VAC, 50/60 Hz, ~12 A (~14 k BTU/hr)
Бучава	≤52 dBA
Димензии	Висина: 81 cm; Ширина: 70 cm; Длабочина: 76 cm
Тежина	124 kg

Опис и карактеристики на мерната опрема за определување содржина на сулфур

Анализатор за S. За лабораториско испитување на сулфур во примерокот од иситнет цврст отпад применет беше LECO анализаторот од моделот S832, даден на Слика 4.16. Тој е специјализиран анализатор на согорување дизајниран за прецизно одредување на содржината на сулфур во различни органски материјали, вклучувајќи јаглен, кокс, цемент, почва и мазут.



Слика 4.16. LECO S832 анализатор на сулфур

Овој инструмент користи високотемпературно согорување проследено со недисперзивна инфрацрвена детекција за прецизно мерење на концентрациите на сулфур. Тој е опремен со високоефикасна печка за согорување способна да достигне до 1.450°C. Интелигентниот систем за контрола ги оптимизира перформансите на печката, ја зголемува доверливоста и го продолжува животниот век на грејните елементи и керамиката. Опсегот на мерење на концентрациите на сулфур од ниски до високи нивоа, во зависност од конфигурацијата на конкретниот модел. Стапката на детекција на сулфур е 0,008 mg до 30 mg и време на анализа од 60 до 120 секунди. Наведените технички карактеристики се прикажани во [137].

Табела 4.12. Технички карактеристики на LECO анализатор S832

Карактеристика	Спецификација
Функција	Детектира сулфур (S) преку NDIR (не-распрскувачка IR детекција)
Метод на анализа	Макро согорување во чист кислород во хоризонтална керамичка фурна
Ранг на детекција	од 0,008 mg до 30 mg
Прецизност	±0,004 mg или 1% RSD, во зависност од тоа што е повисоко
Маса на примерок	од 0,25 g до 0,50 g
Време на анализа	од 60 s до 120 s (номинално)

Печка (температура)	од 800°C до 1.450°C ($\pm 10^\circ\text{C}$)
Гасови	Кислород, чистота 99,5%, при 1 bar $\pm 10\%$
Детектор	NDIR
Димензии (HxWxD)	Висина: 80 cm; Ширина: 46 cm; Длабочина: 79 cm
Електрични параметри	230 VAC, 50/60 Hz, ≤ 12 A при работа; 4 A во мирување
Бучава	≤ 57 dBA (според IEC/EN 61010-1)
Работни услови	Температура: од $+15^\circ\text{C}$ до $+35^\circ\text{C}$; Релативна влажност $\leq 80\%$
Тежина	~ 78 kg (без монитор); ~ 88 kg со монитор

Опис и карактеристики на мерната опрема за определување топлинска моќ

Калориметриска бомба. Топлинска моќ на иситнетиот цврст отпад беше определена со помош на LECO AC500 калориметриската бомба дадена на Слика 4.17. Калориметарот е инструмент дизајниран да ја одредува калориската вредност на цврстите и течните горива со мерење на топлината што се ослободува при согорувањето на примерокот.



Слика 4.17. LECO AC500 калориметриска бомба [138]

Калориметарот се одликува со висока прецизност и обезбедува конзистентни резултати во различни големини на примероци и амбиентални услови. Обезбедува повеќе режими за да одговараат на специфичните аналитички барања. Еден режим е Regnault-Pfaundler со приближно 20 минути по анализа, другиот е режим на прецизност со приближно 8 минути по анализа и третиот е предвидувачки, помеѓу 4,5 до 7,5 минути по анализа. Калориметарот има мониторинг на температурата преку електронски термометар прецизен до $0,0001^\circ\text{C}$, кој ја мери температурата на секои шест секунди. Системот постојано ги следи температурите и во надворешната обвивка и во калориметарот, овозможувајќи двоканална корекција за зголемена точност. Користи софтвер базиран на Windows за управување со податоци, генерирање извештаи и компатибилност со лабораторискиот систем за управување со информации. Софтверот може да контролира до четири одделни калориметри од еден компјутер. Димензиите на уредот се 81,3 cm во ширина, 78,8 cm длабочина и 66 cm висина и се дадени во Табела 4.13 заедно со другите технички карактеристики [138].

Табела 4.13. Технички карактеристики на LECO AC500

Карактеристика	Спецификација
Метод	Isoperibol согорување во кислородна бомба во внатрешна комора
Опсег на енергија по примерок	Од 14.000 J/примерок до 35.000 J/примерок
Прецизност	$\leq 0,05\%$ RSD
Резолуција	0,001 MJ/kg
Време на анализа	Regnault-Pfaundler: 20 min; Precision: 8 min; Predictive: 4,5–7,5 min
Резолуција на мерење на температурата	0,0001°C
Гас	Кислород до 31 bar, чистота $\geq 99,5\%$
Напојување	115/230 VAC $\pm 10\%$, 50/60 Hz; 3,2 A при 115 V или 1,6 A при 230 V
Потрошувачка на енергија	$\sim 0,4$ kW
Вода	Дестилирана вода (~ 16 L); pH 6–8, 0,5–100 ppm растворени материи
Димензии (без монитор)	Ширина: 81,3 cm; Длабочина 78,8 cm; Висина 66 cm
Бучава	≤ 50 dBA
Работни услови	Температура: од +15°C до +35°C; релативна влажност: 20–80% (без да дојде до кондензација)

4.3.Реализација на експериментално истражување

Експерименталното истражување опфати различни лабораторски анализи на отпадот од градот Скопје и градот Краков, со цел утврдување на потенцијалот за негово користење како гориво во процесот на инсенерација и добивање електрична и топлинска енергија. На двата примерока (од Скопје – МасМ и од Краков – Р1) испитани беа сите параметри (освен густината која беше испитана само на МасМ), како пропустливост на вода, рН вредност и влага, како и содржина на испарливи соединенија, присуство на минерална маса, содржина на јаглерод, водород, азот и сулфур, како и топлинска моќ. Коефициентот на водопропустливост беше анализиран на една фракција од двата примерока МасМ30 и Р130, односно отпад со големина на парчињата до 30 mm. Останатите параметри беа испитани на помалата фракција од двата примерока МасМ2 и Р12, со големина на честичките до 2 mm. Додека, густината беше анализирана само на еден примерок (МасМ30 и МасМ2). Процесот на реализација на експерименталното истражување започна со подготовка на отпадот за анализа, а потоа со испитување на неговите параметри. Постапките се опишани во текстот подолу.

4.3.1. Подготовка на отпадот за анализа

Земањето примероци од отпадот беше спроведено согласно Стандардот CEN/TR 15310-1 Карактеризација на отпад — Земање на примероци од отпадни материјали, Дел 1: Насоки за избор и примена на критериуми за земање примероци во различни услови [139]. Беше применета стратегијата за „компонентно земање примероци“, имајќи предвид дека таа вклучува земање повеќе подпримероци кои се комбинираат за да се добие репрезентативен примерок. Комуналниот цврст отпад потекнуваше од единствената легална депонија во државата, депонијата Дрисла, лоцирана во југоисточниот дел на градот, на оддалеченост од 14 km од центарот на Скопје. Земениот отпад беше спакуван во три полиетиленски вреќи со волумен од 100 L. Приближната тежина изнесуваше 90 kg. Временскиот период од денот на узоркување до денот на анализа беше 5 до 10 дена.

Фракциите и нивното процентуално учество во составот на комуналниот цврст отпад се дадени во Табела 4.14 [29].

Табела 4.14. Процентуално учество на отпадни фракции во комуналниот цврст отпад во градот Скопје [29]

Тип/фракција	Тони	Проценти
Хартија	10.914	1,76%
Стакло	3.397	0,55%
Пластика	14.532	2,34%
Метал (железо, челик, алуминиум)	2.203	0,35%
Органски отпад (храна, лисја и сл.)	39.690	6,38%
Текстил	6.695	1,08%
Гума	1.301	0,21%
Измешан комунален отпад	531.033	85,42%
Останато	11.920	1,92%

Најзастапен е измешаниот комунален отпад со 85,42%, а по него следи органскиот отпад со 6,38%. Типови отпадни материи со највисока содржина на топлинска енергија се пластиката и гумата, по што следат текстилните материјали и хартијата, по нив се органските отпадоци и измешаниот комунален отпад. Најмала топлинска моќ имаат стаклото и металот кои претставуваат инертни материјали. Тие отпадоци не може да се искористат за добивање енергија, бидејќи не содржат енергетска вредност. Согласно овие информации, корисен отпаден материјал од вкупниот отпад изнесува околу 97% (ако се одземе “останато” и инертниот материјал), додека неупотреблив материјал е околу 0,9%.

Пред да се спроведе процесот на карактеризација на отпадот направена беше подготовка на истиот во соодветни лабораториски услови во термичката станица за третман на отпад (Ekospalarnia) во Краков, Република Полска. Подготовката вклучуваше постапки на одвојување на инертниот материјал, намалување на големината на парчињата (ситнење) и намалување на влагата (сушење). Оваа подготовка беше направена поради тоа што за дел од анализите беше потребна големина на парчињата до 30 mm, а за останатиот дел од анализите до 2 mm. Најнапред по истурањето на отпадот од вреќите тој беше визуелно проверен. За време на визуелната проверка беа отстранети стаклото (Слика 4.18) и алуминиумот (Слика 4.19), од причина што се инертни материјали, не придонесуваат кон генерирање енергија при согорување и поради крутоста и тврдоста во процесот на мелење на отпадот.



Слика 4.18. Отстрането стакло од комуналниот цврст отпад



Слика 4.19. Отстранет алуминиум од комуналниот цврст отпад

Потоа беше пристапено кон првата фаза на намалување на големината на парчињата до фракција помала од 30 mm. Инсталацијата беше составена од вага, транспортна лента и шредер (мелница). Елементите се дадени на Слика 4.20 и Слика 4.21. Вагата беше од производителот Radwag, додека шредерот од марката Testchem модел LKW-2 [140]. Отпадот беше поставен на вагата и му беше одредена тежината која изнесуваше 27,24 kg, од кои 1,62 kg беше инертната фракција. Потоа, од вагата беше рачно префрлен на транспортната лента (преносник) преку која се внесуваше во шредерот.



Слика 4.20. Инсталација за подготовка на отпад (вага и транспортна лента)



Слика 4.21. Инсталација за подготовка на отпад (шредер)

На излез од шредерот се доби фракција на отпад со големина на парчиња до 30 mm претставена на Слика 4.22. За да се добијат уште помали димензии од парчињата отпад потребно беше истиот да се исуши со помош на муфелна печка. Печката беше од производителот Pol-eko aparatura модел SLW 240, со надворешно загревана комора чиишто сидови пренесуваат топлина до комората со радијација при што материјалот се загрева без контакт со пламенот [141].



Слика 4.22. Фракција на отпад со големина на парчиња до 30 mm

По сушењето отпадоците продолжија кон следниот степен на ситнење за да се добие фракција на парчињата до 10 mm. За тоа беше искористен шредер (дробилка) од истата марка Testchem, но моделот LMN-240, кој е претставен на Слика 4.23. Отпадоците беа внесувани рачно во конусна инка од која паѓаа кон мелницата и беа иситнети до помала фракција. По ова ситнење се пристпи кон следниот степен на третман до најмала фракција на парчињата од 2 mm. За тоа беше искористен шредер (дробилка) од марката Testchem од моделот LMN-100 кој е претставен на Слика 4.24. Состојбата на отпадот е дадена на Слика 4.25.



Слика 4.23. Шредер (дробилка) Testchem LMN-240



Слика 4.24. Шредер (дробилка) Testchem LMN-100



Слика 4.25. Фракција на отпад со големина на парчиња до 2 mm

Техничките карактеристики на трите шредери од марката Testchem се дадени во Табела 4.15 и направена е нивна споредба [142].

Табела 4.15. Технички карактеристики на користени шредери

Модел	Димензии	Тежина	Напојување	Потрошува чка на енергија	Брзина на ротација	Прелимина рна гранулација	Финална гранулација	Ефикасност
LKW-2	1.350x600x380 mm	450 kg	400 V	6 kW (2x3 kW)	/	<40 mm	околу 1 mm	макс 100 kg/h
LMN- 240	800x900x1.300 mm	280 kg	400 V	5,5 kW или 7,5 kW	700 rpm	<100 mm	зависи од ситото	околу 50- 90 kg/h

LMN-100	620x600x1.200 mm	80 kg	400 V	2,2 kW	измеѓу 700-2.815 rpm	<40 mm	зависи од ситото	околу 10 kg/h
---------	------------------	-------	-------	--------	----------------------	--------	------------------	---------------

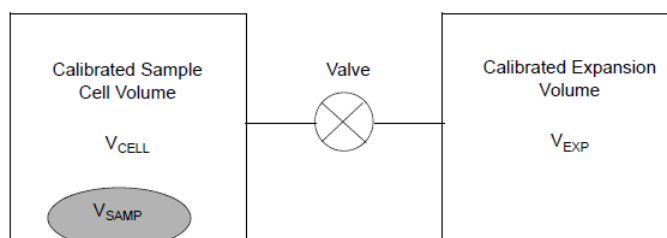
Значајно е да се наведе дека сите спроведени подготвителни постапки спроведени врз отпадот резултираа со **просушен примерок од отпадот** на кој беа работени сите понатамошни анализи со цел испитување на неговите параметри.

4.3.2. Испитување на физички параметри на отпадот

Во рамките на ова истражување, физичките параметри ја опишуваат основната структура и однесување на отпадот, а немаат директен удел во процесот на согорување, но значително влијаат врз неговата обработка, складирање, транспорт и еколошки третман. Анализирани беа параметрите: густина, која дава информации за масата по единица волумен и е значајна за пресметки поврзани со капацитетите за складирање; пропустливост на вода, која укажува на способноста на отпадот да задржува или пропушта течности; pH вредност, како показател на киселоста или алкалноста на отпадната материја, релевантна за еколошките ризици и можната корозивност; и содржината на влага, која директно влијае на ефикасноста при согорување и транспорт. Овие параметри беа определени со лабораториски техники прилагодени на природата на отпадот и согласно со стандардизирани методи.

Одредување густина

Анализата на густина беше работена на еден тип отпад МасМ на две фракции, од 2 mm и 30 mm со ознака на отпадот МасМ2 и МасМ30. Таа беше одредена со употреба на гасен пикнометар, конкретно АссуРус II 1340 од Micromeritics (претставен на Слика 4.1) со примена на Прирачникот за употреба на инструментот приложен од производителот [6]. Овој инструмент користи поместување на хелиум за мерење на волуменот на цврсти примероци со неправилна или правилна форма, пресметувајќи ја густината со мерење на промената на притисокот на хелиумот во калибрирани комори. Многу едноставен дијаграм на инструментот е прикажан на Слика 4.26 [6].



Слика 4.26. Принцип на работа на гасниот пикнометар Ассу Рус II 1340 [6]

Процесот започна со тест на прецизност кои вклучува прочистување на ќелијата и коморите за експанзија пред да започне анализата. Применета беше најголемата стандардизирана топка со волумен од $51,085527 \text{ cm}^3$. Таа беше внесена во празен челичен контејнер со волумен од 100 cm^3 со кој заедно беа внесени во комората на уредот (види Слика 4.2). Волуменот на контејнерот се одбира според потребите на анализата, односно големината на отпадот. Примерокот треба речиси да го исполнува контејнерот,

бидејќи со тоа се оптимизира прецизноста на резултатите. Бројот на прочистувања беше поставен на 10, сметајќи дека претставува доволно висока вредност за да даде задоволителни резултати во оптимално време. Поголем број на прочистувања обезбедуваат почист примерок за анализа, меѓутоа го продолжува времетраењето на анализата. Стандардниот притисок за полнење на комората за одвивање на постапката за прочистување вообичаено е 19,5 psig и се смета за соопштен за повеќето апликации. Меѓутоа, во овој случај притисокот беше подесен на 20,5 psig, што е еквивалентно на 1,4 bar, бидејќи повисоките притисоци вообичаено овозможуваат мерење на волуменот со поголема прецизност. Тестот за прецизност беше задоволен кога волумените на примерокот (стандардизираната топка) пресметани за девет (9) последователни мерења влегоа во опсегот на грешка за волуменот на примерокот на тековното тестирање. Опсегот на грешка е одреден процент од номиналниот волумен на комората за поставување на примерокот. Откако се направи тестот на прецизност и резултатите беа задоволителни, започнаа мерењата. Стандардизираната топка беше отстранета, а контејнерот за примерок беше исчистен. Отпадот беше ставен во истиот контејнер со волумен од 100 cm³ (дадена на Слика 4.2), прочистен со хелиум и подложен на 10 последователни мерења, каде што секој циклус претставува низа функции кои се еднакви на едно мерење на волуменот. Притисокот за полнење на циклусот беше исто така поставен на 20,5 psig, слично на притисокот за полнење при чистење. Густината на отпадот беше пресметана преку делење на масата на примерокот со неговиот волумен согласно Равенка 4.1 [6]. Во лабораторијата каде се изведуваше анализата се следеа атмосферските услови. Амбиенталната температура изнесуваше 20°C.

$$D_{\text{примерок}} = \frac{M_{\text{примерок}}}{V_{\text{примерок}}} \quad (4.1)$$

$D_{\text{примерок}}$ — густина на примерок [$\frac{g}{cm^3}$]

$M_{\text{примерок}}$ —

маса на примерок (се внесува рачно, примерокот се мери со помош на вага) [g]

$V_{\text{примерок}}$ — волумен на примерокот [cm³], согласно Равенката 4.2.

$$V_{\text{примерок}} = V_{\text{комора}} - V_{\text{екс}} \cdot \left(\frac{p_1}{p_2} - 1 \right) \quad (4.2)$$

$V_{\text{комора}}$ — волумен на комората за примерок (во овој случај 100 cm³) [cm³]

$V_{\text{екс}}$ — волумен на експанзиона комора [cm³]

p_1 — надпритисок по полнењето [psig]

p_2 — надпритисок по експанзијата [psig]

Одредување пропустливост на вода

За одредување на пропустливоста на вода кај градскиот отпад беше направена соодветна подготовка на отпадот. За оваа анализа одбран беше отпад со фракција до 30 mm. Иситнетиот цврст отпад MacM30 и P130 беше подложен на постапка на компактирање согласно насоките дадени во Стандардот BS EN 13286 - Неврзани и хидраулично врзани мешавини (Дел 2: Тест методи за лабораториско одредување на референтна густина и содржина на вода со проктор компактор) од Британската Институција за Стандарди (BSI) [8]. Постапката на компактирање беше спроведена со употреба на проктор апарат произведен од MULTISERW. Тој содржеше тест калап во форма на цилиндар со волумен 7.850 mm³ и компактор во вид на чекан со маса од 2,50 kg и 50,00 mm дијаметар на базата поставен на вратило. Сите наведени делови од

опремата се претставени на Слика 4.6. Висината на падот на чеканот беше 305 mm и бројот на удари изнесуваше 25. Процесот започна со формирање на металниот цилиндар (поставување на сидовите и нивно поврзување) во кој беше внесен отпад претходно помешан со вода. Оваа смеса од отпад и вода беше додавана во слоеви, при што секој слој беше удиран со чекан, се додека не беше исполнет цилиндарот до неговата висина. Добиената форма од компактиран отпад е претставена на Слика 4.27. Потоа, формираниот калап беше внесен во гумена обвивка, по што беше поставен во притисна комора која е дадена на Слика 4.28.



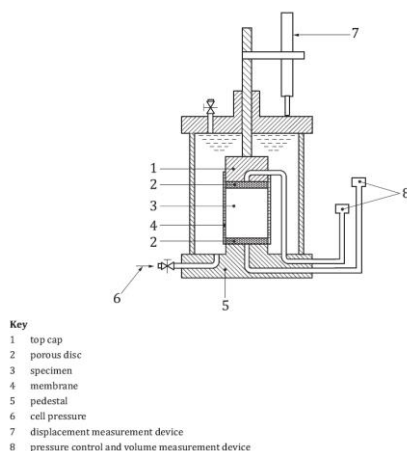
Слика 4.27. Компактиран отпад по отстранување на цилиндар



Слика 4.28. Компактиран отпад внесен во притисна комора

Притисната комора беше поврзана со апаратот Frowag typ 2.924 со користење на триаксијален систем за притисок за тестирање на водопропустливоста на примерокот. Тестот беше спроведен согласно насоките дадени во Стандардот BS EN ISO 17892-11 - Геотехнички истражувања и испитувања (Лабораториско испитување на почва, Дел 11:

Тест за пропустливост) од Британската Институција за Стандарди [7]. Опремата од типот Frowag 2.924 е претставена на Слика 4.8. Елементите на апаратот се дадени на Слика 4.29, а принципот на работа е опишан во текстот подолу.



Слика 4.29. Елементи и принцип на работа на триаксијалниот апарат за компресија [7]

Триаксијалниот апарат за компресија со работен притисок од 2,5 бари се состоеше од резервоар кој го снабдува системот со вода, комора за притисок во која се става примерокот, извор на вода, две бирети и манометри кои овозможуваат подесување на хидростатичкиот притисок и регулација на притисокот на течноста на влезот и излезот од примерокот. За време на експериментот, температурата на водата беше контролирана и беше измерена разликата во нивоата во биретите. Манометарските притисоци применети на примерокот беа 0,2 bar, 0,3 bar, 0,5 bar, 0,8 bar и 1,0 bar, што одговараше на длабочини кои се движат од 2,0387 m до 10,1937 m. Вкупниот притисок на ќелијата беше поголем од збирот на повратниот притисок и применетиот влезен притисок. Притисокот во комората беше избран да не навлезе значително низ мембраната во примерокот ниту да ја извлече водата од порите на примерокот преку мембраната во временскиот период кој беше потребен за да се изврши тестот за пропустливост. Волуменот на вода што минува низ примерокот беше измерен на градуирани цевки. Времето помеѓу мерењата на волуменот на водата беше мерено со стоперка. Во текот на процесот на подготовка беше обрнато внимание да се одржи количината на вода во примерокот.

Вредноста на коефициентот на пропустливост беше земена како аритметичка средина на резултатите од мерењето добиени за двете насоки на проток на вода низ примерокот, согласно Равенката 4.3 [7].

$$k = \frac{a_{\text{влез}} \cdot a_{\text{излез}}}{(a_{\text{влез}} + a_{\text{излез}})} \cdot \frac{l}{A \cdot \Delta t} \cdot \ln \left(\frac{\Delta h_{t1}}{\Delta h_{t2}} \right) \quad \left[\frac{m}{s} \right] \quad (4.3)$$

$A = 78,54 \text{ cm}^2$ –

површина на напречен пресек на примерок во насока на течење [cm^2]

$a_{\text{влез}}$ – површина на напречен пресек на влезна цевка [cm^2]

$a_{\text{излез}}$ – површина на напречен пресек на излезна цевка [cm^2]

Δh_{t1} – висина на вода над ниво на излез во време t_1 [cm]

Δh_{t2} – висина на вода над ниво на излез во време t_2 [cm]

$l = 10 \text{ cm}$ – растојание помеѓу мерните точки 1 и 2 во насока на проток [cm]

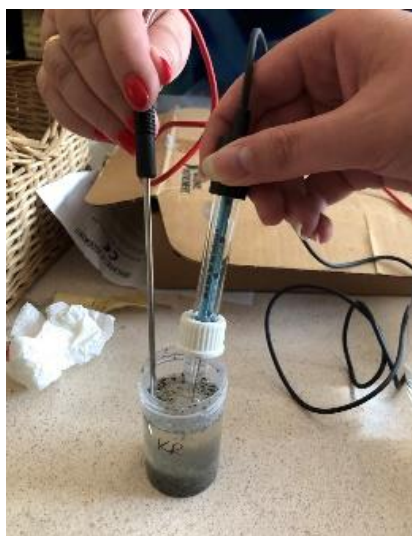
Δt – промена на време помеѓу две читања [s]

Одредување pH вредност

Вредноста на pH беше измерена со помош на pH метар од марката Elmetron CP-411 кој содржеше електрода од типот ERH-11S со мерен распон $0 \div 14$ pH и ранг на температура $0 \div 60^\circ\text{C}$. pH метарот е даден на Слика 4.14. Стандардот согласно кој се спроведе мерењето е ISO 10523 – Квалитет на вода (Одредување на pH) од Интернационалната Организација за Стандардизација (ISO) [143]. Пред анализата примерокот беше подготвен, односно иситнетиот отпад со фракција од 2 mm (MacM 2 и P12) беше внесен во пластичен сад, промешан со вода и оставен 24 часа за стабилизација. По 24 часа настана сепарација на честичките при што во средината имаше реалтивно “чиста” вода, како што може да се види на Слика 4.30. Електродата беше потопена во растворот и оставена во времетраење од 1 минута, по што беше добиена стабилна вредност на pH. Процесот на мерење на pH вредноста на отпадот е престаен на Слика 4.31.



Слика 4.30. Смеса од отпад и вода по сепарација



Слика 4.31. Процедура на мерење pH вредност

Одредување содржина на влага

Содржината на влага во примерокот беше одредена со употреба на лабораториска машина за сушење (сушилница) од производителот Zalmed SML 32/250 со максимална температура на загревање до 250°C, моќност од 1.000 W и висина 60 cm, која е претставена на Слика 4.12. Анализата беше изведена согласно насоките дадени во Стандардот ISO 687 - Цврсти минерални горива – Кокс (Определување на влага во општиот тест примерок за анализа) од Интернационалната Организација за Стандардизација [9]. Процесот започна со подесување на температурата во сушилницата на 105°C. Потоа, во сад за мерење беше додаден дел од примерокот во форма на иситнет отпад (MacM 2 и P12) и садот беше поставен во сушилница во времетраење од 24 часа. Изгледот на отпадот по сушењето е дадена на Слика 4.32.



Слика 4.32. Состојба на отпад по сушење

Вредноста за содржина на влага во анализираниот примерок беше добиена преку односот помеѓу разликата во масата на отпадот пред и по сушењето и масата на внесен отпад согласно Равенката 4.4 [9].

$$\omega_{H_2O} = \frac{M_2 - M_3}{M_2 - M_1} \cdot 100 \quad [\text{масени проценти (\%)}] \quad (4.4)$$

M_1 – маса на празен сад [g]

M_2 – маса на отпадот пред сушењето [g]

M_3 – маса на отпадот по сушењето [g]

4.3.3. Испитување на хемиски параметри на отпадот

Испитувањето на хемиските параметри имаше за цел да го дефинира составот на отпадот и да се оцени енергетскиот потенцијал, односно неговата соодветност за термичка обработка. Анализите опфатија определување на содржината на испарливи материи, кои претставуваат органски компоненти што лесно се ослободуваат при загревање и директно влијаат на запалливоста; пепелта, која укажува на количината на неорганска остатоци по согорување и е важна за проценка на постојаноста на згура и

потребите за постпроизводствен третман; како и елементарниот состав – односно содржината на јаглерод, водород и азот – кои се главните индикатори на горливост и влијание врз емисиите. Дополнително, беше испитана и содржината на сулфур, како параметар значаен за предвидување на потенцијалното загадување со SO_2 , како и топлинската моќ, која ја определува количината на енергија што може да се добие при согорување на отпадот. Сите мерења беа изведени со соодветна мерна опрема и според признати стандардизирани методи, овозможувајќи детална проценка на квалитетот на отпадот од аспект на неговата енергетска искористливост.

Одредување содржина на испарливи материи

Присуството на испарливи материи беше испитано со помош на печка од типот на Neoterm NT 1313 со волумен на грејна комора од $4,5 \text{ dm}^3$ и максимална температура на загревање до 1.100°C . Печката е претставена на Слика 4.9. Постапката беше спроведена според Стандардот ISO 562 – Цврст јаглен и кокс (Одредување на испарливи материи) од Интернационалната Организација за Стандардизација [10]. Процесот започна со внесување иситнет отпад (MacM 2 и P12) во сад со капак кој беше поставен во печката претходно загреана до температура од 900°C . Времето на задржување на садот со отпадот изнесуваше 7 минути. Потоа, садот беше изваден од печката и оставен да се стабилизира до собна температура. Вжарената состојба на садот по вадење од печката може да се види на Слика 4.33, додека согорениот отпад може да се погледне на Слика 4.34.



Слика 4.33. Загреан сад со отпад по вадење од печката



Слика 4.34. Согорен отпад во садот по вадење од печката

Содржината на испарливи материи во примерокот беше добиена согласно Равенката 4.5 [10], односно преку односот во масата на отпадот пред и по загревањето и масата на внесен отпад од кој е одземена содржината на влага која беше претходно одредена.

$$V = \frac{100(m_2 - m_3)}{m_2 - m_1} - \omega_{H_2O} \quad [\text{масени проценти (\%)}] \quad (4.5)$$

m_1 – маса на празен сад со капак [g]

m_2 – маса на садот со капак и примерокот пред загревање [g]

m_3 – маса на садот со капак и примерокот по загревањето [g]

ω_{H_2O} – содржина на влага според анализа [масени проценти (\%)]

Одредување содржина на пепел

За определување на содржината на пепел, односно органски материи во примерокот од комунален отпад (MacM 2 и Pl2), беше употребена истата печка Neoterm NT 1313 меѓутоа со примена на различна постапка, односно Стандардот ISO 1171 – Цврсти минерални горива (Одредување на пепел) од Интернационалната Организација за Стандардизација [11] и Интерното упатство со инструкции за лабораториски вежби [144]. Температурата во печката беше подесена на 800°C и во неа беше внесен сад со примерок од отпадот. Садот беше оставен во печката во времетраење од 1 час, а потоа беше изваден и оставен да се стабилизира на собна температура по што беше измерен. Постапката се повторуваше до постигнување на константна маса.

Содржината на пепел беше одредена со одземање на односот на разликата на масите пред првиот час сушење и n-тиот час и разликата на масите пред првиот час сушење и празниот сад од целината [11]. Овој исказ е претставен со Равенката 4.6.

$$A = \left(1 - \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1}\right) \cdot 100 \quad [\text{масени проценти (\%)}] \quad (4.6)$$

m_1 – маса на празен сад (без капак) [g]

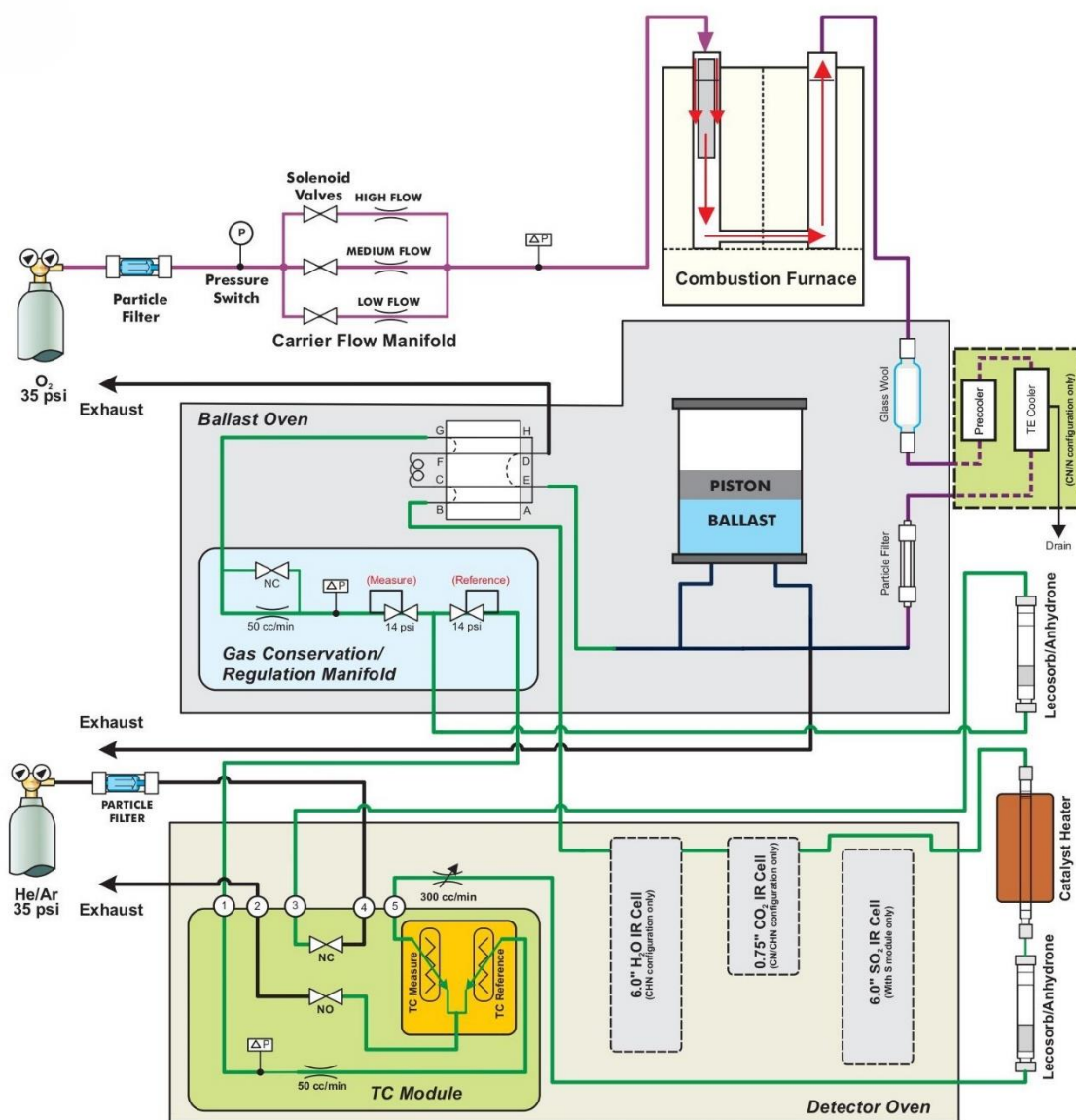
m_2 – маса на садот и примерокот пред 1виот час на загревање [g]

m_3 – маса на садот и примерокот по 1виот час на загревање [g]

m_4 – маса на садот и примерокот пред 2риот час на загревање [g]

Одредување содржина на јаглерод, водород и азот

Содржината на јаглерод, водород и азот беше одредена со примена на Стандардот ISO 16948 – Цврсти биогорива (Одредување на вкупна содржина на јаглерод, водород и азот) од Интернационалната Организација за Стандардизација [12]. За анализата користен беше инструментот LECO анализатор од моделот Truspec CHN 628 со степен на детекција на јаглерод од 0,02 mg до 175 mg, водород 0,1 mg до 12 mg и азот 0,02 mg до 100 mg, со време на анализа од околу 4,5 минути. LECO анализаторот е преставена на Слика 4.15, додека шематскиот приказ на процесот на работа е даден на Слика 4.35.



Слика 4.35. Шематски приказ на процес на работа на LECO Truspec CHN 628 [136]

Процесот започна со додавање точно измерена количина отпад (MacM 2 и P12) во сад кој се внесува во полначот на инструментот, од каде што се пренесува во комората за прочистување што се наоѓа директно над печката. Процесот на прочистување на

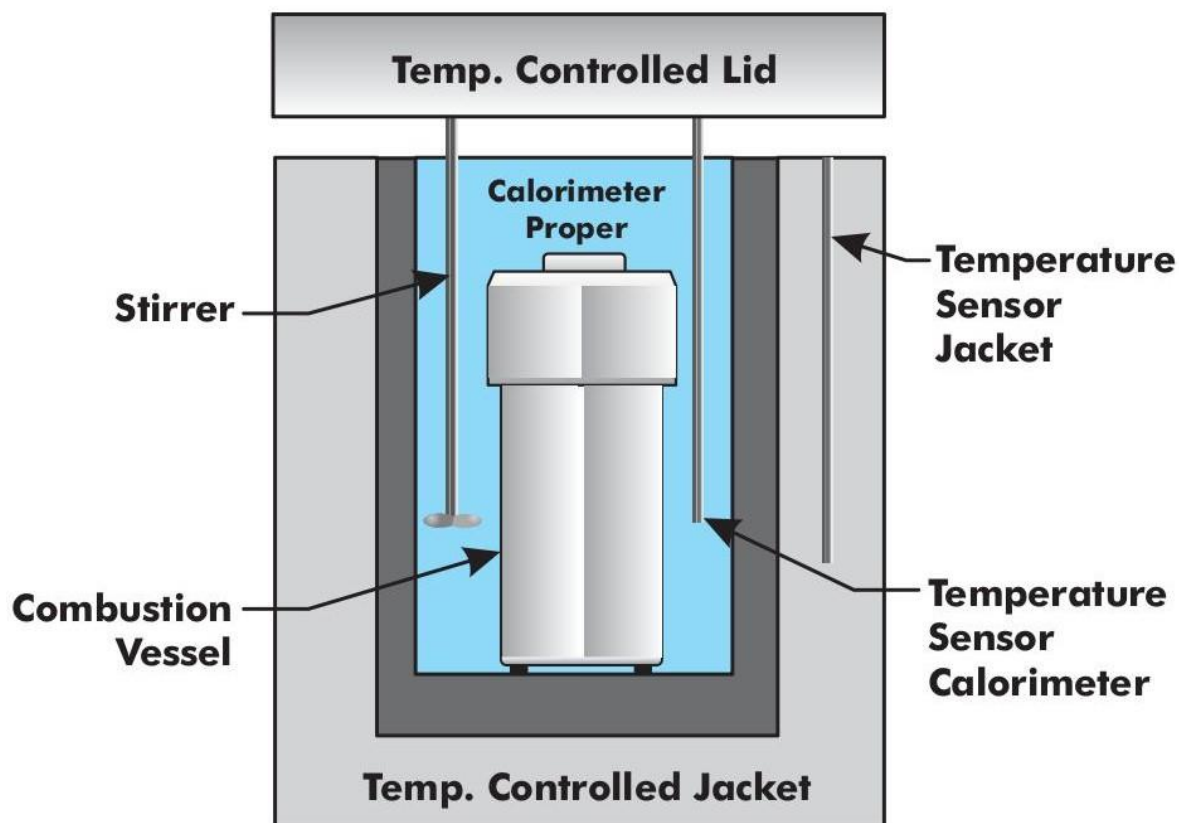
примерокот се прави со примена на кислород, со што се овозможува елиминација на атмосферските гасови при трансферот на примерокот во комората за согорување. Прочистувањето се прави за да се обезбеди влез на примерокот во печката за согорување во средина без загадувачи, со што ќе се осигура дека сите гасови кои ќе настанат при согорувањето потекнуваат само од самиот примерок, а не од нечистотиите во гасовите. Кислородот кој се користи за прочистување на примерокот поминува низ филтер за честички кој ги отстранува цврстите честички, прашината или микрозагадувачите што би можеле да дојдат од гасната боца, со што спречува тие честички да стигнат до печката за согорување или до чувствителните сензори, каде би можеле да ја загадат реакцијата или оштетат инструментот.

Потоа, примерокот се внесува во примарната печка која содржи чист кислород под притисок. Протокот на кислород се регулира со помош на соленоидни вентили кои овозможуваат динамичко прилагодување според фазата на анализата. Ова резултира со брзо и целосно согорување (оксидација) на анализираниот примерок при температура од 950°C . Притоа, органските компоненти во примерокот, јаглеродот, водородот и азотот се трансформираат во CO_2 , H_2O и NO_x и се носат со кислородниот проток низ секундарна печка, каде се дооксидираат и се прочистуваат од нецелосно согорени честички. Овие гасови минуваат низ пред-ладилник и термоелектричен ладилник каде водената пареа од нив се кондензира и се отстранува. Остатокот од гасовите се собира во сад наречен баласт во кој тие се мешаат и стабилизираат, односно се постигнува хомогена гасна смеса со изедначен притисок. Така хомогенизираните гасови се пренесуваат низ аликвотна јамка, која е мала затворена цевка или комора од која се зема точно одреден, репрезентативен волумен од смесата за анализа. Оваа репрезентативна количина превземен гас се пренесува кон детекторите со помош на носечки гас (хелиум или аргон). Со примена на носечки гас се осигурува континуирано и стабилно движење на гасовите низ системот и постигнување точно временско управување со пристигнувањето на гасовите во сензорите.

Аликвотата најпрво минува низ инфрацрвени (NDIR) ќелии кои ја детектираат концентрацијата на CO_2 и водена пареа H_2O . Овие сензори работат на принцип на апсорпција на инфрацрвена светлина на специфични бранови должини, што овозможува брза и селективна анализа на овие два гаса. По оваа почетна анализа, гасната смеса продолжува кон редукционата цевка, исполнета со метален бакар и загреана на висока температура. Во оваа фаза се врши редукција на азотните оксиди (NO_x), формирани при согорувањето, во молекуларен азот (N_2), како и отстранување на вишокот кислород кој може да го наруши мерењето. Потоа, гасната смеса минува низ две посебни хемиски филтрациони компоненти, Lecosorb и Anhydrone. Lecosorb ја апсорбира преостанатата количина на CO_2 , додека Anhydrone ја врзува и отстранува водената пареа. Ова прочистување е потребно бидејќи CO_2 и H_2O веќе се измерени претходно преку инфрацрвената анализа, и нивното присуство би можело да предизвика мешање или нарушување на сигналот во следниот чекор. Откако ќе се отстранат овие гасови, пречистената смеса пристигнува до ќелијата за термичка спроводливост, која го детектира количеството на азот (N_2). Овој сензор ја мери разликата во топлинска спроводливост помеѓу носечкиот гас и гасната смеса што се анализира, што овозможува прецизно определување на концентрацијата на азот во примерокот. Конечните резултати се претставуваат во масени проценти или делови на милион, во зависност од параметрите на анализата [12].

Одредување топлинска моќ

Горната топлинска моќ на иситнетиот цврст отпад беше определена со помош на LECO AC500 калориметриската бомба дадена на Слика 4.17. Нејзината внатрешност со главните елементи е претставена на Слика 4.36. За реализација на анализата применет беше Стандардот ISO 1928 – Јаглен и кокс (Одредување на горна топлинска моќ) од Интернационалната Организација за Стандардизација [13].



Слика 4.36. Главни елементи на LECO AC500 калориметриска бомба [138]

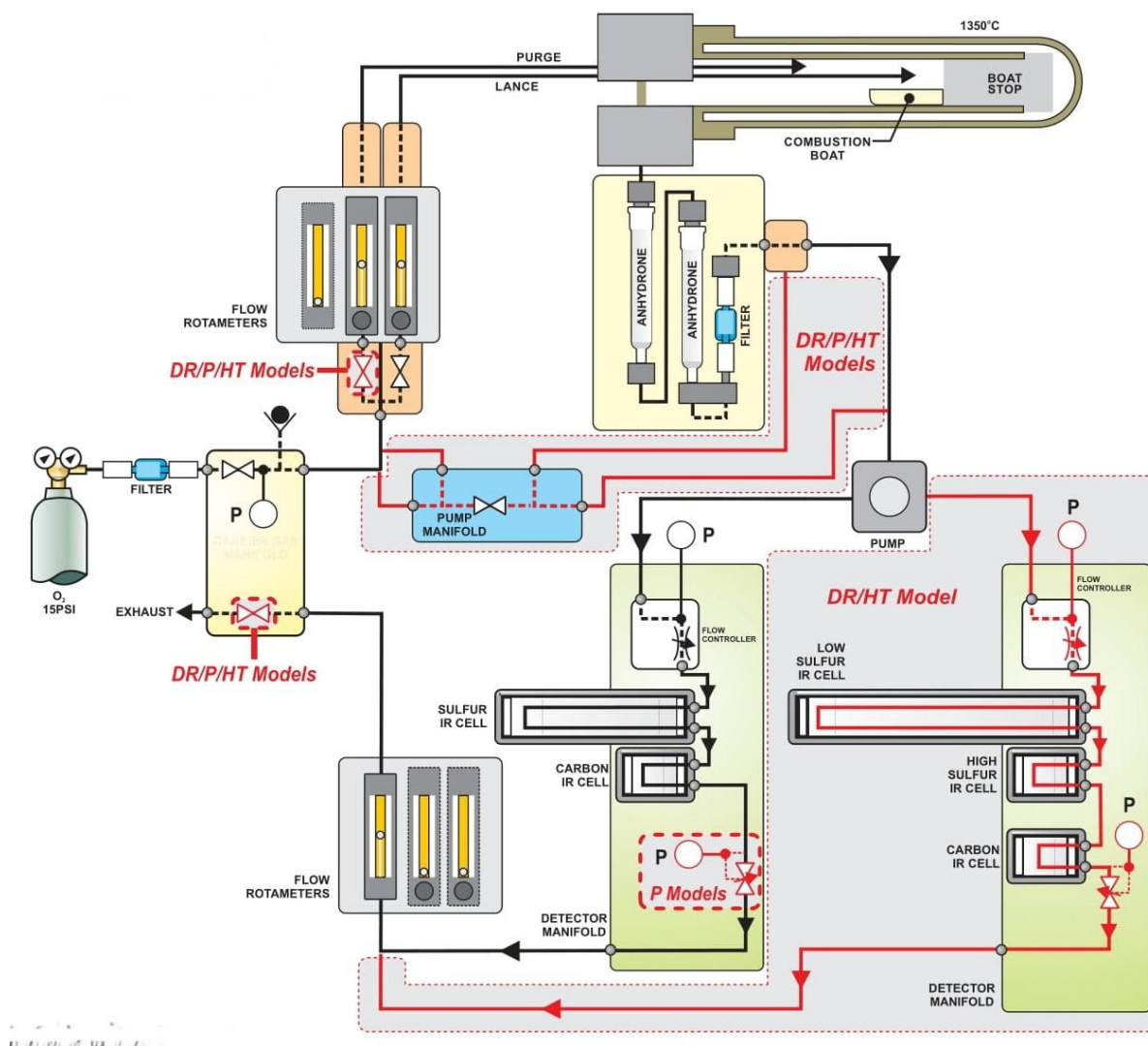
Примерокот (МасМ 2 и Р12) беше внесен во сад за согорување, кој се нарекува и калориметриска бомба. Внатре се поставени фитил и електроди, а бомбата се полни со чист кислород под висок притисок (од околу 30 bar) со помош на системот за полнење на бомбата со кислород, за да се осигура целосно согорување. Откако ќе се затвори херметички, садот се потопува во внатрешната комора, која е исполнета со омекната вода. Околу оваа комора се наоѓа температурно контролирана обвивка, која обезбедува стабилни термални услови и спречува размена на топлина со надворешната средина. За да се постигне еднакво распределување на температурата во водената бања, во системот е вградена мешалка, која постојано ја меша водата за да се овозможи рамномерна апсорпција на ослободената топлина. Во внатрешноста на системот има температурни сензори, еден што го следи температурниот пораст на самата вода во калориметарот, а друг што ја следи температурата на обвивката. Поклопецот одозгора е исто така термички контролиран за да се минимизираат загубите. На секои 6 секунди беше мерена температурата на водата во кофата со помош на високопрецизен термистор. Првата фаза од анализата е воспоставување рамнотежа во времетраење од 3 минути, а потоа втората фаза е анализа на примерокот во времетраење од 5 минути. Фазата на рамнотежа се однесува на постигнувањето на температурна рамнотежа помеѓу водата во кофата и

калориметриската бомба. Фазата на анализа од 5 минути е доволна за целосно согорување на отпадот што беше направено во контролирана средина. Количината на топлина ослободена од процесот на согорување беше пресметана од топлинската рамнотежа на системот [13].

Долната топлинска моќ може да се добие и пресметковно, со познат состав на отпадот, односно спроведена елементарна анализа на истиот.

Одредување содржина на сулфур

За лабораториско испитување на сулфур во примерокот од иситнет цврст отпад применет беше LECO анализаторот од моделот S832 со стапка на детекција на сулфур 0,008 до 30 mg и време на анализа од 60 до 120 секунди, даден на Слика 4.16. Шематскиот приказ на уредот е претствен на Слика 4.37. Постапката за анализа беше опишана во Стандардот ISO 16994 – Цврсти биогорива (Одредување на вкупна содржина на сулфур и хлор) од Интернационалната Организација за Стандардизација [14].



Слика 4.37. Шематски приказ на LECO S832 [137]

Анализата започна со внесување мала количина иситнет отпад (MacM 2 и P12) во печката во која имаше чист кислород и која беше претходно загреана до температура од 1.350°C . Тој согорува при што се ослободува јаглерод во форма на CO_2 гас и сулфур во форма на SO_2 гас. По одредено време, дополнителен кислород се внесува преку керамичка цевка, директно над примерокот за да се забрза согорувањето на огноотпорните материјали. Гасовите од согорувањето се одведуваат кон задниот дел на печката, а потоа напред низ внатрешните и надворешните цевки на печката, дозволувајќи им да останат во зоната на висока температура на печката, обезбедувајќи целосна оксидација [14]. Откако ќе ја напуштат печката гасовите поминуваат низ цевки со анхидрон, кои служат за отстранување на влагата. Потоа, продолжуваат кон регулаторот на протокот, кој ја одредува брзината на протокот на гасовите низ инфрацрвени ќелии за детекција на сулфур. Технологијата на работа на инфрацрвените ќелии се базира на фактот дека гасовите како CO и SO_2 апсорбираат инфрацрвена енергија на специфични бранови должини, а степенот на апсорпција е пропорционален на концентрацијата на гасот и должината на патеката на зрачењето низ ќелијата. Конечната концентрација на сулфур во непознатиот примерок се добива со споредба со калибрациони стандарди, кои претставуваат материјали со позната содржина.

4.4.Пресметка на основните штетни компоненти во излезните гасови од согорување отпад

Емисијата на штетни материи претставува количеството на одредена супстанција што се испушта во атмосферата за единица време од некој уред (парен котел), постројка или технолошки процес. Видот и количината на испуштените штетни материи кои настануваат при процесот на инсенерација на отпадот во голема мера се определуваат од типот и карактеристиките на комуналниот цврст отпад кој се користи, начинот на согорување, како и од капацитетот и режимот на работа на систем. Приближните вредности за емисиите може да се пресметаат врз основа на анализа на горивото и техничките карактеристики на котлите, додека прецизни податоци се добиваат преку мерења.

Главните штетни материи кои се испуштаат во атмосферата преку гасните продукти од согорувањето се: сулфурни оксиди (SO_2 и SO_3), азотни оксиди (NO и NO_2), јаглеродни соединенија (CO и CO_2), како и цврсти честички од летечка пепел и остатоци од несогорено гориво.

Сулфурните оксиди, особено сулфур диоксидот (SO_2), претставуваат еден од клучните загадувачи од парните котли. Тој се формира при согорување на сулфурот присутен во горивото. Сулфур триоксидот (SO_3), пак, се создава во многу помали количества преку дополнителна оксидација на SO_2 , при присуство на вишок кислород и високи температури.

Меѓу гасните загадувачи значајна улога имаат и азотните оксиди, кои во стручната литература се означуваат со симболот NO_x . Во услови на согорување во парните котли, доминантно се формира азот моноксид (NO), додека азот диоксидот (NO_2) учествува со помалку од 0,5% од вкупните NO_x соединенија. Подоцна, NO во контакт со молекуларен кислород и озон во атмосферата, особено под влијание на сончева светлина, се претвора во NO_2 , кој е дури четири пати потоксичен од NO .

Јаглерод моноксидот (CO) се јавува како резултат на непотполно хемиско согорување на горивата. Тоа е безбоен и безмирисен гас со силна способност за врзување

со хемоглобинот во крвта, што го прави опасен по здравјето. Јаглерод диоксидот, пак, се ослободува при комплетно согорување и неговата емисија е директно поврзана со содржината на јаглерод во фосилното гориво и количеството на согорено гориво. Зголемувањето на потрошувачката на горива доведува до пораст на емисијата на CO_2 [145].

4.4.1. Материјален биланс на процесот на согорување

За да се изврши квантитативна анализа на процесот на согорување на горивата, потребно е да се изработи материјален биланс на сите супстанции што учествуваат во процесот – односно горивото, кислородот и продуктите од согорувањето. Односите помеѓу согорливите компоненти на горивото и количината на кислород потребна за нивно целосно согорување, како и количината на резултирачките гасовити продукти, се познати како стехиометриски односи.

Равенките по кои се направени пресметките за истите се дадени во текстот подолу. Теоретско количество кислород за целосно согорување се пресметува согласно Равенката 4.7.

$$O_{min} = \frac{1}{100} \left[1,867C + 5,6 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 0,7S \right] \quad [\text{m}^3/\text{kg}] \quad (4.7)$$

Минимално потребниот волумен воздух за целосно согорување се пресметува согласно Равенката 4.8.

$$V_{Lmin} = \frac{O_{min}}{0,21} \quad [\text{m}^3/\text{kg}] \quad (4.8)$$

Вистинскиот волумен воздух за целосно согорување се пресметува според Равенката 4.9.

$$V_L = \lambda_l V_{Lmin} \quad [\text{m}^3/\text{kg}] \quad (4.9)$$

Теоретскиот волумен суви продукти од согорување се наоѓа со помош на Равенката 4.10.

$$V_{Rst} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{N}_2}^t \quad [\text{m}^3/\text{kg}] \quad (4.10)$$

Волуменот на јаглерод диоксид може да се пресмета користејќи ја Равенката 4.11.

$$V_{\text{CO}_2} = 1,867 \frac{C}{100} \quad [\text{m}^3/\text{kg}] \quad (4.11)$$

Волуменот на сулфур диоксид се пресметува согласно Равенката 4.12

$$V_{\text{SO}_2} = 0,7 \frac{S}{100} \quad [\text{m}^3/\text{kg}] \quad (4.12)$$

Теоретскиот волумен на азот се пресметува согласно Равенката 4.13.

$$V_{\text{N}_2}^t = 0,79 V_{Lmin} + 0,8 \frac{N}{100} = \frac{79}{21} O_{min} + 0,8 \frac{N}{100} \quad [\text{m}^3/\text{kg}] \quad (4.13)$$

Волумен на суви троатомни гасови, Равенка 4.14.

$$V_{\text{RO}_2} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} \quad [\text{m}^3/\text{kg}] \quad (4.14)$$

Вистинскиот волумен на суви гасни продукти од согорување се добива според Равенката 4.15.

$$V_{RS} = V_{Rst} + (\lambda_l - 1) V_{Lmin} \quad [\text{m}^3/\text{kg}] \quad (4.15)$$

Теоретскиот волумен влажни продукти од согорување се пресметува според Равенка 4.16.

$$V_{RWt} = V_{RSt} + V_{H_2O}^t \quad [\text{m}^3/\text{kg}] \quad (4.16)$$

Теоретскиот волумен на водена пареа во продукти од согорување се добива користејќи ја Равенката 4.17.

$$V_{H_2O}^t = \frac{1,244}{100} (9H + W) + 0,0161 V_{Lmin} \quad [\text{m}^3/\text{kg}] \quad (4.17)$$

Вистинскиот волумен на водена пареа во продукти од согорување се пресметува согласно Равенката 4.18.

$$V_{H_2O} = V_{H_2O}^t + 0,0161 (\lambda_l - 1) V_{Lmin} \quad [\text{m}^3/\text{kg}] \quad (4.18)$$

Вистинскиот волумен влажни продукти од согорување се добива според Равенка 4.19.

$$V_{RW} = V_{RWt} + (\lambda_l - 1) V_{Lmin} = V_{RS} + V_{H_2O} \quad [\text{m}^3/\text{kg}] \quad (4.19)$$

4.4.2. Емисија на цврсти честички

Присуството на цврсти честички како летечка пепел и несогорени остатоци (како што се кокс и саѓи) во издувните гасови од парните котли се должи на минералните компоненти во фосилните горива и на непотполното согорување на органските материи. Во процесот на согорување на цврсти горива при високи температури и под дејство на сложени физичко-хемиски реакции, минералните материи се преобразуваат во несогорливи остатоци познати како пепел. Дел од таа пепел, која се создава во зоната на пламенот или на површината на горивото, се топи и формира минерална течност наречена шљака. Таа шљака паѓа на дното на ложиштето или се прилепува на неговите сидови, а потоа заедно со поголемите фракции од пепелта, се исфрла надвор од котелот преку ложиштната инка, во цврста или течна состојба.

Преостанатиот дел од пепелта, вклучувајќи ги најситните честички, како и несогорените делови од горивото, се пренесуваат со гасовите како летечка пепел од ложиштето кон останатите делови на гасниот систем на котелот. Таму, поради промена на насоката на струење, мал дел од овие честички се одвојува од гасовите и се отстранува преку посебни отвори, додека најголемиот дел од летечката пепел заедно со гасовите продолжува кон отпепелувачот [145].

Пресметката на емисиите на цврсти честички се прави согласно подолунаведените равенки.

Емисијата на летечка пепел е добиена со помош на Равенката 4.20.

$$M_{lp} = 10B \left(A + \frac{q_A H_d}{32,65} \right) a_{lp} (1 - \eta_0) \quad [\text{g/s}] \quad (4.20)$$

Потрошувачката на цврсто гориво кое се внесува во котелот во $[\text{kg/s}]$ се обележува со B и зависи од процентуално учество на отпад.

Содржината на пепел во горивото во $[\text{масени проценти (\%)}]$ е различна за двата примерока од отпад и изнесува:

$$A = 8,90\% \text{ (за } Pl2)$$

$$A = 7,76\% \text{ (за } MacM2)$$

Топлинската загуба поради механички нецелосно согорување на гориво во $[\%]$ е усвоена да изнесува $q_A = 1,25$.

Долната топлинска моќ во $[\text{MJ/kg}]$ е различна за двата примерока од отпад и изнесува:

$$H_d = 20,16 \text{ (за Pl2)}$$

$$H_d = 23,24 \text{ (за MacM2)}$$

Дел од вкупна пепел внесена со гориво која како летечка пепел се одведува со гасовите од ложиштето во [-] зависи од системот за согорување. Вредноста е усвоена и изнесува $a_{lp} = 0,2$.

Степенот на отпепелување на гасовите во [-] зависи од филтрите и сметаме, па $\eta_0 = 0,99$.

4.4.3. Емисија на сулфурни оксиди

Сулфурните оксиди (SO_2 и SO_3) што се појавуваат во гасовите од согорувањето се создаваат како резултат на присуството и согорувањето на согорливиот сулфур во горивата. Во цврстите горива, согорливиот сулфур се среќава во две главни форми: органски, каде што е хемиски поврзан со елементи како јаглерод, водород, азот и кислород во рамките на сложени органски соединенија, и пиритен, каде што е сврзан со железо (во форма на FeS_2).

При согорување во парните котли, поголемиот дел од согорливиот сулфур се трансформира во сулфур диоксид (SO_2). Формирањето на сулфур триоксид (SO_3) е минимално, при што неговата концентрација во издувните гасови обично изнесува само 2 до 5% од количината на SO_2 . Поради оваа мала застапеност, при пресметување на емисиите на сулфурни оксиди, вообичаено се претпоставува дека целиот сулфур од горивото преминува исклучиво во облик на SO_2 .

Емисиите на сулфурни оксиди се пресметани согласно подолунаведените равенки.

Емисијата на сулфур диоксид се пресметува согласно Равенката 4.21.

$$M_{SO_2} = B g_{SO_2} (1 - \eta_{SO_2'}) (1 - \eta_{SO_2''}) \quad [g/s] \quad (4.21)$$

Масата на сулфур диоксид SO_2 за единица маса гориво во излезни гасови се добива со примена на Равенката 4.22.

$$g_{SO_2} = 10^3 (r_{SO_2} - 0,01 SO_3) V_{RS} \rho_{SO_2} \left(\frac{\lambda_l}{\lambda_{ig}} \right) \quad [g/kg] \quad (4.22)$$

Волуменското учество на сулфур диоксид SO_2 во суви продукти на согорување се наоѓа со помош на Равенката 4.23.

$$r_{SO_2} = \frac{V_{SO_2}}{V_{RS}} \quad [m^3/m^3] \quad (4.23)$$

Процентната содржина на сулфур триоксид SO_3 во продукти на согорување се пресметува со примена на Равенката 4.24.

$$SO_3 = 0,424 r_{SO_2} O_2^{0,5} q_A \left(\frac{Q}{Q_M} \right)^2 \quad [\%] \quad (4.24)$$

Густината на сулфур диоксид SO_2 при нормални услови во $[kg/m^3]$ е усвоена и изнесува $\rho_{SO_2} = 2,86$.

Коефициентот на вишок на воздух во ложиште во [-] е исто така усвоен и изнесува $\lambda_l = 1,2$. Коефициент на вишок на воздух во гасовите на излезот од оџак во [-] изнесува $\lambda_{ig} = 1,2$, чијашто вредност е усвоена.

Процентната содржина на вишокот кислород по согорувањето на горивото се добива од Равенката 4.25.

$$O_2 = \frac{21(\lambda_l - 1)V_{Lmin}}{V_{RS}} \quad [\%] \quad (4.25)$$

Максималната количина топлина внесена во котел се пресмеува според Равенката 4.26.

$$Q_M = \frac{BH_d}{1000} \quad [MW] \quad (4.26)$$

Пресметковната количина топлина внесена во котелот се добива со примена на Равенката 4.27.

$$Q = Q_M \eta \quad [MW] \quad (4.27)$$

Коефициентот на полезно дејство е усвоен и изнесува $\eta = 0,9$. Усвоени се и вредностите за делот од сулфурни оксиди кој се врзува со летечка пепел во гасни канали на котелот во [-] и делот од сулфурни оксиди кој се одвојува од гасовите во отпепелувачот [-] и тие изнесуваат $\eta_{SO_2'} = 0,1$ (за цврсти горива) и $\eta_{SO_2''} = 0$ (најлош случај, како да нема одвојување SO_2 во фазата на отстранување на пепел).

4.4.4. Емисија на азотни оксиди

Во процесот на согорување на горивата во ложиштата на парните котли, од азотните оксиди (NO и NO_2), најпрво се создава азот моноксид (NO). Мал дел од него, околу 2 до 5%, брзо реагира со слободниот кислород и се претвора во азот диоксид (NO_2). Вкупната количина на овие два соединенија се обележува со ознаката NO_x . Преостанатиот дел од NO дополнително се оксидира во NO_2 при контакт со атмосферата, односно за време на ширењето на издувните гасови. При пресметување на емисијата на азотни оксиди, вообичаено се смета дека целата количина на NO_x е во форма на NO_2 .

Азотните оксиди во котлите можат да се формираат од молекуларниот азот присутен во воздухот што се користи за согорување, како и од азотот што се наоѓа во самото гориво. Во зависност од начинот на настанување, се разликуваат три типа:

- Термички азотни оксиди (NO_x^T) – кои настануваат како резултат на реакција меѓу азотот и кислородот од воздухот при високи температури;
- Брзи азотни оксиди (NO_x^B) – кои се создаваат кога јаглеводородни радикали реагираат со молекуларен азот;
- Горивни азотни оксиди (NO_x^G) – кои се формираат при оксидација на соединенија што содржат азот во самото гориво.

Формирањето на термичкиот азотен оксид (NO^T) се одвива преку реакции на молекуларен азот со атомарен кислород, или обратно, при температури над $1.300^\circ C$. Брзиот азотен оксид (NO^B) се резултат на повеќе можни реакции меѓу јаглеводородните радикали и молекуларниот азот. Горивен азотен оксид (NO^G) се создава со оксидација на органски врзаниот азот во цврстите и течните горива при температури повисоки од $630^\circ C$.

За разгледуваниот комунален цврст отпад емисиите на азотни оксиди се пресметани согласно равенките дадени подолу.

Емисијата на азотни оксиди сведена на NO_2 од парните котели во атмосферата се добива со примена на Равенката 4.28.

$$M_{NO_2} = BV_{RS} C_{NO_2} \frac{\lambda_s}{\lambda_{ig}} \quad [g/s] \quad (4.28)$$

Вкупната максимална концентрација на азотни оксиди во гасовите во зоната на согорување за λ_s сведена на NO_2 се пресметува преку Равенката 4.29.

$$C_{NO_2} = C_{NO_2}^T + C_{NO_2}^G + C_{NO_2}^B \quad [g/m^3] \quad (4.29)$$

Вкупната максимална концентрација на термички азотни оксиди сведена на NO_2 се наоѓа со помош на Равенката 4.30.

$$C_{NO_2}^T = 7,03 \cdot 10^3 C_{O_2}^{0,5} e^{-\frac{10860}{T_M} \frac{\tau_r}{\tau_0}} \quad [g/m^3] \quad (4.30)$$

Концентрацијата на вишокот кислород во зона на согорување се пресметува со Равенката 4.31.

$$C_{O_2} = \frac{0,21 V_{Lmin}[(\lambda_s - 1) + r(\lambda_{rg} - \lambda_s)] \rho_{O_2}}{[V_{RSt} + (\lambda_s - 1) V_{Lmin}](1 + r)} \quad [kg/m^3] \quad (4.31)$$

Коефициентот на вишок на воздух во зоната на согорување се добива со примена на Равенката 4.32.

$$\lambda_s = \lambda_l + 0,5 \Delta \lambda_l \quad [-] \quad (4.32)$$

Прирастот на коефициент на вишок на воздух во ложиште во $[-]$ е усвоен и изнесува $\Delta \lambda_l = 0$. Степенот на рецикулација на гасовите во зоната на согорување изразен во $[-]$ е усвоен и изнесува $r = 0,15$. Коефициентот на вишок на воздух во рецикулациони гасови $[-]$ има усвоена вредност од $\lambda_{rg} = 1,2$. Густината на O_2 при нормални услови $[kg/m^3]$ е усвоено да изнесува $\rho_{O_2} = 1,428$.

Максималната температура во зоната на согорување се добива од Равенката 4.33.

$$T_M = \beta_s T_a' (1 - \psi_{zs})^{0,25} (1 - r^{1+nr}) m_g \quad [K] \quad (4.33)$$

Дел од горивото што согорува од излезот од пламениците до завршувањето на интензивното високотемпературно согорување во $[-]$ изнесува $\beta_s = 0,96$.

Условната адијабатска температура на гасови во зоната на согорување се пресметува од Равенката 4.34.

$$T_a' = \frac{q_l'}{V_{RWt} c_g + 1,0161 (\lambda_s - 1) V_{Lmin} c_v} + 273 \quad [K] \quad (4.34)$$

Ослободената топлина во зоната на согорување се добива од Равенката 4.35.

$$q_l' = H_d + q_{zv} + q_G \quad [kJ/kg] \quad (4.35)$$

Топлината внесена во ложиште со загреан воздух во $[kJ/kg]$ е усвоена и изнесува $q_{zv} = 0$, физичката топлина на гориво во $[kJ/kg]$ е $q_G = 0$ (усвоена).

Средниот специфичен топлински капацитет на гасови за очекувана адијабатска температура (t_a) се добива од Равенката 4.36.

$$c_g = (1,59 + 0,004 W_s) + 0,14 k_t \quad [kJ/m^3 K] \quad (4.36)$$

Сведената содржина на влага во гориво се пресметува со примена на Равенката 4.37.

$$W_s = \frac{W}{H_d} \quad [\% kg/MJ] \quad (4.37)$$

Температурниот коефициент на промената на специфичниот топлински капацитет се добива од Равенка 4.38.

$$k_t = \frac{t_a - 1200}{1000} \quad [\text{K}^{-1}] \quad (4.38)$$

Коефициентот на вишок на воздух во зоната на согорување во [-] е усвоен со вредност $\lambda_s = 1,2$.

Средниот специфичен топлински капацитет на воздух за очекувана адијабатска температура (t_a) се добива од Равенката 4.39.

$$c_v = 1,46 + 0,092k_t \quad [\text{kJ/m}^3\text{K}] \quad (4.39)$$

Коефициентот на топлинска ефективност на екраните во зоната на јадрото на пламенот во [-] изнесува $\psi_{zs} = 0,9$ (усвоен). Коефициент со кој се зема во предвид начинот на внесување на рециркулационите гасови во ложиштето во [-] има усвоена вредност од $n = 5$. Коефициентот со кој се зема во предвид видот на пламениците во [-] изнесува $m_g = 0,99$ (усвоен).

Времетраењето на реакциите на формирање на азотни оксиди во ложиштето се добива преку Равенката 4.40.

$$\tau_r = \frac{\Delta T_r}{T'_a - T''_l} \left(\frac{q_{AL}}{300} \right)^{0,5} \tau_z \quad [\text{s}] \quad (4.40)$$

Температурниот интервал во кој се одвиваат активните реакции на формирање азотни оксиди се добива преку Равенката $\Delta T_r = T_M^2 \cdot 10^{-5} - 50,614 + T_M \cdot 10^{-5}$ [K] (4.41).

$$\Delta T_r = \frac{T_M^2 \cdot 10^{-5}}{0,614 + T_M \cdot 10^{-5}} \quad [\text{K}] \quad (4.41)$$

Периметарот на ложиштето изразен во [m] изнесува $L = 30$.

Апсолутната температура на гасовите на излез од ложиштето се пресметува со примена на Равенката 4.42 или преку номограм.

$$\text{Опција 1: } t'_l = \frac{T_a}{M \left(\frac{\sigma_0 \psi_{sr} \varepsilon_l A_z T_a^3}{\eta_z B(Vc)_{sr}} \right)^{0,6} + 1} - 273 \quad [\text{K}] \quad (4.42)$$

Опција 2: од номограм

За номограм се потребни податоци за ефективен степен на црност на пламенот ε_p , коефициент на топлинска ефективност на екраните во зоната на јадрото на пламенот ψ , изразот $\frac{BI_a}{A_z}$, коефициент на температурно поле во ложиштето M и очекувана адијабатска температура на гасовите t_a .

Одбрана е опција 2.

Очекуваната адијабатска температура на гасовите се добива со помош на Равенка 4.43.

$$t_a = \frac{1800}{\lambda_s} (1 + 10^{-5} q'_l) \quad [^\circ\text{C}] \quad (4.43)$$

Коефициент на температурно поле во ложиштето [-] изнесува $M = 0,46$ (усвоен).

Ефективниот степен на црност на пламенот е добиен преку Равенката 4.44.

$$\varepsilon_p = 1 - e^{-kps} \quad [-] \quad (4.44)$$

Коефициентот на слабеење на зраци во ложишна средина се пресметува согласно Равенката $k = k_g r_n = \left(\frac{0,78+1,6r_{H_2O}}{\sqrt{p_n s}} - 0,1 \right) \left(1 - 0,37 \frac{T_g}{1000} \right) r_n$ [1/m·bar] (4.45).

$$k = k_g r_n = \left(\frac{0,78+1,6r_{H_2O}}{\sqrt{p_n s}} - 0,1 \right) \left(1 - 0,37 \frac{T_g}{1000} \right) r_n \quad [1/m \cdot bar] \quad (4.45)$$

Волументското учество на водена пареа се добива со примена на Равенката 4.46.

$$r_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{V_{RW}} \quad [m^3/m^3] \quad (4.46)$$

Парцијалниот притисок на троатимните гасови е пресметан според Равенката 4.47.

$$p_n = p r_n \quad [bar] \quad (4.47)$$

Вкупното волуменско учество на троатомни гасови се добива преку Равенката 4.48.

$$r_n = r_{RO_2} + r_{H_2O} \quad [m^3/m^3] \quad (4.48)$$

Волументското учество на троатомни гасови CO₂ и SO₂ се пресметува со помош на Равенката 4.49.

$$r_{RO_2} = \frac{V_{RO_2}}{V_{RW}} \quad [m^3/m^3] \quad (4.49)$$

Ефективната дебелина на гасен слој кој зрачи се наоѓа преку Равенката 4.50.

$$s = 3,6 \frac{V}{A_z} \quad [m] \quad (4.50)$$

Димензиите на ложиштето се следни:

$$\text{Висина} \quad H = 15 \, m$$

$$\text{Ширина} \quad W = 6 \, m$$

$$\text{Должина/длабочина} \, D = 9 \, m$$

$$\text{Волумен на ложиште} \, [m^3]$$

$$V = H \cdot W \cdot D$$

Вкупната површина на сидовите на ложиштето е пресметана преку Равенката 4.51.

$$A_z = (H \cdot W \cdot 2) + (H \cdot D \cdot 2) \quad [m^2] \quad (4.51)$$

Апсолутната температура на гасовите во [K] е еднаква на усвоената очекувана адијабатска температура на гасови во [K]. Зависноста е дадена преку Равенката 4.52.

$$T_g = T_a \quad [K] \quad (4.52)$$

Притисок на гасовите изразен во [bar] е $p = 1$. Вредноста е усвоена

Теоретската енталпија на гасовите се добива преку Равенката 4.53.

$$I_a = q \left(1 - \frac{u_3+u_6}{100-u_4} \right) + (q_v - q_{vv}) + q_r \quad [kJ/kg] \quad (4.53)$$

Внесената топлина во котелот е претставена преку Равенката 4.54.

$$q = H_d \quad [kJ/kg] \quad (4.54)$$

Загубите поради хемиски нецелосно согорување, поради механички нецелосно согорување, преку физичка топлина на шљака се усвоени и изнесуваат во [%]:

$$u_3 = 0,25$$

$$u_4 = 1,25$$

$$u_6 = 1,25$$

Количеството топлина што се внесува во ложиштето со загреаниот и ладниот воздух што навлегува во ложиштето и во системот за подготовка на јагленов прав од околината се добива преку Равенката 4.55.

$$q_v = \lambda_l I_l^t \quad [\text{kJ/kg}] \quad (4.55)$$

Енталпијата на теоретско количество ладен воздух се пресметува со помош на Равенката 4.56.

$$I_l^t = V_{Lmin} c_{pv} t_l \quad [\text{kJ/kg}] \quad (4.56)$$

Специфичниот топлински капацитет на воздухот во [-] при t_l [kJ/mK] е усвоен и изнесува $c_{pv} = 1,3197$.

Температурата на околниот воздух [°C] е усвоена и изнесува $t_l = 20$.

Количеството топлина што се внесува во ложиштето со предзагреан воздух со надворешен извор на топлина [kJ/kg] е $q_{vv} = 0$ (усвоено).

Топлината на рециркулирачките гасови се добива со Равенка 4.57.

$$q_r = 0,15 \cdot q \quad [\text{kJ/kg}] \quad (4.57)$$

Апсолутната температура на гасовите на излез од ложиштето [K] се добива дека е:

$$t_l'' = 810 \text{ °C (за } Pl2)$$

$$t_l'' = 875 \text{ °C (за } MacM2)$$

Времето на задржување на гасовите во ложиште се пресметува со Равенката 4.58.

$$\tau_z = \frac{273\xi}{q_v T_{g,sr} v_{g,s} (1+r)} \quad [\text{s}] \quad (4.58)$$

Коефициентот на исполнетост на напречниот пресек на ложиштето со гасови [-] е усвоен и изнесува $\xi = 0,8$.

Специфичното топлинско оптоварување на волуменот на ложиштето се добива од Равенката 4.59.

$$q_v = \frac{BH_d}{V} \quad [\text{MW/m}^3] \quad (4.59)$$

Средната пресметковна апсолутна температура на гасовите во волуменот на ложиштето се наоѓа преку Равенката 4.60.

$$T_{g,sr} = 0,84 (T_M^4 + T_l''^4)^{0,25} \quad [\text{K}] \quad (4.60)$$

Средниот сведен волумен на гасовите при $\lambda=1$ се добива со помош на Равенката 4.61.

$$v_{g,s} = 0,278 + 0,001W \quad [\text{m}^3/\text{MJ}] \quad (4.61)$$

Теоретското време за постигнување на рамнотежна концентрација на азот моноксид при T_M се наоѓа од Равенката 4.62.

$$\tau_0 = 0,024 \exp \left(\frac{54290}{T_M} - 23 \right) \quad [\text{s}] \quad (4.62)$$

Вкупната максимална концентрација на горивни и брзи азотни оксиди сведена на NO₂ е добиена со примена на Равенката 4.63.

$$C_{NO_2}^G + C_{NO_2}^B = 1,25(0,40 - 0,10N)N \left(\frac{\lambda_s + r}{1 + r} \right)^2 \left(\frac{T_M - 800}{1000} \right)^{0,33} \quad [\text{g/m}^3] \quad (4.63)$$

5. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

Во ова поглавје се презентирани и анализирани добиените резултати од истражувањето и експерименталните мерења. Посебно внимание е посветено на интерпретацијата на клучните показатели и нивната релевантност во контекст на поставените цели. Исто така, се дискутираат можните фактори кои влијаат на резултатите, како и нивните импликации за понатамошен развој и примена на технологиите за енергетско користење на отпад. Овој дел овозможува цврста основа за заклучоци и препораки кои ќе бидат дадени во следните поглавја.

5.1. Презентација на резултатите добиени аналитички, нумерички и експериментално

Во ова поглавје се прикажани и споредени резултатите добиени преку три различни пристапи: аналитички, нумерички и експериментално, со цел да се добие целосна и прецизна слика за карактеристиките и однесувањето на цврстиот отпад. Аналитичкиот пристап се базира на пресметки изведени врз основа на познати формули и теоретски модели, претставени во третото поглавје. Нумерички пресметки беа спроведени за внатрешна проверка на експерименталните резултати и служеа за дополнителна проверка на добиените резултати. Експерименталните резултати, пак, се добиени преку директни лабораториски мерења и тестирања на физичко-хемиските параметри на отпадот, дадени во четвртото поглавје. Споредбата помеѓу овие три извори на податоци овозможува потврда на точноста и валидноста на истражувањето, како и идентификација на евентуални отстапувања или ограничувања кај секој поединечен пристап. Резултатите се презентирани табеларно и графички, со целосни објаснувања за методите и постапките применети при добивањето на податоците.

Анализите се спроведени врз основа на пропишани стандарди наведени во претходното поглавје, а вредносните податоци (резултатите) се добиени врз основа на равенки наведени во стандардите.

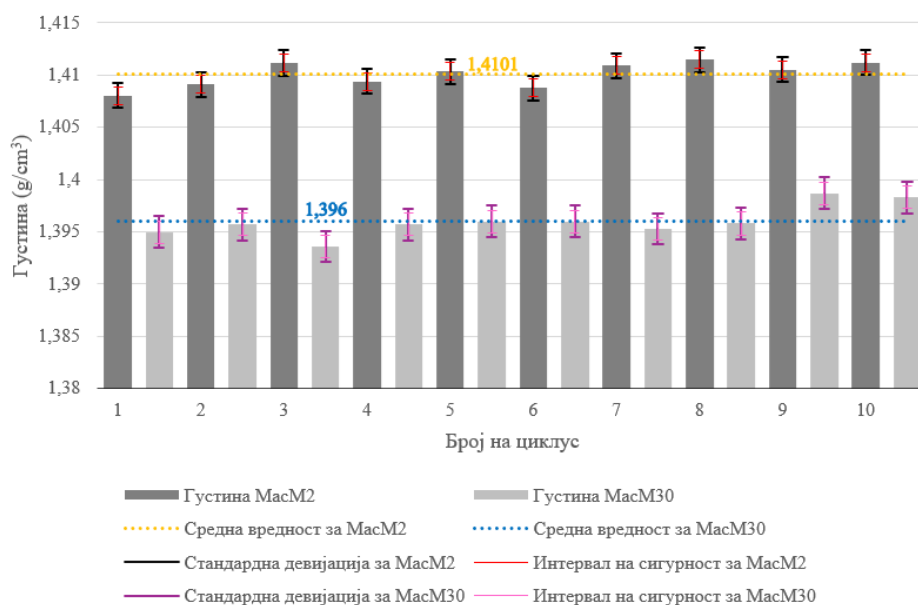
5.1.1. Резултати добиени за физичките параметри на отпадот

Во оваа подточка се презентирани резултатите добиени за физичките параметри на анализираниот цврст отпад, кои вклучуваат густина, пропустливост на вода, рН вредност и содржина на влага. Овие параметри, иако не придонесуваат директно кон енергетската вредност на отпадот, имаат значајно влијание врз неговата техничка обработка, складирање, транспорт и потенцијално влијание врз животната средина.

Густина

Анализа на густината на комуналниот цврст отпад е направена за еден тип отпад на двете фракции од истиот, фракција до 30 mm означена како МасМ30 и до 2 mm означена како МасМ2.

Вредностите од резултатите добиени при анализата на густина се претставени на Слика 5.1.



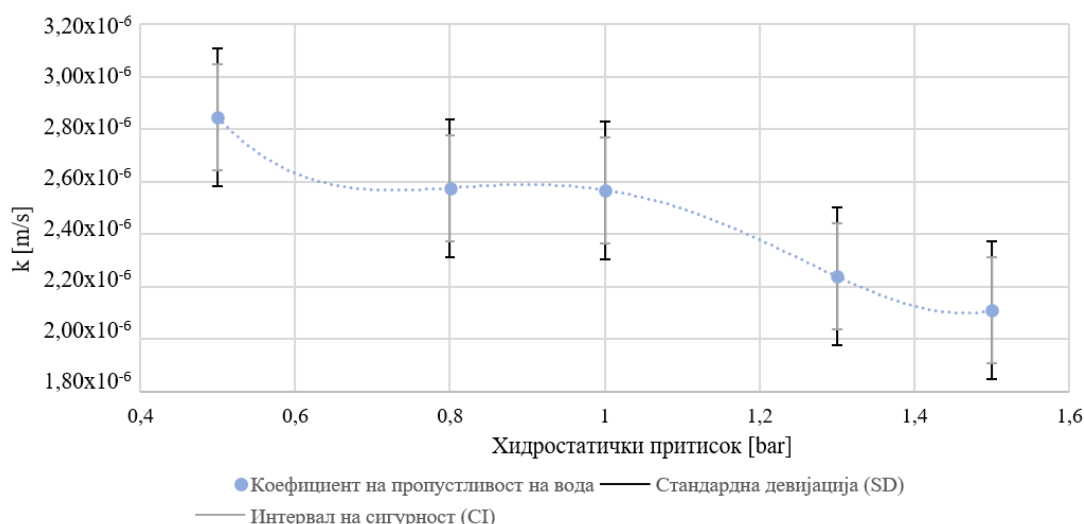
Слика 5.1. Густина на две фракции од МасМ (МасМ2 и МасМ30)

Густината на МасМ2 е континуирано повисока од таа на МасМ30 низ сите циклуси. Просечната густина на МасМ2 изнесува $1,4101 \text{ g/cm}^3$ (испрекината портокалова линија), додека МасМ30 има пониска просечна густина од $1,396 \text{ g/cm}^3$ (испрекината сина линија).

Стандардните девијации на мерењата на густината на отпадот се означени со црна полна линија за примерокот МасМ2 и со виолетова боја со ист стил, за МасМ30. За МасМ2 изнесува $\pm 0,00119 \text{ g/cm}^3$, а за МасМ30 $\pm 0,00149 \text{ g/cm}^3$, што укажува дека помалите честички покажуваат поголема конзистентност во податоците. Ова може да се објасни со поголема униформност, поефикасно пакување и намалена случајна варијабилност кај помалиот отпад. Интервалите на доверба за двата примерока отпад се прикажани на сликата со црвени ленти за МасМ2 ($\pm 0,0008 \text{ g/cm}^3$) и розеви ленти за МасМ30 ($\pm 0,0011 \text{ g/cm}^3$). Ова е во согласност со резултатите од стандардната девијација, каде што помалите честички отпад имаат и потесен интервал на доверба, поради слични причини. Дополнително, може да се забележи дека интервалите на стандардната девијација се пошироки од опсегот на интервалите на доверба, што значи дека поединечните точки на податоци се широко распоредени околу средната вредност, што води до висока варијабилност на податочниот сет. Додека, потесниот интервал на доверба значи дека просечната вредност е проценета со висока прецизност, најверојатно поради значителниот број на примероци (број на циклуси) што ја намалуваат неизвесноста во средната вредност.

Пропустливост на вода

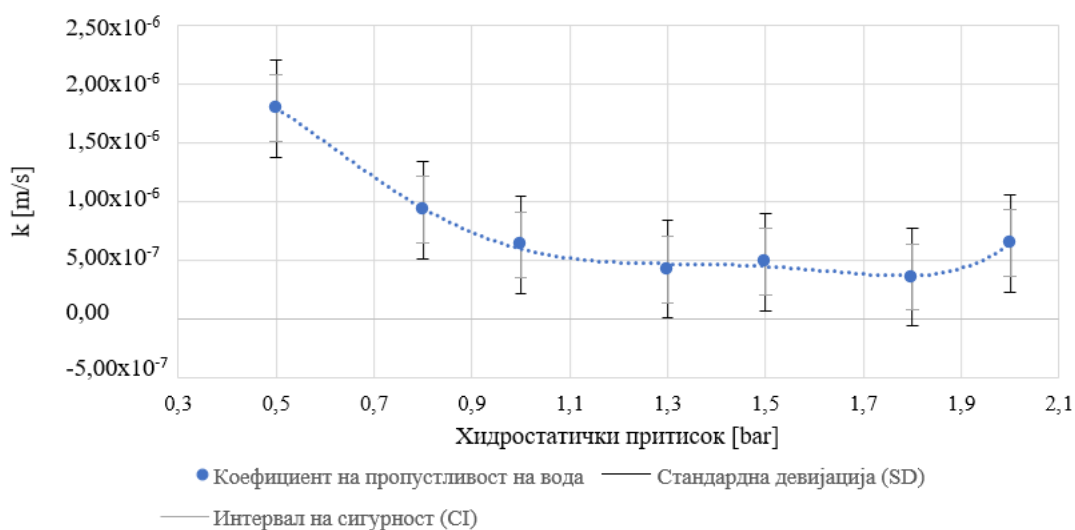
Пресметката на пропустливост на вода низ отпадот е направена на двата типа на отпад со фракција до 30 mm МасМ30 и P130, поради соодветноста на големината на парчињата за анализа. Кај фракцијата од 2 mm не беше возможно да се добие компактна структура за внесување во притисната комора поради малите димензии на парчињата од отпад од причина што имаа прашкаста структура. Додека резултатите од мерењата за МасМ30 се дадени на Слика 5.2, а за P130 на Слика 5.3.



Слика 5.2. Пропустливост на вода на MacM30

Резултатите за коефициентот на водопропустливост за MacM30 се прикажани на Слика 5.2 и се движат во интервал од $2,84 \times 10^{-6}$ m/s до $2,11 \times 10^{-6}$ m/s. Коефициентот на пропустливост опаѓа со зголемување на хидростатскиот притисок, што укажува дека повисокиот притисок ја намалува пропустливоста на материјалот. Овој тренд сугерира компресија на порозната структура на материјалот, со што се намалува способноста на течностите да поминуваат низ него.

На истата Слика 5.2, стандардната девијација е означена со црна полна линија и има вредност од $\pm 2,627 \times 10^{-7}$ m/s, а интервалот на доверба е обележан со сиви ленти и изнесува $\pm 2,020 \times 10^{-7}$ m/s. Бидејќи за секоја точка на притисок имаше само едно мерење, стандардната девијација беше пресметана од просекот на сите мерења на притисок, наместо индивидуално за секоја точка. Иако овој пристап претпоставува конзистентна варијабилност низ сите притисоци, тој сепак обезбедува разумна проценка во отсуство на повеќе повторени мерења за секоја состојба. Сепак, идните истражувања би требало да земат предвид добивање на повеќе мерења по притисок за попрецизна евалуација на варијабилноста зависна од притисокот.



Резултатите за коефициентот на водопропустливост за P130 се претставени на Слика 5.3. Вредноста се движи во интервал од $1,79 \times 10^{-6}$ m/s до $3,17 \times 10^{-7}$ m/s. Генерално може да се забележи дека пропустливоста опаѓа со пораст на притисокот до околу 1 bar притисок, за потоа релативно да се стабилизира до притисок од 1,8 bar. Првичното намалување на водопропустливоста е од причина што доаѓа до затворање на порите и компактирање на отпадот што доведува до помал простор за проток на течност. Стабилизацијата настанува кога веќе промената на притисокот не влијае врз формата и структурата на отпадот, односно не доаѓа до поголемо компактирање и збивање на материјалот. При последното мерење на 2 bar забележано е минимално зголемување на вредноста на коефициентот на водопропустливост. Ова може да укаже дека материјалот достигнал граница на набивање или дека почнуваат да се случуваат структурни промени (на пр., микропукнување), што повторно малку ја зголемува пропустливоста.

Стандардната девијација е означена со црна полна линија и вредноста за истата е $\pm 4,15 \times 10^{-7}$ m/s, а интервалот на доверба е обележан со сиви ленти со вредност од $\pm 2,83 \times 10^{-7}$ m/s. Може да се забележи дека вредностите за стандардната девијација и интервалот на доверба се наоѓаат во поширок интервал за отпадот P130 споредено со MacM30. Тоа укажува на голема варијабилност или несигурност во мерењата. За да се провери оваа појава потребно е да се зголеми бројот на мерења со цел добивање поголема прецизност во заклучоците.

Содржина на влага

Содржината на влага беше анализирана на една фракција со големина на парчињата до 2 mm на двата примерока (MacM2 и P12). Причината беше во тоа што сировите во кои примерокот беше внесен за анализа беа мали, како и тоа дека кај помалата фракција се добиваше похомоген примерок на помала површина/волумен.

Содржината на влага во анализираниот примерок од цврст отпад MacM2 е 2,76%, што е релативно ниска вредност и укажува дека процесот на сушење на примерокот е извршен пред анализата. Вредноста добиена за содржината на влага во отпадот P12 изнесува 3,23%, што исто така е мал процент и се должи на претходниот третман на отпадот кој вклучуваше сушење.

5.1.2. Резултати добиени за хемиските параметри на отпадот

Во оваа подточка се прикажани и анализирани резултатите добиени за хемиските параметри на цврстиот отпад, кои се клучни за оценка на неговиот енергетски потенцијал и соодветност за термичка обработка. Испитани беа следните показатели: содржина на испарливи материи, пепел, елементарен состав (јаглерод, водород, азот, сулфур) и топлинска моќ.

Испарливи материи

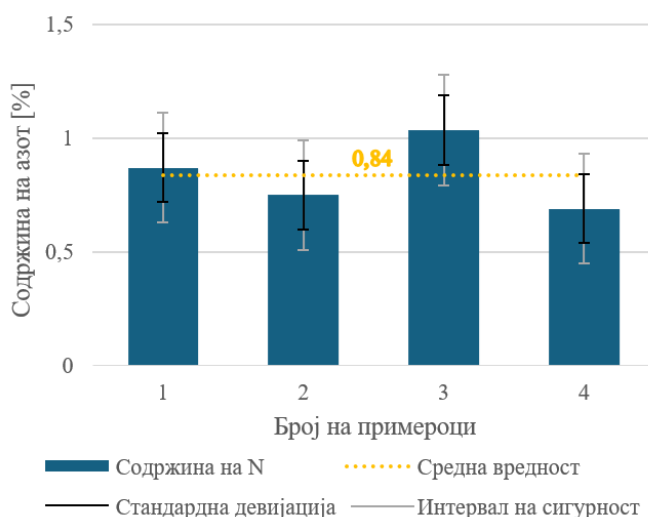
Содржината на испарлива материја во отпадот MacM2 е 79,42%, додека во P12 е 76,97%, што укажува на висок процент на запаливи органски компоненти во двата примерока.

Пепел

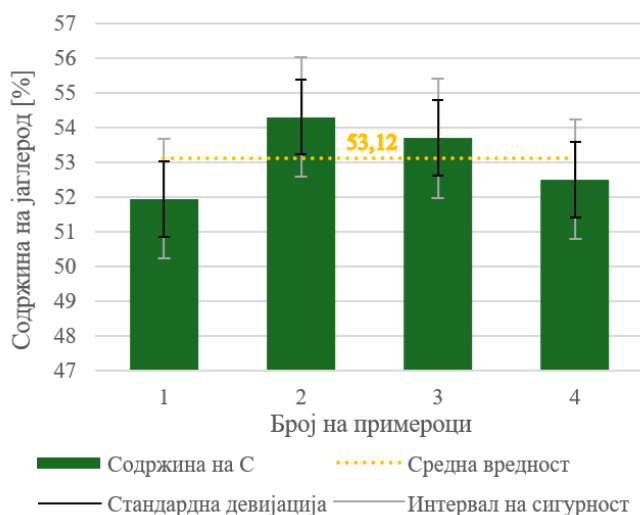
Содржината на минерални материи во отпадот МасМ2 изнесува 7,76%, а во другиот примерок Р12 е 8,90%. Тоа претставува содржина на неорганска, незапалива фракција од отпадот. Вредностите укажуваат на релативно чиста и квалитетна фракција на отпад погодна за енергетска употреба, со ниска содржина на неоргански материи што резултира со помалку остатоци по согорување и добар квалитет од аспект на калориска вредност.

Јаглерод, водород, азот и сулфур

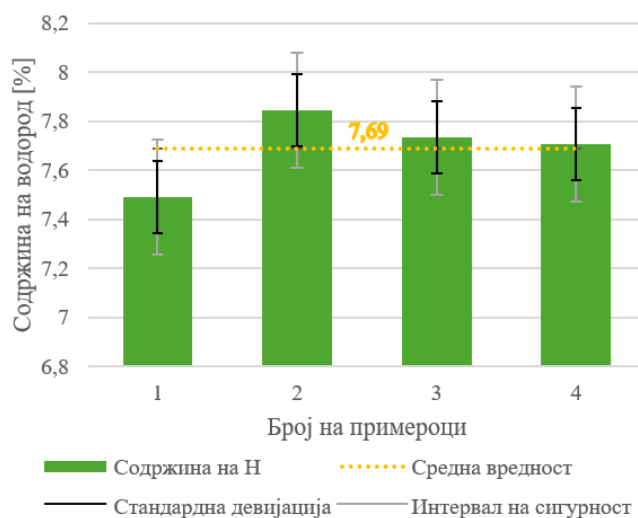
Вредностите за содржината на азот, јаглерод, водород и сулфур исто така беа анализирани само за една фракција од двата примерока со големина на честички до 2 mm (МасМ2 и Р12) од иста причина како останатите параметри во елементарната анализа, помалата фракција дава похомоген примерок. Резултатите за овие четири параметри се прикажани од Слика 5.4 до Слика 5.7 за МасМ2 и од Слика 5.8 до Слика 5.11 за Р12, соодветно. На сите слики просечната вредност е прикажана со испрекинатата портокалова линија, стандардната девијација означена со црна полна линија, а интервалот на доверба е обележан со сиви линии.



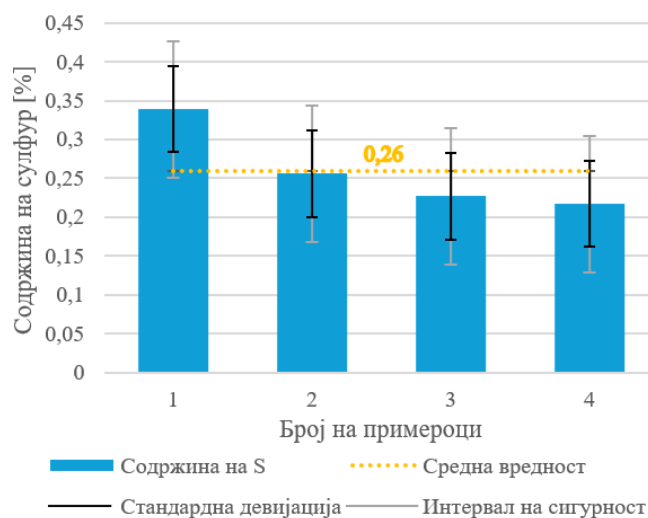
Слика 5.4. Содржина на азот во МасМ2



Слика 5.5. Содржина на јаглерод во MacM2



Слика 5.6. Содржина на водород во MacM2



Слика 5.7. Содржина на сулфур во MacM2

Содржината на азот во MacM2 е претставена на Слика 5.4 и се движи од 0,6909% до 1,036% кај четирите примероци, а просечната вредност изнесува 0,84%. Стандардната девијација има вредност од $\pm 0,153\%$, додека интервалот на доверба е во рамки на $\pm 0,24\%$. Стандардната девијација претставува околу 18% од просекот, што укажува на умерена варијабилност во содржината на азот помеѓу примероците. Од друга страна, интервалот на доверба е околу 29% од просекот, што е релативно широко и води до одредена неизвесност во проценката (најверојатно поради ограничениот број на мерења).

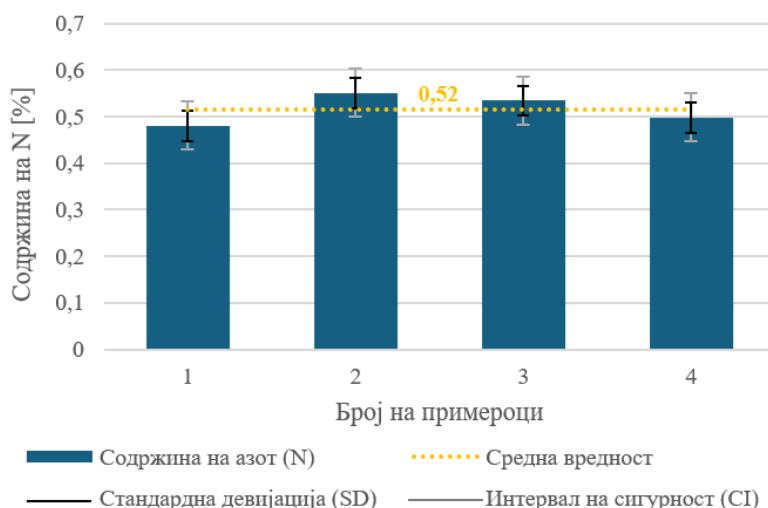
Содржината на јаглерод во MacM2 е дадена на Слика 5.5 и се движи од 51,947% до 54,31%, а просечната вредност изнесува 53,12%. Интервалот на стандардната девијација е $\pm 1,082\%$, а интервалот на доверба изнесува $\pm 1,72\%$. Бидејќи стандардната

девијација е околу 2% од просекот, тоа укажува на мала варијабилност, односно резултатите се компактно групирани околу просечната вредност. Интервалот на доверба е околу 3% од просекот, што покажува ниска до умерена неизвесност.

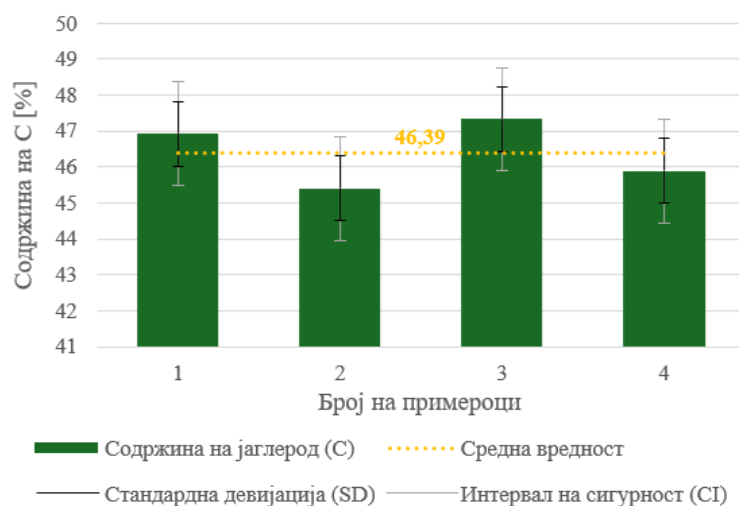
Содржината на водород во просушениот примерок на комунален отпад МасМ2 е прикажана на Слика 5.6 и е во интервал од 7,492% до 7,844%, при што просечната вредност е 7,69%. Стандардната девијација изнесува $\pm 0,147\%$, што укажува на мала варијабилност во содржината на водород помеѓу примероците, а интервалот на доверба изнесува $\pm 0,23\%$, што покажува релативно тесен интервал и висока сигурност на податоците.

Содржината на сулфур во МасМ2 варира од 0,217% до 0,339%, со средна вредност од 0,26%, што може да се види на Слика 5.7. Вредностите на стандардната девијација се во интервал од $\pm 0,055\%$, а интервалот на доверба изнесува $\pm 0,09\%$. Стандардната девијација е 21,15% од средната вредност, што укажува на умерена варијабилност во содржината на сулфур кај примероците. Интервалот на доверба е 33,85% од просекот, што е релативно широко и значи дека постои неизвесност при проценката на вистинската популациска средина. Една од причините за ова е што при работа со многу мали нумерички вредности, дури и мали варијации може да резултираат со релативно висок процент на стандардна девијација и интервал на доверба во однос на просекот.

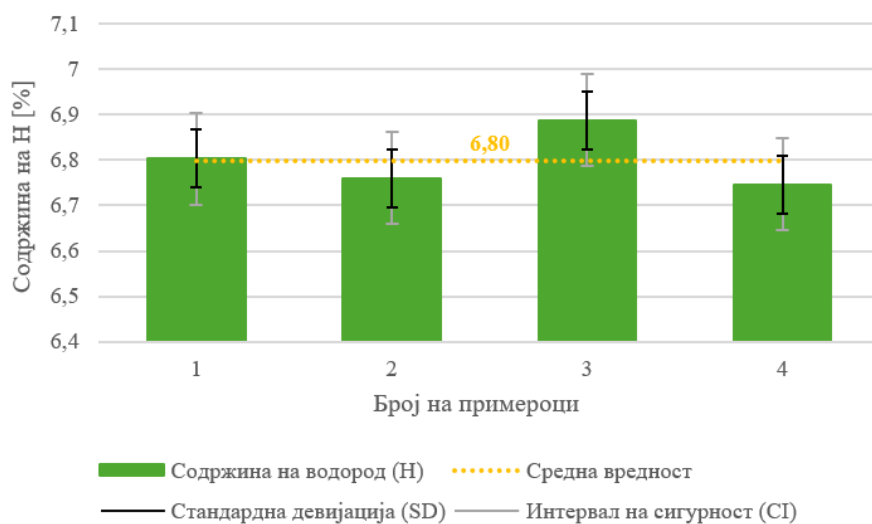
Просечните вредности за сите компоненти (N, C, H, S) во примерокот МасМ2 се во рамките на интервалот на стандардната девијација. Оваа конзистентност укажува дека варијабилноста на податоците не е екстремна и дека просечната вредност претставува разумна репрезентација на податочниот сет. Сепак, само јаглеродот се наоѓа во рамките на интервалот на доверба интервалот, што значи дека проценката за јаглерод е статистички попрецизна и понадежна во споредба со другите елементи.



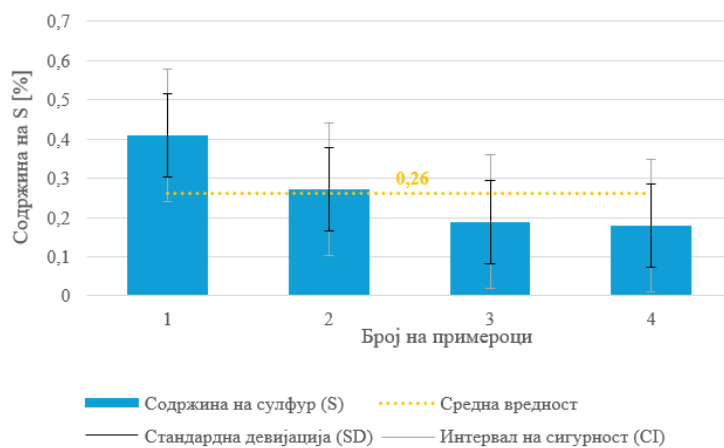
Слика 5.8. Содржина на азот во PI2



Слика 5.9. Содржина на јаглерод во PI2



Слика 5.10. Содржина на водород во PI2



Слика 5.11. Содржина на сулфур во PI2

Содржината на азот во примерокот P12 е дадена на Слика 5.8 и се движи во интервал од околу 0,4803% до 0,5512%, каде просечната вредност изнесува 0,52%. Стандардната девијација е $\pm 0,033\%$, што претставува 6,25% од просекот, покажувајќи умерена варијабилност. Интервалот на сигурност изнесува $\pm 0,05\%$, односно околу 9,94% од просекот. Овој интервал релативно широк спореден со стандардната девијација што може да сугерира на мала големина на примерокот која влијае на довербата (сигурноста).

Содржината на јаглерод во P12 е претставена на Слика 5.9 и се движи од 45,395% до 47,339%, а просечната вредност изнесува 46,39%. Интервалот на стандардната девијација е $\pm 0,901\%$, а интервалот на сигурност изнесува $\pm 1,43\%$. Стандардната девијација е 1,94% од просекот, тоа укажува на мала варијабилност помеѓу индивидуалните мерења, односно дека вредностите се конзистентни. Интервалот на сигурност е 3,09% од просекот, што значи дека проценката на вистинската средина е доста веродостојна. Свкупно, содржината на јаглерод покажува мала варијација и висока доверба во мерењето, односно прецизен и стабилен резултат.

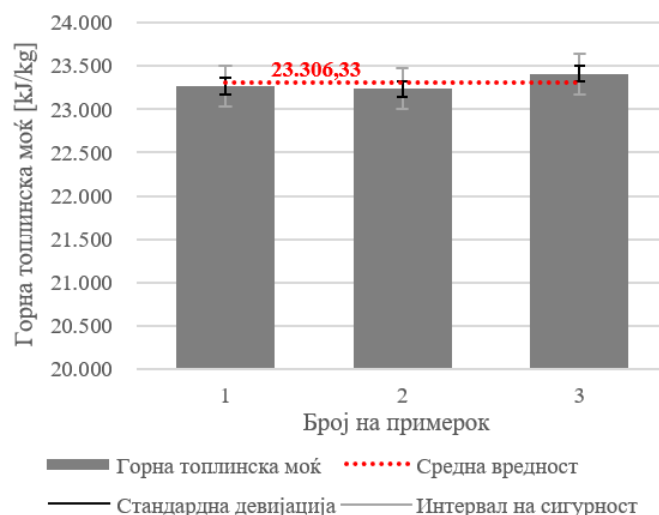
Содржината на водород во отпадот P12 е во интервал од 6,7462% до 6,8878%, при што просечната вредност беше 6,8%, што се гледа од Слика 5.10. Стандардната девијација изнесува $\pm 0,064\%$, што укажува на многу мала варијабилност во содржината на водород помеѓу примероците, односно индивидуалните мерења се многу конзистентни. Додека, интервалот на сигурност изнесува $\pm 0,1\%$, што значи дека проценката на вистинската средина е многу прецизна.

Содржината на сулфур во P12 варира од 0,179% до 0,41%, со средна вредност од 0,26%, што може да се види на Слика 5.11. Вредностите на стандардната девијација се во интервал од $\pm 0,107\%$, а интервалот на сигурност изнесува $\pm 0,17\%$. Стандардната девијација е 41,15% од средната вредност, што укажува на многу висока варијабилност во содржината на сулфур кај примероците. Интервалот на сигурност е 65,38% од просекот, што покажува многу мала доверба во прецизноста на средната вредност. И тука се појавува истата ситуација како кај отпадот МасМ2, што може да се објасни со тоа дека самата вредност за сулфур во примерокот е многу мала и мали варијации резултираат со висок процент на стандардна девијација и интервал на сигурност во однос на просекот.

Топлинска моќ

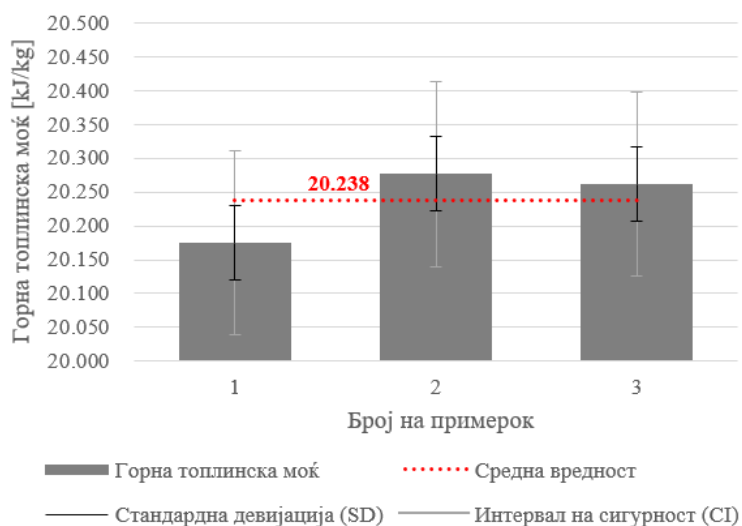
Резултатите за горната топлинска моќ на примерокот МасМ2 се прикажани на Слика 5.12. Вредностите за топлинската моќ за трите мерења се движат од 23.236 до 23.414 kJ/kg. Просечната вредност изнесува 23.306,33 kJ/kg и е прикажана со црвена непрекината линија на Сликата.

Стандардната девијација од $\pm 94,691$ kJ/kg е во релативно тесен интервал, што укажува дека вредностите не се разликуваат значително меѓу примероците. Сепак, интервалот на доверба од $\pm 235,24$ kJ/kg е забележително поширок, што укажува на одредена неизвесност во проценката на вистинската средна вредност за топлинската моќ. Поголемиот интервал на доверба може да биде резултат на мал број на мерења, мали хетерогености во составот на материјалот, како и на неизвесности во мерењето или варијации во експерименталните услови.



Слика 5.12. Топлинска моќ на MacM2

На Слика 5.13 дадени се резултатите кои се добиени за топлинската моќ за примерокот P12. Средната вредност изнесува 20.238,00 kJ/kg за вредности во интервалот од 20.175,00 kJ/kg до 20.277,00 kJ/kg. Стандардната девијација е $\pm 55,073$ kJ/kg и изнесува само $\sim 0,27\%$ од средната вредност, што покажува дека поединечните мерења се многу блиску до просекот. Ова ја одразува малата варијација во сетот на податоци. Интервалот на доверба е $\pm 136,82$ kJ/kg и претставува околу $0,68\%$ од средната вредност, што укажува на голема доверба во точноста на средната вредност.

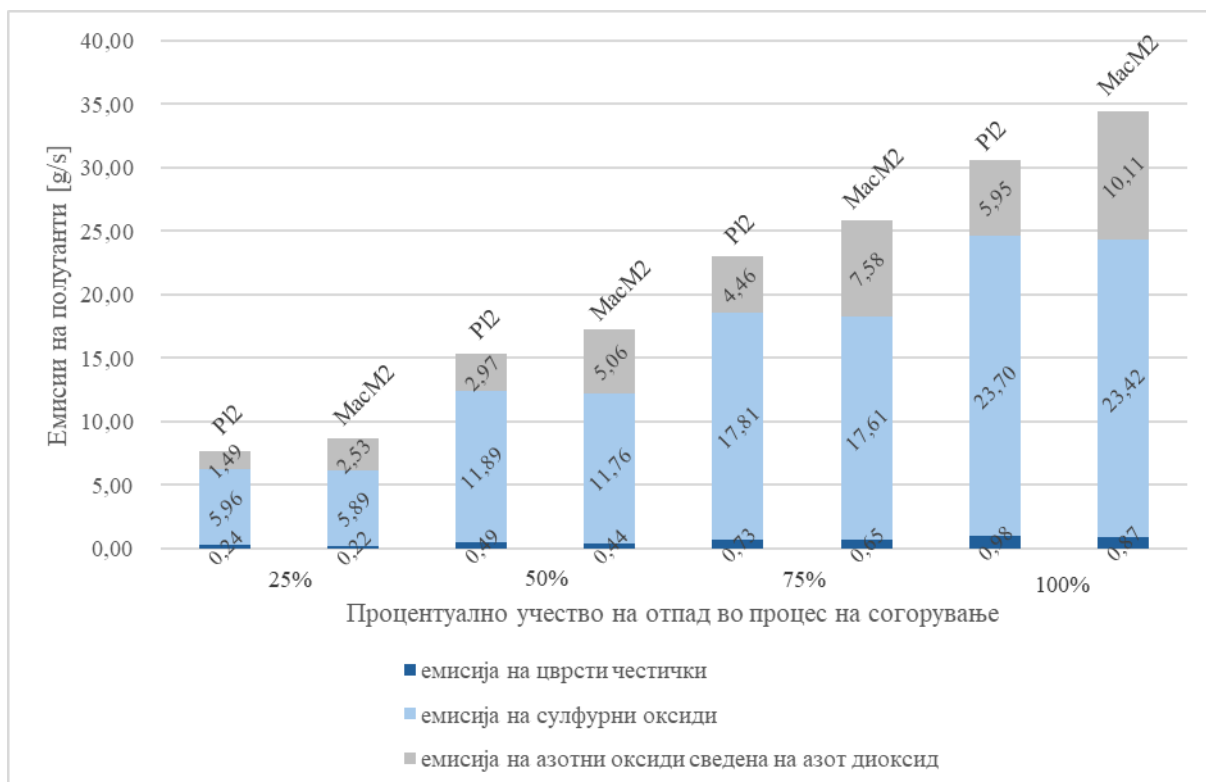


Слика 5.13. Топлинска моќ на P12

5.1.3. Резултати добиени за емисии на штетни загадувачи

На Слика 5.14 се дадени емисиите од различните полутанти кои се формираат во процесот на согорување отпад при различен процентуален удел за двата типа разгледуван и анализиран отпад, P12 и MacM2. Графикот прикажува емисии на три

главни групи загадувачи: цврсти честички, сулфурни оксиди (SO_x) и азотни оксиди (NO_x , сведени на NO_2), изразени во единица g/s. За секој тип отпад се разгледуваат четири сценарија според процентуалниот удел на отпадот во вкупната количина за согорување. Процентуалните удели се 25%, 50%, 75% и 100%, што одговараат на реални количини на отпад од 39.799 t/год., 79.598 t/год., 119.397 t/год. и 159.196 t/год., соодветно. Последната вредност е максималната количина отпад која се депонира на депонијата Дрисла на годишно ниво (за 2023 година) и е земена како референтна вредност во пресметките.



Слика 5.14. Емисии на полутанти од согорување отпад P12 и MacM2

Емисијата на цврсти честички е прикажана со темносина боја и е најниска од трите анализирани групи загадувачи. Вредностите се движат од приближно 0,2 g/s до скоро 1,0 g/s, со минимални разлики меѓу P12 и MacM2. Ниското ниво на емисии на цврсти честички укажува на висока ефикасност на системот за отпрашување, постигната со употреба на филтри со ткаенина или електростатски сепаратори. Ова е очекуван резултат во современи инсинератори каде што контролата на прашина е добро развиена и стандардизирана.

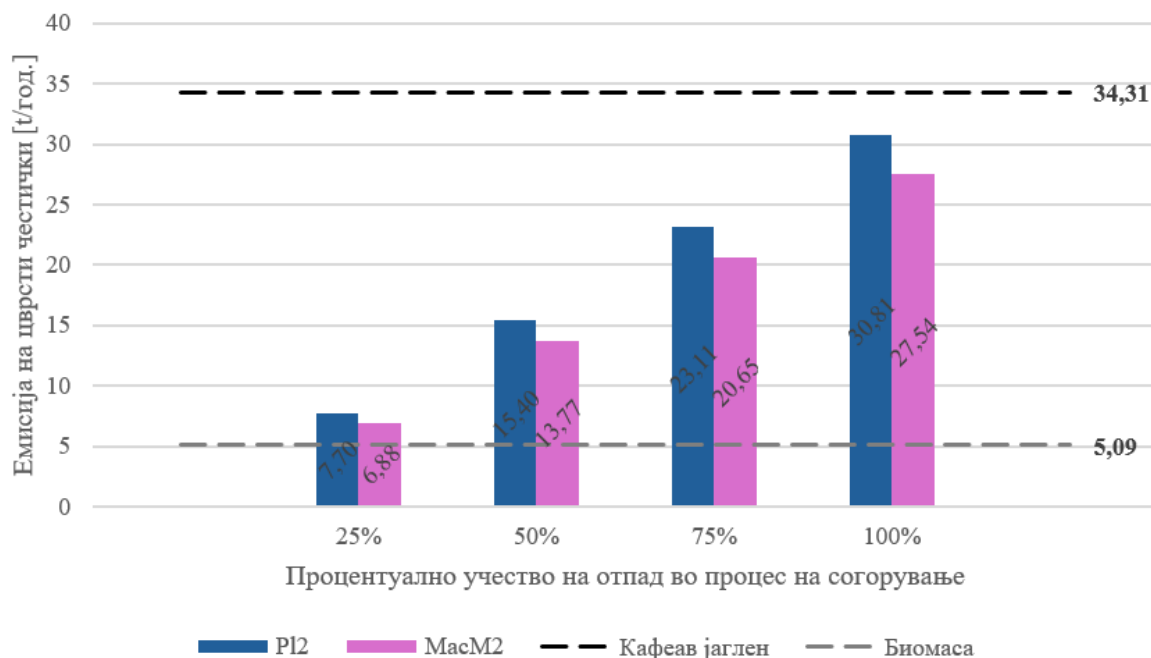
Сулфурните оксиди се прикажани во светлосина боја и претставуваат најголем дел од вкупните емисии во сите сценарија. Нивните вредности значително се зголемуваат со раст на процентуалниот удел на согорен отпад. На пример, при 100% удел, емисијата на SO_x кај P12 изнесува 23,70 g/s, додека кај MacM2 е 23,42 g/s. Сличноста во емисиите кај двата типа отпад укажува на слична содржина на сулфур присутна во горивото (P12 има 0,262%, додека MacM2 содржи 0,259% сулфур), како и на сличен термички одговор во однос на создавање на сулфурни соединенија.

Азотните оксиди (сведени на NO_2), прикажани во сива боја, се втората најзначајна компонента. Кај P12, нивната емисија се движи од 1,49 до 5,95 g/s, додека кај MacM2 од

2,53 до 10,11 g/s. Иако не доминираат во вкупната количина на емисии, тие се еколошки значајни поради нивниот придонес во формирањето на тропосферен озон и киселински дожд. Повисоките вредности кај МасМ2 се должат на поголема содржина на азотни органски материи во составот на отпадот. Отсуството на технологии за редукција на NO_x емисии (како селективна каталитичка редукција) дополнително го засилува нивното присуство во издувните гасови.

Во споредба на двата типа отпад, се забележуваат релативно слични вредности за сулфурните оксиди, што е резултат на споредливиот состав во однос на сулфурните компоненти во состав на горивото. Емисиите на азотни оксиди се поизразени кај МасМ2 во сите сценарија, со оглед на тоа дека овој отпад има поголема содржина на азот со 0,837%, споредено со Р12 кој има 0,516% азот во составот. Кај цврстите честички нема значајни разлики, што дополнително потврдува дека тие се ефикасно отстранети од ист тип филтерски систем, независно од видот на отпадот и од уделот на минерална маса во истиот.

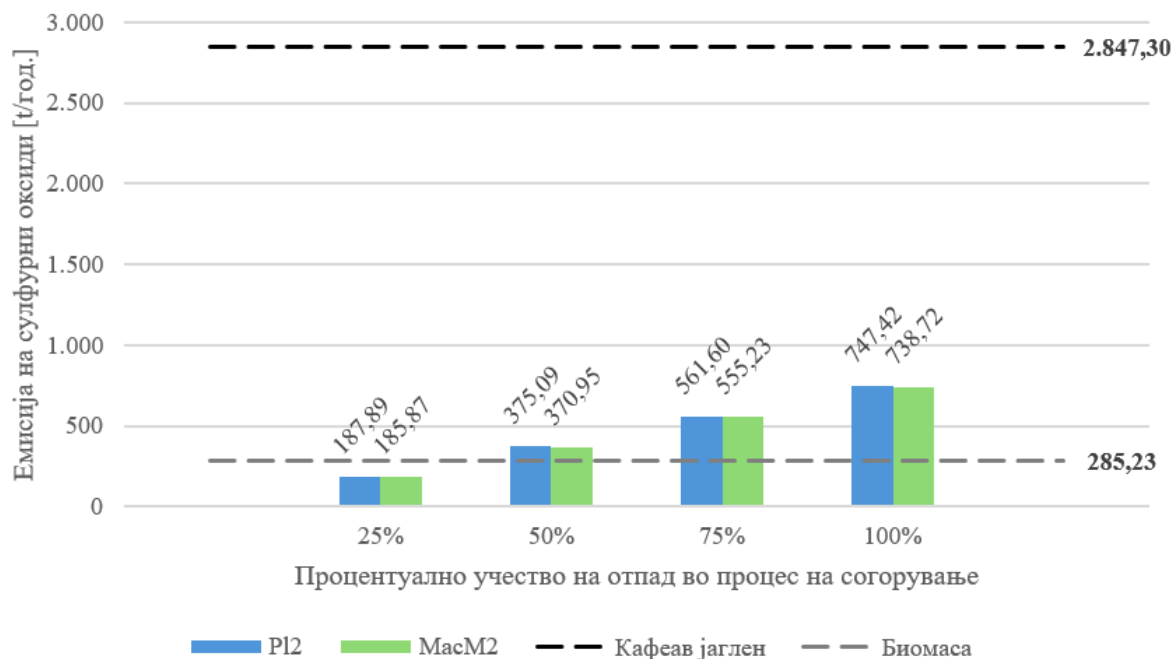
На следните дијаграми од Слика 5.15 до Слика 5.17 се претставени годишните емисии на штетни загадувачи од процесот на согорување на разгледуваните отпадни материи, споредени со класично фосилно гориво, како камен јаглен и обновливо органско гориво, како биомаса. На сите дијаграми на апсцисната оска е даден процентуаланиот удел на гориво во процесот на согорување, каде 25% е 39.799 t/год., 50% изнесува 79.598 t/год., 75% е 119.397 t/год. и 100% кореспондира на 159.196 t/год. Со нанесените колони на апсцисната оска се обележани емисиите од различните полутанти при различен удел на гориво, додека со испрекинати линии се максималните емисии при 100% удел на гориво од кафеав јаглен и биомаса како референца.



Слика 5.15. Годишни емисии на цврсти честички од согорување на отпад (P12 и МасМ2), јаглен и биомаса

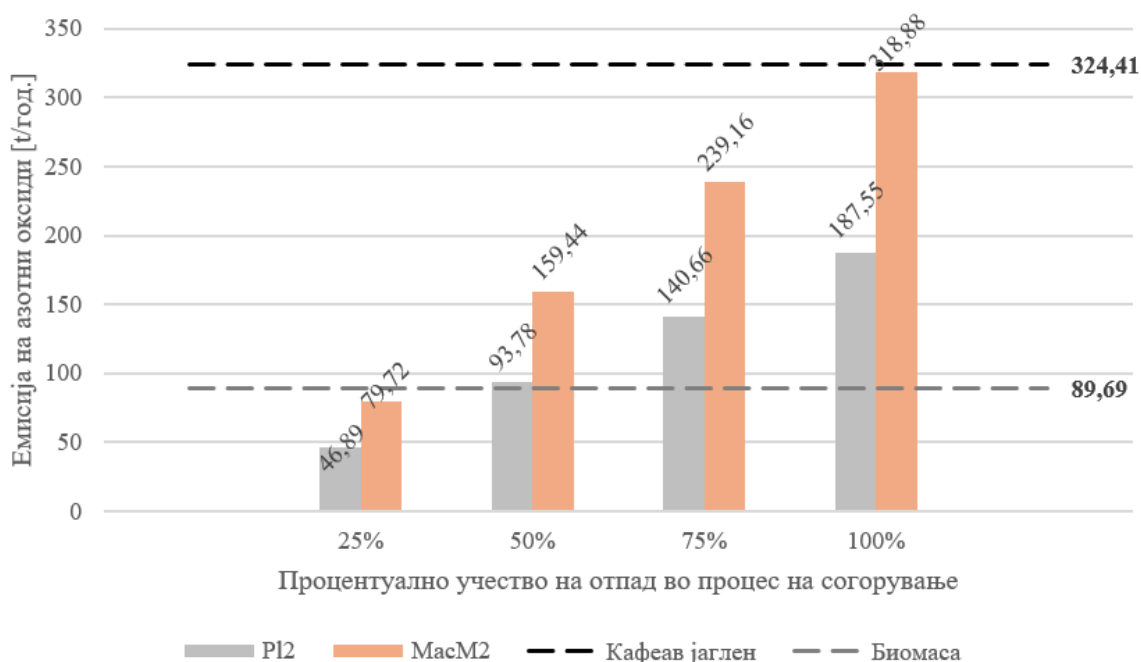
На Слика 5.15 се претставени годишните емисии на цврсти честички од инсенерација на отпад, кафеав јаглен и биомаса, при различен процентен удел на

горивото во процесот на согорување. Максималните годишни емисии на цврсти честички се од согорување кафеав јаглен, каде вредноста на емитирани честички при максимално учество на горивото во процесот на согорување од 100% изнесува 34,31 t/год. Потоа следуваат емисиите од двата типа отпад, каде P12 има минимално повисоки емисии со 30,81 t/год., а МасМ2 емитира 27,54 t/год. цврсти честички. Најниски емисии на пепел и резидуи има при согорување на биомаса кои изнесуваат 5,09 t/год. Емитираните вредности од двата типа отпад, како и биомасата, се релативно ниски, што укажува на функционален систем за филтрирање.



Слика 5.16. Годишни емисии на сулфурни оксиди од согорување отпад (P12 и МасМ2), јаглен и биомаса

На Слика 5.16 се претставени годишните емисии на сулфурни оксиди кои се емитираат при согорување различни видови горива при нивен различен удел. Сулфурните оксиди се најзначајниот загадувач во вкупните емисии. Кај фосилното гориво достигнуваат до вредност од околу 2.850 t/год. Кај останатите обновливи горива се значително пониски, кај отпадот достигнуваат до речиси 750 t/год., а кај биомасата само до 285 t/год. Причината за високите емисии на SO_x кај кафеавиот јаглен е неговиот хемиски состав, кој природно содржи повеќе сулфур (во форма на сулфиди, сулфати или органски врзан сулфур). Биомасата и отпадот имаат многу помала сулфурна содржина, со 0,1% и 0,26% соодветно. Причина за поголемото присуство сулфур во отпадот е потенцијалната содржина на сулфурни компоненти како гума, пластика или некои индустриски остатоци. Во овој контекст, замената на јагленот со отпад како гориво прикажува поволни резултати, иако апсолутните емисии не се занемарливи.



Слика 5.17. Годишни емисии на азотни оксиди од согорување отпад (PI2 и MacM2), јаглен и биомаса

Слика 5.17 ги претставува годишните емисии на азотни оксиди од четири различни горива вклучени во процесот на согорување при исти работни услови. Повторно највисоките емисии се од кафеав јаглен во износ од 324,41 t/год. Многу блиску до нив се и емисиите од MacM2 кои максимално изнесуваат 318,88 t/год. Пониски вредности се забележуваат кај другиот тип отпад PI2 каде емисиите се 187,55 t/год., а од биомаса се значително пониски 89,69 t/год. Главна причина за повисока емисија на NO_x од кафеав јаглен е високата температура на согорување на горивото, што поттикнува формирање на термички NO_x , кој настанува од реакцијата на азотот (N_2) од воздухот со кислород при висока температура. Додека, емисијата кај отпадот MacM е висока поради содржината на азот присутна во горивото со 0,84%. Биомасата пак обично содржи повеќе влага и помалку азот, а согорувањето е на пониска температура, што намалува создавање термички NO_x . Освен тоа, биомасата има помала концентрација на органски азот, па емисијата на горивни NO_x е исто така помала.

5.2. Споредбена анализа

Според направените анализи може да се дефинира елементарната анализа на комуналниот цврст отпад која го дава квантитативниот износ на сите елементи што се содржани во горивото: јаглерод, водород, кислород, азот, согорлив сулфур, минерални материи (пепел) и влага. Елементарната анализа за MacM е дадена во Табела 5.1, додека за PI е во Табела 5.2.

Табела 5.1. Елементарна анализа на MacM2 (во масени%)

N,%	C,%	H,%	S,%	O,%	A,%	W,%
0,84	53,12	7,69	0,26	27,57	7,76	2,76

Табела 5.2. Елементарна анализа на Pl2 (во масени%)

N,%	C,%	H,%	S,%	O,%	A,%	W,%
0,52	46,39	6,80	0,26	33,90	8,90	3,23

Од сите компоненти во составот на горивото согорливи се: јаглерод, водород и сулфур, додека азотот и кислородот не се сметаат за согорливи компоненти, но влијаат врз ефикасноста на процесот на согорување. Пепелта е инертен и несогорлив материјал кој останува како остаток, односно несогорен дел од процесот. Влагата го намалува ефективното производство на енергија, бидејќи енергијата се троши за испарување на истата.

Анализираниот материјал МасМ покажува висока содржина на јаглерод (53,12%) и водород (7,69%), што укажува на силен енергетски потенцијал за термичка конверзија, додека умерената содржина на кислород (27,57%) малку ја намалува неговата калориска вредност. Ниските нивоа на азот (0,84%) и сулфур (0,26%) укажуваат на ниски емисии на NO_x и SO₂ за време на согорувањето. Дополнително, содржината на пепел (7,76%) е ниска до умерена, намалувајќи го потенцијалот за формирање згура, а ниската содржина на влага (2,76%) ја зголемува ефикасноста на согорувањето. Генерално, материјалот покажува добра соодветност за обновување на енергија, со ниско влијание врз животната средина (според тестираните параметри).

Материјалот Pl покажува висока содржина на јаглерод (46,39%) и водород (6,80%), што укажува на присуство на органски компоненти кои можат да бидат енергетски вредни. Кислородот е исто така значително застапен (33,90%), што може да влијае на вкупната енергетска рамнотежа на материјалот. Содржината на азот (0,52%) и сулфур (0,26%) е ниска, што може да значи дека при согорување, не би се очекувале високи емисии на загадувачки гасови како NO_x и SO₂. Минералната содржина изнесува 8,90%, што е умерена вредност и може да влијае на количината на цврст остаток по термичка обработка. Влажноста е ниска (3,23%), што укажува дека материјалот е претходно сушен. Генерално, според анализираните параметри, отпадот покажува соодветни карактеристики за негово користење како алтернативно гориво со минимални еколошки последици.

Дополнително, врз основа на изработените анализи направена е и техничка анализа на отпадот и истата е дадена во Табела 5.3 и Табела 5.4.

Табела 5.3. Техничка анализа на МасМ2 (во масени%)

A,%	C _{fix} ,%	V,%	W,%
7,76	10,06	79,42	2,76

Табела 5.4. Техничка анализа на Pl2 (во масени%)

A,%	C _{fix} ,%	V,%	W,%
8,90	10,90	76,97	3,23

5.3. Дискусија

Во понатамошниот текст е претставена критичка анализа на добиените резултати, преку нивна споредба со референтни вредности и релевантна литература, со цел да се оцени валидноста на истражувањето и да се идентификуваат клучните заклучоци и можни насоки за понатамошни истражувања.

5.3.1. Анализа на резултатите добиени за отпадот МасМ2

Од сите спроведени анализи на просушениот цврст комунален отпад од Македонија и Полска, добиени се следните наоди.

Просечната густина на двете фракции од цврст комунален отпад (МасМ30 и МасМ2) беше приближно 1.400 kg/m^3 , значително над типичниот опсег за нетретиралиот отпад, како што е наведено во трудовите во понатамошниот текст. Во земјите со високи приходи, густината на цврстиот комунален отпад обично се движи од 100 до 150 kg/m^3 ; во земјите со средни приходи, оваа густина се зголемува помеѓу 175 и 330 kg/m^3 [146, 147]; додека во земјите со ниски приходи, се проценува дека е помеѓу 300 и 600 kg/m^3 [148, 149]. Според податоците од Државниот завод за статистика на Северна Македонија, составот на генериралиот цврст комунален отпад е составен главно од органски отпад, со 49%; проследено со пластичен отпад, со 19%; хартија, со 15%; стакло, со околу 5%; метал и текстил, со помалку од 3%; и гума, со помалку од 2% [29]. Високата вредност на густината може да се припише на големата количина на органски отпад присутен во вкупниот цврст комунален отпад (скоро половина од неговиот состав), имајќи предвид дека депонираниот отпад од храна има густина од 1.300 до 1.900 kg/m^3 , како што е наведено во референцата [150]. Густината на отпадот може индиректно да влијае на неговите запаливи карактеристики. Високата густина го зголемува производството на енергија, бидејќи содржи повеќе запаливи компоненти по единица волумен. Смесата е компактна, што потенцијално ја подобрува конзистентноста во снабдувањето со гориво на системите за согорување. Сепак, погустот отпад може да го ограничи протокот на воздух и да ја задржи влагата, што бара дополнителна претходна обработка пред согорување.

Просечната густина на цврстиот комунален отпад со помала големина на честичките МасМ2 е $1,4101 \text{ g/cm}^3$, додека оној со поголеми честички МасМ30 има помала просечна густина од $1,396 \text{ g/cm}^3$. Причината за ова може да биде поголемата компактност кај помалите честички со што се намалуваат празнините помеѓу деловите. Помалите честички можат поефикасно да ги пополнат празнините меѓу другите честички, што доведува до поголема густина на пакување. Дополнително, пофината фракција има поголема површина по единица волумен, што овозможува подобра адхезија или кохезија, што може да придонесе за зголемена густина. Додека поголемите честички создаваат повеќе празнини, неправилни простори и се лабаво распоредени, намалувајќи ја вкупната густина.

Просечниот коефициент на пропустливост на вода на просушениот цврст комунален отпад МасМ30 беше околу $2,47 \times 10^{-6} \text{ m/s}$, што укажува на ниска до умерено ниска пропустливост на вода, што го прави материјалот водоотпорен и го минимизира истекувањето на загадувачи во околната почва и подземните води. Сепак, ниската пропустливост го зголемува задржувањето на влагата, намалувајќи ја калориската вредност, како што е наведено во референцата [151]. Ова бара претходна подготовка на отпадот, како што е сушење, пред да се внесе во печката. Исто така, може да се забележи дека коефициентот на пропустливост на вода на материјалот се намалува со зголемување

на хидростатскиот притисок. Ова сугерира дека можеби се случиле неколку феномени, како што е потврдено во референцата [152], како што се компресија на структурата на порите што ги намалува водните патишта, намалена поврзаност на порите што ги блокира каналите или структурни или хемиски промени предизвикани во материјалот, менувајќи ги неговите својства на пропустливост.

Разгледуваниот комунален цврст отпад има висок топлински потенцијал од околу 23.300,00 kJ/kg поради неговата значителна содржина на јаглерод и водород, ниско ниво на сулфур и ниски нивоа на влага. Оваа вредност е повисока од типичниот ранг на топлинската моќ на комунален отпад (од 7.000,00 kJ/kg до 15.000,00 kJ/kg) и е приближна до топлинската моќ на цврстите фосилни горива. Недостатокот на комуналниот цврст отпад споредено со другите фосилни горива е во непостојаниот карактер на составот на отпадот и неговата хетерогена структура, што може значително да влијае на топлинската моќ на истиот.

Просечните измерени вредности за азот, јаглерод, водород и сулфур во МасМ2 се 0,84%, 53,12%, 7,69% и 0,26%, а стандардните девијации за секој од овие параметри се $\pm 0,153\%$, $\pm 1,082\%$, $\pm 0,147\%$ и $\pm 0,055\%$, соодветно. Користејќи ја стандардната девијација, коефициентот на варијација беше пресметан за секој параметар и изнесуваше $\pm 18,2$ за азот, $\pm 2,0$ за јаглерод, $\pm 1,9$ за водород и $\pm 21,3$ за сулфур. Овие вредности даваат увид во релативната варијабилност на резултатите од секој примерок за различни параметри и помагаат да се процени веродостојноста на мерењето [153]. Јаглеродот и водородот имаат мала варијабилност, што значи дека мерењата се прецизни и повторувачки, а составот на цврст отпад во однос на овие параметри е многу конзистентен, додека азотот и сулфурот имаат умерена до висока варијабилност и укажува на некои флукуации помеѓу примероците. Објаснувањето во врска со овие разлики во варијабилноста на различните параметри е поврзано со концентрацијата на секоја компонента во примерокот, хетерогеноста на примерокот и чувствителноста на мерењето. Јаглеродот и водородот сочинуваат голем дел од составот на примерокот, што доведува до постабилни мерења. Исто така, тие се структурни компоненти на органската материја во цврстиот комунален отпад, што значи дека се постојано присутни. Надворешните фактори имаат помало влијание врз нивната застапеност во цврстиот комунален отпад. Сулфурот и азотот се присутни во многу помали количини од јаглеродот и водородот, па дури и малите промени во нивната содржина создаваат големи релативни варијации. Хетерогеноста на примерокот влијае врз нивната содржина. Доколку примерокот содржи повеќе пластика, содржината на сулфур е поголема, додека поголем дел од отпадот од храна резултира со поголема содржина на азот, како што е наведено во [154]. Исто така, инструментите што се користат за откривање на помали концентрации имаат тенденција да имаат малку повисоки граници на грешка, зголемувајќи ја варијабилноста. Интервалот на доверба за секој параметар во просушениот комунален цврст отпад се $\pm 0,2426\%$ за азот, $\pm 1,7210\%$ за јаглерод, $\pm 0,2347\%$ за водород и $\pm 0,0881\%$ за сулфур. Толкувањето би било дека азотот, водородот и сулфурот имаат мала неизвесност, што укажува на попрецизни и посигурни мерења, додека јаглеродот има најширок интервал на доверба, што значи дека неговите мерења се помалку прецизни и флукуираат повеќе. Ова можеби се должи на природните флукуации на органската материја во разгледуваниот отпад.

Во однос на еколошкиот аспект, емисиите на цврсти честички се релативно ниски кај двата типа отпад, со тоа што се пониски кај отпадот МасМ2 споредено со Р12, каде максималните вредности изнесуваат 27,54 t/год. и 30,81 t/год. соодветно. Влијанието на содржината на пепел во горивото врз формирањето на емисии од цврсти честички е претставено во [155], каде е наведено дека содржината на пепел во цврстите горива

значително влијание врз содржината на PM_{10} во издувните гасови. Тоа се потврдува и во овој случај каде отпадот МасМ2 има пониска содржина на пепел во својот состав споредено со Р12 и истите изнесуваат 7,76% и 8,90% соодветно. Овие вредности на емисии од цврсти честички се во очекуваните граници за модерни инсенератори, каде степенот на отпепелување на гасовите е прилично висок.

Сулфурните оксиди имаат високи апсолутни вредности кај двата типа отпад, при што македонскиот отпад повторно има минимално помали емисии од полскиот, во вредност од 738,72 t/год. наспроти 747,42 t/год. И кај овие емисии големо влијание врз формирањето на сулфурните оксиди во издувните гасови им присуството на сулфур во горивото и кај двата типа отпад тоа е идентично и изнесува 0,26%. Овие вредности на емисии бараат задолжителна примена на технологии за неутрализација, односно поставување соодветна опрема за пречистување на гасовите. Сепак, замената на јагленот со отпад како гориво прикажува поволни резултати, што е промовирано како метод во [156].

Азотните оксиди се со помал удел во вкупните емисии, меѓутоа се значително поизразени кај отпадот МасМ2 споредено со Р12, каде максимално изнесуваат 318,88 t/год. споредено со 187,55 t/год. Позастапени се горивните и брзите азотни оксиди во продуктите на согорување споредено со термичките азотни оксиди. Тие директно зависат од учеството на азотот во горивото и температурата при која се одвива согорувањето. Овие загадувачи претставуваат значителен еколошки ризик и бараат целна редукција [157] со примена на примарни и секундарни методи. Примарните методи вклучуваат снижување на максималната температура во ложиштето, намалување на концентрацијата на кислород во зоните на реакција, намалување на времето на престој на гасовите во зоните со високи температури и примена на специјални технологии на согорување. Додека, секундарните опфаќаат примена на технологии за врзување или редукција на азотните оксиди содржини во излезните гасови, надвор од котлите, како селективна не/каталитичка редукција.

Содржината на фиксен јаглерод од 10,06% е релативно мала во споредба со традиционалните цврсти горива како јаглен или биомаса и ова сугерира дека најголем дел од запаливиот материјал во отпадот е испрлив, како што се покажува со содржината на испарливи материи од 79,42%. Ова укажува дека при согорување на отпадот доаѓа до брзо палење и интензивно согорување, но помалку одржливо горење, од причина што цврстиот јаглерод кој останува по согорувањето е минимален што не овозможува согорување со тек на времето. Тоа бара контрола на доводот на воздух за да се обезбеди целосна оксидација и да се спречи формирање на несогорени соединенија. Ниската содржина на пепел од 7,76% значи помало присуство на инертни материјали, подобар пренос на топлина и помали трошоци за одржување, поради помало валкање и затнување на опремата. Помалата содржина на пепел во отпадот значи помала количина на пепел како нус производ, со дополнителна можност за нејзина пренамена во градежни или други примени (ако е инертна и нетоксична).

5.3.2. Анализа на резултатите добиени за отпадот Р12

Средната вредност на коефициентот на водопропустливост на отпадот Р130 изнесува околу $7,36 \times 10^{-7}$ m/s и преставува ниска пропустливост на вода низ материјалот, што го прави материјалот водоотпорен, а тоа го минимизира истекувањето на загадувачите во околната почва и подземните води. Меѓутоа, ниската вредност на пропустливоста го зголемува задржувањето на влага, а тоа ја намалува топлинската моќ. Ова доведува до потребата од претходна подготовка на отпадот пред неговото

внесување во ложиштето, односно негово сушење. Дополнително, вредностите покажуваат дека водопропустливоста се намалува со зголемување на притисокот до околу 1 бар, по што останува релативно стабилна до 1,8 бари. Ова почетно намалување може да се објасни со затворање на порите и компактирање на материјалот, што го намалува просторот низ кој може да тече водата. Стабилизацијата што следува укажува дека структурата на материјалот станува помалку чувствителна на дополнително зголемување на притисокот. Мало зголемување на вредноста при 2 бари може да биде резултат на достигнување на границата на набивање или почеток на структурни промени како микропукнатини, што повторно овозможува мала количина вода да помине.

Топлинската моќ на примерокот P12 е околу 20.238,00 kJ/kg, при што индивидуалните вредности се движат во тесен интервал од 20.175,00 до 20.277,00 kJ/kg. Ова укажува на стабилна енергетска вредност и потврдува дека материјалот има потенцијал за употреба како гориво, со предвидливи карактеристики при согорување.

Содржината на азот во примерокот P12 се движи од 0,4803% до 0,5512%, со просечна вредност од 0,52%. Овој интервал покажува дека азотот е присутен во умерени количини и со релативно стабилна концентрација. Содржината на јаглерод се движи помеѓу 45,395% и 47,339%, со просек од 46,39%. Вредностите се блиску една до друга, што укажува на стабилна и значајна застапеност на јаглерод во материјалот. Ова најверојатно е поврзано со органската природа на примерокот и неговото влијание врз топлинската вредност. Водородот исто така покажува конзистентност, со вредности од 6,7462% до 6,8878% и просечна вредност од 6,8%. Овие мерења потврдуваат дека водородот е рамномерно распределен во примерокот и придонесува кон енергетскиот потенцијал на материјалот. Сулфурот, пак, се појавува во количини од 0,179% до 0,41%, со просек од 0,26%. Иако концентрацијата е релативно мала, разликите помеѓу поединечните мерења се поголеми, што може да се објасни со чувствителноста на мали концентрации на промени.

Од еколошка перспектива, емисиите на цврсти честички при согорување на двата типа комунален отпад се релативно ниски, при што отпадот MacM2 покажува пониски емисии во споредба со P12. Максималните годишни вредности се движат околу 27,54 t/год. за MacM2 и 30,81 t/год. за P12, што се во рамки на очекуваните граници за модерни инсинератори со добра филтрација. Цврстите честички, вклучувајќи ги PM₁₀ и PM_{2,5}, се опасни по здравјето, бидејќи можат да навлезат длабоко во респираторниот систем. Затоа, потребно е користење на високоефикасни отпепелувачи и филтри, како што се електростатски филтри или ткаенински филтер-кеси, за нивно ефективно отстранување од издувните гасови.

Во однос на сулфурните оксиди и двата типа отпад покажуваат високи апсолутни емисии, при што MacM2 има незначително пониски вредности од P12, односно 738,72 t/год. наспроти 747,42 t/год. Овие соединенија се одговорни за киселински дождови и можат да предизвикаат долгорочно оштетување на екосистемите. Заради тоа, потребна е употреба на технологии за десулфуризација или примена на техниката за согорување во флуидизиран слој, со цел намалување на нивната концентрација пред испуштање во атмосферата.

Азотните оксиди имаат помал удел во вкупните емисии, но се еколошки значајни поради нивната улога во формирањето на озон во тропосферата и фотохемиски смог. Во споредба на отпадите, MacM2 покажува значајно повисоки вредности (318,88 t/год.) од P12 (187,55 t/год.). Со оглед на тоа што азотните оксиди претставуваат значителен ризик за квалитетот на воздухот и јавното здравје, неопходна е нивна целна редукција преку техники како што се селективна некаталитичка или каталитичка редукција.

Присуството на јаглерод (46,39%) и водород (6,8%) укажува на доминантна органска компонента во составот, која иако е енергетски корисна, при согорување сепак придонесува за емисии на CO₂. Сепак, ако материјалот потекнува од биоген отпад, овие емисии може да се сметаат како дел од затворен јаглероден циклус, со релативно помало влијание врз климатските промени во споредба со фосилните горива.

Содржината на пепел изнесува 8,90%, што укажува на присуство на неоргански, неризнични компоненти кои не горат, како минерални остатоци. Оваа вредност е релативно умерена и може да влијае на количината на остатоци по согорување. Фиксниот јаглерод е 10,90%, што го претставува делот од јаглеродот кој останува во материјалот по испарување на влагата и испарливите материи и укажува на делот што директно учествува во процесот на согорување. Оваа содржина на фиксен јаглерод во отпадот ни кажува дека при согорување на отпадот најголем дел од енергијата се ослободува во почетните фази на согорувањето. Дополнително, за инсенерација на овој тип комунален отпад потребно е да се применат горилници со флуидизиран слој. Испарливите материи (76,97%) се многу високи, што покажува дека материјалот содржи голема количина лесно испарливи компоненти кои брзо согоруваат. Висока содржина на испарливи материи често значи дека материјалот има добра реактивност при согорување, што е корисно за енергетско искористување. Влажноста (3,23%) е релативно ниска, што е позитивен показател, бидејќи висока влага ја намалува енергетската ефикасност при согорување. Ова укажува дека примерокот бил претходно подготвен за анализа со примена на постапка на сушење.

6. ЗАКЛУЧОЦИ, ПРЕПОРАКИ И НАСОКИ ЗА ПОНАТАМОШНИ ИСТРАЖУВАЊА

Моментално постојано се зборува за можноста за појава на енергетска криза, како и потребите за воведување обновливи извори на енергија во електроенергетскиот систем. Иако, отпадот применет како гориво не е типичен пример за обновлив ресурс на енергија, сепак со оглед на тоа дека непрекинато се генерира може да се смета како таков кога е применет во постројка за производство на енергија. Користењето на отпадот како гориво во постројки за генерирање на електрична и/или топлинска енергија овозможува не само намалување на количината на отпад кој завршува на депонии, туку и замена на дел од фосилните горива со алтернативен извор на енергија. На тој начин, технологиите “енергија-од-отпад” го претвораат остаточниот отпад во ресурс и придонесуваат за енергетска ефикасност, намалување на емисиите на стакленички гасови и одржливо управување со отпадот.

6.1. Заклучоци во однос на резултатите

Оваа студија го истакнува значителниот потенцијал на комуналниот цврст отпад кој се создава во поголеми урбани региони како одржлив и ефикасен извор на енергија за системте за добивање енергија од отпад. Клучните наоди покажуваат дека тој покажува поволни физички, хемиски и термички својства, кои колективно го позиционираат како остварлива алтернатива на традиционалните фосилни горива со одржување намалено негативно влијание врз животната средина.

Резултатите од истражувањето ги потврдуваат поставените хипотези и укажуваат на следниве заклучоци:

1. **Градскиот цврст отпад генериран во урбани средини, како што е градот Скопје, поседува соодветна калориска вредност што го прави применлив како ефикасен алтернативен извор на гориво.** Анализите покажуваат дека токму органските и пластичните компоненти најмногу придонесуваат за вкупниот енергетски потенцијал на отпадот, што ја потврдува хипотезата за неговата енергетска искористливост.
2. **Согорувањето на комуналниот цврст отпад од големите урбани зони, под оптимизирани технички и термички услови, може да овозможи значително производство на електрична и топлинска енергија.** Пресметките на топлинската моќност и содржината на испарливи и согорливи материји го потврдуваат потенцијалот за висока енергетска ефикасност при правилно дизајнирани постројки.
3. **Процесот на когенерација (комбинирано производство на топлинска и електрична енергија од отпад) резултира со најниско ниво на емисии на стакленички гасови, споредено со други методи на управување со отпад – како што се депонирање, неконтролирано согорување или ко-согорување во цементни печки.** Ова го потврдува потенцијалот на когенерацијата како најефикасен и најеколошки прифатлив метод за енергетско искористување на отпадот.

6.1.1. Отпад МасМ

Анализата на физичко-хемиските својства на цврстиот комунален отпад од примероците МасМ30 и МасМ2 покажува дека тој има значително повисока просечна густина ($\sim 1.400 \text{ kg/m}^3$) во споредба со стандардните вредности за нетретиран отпад во различни економски категории на држави. Оваа висока густина најверојатно се должи на доминантното присуство на органски компоненти (околу 49% од составот), особено отпад од храна, кој сам по себе има висока густина. Поголемата густина на помалите честички (МасМ2) во однос на поголемите (МасМ30) се објаснува со подобрата компактност и намалениот волумен на празнини, што овозможува погуста и поконзистентна маса.

Пропустливоста на вода кај МасМ30 е релативно ниска ($2,47 \times 10^{-6} \text{ m/s}$), што од една страна го прави материјалот водоотпорен и го ограничува истекувањето на загадувачи, но од друга страна овозможува задржување на влага, што негативно влијае на калориската вредност. Ова бара дополнителна претходна обработка, како што е сушење, за да се постигне ефикасно согорување. Дополнително, беше забележано дека со зголемување на хидростатскиот притисок, се намалува пропустливоста, што укажува на структурни промени во порите или на компресија на материјалот.

Разгледуваниот отпад покажа висок топлински потенцијал ($\sim 23.300 \text{ kJ/kg}$), што е значително над типичните вредности за отпад и се доближува до вредностите на цврсти фосилни горива. Тоа се должи на високиот процент на јаглерод и водород и ниската содржина на влага и сулфур. Главен недостаток е хетерогеноста на составот, која може да влијае на стабилноста и доследноста на енергетската испорака. Елементалната анализа на МасМ2 покажа дека јаглеродот и водородот имаат мала варијабилност и висока прецизност, што укажува на нивна конзистентност во примероците. Од друга страна, азотот и сулфурот имаат повисока варијабилност, што може да се припише на нивната ниска концентрација и чувствителноста на мерењата, како и на хетерогеноста на отпадот.

Од еколошки аспект, МасМ2 создава пониски емисии на цврсти честички во споредба со Р12 при сите проценти на учество во процесот на согорување, при што максималната емисија кај МасМ2 (27,54 t/год.) е пониска од онаа кај Р12 (30,81 t/год.). Дополнително, емисиите од МасМ2 се значително под оние од кафеав јаглен кои изнесуваат 34,31 t/год., што укажува на негов потенцијал како почиста алтернатива на фосилните горива во контекст на прашина. Иако биомасата останува гориво со најниски емисии на цврсти честички (5,09 t/год.), МасМ2 нуди балансирано решение кое комбинира енергетска ефикасност и подобра еколошка прифатливост. Енергетската ефикасност се манифестира преку повисока калорична вредност на отпадот во споредба со биомасата, со што може да произведе повеќе енергија по единица маса и да се одржува стабилен процесот на согорување. Додека, подобрата еколошка прифатливост е изразена со пониските емисии на цврсти честички споредено со фосилните горива.

Емисиите на сулфурни оксиди од согорување на отпадот МасМ2 покажуваат прогресивен пораст со зголемување на процентуалниот удел во горивото, достигнувајќи максимална вредност од 738,72 t/год. при 100% замена на основното гориво. Иако овие емисии се значително пониски од оние на кафеавиот јаглен (2.847,30 t/год.), тие значително ги надминуваат емисиите од биомаса (285,23 t/год.), што укажува дека МасМ2, и покрај тоа што е поеколошки од фосилните горива, не е нискосулфурен енергетски извор. Затоа, неговата примена во термички процеси мора да биде поддржана со технологии за прочистување на издувните гасови, за да се постигне усогласеност со еколошките стандарди за емисии.

Вредностите на емисиите на азотни оксиди се значително поблиску до емисиите од кафеав јаглен (324,41 t/год.), отколку до биомасата (89,69 t/год.), што укажува дека

MacM2 содржи значајни количини на азот или создава услови при согорување кои промовираат формирање на NO_x . Со тоа, иако е поодржлив од фосилните горива од аспект на ресурси, MacM2 претставува потенцијален извор на загадување на воздухот со NO_x , особено ако се користи без примена на технологии за редукција, како што се селективна каталитичка редукција или селективна некаталитичка редукција.

Содржината на фиксен јаглерод во цврстиот отпад е релативно мала (10,06%), додека содржината на испарливи материи е висока (79,42%), што укажува на тенденција кон брзо и интензивно согорување, но со помала одржливост. Тоа бара добро управување со воздухот при согорување за да се обезбеди целосна оксидација и да се спречи создавање на несогорени гасови. Ниската содржина на пепел (7,76%) е уште една поволна карактеристика, бидејќи значи помалку неоргански остатоци, подобар пренос на топлина, помала потреба од одржување на опремата и потенцијал за корисна пренамена на пепелта, под услов да е инертна и нетоксична.

Сумирано, физичко-хемиските карактеристики на комуналниот цврст отпад MacM укажуваат на неговиот значителен потенцијал како алтернативен енергенс, особено во контекст на циркуларна економија и управување со отпад. Сепак, потребни се соодветни мерки за подготовка и стабилизација на составот за да се оптимизира неговото користење во системи за согорување и да се минимизираат негативните еколошки влијанија.

6.1.2. Отпад P1

Вредноста на коефициентот на водопропустливост кај отпадот P130, која изнесува околу $7,36 \times 10^{-7} \text{ m/s}$, укажува на многу ниска способност на материјалот да пропушта вода. Ова својство го прави материјалот практично водоотпорен, што има позитивно влијание од еколошки аспект, бидејќи значително го намалува ризикот од истекување на загадувачки супстанции во околното тло и подземните води. Сепак, оваа ниска пропустливост води кон задржување на влага во материјалот, што директно влијае на намалување на неговата топлинска моќ и ја намалува ефикасноста при согорување. Ова наметнува потреба од претходна подготовка, особено сушење, пред следните постапки на термичка обработка.

Дополнителните мерења покажуваат дека пропустливоста се намалува со пораст на хидростатскиот притисок до околу 1 бар, по што останува релативно стабилна до 1,8 бари. Овој тренд се објаснува преку затворање на порите и зголемена компактност на материјалот, што го намалува волуменот на достапни канали за проток на вода. Малиот пораст на пропустливоста при 2 бари е индикатор за можни микроструктурни промени, како што се појава на микропукнатини, кои повторно овозможуваат минимално протекување на течности. Овој ефект е важен при дизајнирање на услови за складирање или обработка на отпадот, особено кога се применуваат техники на збивање.

Што се однесува до енергетските карактеристики, примерокот P12 покажува стабилна и висока топлинска моќ од околу 20.238 kJ/kg. Вредностите се движат во тесен интервал, што укажува на хомогеност и конзистентност на енергетскиот потенцијал, што е важно при димензионирање на постројки за согорување и за постигнување предвидливи термички перформанси.

Хемиската анализа на примерокот P12 дополнително го потврдува неговиот потенцијал како енергенс. Содржината на јаглерод е висока и стабилна (просечно 46,39%), што укажува на доминантна органска компонента во составот. Стабилната содржина на водород (околу 6,8%) дополнително придонесува за топлинската вредност

на отпадот, при што енергетскиот принос може да се смета за сигурен. Влажноста од 3,23% е релативно ниска, што е исклучително поволно, бидејќи помалата содржина на вода значи помали загуби на енергија при согорување.

Содржината на азот (просечно 0,52%) укажува на умерено ниво, со што се минимизира потенцијалната емисија на NO_x , познати загадувачи при термички процеси. Истото важи и за сулфурот, кој е присутен во ниски концентрации (просек 0,26%), но со нешто поголема варијабилност. Ова бара внимателно следење, особено при третман на поголеми количини отпад, заради ризик од емисии на SO_2 и потребата од соодветни системи за прочистување на гасовите. И покрај тоа, ваквото ниво на сулфур се смета за прифатливо во рамките на индустриските стандарди.

Содржината на пепел изнесува 8,90%, што укажува на присуство на неоргански компоненти кои не се согоруваат. Иако оваа вредност не е висока, сепак треба да се земе предвид при проценка на количината на остатоци и потенцијалното управување со нив. Фиксниот јаглерод од 10,90% укажува на присуство на стабилни јаглеродни компоненти кои подолгорочно придонесуваат за согорувањето, додека испарливите материи (76,97%) се на високо ниво, што укажува на добра реактивност и брза оксидација при согорување. Овој баланс помеѓу фиксен и испарлив јаглерод е индикатор за динамика на согорувањето и е особено значаен за дизајн на термички постројки.

Анализата на емисиите на цврсти честички од аспект на отпадот P12 покажува дека тој генерира повисоки емисии во споредба со МасМ2 при сите сценарија на процентуално учество во процесот на согорување. Максималната вредност од 30,81 t/год. (при 100% учество) ја надминува емисијата од МасМ2 (27,54 t/год.). Дополнително, емисиите на P12, иако пониски од оние на кафеавиот јаглен (34,31 t/год.), сепак остануваат релативно високи и укажуваат на потреба од применување на соодветни технологии за контрола на прашина. Во споредба со биомасата, која има најниски емисии (5,09 t/год.), P12 покажува значително повисоки вредности, што го става во неповолна еколошка позиција. Причината за оваа разлика се должи на хемискиот состав на P12, кој содржи повеќе неоргански материи кои придонесуваат за зголемено создавање прашина. Иако P12 може да обезбеди одредена енергетска вредност и да се искористи како алтернативно гориво, неговиот повисок емисионен профил укажува дека неговата употреба треба да биде внимателно регулирана и секогаш придружена со мерки за намалување на емисиите.

Отпадот P12 покажува постепено зголемување на емисиите на SO_x во зависност од процентот на учество во согорувањето, со максимална вредност од 747,42 t/год. при 100% учество. Овие емисии се маргинално повисоки од оние кај МасМ2, што сугерира дека P12 содржи нешто поголема концентрација на сулфурни компоненти, можно поради поголем удел на гума, пластика или други материјали кои содржат сулфур. И покрај ова, и P12 генерира значително помалку SO_x од кафеавиот јаглен, што го позиционира како поиздржлива алтернатива од фосилните горива, но сепак бара применување на ефикасни системи за третман на гасовите за да се спречат негативните влијанија врз животната средина.

Емисиите на азотни оксиди од отпадот P12 растат со зголемување на неговото учество, но се движат во значително пониски граници во споредба со МасМ2. Почнуваат од 46,89 t/год. при 25% замена и достигнуваат до 187,55 t/год. при 100%. Овие вредности се под референтната граница на кафеавиот јаглен, но сепак се значително повисоки од биомасата (89,69 t/год.). Тоа значи дека P12 има умерена содржина на азотни компоненти, иако е почист избор од МасМ2, особено во повисоките проценти на замена. Затоа, неговата употреба може да се разгледува како компромисно решение меѓу перформанси

и емисии, со потенцијал за дополнителна еколошка оптимизација преку контрола на температурите и примената на еколошки технологии за третман на издувни гасови.

За третман на ваков тип отпад, особено со оглед на неговата гранулометрија и висока содржина на испарливи материи, најсоодветни се горилници со флуидизиран слој, кои овозможуваат подобро мешање, стабилна температура и порамномерно согорување на хетерогените компоненти.

Сумирано, карактеристиките на примерокот P1 укажуваат на неговата соодветност за употреба како алтернативно гориво. Високата топлинска вредност, ниската влажност, умерената содржина на пепел и ниските концентрации на азот и сулфур го прават материјалот погоден за енергетска употреба со минимално еколошко влијание. Сепак, потребни се соодветни претходни подготовки и прецизно управување со процесните параметри за да се максимизира неговата ефикасност и да се намалат ризиците поврзани со емисии.

6.2.Препораки и насоки за понатамошни истражувања

Врз основа на добиените резултати и потврдените хипотези, се препорачува понатамошните истражувања да се насочат кон неколку клучни аспекти со цел продлабочување на знаењата и оптимизирање на системите за енергетско искористување на цврстиот комунален отпад. Најнапред, потребно е да се спроведат подетални сезонски анализи на составот и енергетските карактеристики на отпадот, бидејќи неговата структура може значително да варира во зависност од времето на годината и навиките на населението. Исто така, се препорачува развој на пилот-постројка или симулациски модели за согорување под контролирани услови, со цел да се потврдат лабораториските резултати во реални техничко-технолошки рамки.

Понатаму, посебен фокус треба да се стави на подобро разбирање на емисионите карактеристики при согорување, особено во однос на NO_x , SO_2 и CO_2 , како и можностите за нивно намалување преку примена на различни технологии, вклучително и филтри, постсогорувачи и флуидизирани горилници. Дополнително, би било корисно да се испита потенцијалот за одделно третирање или претходна обработка на фракциите со повисока влажност и ниска топлинска моќ, со цел подобрување на енергетската ефикасност на целиот процес.

Конечно, се предлага проширување на истражувањата кон компаративни анализи на различни сценарија за управување со отпадот (депонирање, инсенерација, ко-согорување, анаеробна дигестија), во контекст на нивната енергетска искористливост, економска оправданост и влијание врз животната средина. Овие истражувања би придонеле кон формирање на интегрирани стратегии за одржливо управување со отпад во урбаните средини, како и за поддршка на процесите на енергетска транзиција и циркуларна економија.

7. РЕФЕРЕНЦИ

- [1] Andonova, E., Higuera Garcia, E., & García-González, M. C. (2024). Air quality, health, and the city: The case of Skopje. *International Urban Planning Research Seminar*, 15. <https://doi.org/10.5821/siu.12768>
- [2] Veljanovski, P., & MaCrkoski, B. (2022). Challenges of urban expansion in the Skopje region. *Annual Review of Territorial Governance in the Western Balkans*, IV, 35-46. <https://doi.org/10.32034/CP-TGWBAR-I04-03>
- [3] European Topic Centre on Waste and Materials in a Green Economy. (2021). *Municipal waste management in North Macedonia* [Fact sheet]. European Environmental Agency. <https://www.eea.europa.eu/themes/waste/waste-management/municipal-waste-management-country/north-macedonia-municipal-waste-factsheet-2021/view>
- [4] McPhail, A., Griffin, R., El-Halwagi, M., Medlock, K., & Alvarez, J. J. P. (2014). Environmental, economic, and energy assessment of the ultimate analysis and moisture content of municipal solid waste in a parallel co-combustion process. *Energy & Fuels*, 28, 1453-1462. <https://doi.org/10.1021/ef401373n>
- [5] Ram, C., Kumar, A., & Rani, P. (2021). Municipal solid waste management: A review of waste-to-energy (WtE) approaches. *BioResources*, 16(2), 4275-4320.
- [6] Micromeritics Instrument Corporation. (2011). *AccuPyc II 1340 for Windows Operator's Manual* (1st ver., 3rd ed.).
- [7] The British Standards Institution. (2019). *Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil Part 11: Permeability tests* (BSI Standard No.17892-11:2019).
- [8] The British Standards Institution. (2012). *Unbound and Hydraulically Bound Mixtures Part 2: Test Methods for Laboratory Reference Density and Water Content - Proctor Compaction* (BSI Standard No. 13286-2:2010).
- [9] International Organization for Standardization. (2010). *Solid Mineral Fuels – Coke - Determination of Moisture in the General Analysis Test Sample* (ISO Standard No. 687:2010).
- [10] International Organization for Standardization. (2010). *Hard Coal and Coke - Determination of Volatile Matter* (ISO Standard No. 562:2010).
- [11] International Organization for Standardization. (2010). *Solid mineral fuels — Determination of Ash* (ISO Standard No. 1171:2010).
- [12] International Organization for Standardization. (2015). *Solid Biofuels - Determination of Total Content of Carbon, Hydrogen and Nitrogen* (ISO Standard No. 16948:2015).
- [13] International Organization for Standardization. (2020). *Coal and Coke - Determination of Gross Calorific Value* (ISO Standard No. 1928:2020).
- [14] International Organization for Standardization. (2016). *Solid Biofuels-Determination of Total Content of Sulfur and Chlorine* (ISO Standard No. 16994:2016).
- [15] European Parliament & Council of the European Union. (2008). *Directive 2008/98/EC on waste and repealing certain Directives*. Official Journal of the European Union, L 312, 3–30. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2008/98/oj>
- [16] Alves, B. (2024, October 22). *Share of total waste treatment in the European Union 2022, by method*. Statista. Retrieved June 15, 2025, from <https://www.statista.com/statistics/1341013/european-union-total-waste-treatment-shares-by-method/>
- [17] European Commission. (n.d.). *European Climate Law*. Climate Action. Retrieved July 19, 2025, from https://climate.ec.europa.eu/eu-action/european-climate-law_en
- [18] European Environment Agency. (2024, December 4). *Waste generation in Europe – Waste generation and decoupling in Europe*. European Environment Agency. Retrieved July 19, 2025, from <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/waste-generation-and-decoupling-in-europe>
- [19] Eurostat. (2023, October 27). *Waste statistics*. European Commission. Retrieved July 19, 2025, from <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?oldid=491257>
- [20] Alves, B. (2024, August 16). *Recycling in Europe - statistics & facts*. Statista. Retrieved February 1, 2025, from <https://www.statista.com/topics/9617/recycling-in-europe/#topicOverview>
- [21] Alves, B. (2024, July 30). *Waste management in Europe - statistics & facts*. Statista. Retrieved February 1, 2025, from <https://www.statista.com/topics/7561/waste-management-in-europe/#topicOverview>

- [22] United Nations Environment Programme, & International Solid Waste Association (2024). *Global Waste Management Outlook 2024 - Beyond an age of waste: Turning Rubbish into a Resource*. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/44939>
- [23] Eurostat. (2024). *Treatment of waste by waste operations and method [env_wasoper]* [Data set]. European Commission. Retrieved July 29, 2025, from https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env_wasoper_custom_17618321/default/bar?lang=en
- [24] Główny Urząd Statystyczny. (2025, 30 јуни). *Ochrona środowiska w 2024 r.* Główny Urząd Statystyczny. https://stat.gov.pl/download/gfx/portalinformacyjny/pl/defaultaktualnosci/5484/12/8/1/ochrona_srodowiska_w_2024_r..pdf
- [25] Monitor Polski. (2023, 12 Lipiec). *Uchwała nr 96 Rady Ministrów z dnia 12 czerwca 2023 r. w sprawie Krajowego planu gospodarki odpadami 2028* (Poz. 702). Dziennik Urzędowy Rzeczypospolitej Polskiej. <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/download.xsp/WMP20230000702/O/M20230702.pdf>
- [26] European Environment Agency. (2022, June). *Early warning assessment related to the 2025 targets for municipal waste and packaging waste*. European Environment Agency. Retrieved August 14, 2025, from <https://www.eea.europa.eu/publications/many-eu-member-states/poland>
- [27] European Recycling Platform. (2023, December 20). *Poland: New deposit return scheme from 2025*. ERP Global. Retrieved August, 14, 2025, from <https://erp-recycling.org/news-and-events/2023/12/poland-new-deposit-return-scheme-from-2025/>
- [28] Министерство за животна средина и просторно планирање. (2021). *План за управување со отпад на Република Северна Македонија за 2021-2031*. <https://www.moepp.gov.mk/wp-content/uploads/2021/10/%D0%9F%D0%BB%D0%B0%D0%BD-%D0%B7%D0%B0-%D0%A3%D0%BF%D1%80%D0%B0%D0%B2%D1%83%D0%B2%D0%B0%D1%9A%D0%B5-%D1%81%D0%BE-%D0%BE%D1%82%D0%BF%D0%B0%D0%B4-%D0%BD%D0%B0-%D0%A0%D0%A1%D0%9C-2021-%D0%B4%D0%BE-2031-%D0%B3%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D0%BD%D0%B0.pdf>
- [29] Државен завод за статистика. (2024, Април 22). *Комунален отпад, 2023 година*. Retrieved September 28, 2023, from <https://www.stat.gov.mk/PrikaziSoopstzenie.aspx?rbtxt=80>
- [30] Ministry of Environment and Physical Planning and Swedish Environmental Protection Agency. (2012). *Capacity building for implementation of EU-landfill directive – closure of non-compliant landfills and inspections*. <https://www.moepp.gov.mk/wp-content/uploads/2014/12/Plan-for-closure-of-non-compliant-landfill.pdf>
- [31] United States Environmental Protection Agency. (2024, September 20). *Basic Information about Landfill Gas*. Retrieved September 20, 2022, from <https://www.epa.gov/lmop/basic-information-about-landfill-gas>
- [32] Kumar, A., & Samadder, S. R. (2017). A review on technological options of waste to energy for effective management of municipal solid waste. *Waste Management*, 69, 407-422. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.046>
- [33] Annepu R. K. (2012). *Sustainable Solid Waste Management in India* [Master's dissertation, Columbia University]. https://www.nswai.org/docs/Sustainable%20Solid%20Waste%20Management%20in%20India_Final.pdf
- [34] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate Change 2007: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 104.
- [35] Satiada, M. A., & Calderon, A. (2021). Comparative analysis of existing waste-to-energy reference plants for municipal solid waste. *Clean Environmental Systems*, 3, 100063. <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2021.100063>
- [36] Puttachai, W., Tarkhamtham, P., Yamaka, W., & Maneejuk, P. (2021). Linear and nonlinear causal relationships between waste-to-energy and energy consumption in Germany. *Energy Reports*, 7(3), 286–292. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.06.047>
- [37] Министерство за животна средина и просторно планирање. (2022). *План за спречување на создавање на отпад за 2022-2028 година*. <https://www.moepp.gov.mk/wp-content/uploads/2014/12/%D0%9F%D0%A1%D0%97%D0%9E-2022-2028.pdf>
- [38] Републички завод за статистику Република Србија. (2024, Јули 9). *Генерисани отпад према врстама отпада, опасности и из домаћинства*. Retrieved February 2, 2025, from <https://data.stat.gov.rs/Home/Result/2502010102?languageCode=sr-Cyrl>

-
- [39] Републички завод за статистику Република Србија. (2024, Јули 10). *Третман отпада према врстама третмана и опасности*. Retrieved February 2, 2025, from <https://data.stat.gov.rs/Home/Result/2502010201?languageCode=sr-Cyrl>
- [40] Ministry of Environmental Protection of Republic of Serbia. (2022, January 28). *Waste Management Program of the Republic of Serbia for the Period 2022-2031*. https://www.ekologija.gov.rs/sites/default/files/2022-03/program_upravljanja_otpadom_eng_-_adopted_version.pdf
- [41] ЕУ за тебе. (2025, June 13). *EU FOR ENVIRONMENT- Promoting waste source separation in 4 regions*. Retrieved February 2, 2025, from <https://www.euzatebe.rs/en/projects/eu-for-environment--promoting-waste-source-separation-in-4-regions>
- [42] Institute of Statistics of Republic of Albania. (2025, September 23). *Urban Solid Waste*. Retrieved February 2, 2025, from <https://www.instat.gov.al/en/themes/environment-and-energy/environment/#tab1>
- [43] European Topic Centre on Waste and Materials in a Green Economy. (2021). *Municipal waste management in Albania* [Fact sheet]. European Environmental Agency. <https://www.eea.europa.eu/themes/waste/waste-management/municipal-waste-management-country/albania-municipal-waste-factsheet-2021>
- [44] Agency for Statistics of the Bosnia and Herzegovina. (2024, November 5). *Public transportation and disposal of municipal waste, 2023*. https://bhas.gov.ba/data/Publikacije/Saopštenja/2024/ENV_01_2023_Y1_1_BS.pdf
- [45] European Topic Centre on Waste and Materials in a Green Economy. (2021). *Municipal waste management in Bosnia and Herzegovina* [Fact sheet]. European Environmental Agency. <https://www.eea.europa.eu/themes/waste/waste-management/municipal-waste-management-country/bosnia-and-herzegovina-municipal-waste>
- [46] MONSTAT. (n.d.). *Statistika otpada*. Retrieved February 3, 2025, from <https://www.monstat.org/cg/page.php?id=1007&pageid=64>
- [47] Vukmirovic Misic, L. (2024, October 22). *New Waste Management Law of Montenegro – Key Changes for Producers and Retailers*. CEE Legal Matters. Retrieved February 3, 2025, from <https://ceelegalmatters.com/briefings/27802-new-waste-management-law-of-montenegro-key-changes-for-producers-and-retailers>
- [48] Anukam, A., Mamphweli, S., Reddy, P., Meyer, E., & Okoh, O. (2016). Pre-processing of sugarcane bagasse for gasification in a downdraft biomass gasifier system: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 66, 775–801. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.046>
- [49] Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. (n.d.). *Waste-to-Energy*. US Department of Energy. Retrieved March 9, 2025, from <https://www.energy.gov/eere/bioenergy/waste-energy>
- [50] Cambi. (2025, January 29). *Biogas from Wastewater: A Sustainable Energy Solution*. Retrieved June 17, 2025, from <https://www.cambi.com/blog/biogas-wastewater>
- [51] Cosgun, A., Oral, B., Günay, M., & Yildirim, R. (2024). Machine learning–based analysis of sustainable biochar production processes. *BioEnergy Research*, 17, 2311–2327. <https://doi.org/10.1007/s12155-024-10796-7>
- [52] Wojtacha-Rychter, K., Kucharski, P., & Smolinski, A. (2021). Conventional and alternative sources of thermal energy in the production of cement—An impact on CO₂ emission. *Energies*, 14(6), 1539. <https://doi.org/10.3390/en14061539>
- [53] United States Environmental Protection Agency. (2022). *Energy recovery from the combustion of municipal solid waste (MSW)*. Retrived March 9, 2022, from <https://www.epa.gov/smm/energy-recovery-combustion-municipal-solid-waste-msw>
- [54] iStock. (n.d.). *Waste to energy process scheme with labeled description steps outline diagram stock illustration*. Retrieved June 17 2025, from <https://www.istockphoto.com/vector/waste-to-energy-process-scheme-with-labeled-description-steps-outline-diagram-gm1345451740-423517936>
- [55] WEKA Industrie Medien. (2015, February 19). *Waste to Energy: The Carbon Perspective*. Retrieved June 15 2025, from <https://waste-management-world.com/artikel/waste-to-energy-the-carbon-perspective/>
- [56] Sikder, S., Toha, M., & Rahman, M. M. (2024). Municipal solid waste incineration: An incredible method for reducing pressures on landfills. In Souabi, S., & Anouzla, A. (Eds.), *Technical Landfills and Waste Management* (pp. 169–188). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-55665-4_7

-
- [57] Mikulionok, I. (2023). Municipal solid waste incineration furnaces (review). *Energy Technologies & Resource Saving*, 74, 59–80. <https://doi.org/10.33070/etars.1.2023.06>
- [58] Li, Z., Fan, T. W., Lun, M. S., & Li, Q. (2024). Optimization of municipal solid waste incineration for low-NO_x emissions through numerical simulation. *Scientific Reports*, 14(19309). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-69019-w>
- [59] Wielgosinski, G. (2003). Emissions from waste incineration plants—Primary methods of emission reduction. *Energetic Policy*, 6, 131–140.
- [60] Antoine, B., Stéphanie, M., Marie, D., Yannick, M., & Jacques, V. (2018). Life cycle assessment of the French municipal solid waste incineration sector. *Waste Management*, 80, 144–153. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.08.037>
- [61] Meixi, Z., & Yi, Z. (2024). Intelligent control system and operational performance optimization of a municipal solid waste incineration power plant. *Fuel Processing Technology*, 266. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2024.108162>
- [62] Grand View Research. (2023, June). *Europe Waste To Energy Market Size, Share & Trends Analysis Report By Technology (Thermal, Biological), By Country, and Segment Forecasts, 2023 – 2030*. Grand View Research. <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/europe-waste-energy-market-report>
- [63] Eurostat. (2025, January). *Municipal waste statistics*. Retrieved February 8, 2025, from https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Municipal_waste_statistics
- [64] Wilson, M., & Tangri, N. (2017). Waste Gasification & Pyrolysis: High Risk, Low Yield Processes for Waste Management. GAIA. <https://www.no-burn.org/wp-content/uploads/Waste-Gasification-and-Pyrolysis-high-risk-low-yield-processes-march-2017.pdf>
- [65] Jaganmohan, M. (2025, April 15). *Installed capacity of municipal waste energy in Europe from 2010 to 2024*. Statista. Retrieved February 8, 2025, from <https://www.statista.com/statistics/1122054/europe-waste-to-energy-capacity/>
- [66] Jaganmohan, M. (2025, April 15). *Installed capacity of municipal waste energy in Europe from 2010 to 2024, by country*. Statista. Retrieved February 8, 2025, from <https://www.statista.com/statistics/1122082/europe-waste-to-energy-capacity-by-country/>
- [67] ARC. (n.d.). *From Waste to Energy – The technology Inside Amager Bakke*. Retrieved February 8, 2025, from <https://a-r-c.dk/amager-bakke/from-waste-to-energy/>
- [68] Wikipedia contributors. (n.d.). *Lisbjerg Power Station*. Wikipedia. Retrieved February 8, 2025, from https://en.wikipedia.org/wiki/Lisbjerg_Power_Station
- [69] AFRY. (n.d.). *Groundbreaking waste-to-energy plant, Vantaa Energy, Finland*. Retrieved February 8, 2025, from <https://afry.com/en/project/groundbreaking-waste-energy-plant-vantaa-energy-finland>
- [70] FCC Environment (UK) Limited. (n.d.). *Our facility, The Millerhill Recycling and Energy Recovery Centre*. Retrieved February 8, 2025, <https://millerhill.fccenvironment.co.uk/our-facility/>
- [71] North Yorkshire Council. (n.d.). Allerton Waste Recovery Park. Retrieved February 8, 2025, from <https://www.northyorks.gov.uk/bins-recycling-and-waste/allerton-waste-recovery-park>
- [72] environmental services association. (2022, May). *ESA PAPER ON RI STATUS*. Retrieved February 8, 2025, from <https://archiveesauk.org/what-we-do/raising-standards/energy-waste>
- [73] Ministry of Environment and Physical Planning. (2020). *A-Integrated Environmental Permit*. <https://www.usje.mk/media/xbxdsbmi/a-ippc-usje-2020.pdf>
- [74] Titan Цементарница Усје. (n.d.). *Алтернативни горива и сировини*. Retrieved July 21, 2022, from <https://www.usje.mk/mk/odrzhlivost/zhivotna-sredina/alternativni-goriva-i-surovini/>
- [75] ЈП Депонија Дрисла Скопје. (n.d.). *Третман на опасен отпад*. Retrieved July 21, 2022, from <https://drisla.mk/tretman-na-opasen-otpad/>
- [76] Todorović, I. (2021, September 6). *Plasma waste gasification project in North Macedonia is getting strategic investment status*. Balkan Green Energy News. Retrieved July 17, 2022, from <https://balkangreenenergynews.com/plasma-waste-gasification-project-in-north-macedonia-is-getting-strategic-investment-status/>

-
- [77] ЕКО ЕНЕРЏИ АГРИ ДИЗАЈН ДООЕЛ Скопје. (2021, август). *Известување за намера за спроведување на проект "Постројка за термичка декомпозиција на пластика и пластичен отпад" во изграден објект лоциран на дел од КП 2178 КО Желино, Општина Желино*. https://www.moepp.gov.mk/wp-content/uploads/2018/04/Izvestuvanje-za-namera_Postrojka-za-termicka-dekompozicija-na-plastika-i-plasticen-otpad_Zelino.pdf
- [78] Jovičić, B. (2016, January 22). *Biogas plant, cow farm launched in Bitola*. Balkan Green Energy News. Retrieved March 21, 2025, from <https://balkangreenenergynews.com/biogas-plant-cow-farm-launched-in-bitola/>
- [79] Miskovic, I., Bracken, B. & Bauer, R. (2023, October). *Belgrade's Waste-to-Energy Project Sparks Environmental Renaissance*. International Finance Corporation World Bank Group. Retrieved February 8, 2025 from <https://www.ifc.org/en/stories/2023/belgrade-waste-to-energy-sparks-environmental-renaissance>
- [80] World Bank. (2024, 16 April). *Municipal Waste Management in Serbia - Situational Analysis (English)*. Retrieved February 8, 2025, from <http://documents.worldbank.org/curated/en/099041624111016977>
- [81] Bjelić, D., Markić, D. N., Prokić, D., Malinović, B. N., Andrejević Panić, A. (2024). "Waste to energy" as a driver towards a sustainable and circular energy future for the Balkan countries. *Energy, Sustainability and Society*, 14(1), 3. <https://doi.org/10.1186/s13705-023-00435-y>
- [82] Transparency International. (n.d.). *Public-private partnership for waste incinerators*. Transparency International. Retrieved February 8, 2025, from <https://www.transparency.org/en/cepi/cases/public-private-partnership-for-waste-incinerators>
- [83] Alcani, M., Gjeta, A., & Bebi, E. (2023). Municipal solid waste incineration, the factors affecting the value of LCOE and the risks associated with this method of waste disposal in Albania. *Proceedings of the International Conference on Engineering and Applied Natural Sciences, Turkey*, 1(1). <https://doi.org/10.59287/as-proceedings.293>
- [84] Sito-sucic, D. (2023, January 21). *Bosnian dairy farm makes electricity from organic waste*. Reuters. Retrieved February 8, 2025, from <https://www.reuters.com/business/sustainable-business/bosnian-dairy-farm-makes-electricity-organic-waste-2023-01-20/>
- [85] Montenergo Business News. (2024, February 28). *Within the Mozura landfill, a biogas power plant will be constructed*. Retrieved February 8, 2025, from <https://montenegrobusiness.eu/montenegro-recent-biogas/>
- [71] Montenergo Business News. (2024, July 29). *Planned construction of bioenergy plant at Livade landfill: Feasibility study tender announced*. Retrieved February 8, 2025, from <https://balkangreenenergynews.com/waste-to-energy-is-win-win-solution-for-podgorica-landfill-minister/>
- [87] Spasić, V. (2024, August 9). *Waste-to-energy is win-win solution for Podgorica landfill – minister*. Balkan Green Energy News. Retrieved February 8, 2025, from <https://balkangreenenergynews.com/waste-to-energy-is-win-win-solution-for-podgorica-landfill-minister/>
- [88] Psomopoulos, C. S., & Themelis, N. J. (2015). The combustion of as-received and pre-processed (RDF/SRF) municipal solid wastes as fuel for the power sector. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 37(16), 1813–1820. <https://doi.org/10.1080/15567036.2011.639845>
- [89] Psomopoulos, C. & Themelis, N. (2009). Potential for energy generation in Greece by mass burning and by pre-processing (RDF/SRF) of solid wastes. *Proceedings of the 2nd International CEMEPE & SECOTOX Conference, Greece*, 2, 1121-1126.
- [90] Psomopoulos, C., Stavroulakis, C., Stavropoulos, V., & Themelis, N. (2013). Greenhouse gases emission reduction potential in Greece by implementing WTE facilities in strategically selected urban areas. *Fresenius Environmental Bulletin*, 22, 2042–2047.
- [91] Luka, T. (2023). The potential for a combined heat and power (CHP) generation from municipal solid waste: A case study of Croatia. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 8. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100450>
- [92] Neuwahl, F., Cusano, G., Gómez Benavides, J., Holbrook, S., & Roudier, S. (2019). *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste Incineration*. Joint Research Centre. https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2020-01/JRC118637_WI_Bref_2019_published_0.pdf

- [93] Гочевски, М. (2024, февруари). *Извештај за целокупното работење на ЈП депонија Дрисла Скопје за 2023 година*. ЈП депонија Дрисла Скопје. <https://drisla.mk/wp-content/uploads/2024/07/izveshtaj-za-celokupno-rabotene-na-drisla-za-2023.pdf>
- [94] Penman, J., Kruger, D., Galbally, I., Hiraishi, T., Nyenzi, B., Emmanul, S., Buendia, L., Hoppaus, R., Martinsen, T., Meijer, J., Miwa, K., & Tanabe, K. (Eds.). (2000). *Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories*. The Intergovernmental Panel on Climate Change. Retrieved June 16, 2025, from <https://www.ipcc.ch/publication/good-practice-guidance-and-uncertainty-management-in-national-greenhouse-gas-inventories/>
- [95] Tavana, M., Soltanifar, M., & Santos Arteaga, F. J. (2021). Analytical hierarchy process: Revolution and evolution. *Annals of Operations Research*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1007/s10479-021-04432-2>
- [96] Taherdoost, H., & Madanchian, M. (2024). A comprehensive survey and literature review on TOPSIS. *International Journal of Service Science, Management, Engineering, and Technology*, 15(1), 1–65. <https://doi.org/10.4018/IJSSMET.347947>
- [97] Taherdoost, H., & Madanchian, M. (2023). *A Comprehensive Overview of the ELECTRE Method in Multi-Criteria Decision-Making*. *Journal of Management Science & Engineering Research*, 6(2), 5–16. <https://doi.org/10.30564/jmser.v6i2.5637>
- [98] Taherdoost, H., & Madanchian, M. (2023). *Using PROMETHEE Method for Multi-Criteria Decision Making: Applications and Procedures*. *Iris Journal of Economics & Business Management*, 1(1), 1–7.
- [99] Dyer, J. S. (2016). Multiattribute Utility Theory. In S. Greco, M. Ehrgott, & J. R. Figueira (Eds.), *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys* (pp. 225–295). Springer.
- [100] Mujtaba, M. A., Munir, A., Imran, S., Nasir, M. K., Muhayyuddin, M. G., Javed, A., Mehmood, A., Habila, M. A., Fayaz, H., & Qazi, A. (2024). Evaluating sustainable municipal solid waste management scenarios: A multicriteria decision making approach. *Heliyon*, 10(4), e25788. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25788>
- [101] Vlachokostas, C., Michailidou, A. V., & Achillas, C. (2021). Multi-criteria decision analysis towards promoting waste-to-energy management strategies: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 138, 110563. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110563>
- [102] Kurbatova, A., & Abu-Qdais, H. A. (2020). Using Multi-Criteria Decision Analysis to Select Waste to Energy Technology for a Mega City: The Case of Moscow. *Sustainability*, 12(23), 9828. <https://doi.org/10.3390/su12239828>
- [103] Decision Radar. (n.d.). *TOPSIS: Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*. Retrieved February 22, 2025, from <https://decision-radar.com/topsis>
- [104] MCDMaker. (n.d.). *MCDMaker software tool*. Retrieved February 22, 2025, from <https://mcdmaker-software.web.app/index.html>
- [105] European Parliament & Council of the European Union. (2018). *Directive (EU) 2018/851 amending Directive 2008/98/EC on waste*. Official Journal of the European Union, L 150, 109–140. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2018/851/oj>
- [106] European Parliament & Council of the European Union. (1994). *Directive 94/62/EC on packaging and packaging waste*. Official Journal of the European Union, L 365, 10–23. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/1994/62/oj>
- [107] European Parliament & Council of the European Union. (2018). *Directive (EU) 2018/852 amending Directive 94/62/EC on packaging and packaging waste*. Official Journal of the European Union, L 150, 141–154. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2018/852/oj>
- [108] Council of the European Union. (1999). *Council Directive 1999/31/EC on the landfill of waste*. Official Journal of the European Union, L 182, 1–19. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/1999/31/oj>
- [109] European Parliament & Council of the European Union. (2010). *Directive 2010/75/EU on industrial emissions (integrated pollution prevention and control)*. Official Journal of the European Union, L 334, 17–119. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2010/75/oj>
- [110] European Parliament & Council of the European Union. (2023). *Directive (EU) 2023/1791 on energy efficiency*. Official Journal of the European Union, L 231, 94–178. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2023/1791/oj>
- [111] European Commission. (2020). *A new Circular Economy Action Plan: For a cleaner and more competitive Europe* (COM/2020/98 final). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52020DC0098>
- [112] European Commission. (2018). *A European strategy for plastics in a circular economy* (COM/2018/028). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52018DC0028>
- [113] European Commission. (2019). *The European Green Deal* (COM/2019/640). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52019DC0640>

- [114] European Parliament & Council of the European Union. (2024). *Regulation (EU) 2024/1781 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for sustainable products, amending Directive (EU) 2020/1828 and Regulation (EU) 2023/1542 and repealing Directive 2009/125/EC*. Official Journal of the European Union, L 1781, 28.6.2024. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1781/oj>
- [115] Собрание на Република Северна Македонија. (2021). *Закон за управување со отпад* [Службен весник на РСМ, бр. 68/21].
- [116] Собрание на Република Северна Македонија. (2021). *Закон за управување со пакување и отпад од пакување* [Службен весник на РСМ, бр. 251/21].
- [117] Собрание на Република Северна Македонија. (2018). *Закон за енергетика* [Службен весник на РСМ, бр. 96/18].
- [118] Собрание на Република Северна Македонија. (2020). *Закон за енергетска ефикасност* [Службен весник на РСМ, бр. 32/20].
- [119] Министерство за животна средина и просторно планирање. (2009). *Правилник за количеството на биоразградливи состојки во отпадот што смее да се депонира* [Службен весник на РМ, бр. 108/09].
- [120] Министерство за животна средина и просторно планирање. (2009). *Правилник за граничните вредности на емисии при горење и согорување на отпад и условите и начинот на работа на инсталациите за горење и согорување* [Службен весник на РМ, бр. 123/09]
- [121] Управа за животна средина, Сектор за управување со отпад. (2020). *Нацрт извештај за стратеска оценка на животната средина за Национален план за управување со отпад 2020–2030*, Министерство за животна средина и просторно планирање.
- [122] Министерство за животна средина и просторно планирање. (2009). *Национална стратегија за одржлив развој во Република Македонија (дел I/II) 2009–2030*.
- [123] Министерство за животна средина и просторно планирање. (2021). *Долгорочна стратегија за климатска акција со Акциски план: Извршно резиме*. <https://api.klimatskipromeni.mk/data/rest/file/download/2ba0633b4385d2538862b16572bff16d13ad0895665ee2729d24e177022ace27.pdf>
- [124] Министерство за економија на Република Северна Македонија. (2021). *Стратегија за развој на енергетиката во Република Северна Македонија до 2040 година*. [https://www.economy.gov.mk/Upload/Documents/Energy%20Development%20Strategy_FINAL%20DRAFT%20-%20For%20public%20consultations_MK_29.10.2019\(4\).pdf](https://www.economy.gov.mk/Upload/Documents/Energy%20Development%20Strategy_FINAL%20DRAFT%20-%20For%20public%20consultations_MK_29.10.2019(4).pdf)
- [125] Ferdoush, M. R., Al Aziz, R., Karmaker, C. L., Debnath, B., Limon, M. H., & Bari, A. B. M. M. (2024). Unraveling the challenges of waste-to-energy transition in emerging economies: Implications for sustainability. *Innovation and Green Development*, 3(2), 100121. <https://doi.org/10.1016/j.igd.2023.100121>
- [126] Jaisue, N., Ketjoy, N., Kaewpanha, M., & Thanarak, P. (2023). The Barriers Analysis for Waste-to-Energy Project Development in Thailand: Using an Interpretive Structural Modeling Approach. *Energies*, 16(4), 1941. <https://doi.org/10.3390/en16041941>
- [127] Khan, M., Farooq, N., Khattak, A., Hussain, A., Sahibzada, S., & Malik, S. (2020). Applying interpretive structural modeling and MICMAC analysis to evaluate inhibitors to transparency in humanitarian logistics. *Utopia y Praxis Latinoamericana*, 25(Esp. 2), 325–337. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3815216>
- [128] Donevska, K., Jovanovski, J., Jovanovski, M., & Pelivanoski, P. (2013). Analyses of environmental impacts of non hazardous regional landfills in Macedonia. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 1(4), 281–290. <https://doi.org/10.13044/j.sdewes.2013.01.0021>
- [129] Micromeritics. (2017, May). *AccuPyc II 1340 - Pycnometer* [Specification sheet]. http://www.kromtek.com.my/wp-content/uploads/2017/05/AccuPyc_1340_Pycnometer_Specification_Sheet.pdf
- [130] Axis. (2016, October 3). *User Manual ALN/G, ALZ/G Series* [User manual]. https://siamintercorp.co.th/sites/11053/files/u/AXIS/Analytical%20Balance/Professional%20model%20alng/user_manual_for_aln_g_series.pdf
- [131] Neoterm. (n.d.). *Piec oporowy NT 1313 z termoregulatorem mikroprocesorowym KXP 3, Instrukcja obsługi* [User manual]. <https://neoterm.wroclaw.pl/nt1313/instrukcja%20NT1313%20%20KXP3.pdf>
- [132] SHINKO DENSHI. (n.d.). *AJ/AJH series, Precision Balance*. Retrieved 21 June, 2025 from <https://www.vibra.co.jp/global/products/detail/12>
- [133] Allegro. (2021, February 26). *SUSZARKA LABORATORYJNA ZALMED SML 32/250 AUTOKLAW*. <https://archiwum.allegro.pl/oferta/suszarka-laboratoryjna-zalmed-sml-32-250-autoklaw-i9980368223.html>
- [134] Elmetron. (n.d.). *Waterproof pH-meter CP-411 User's manual*. https://selectscientific.com.au/mwdownloads/download/link/id/61?srsId=AfmBOoo0hVTjIbpmFvuEs5JAWBa4j1VYGkxfn1h5d3CIRLi5y8yA23_&
- [135] Elmetron. (n.d.). *COMBINATION pH ELECTRODE ERH-11S*. <https://www.elmetron.com.pl/ERH-11s-eng.html>

- [136] LECO. (2018, May 29). *628 Series Elemental Determinators* [Specification sheet]. <https://lecoperu.com/wp-content/uploads/2018/05/CHN628-ESPECIFICACIONES-ENG-29052018.pdf>
- [137] LECO. (2018, May 28). *832 Series Sulfur/Carbon Determinator* [Specification sheet]. <https://lecoperu.com/wp-content/uploads/2018/05/SC832-ESPECIFICACIONES-ENG-28052018.pdf>
- [138] LECO. (2018, April). *AC500 Calorimeter*. https://lecoperu.com/wp-content/uploads/2018/04/AC500_209-160.pdf
- [139] CEN. (2006). *CEN/TR 15310-1:2006. Characterization of waste – Sampling of waste materials – Part 1: Guidance on selection and application of criteria for sampling under various conditions*. Brussels: European Committee for Standardization.
- [140] Testchem. (n.d.). *Roller crushers*. Retrieved April 21, 2025, from <https://testchem.pl/en/testchem-products/sample-preparing/grinders-and-crushers/roller-crushers/>
- [141] Hussain, G. (2015, November 19). *Muffle furnace*. SlideShare. Retrieved January 25, 2025, from <https://www.slideshare.net/slideshow/muffle-furnace-55292258/55292258>
- [142] Testchem. (n.d.). *Knife grinders*. Retrieved January 25, 2025, from <https://testchem.pl/en/testchem-products/sample-preparing/mills-and-crushers/knife-lab-grinders/>
- [143] International Organization for Standardization. (2008). *Water Quality-Determination of pH* (ISO Standard No. 10523:2008).
- [144] den Boer, E., Sebastian, M., Joczyn, A., & Małysa, H. (oprac.). (2020). *Instrukcja do ćwiczeń laboratoryjnych Fizykochemia odpadów Chemia odpadów*. Wydział Inżynierii Środowiska.
- [145] Филкоски, Р. В. (2019). *Технологии за енергетска конверзија: Интерна скрипта – работна верзија*. Машински факултет – Скопје.
- [146] Zhu, Y., Zhang, Y., Luo, D., Chong, Z., Li, E., & Kong, X. (2021). A review of municipal solid waste in China: Characteristics, compositions, influential factors, and treatment technologies. *Environment, Development and Sustainability*, 23, 6603–6622. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00959-9>
- [147] Alabdrraba, W. M. S., & Al-Qaraghully, H. A. K. (2013). Composition of domestic solid waste and the determination of its density, moisture content: A case study for Tikrit City, Iraq. *International Review of Civil Engineering*, 4(2), 1–6.
- [148] Palanivel, T. M., & Sulaiman, H. (2014). Generation and composition of municipal solid waste (MSW) in Muscat, Sultanate of Oman. *APCBEE Procedia*, 10, 96–102. <https://doi.org/10.1016/j.apcbee.2014.10.024>
- [149] Rajesh, B., Suresh, S., & Sharma, A. K. (2013). Characterization of municipal solid waste generated by the city of Bhopal, India. *International Journal of ChemTech Research*, 5, 623–628.
- [150] Cline, C., Anshassi, M., Laux, S., & Townsend, T. G. (2020). Characterizing municipal solid waste component densities for use in landfill air space estimates. *Waste Management & Research*, 38(6), 673–679. <https://doi.org/10.1177/0734242X19895324>
- [151] Feltrim, F., Machado, A. B., Izzo, R. L. S., Rose, J. L., Oro, S. R. (2021). Evaluation of the bio-drying process of municipal solid waste using rotating drums. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 93, e20200085. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202120200085>
- [152] Zeng, G., Liu, L., Xue, Q., Wan, Y., Ma, J., & Zhao, Y. (2017). Experimental study of the porosity and permeability of municipal solid waste. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 36, 1694–1699. <https://doi.org/10.1002/ep.12632>
- [153] Macaskill, P. (2018). Standard deviation and standard error: Interpretation, usage and reporting. *Medical Journal of Australia*, 208(2), 63–64. <https://doi.org/10.5694/mja17.00633>
- [154] Wang, L., Qin, T., Zhao, J., Zhang, Y., Wu, Z., Cui, X., Zhou, G., Li, C., Guo, L., & Jiang, G. (2022). Exploring the nitrogen reservoir of biodegradable household garbage and its potential in replacing synthetic nitrogen fertilizers in China. *PeerJ*, 10. <https://doi.org/10.7717/peerj.12621>
- [155] Wu, Y., Pudasainee, D., Gupta, R., Li, W., Wang, B., & Sun, L. (2021). An overview of inorganic particulate matter emission from coal/biomass/MSW combustion: Sampling and measurement, formation, distribution, inorganic composition and influencing factors. *Fuel Processing Technology*, 213, 106657. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2020.106657>
- [156] Kaminski, J. (2003). Technologies and costs of SO₂-emissions reduction for the energy sector. *Applied Energy*, 75(3–4), 165–172. [https://doi.org/10.1016/S0306-2619\(03\)00029-1](https://doi.org/10.1016/S0306-2619(03)00029-1)

[157] Ma, Z., Deng, J., Li, Z., Li, Q., Zhao, P., Wang, L., Sun, Y., Zheng, H., Pan, L., Zhao, S., Jiang, J., Wang, S., & Duan, L. (2016). Characteristics of NO_x emission from Chinese coal-fired power plants equipped with new technologies. *Atmospheric Environment*, 131, 164–170. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.02.006>

ПРИЛОЗИ

Прилог А. Материјален биланс на Сценарио I

А.1. Пресметка на емисии

I)	Business as usual (Waste to disposal site)		
CH₄	(SW*CF*DOC*DOC_f*F_{CH₄}*(16/12)-R_{CH₄})*(1-OF)		kt CH ₄ /y
E _{CH₄}	emission of CH ₄		
SW	solid waste disposed to solid waste disposal site	159,20	kt/y
CF	methane correction factor (fraction)	0,6	
DOC	degradable organic carbon (fraction)	21,45	% by weight
	0.4A+0.17B+0.15C+0.3D	0,2145	
DOC _f	fraction of DOC dissimilated	0,77	
	0.014t+0.28		
F _{CH₄}	fraction of CH ₄ in landfill gas	0,5	
R _{CH₄}	recovered CH ₄	0	Gg/y
OF	oxidation factor	0	
A	solid waste that is paper and textiles	20	% by weight
B	garden waste, park waste, non-organic waste	35	% by weight
C	food waste	40	% by weight
D	wood or straw	5	% by weight
t	temperature in the anaerobic zone of a SWDS	35	°C
GHG	CO₂+21CH₄+310N₂O		kt GHG/y

А.2. Пресметка на исцедок

L	Leachate		
	$R*(C_1*A_1-C_2*A_2)/1000$		m ³ /d
R	rainfall	1,08	mm/d
C ₁	leaching coefficient of operating landfill area	0,6	
C ₂	leaching coefficient of covered landfill area	0,6	
A ₁	operational landfill area	760.000	m ²
A ₂	covered landfill area	0	m ²

Прилог Б. Материјален биланс на Сценарио II

Б.1. Пресметка на емисии

II)	Waste burned in an uncontrolled manner		
CO₂	SW*dm*CF*FCF*OF*(44/12)		kt/y
E _{CO2}	emission of CO ₂		
SW	solid waste burned	159.20	kt/y
dm	dry matter content in the waste burned	0.8	% of wet weight
CF	fraction of carbon in the dry matter (TCC)	0.5	% of dry weight
FCF	fraction of fossil carbon in the total carbon	0.5	% of total C content
OF	oxidation factor	0.58	% of C input
44/12	conversion factor, ratio of molar masses of CO ₂ and C		
CH₄	SW*EF*10⁻⁶		kt/y
E _{CH4}	emission of CH ₄		
SW	solid waste burned	159.20	kt/y
EF	aggregate CH ₄ emission factor	50	kg CH ₄ /kt w.
10 ⁻⁶	conversion factor (kg to kt)		
N₂O	SW*EF*10⁻⁶		
E _{N2O}	emission of N ₂ O		
SW	solid waste burned	159.20	kt/y
EF	N ₂ O emission factor	50	kg N ₂ O/kt w.
10 ⁻⁶	conversion factor (kg to kt)		
GHG	CO₂+21CH₄+310N₂O		

Б.2. Пресметка на произведени остатоци и ослободена топлина

RES	Residuals		
	(SW*A)+UA		kt/y
SW	solid waste burned	159,20	kt/y
A	ash content in MSW	7,76	weight %
		0,07760	
UA	unburned ash	10%*SW	kt/y
H_w	Waste Heat		
	SW*η ₂ *LHV		MJ/y
η ₂	efficiency (open burn)	10	%
		0,1	
LHV	lower heating value of MSW	23.237,33	kJ/kg
		2.323.733,00	MJ/kt
HHV	higher heating value of MSW	23.306,33	kJ/kg

Прилог В. Материјален биланс на Сценарио III

В.1. Пресметка на емисии

III)	Waste incinerated in a controlled manner (Waste-to-energy → CHP)		
CO₂	SW*EGV*EC		
E _{CO2}	emission of CO ₂		
SW	solid waste incinerated	159.20	kt/y
EC	emission concentration	0.415	Mg CO ₂ /Mg w.
		0.415	kt CO ₂ /kt w.
CH₄			
E _{CH4}	emission of CH ₄	0	kt/y
N₂O	SW*EGV*EC		
E _{N2O}	emission of N ₂ O		
SW	solid waste burned	159.20	kt/y
EC	emission concentration	2	mg/m ³
EGV (dry)	exhaust gas volume	5,500	m ³ /t w.
		5,500,000	m ³ /kt w.
GHG	CO₂+21CH₄+310N₂O		

В.2. Пресметка на произведени остатоци и топлинска и електрична енергија

RES	Residuals		kt/y
	SW*A		
SW	solid waste burned	159,20	kt/y
A	ash content in MSW	7,76	weight %
		0,07760	
TE	Total energy		MJ/y
	E _H +E _E		
E _H	Heat energy produced		MJ/y
	SW*LHV*η _{3,H}		
E _E	Electrical energy produced		MJ/y
	SW*LVH*η _{3,E}		
η _{3,H}	Efficiency E _H	0,55	
η _{3,E}	Efficiency E _E	0,25	

Прилог Г. Материјален биланс на Сценарио IV

Г.1. Пресметка на емисии

IV)	Waste burned in cement kilns (Waste-to-energy)		
CO₂	RDF*EF_{RDF}		
E _{CO2}	emission of CO ₂		
SW	solid waste burned	159,20	kt/y
RDF	RDF produced	63,68	kt/y
EF _{RDF}	emission factor for RDF	1,20	kg CO ₂ /kg RDF
		1,20	kt CO ₂ /kt RDF

Г.2. Пресметка на летечка пепел и произведен цемент

FA	Flying ashes		
	SW*A*FA _% /100		kt/y
SW	solid waste burned	159,20	kt/y
A	ash content in MSW	7,76	weight %
		0,07760	
FA	Percent of generated ash as fly ash	10	%
CLN	Clinker produced		
	SW*A*BA _% /100		kt/y
BA	Percent of generated ash as bottom ash	90	%
CEM	Cement produced		
	CLN/(C/C)		kt/y
C/C	Clinker to cement ratio	0,75	

Прилог Д. Пресметка на емисии од цврсти честички

коэффициент на вишок на воздух во ложиште	λ_1	[-]	1,2
коэффициент на вишок на воздух во гасовите на излез од оцак	λ_{ig}	[-]	1,2
коэффициент на вишок на воздух во зоната на согорување	λ_s	[-]	1,2

Д.1. 25% комунален цврст отпад

ЦВРТИ ЧЕСТИЧКИ				
Летечка пепел и несогорено гориво				
<i>емисија на цврсти честички</i>			PI2	MacM2
$\dot{M}_{ip} = 10B(A + q_4 H_d / 32,65) a_{ip} (1 - \eta_o)$ [g/s]				
потрошувачка на цврсто гориво кое се внесува во котелот	B	kg/s	1,26	1,26
содржина на пепел во горивото	A	%	8,90	7,76
долна топлинска моќ	H_d	MJ/kg	20,16	23,24
топлинска загуба поради механички нецелосно согорување на гориво	q_4	%	1,25	1,25
дел од вкупна пепел внесена со гориво која како летечка пепел се одведува со гасовите од ложиштето	a_{ip}	[-]	0,2	0,2
степен на отпепелување на гасовите	η_o	[-]	0,99	0,99
емисија на цврсти честички	M_{ip}	[g/s]	0,244	0,218

Д.2. 100% комунален цврст отпад

ЦВРТИ ЧЕСТИЧКИ				
Летечка пепел и несогорено гориво				
<i>емисија на цврсти честички</i>			PI2	MacM2
$\dot{M}_{ip} = 10B(A + q_4 H_d / 32,65) a_{ip} (1 - \eta_o)$ [g/s]				
потрошувачка на цврсто гориво кое се внесува во котелот	B	kg/s	5,05	5,05
содржина на пепел во горивото	A	%	8,90	7,76
долна топлинска моќ	H_d	MJ/kg	20,16	23,24
топлинска загуба поради механички нецелосно согорување на гориво	q_4	%	1,25	1,25
дел од вкупна пепел внесена со гориво која како летечка пепел се одведува со гасовите од ложиштето	a_{ip}	[-]	0,2	0,2
степен на отпепелување на гасовите	η_o	[-]	0,99	0,99
емисија на цврсти честички	M_{ip}	[g/s]	0,977	0,873

Д.3. 100% јаглен

ЦВРТИ ЧЕСТИЧКИ			
Летечка пепел и несогорено гориво			
<i>емисија на цврсти честички</i>			Јаглен
$\dot{M}_{ip} = 10B(A + q_4 H_d / 32,65) a_{ip} (1 - \eta_o)$ [g/s]			
потрошувачка на цврсто гориво кое се внесува во котелот	B	kg/s	5,05
содржина на пепел во горивото	A	%	10,00
долна топлинска моќ	H_d	MJ/kg	20,16
топлинска загуба поради механички нецелосно согорување на гориво	q_4	%	1,25
дел од вкупна пепел внесена со гориво која како летечка пепел се одведува со гасовите од ложиштето	a_{ip}	[-]	0,2
степен на отпепелување на гасовите	η_o	[-]	0,99
емисија на цврсти честички	M_{ip}	[g/s]	1,088

Д.4. 100% биомаса

ЦВРТИ ЧЕСТИЧКИ			
Летечка пепел и несогорено гориво			
емисија на цврсти честички			Биомаса
$\dot{M}_{ip} = 10B(A + q_4 H_d / 32,65) a_{ip} (1 - \eta_o)$ [g/s]			
потрошувачка на цврсто гориво кое се внесува во котелот	B	kg/s	5,05
содржина на пепел во горивото	A	%	1,00
долна топлинска моќ	H_d	MJ/kg	15,63
топлинска загуба поради механички нецелосно согорување на гориво	q_4	%	1,25
дел од вкупна пепел внесена со гориво која како летечка пепел се одведува со гасовите од ложиштето	a_{ip}	[-]	0,2
степен на отпепелување на гасовите	η_o	[-]	0,99
емисија на цврсти честички	$\dot{M}_{ip}$	[g/s]	0,161

Прилог Ѓ. Емисии на сулфурни оксиди

коефициент на вишок на воздух во ложиште	λ_l	[-]	1,2
коефициент на вишок на воздух во гасовите на излез од оцак	λ_{ig}	[-]	1,2
коефициент на вишок на воздух во зоната на согорување	λ_s	[-]	1,2

Ѓ.1. 25% комунален цврст отпад

СУЛФУРНИ ОКСИДИ				
SO₂ и SO₃				
емисија на сулфурни оксиди			PI2	MacM2
$\dot{M}_{SO_2} = B g_{SO_2} (1 - \eta_{SO_2}) (1 - \eta_{SO_2}^{**})$ [g/s]				
маса на SO ₂ за единица маса гориво во излезни гасови	g_{SO_2}	[g/kg]	5,2456	5,1891
$g_{SO_2} = 10^3 (r_{SO_2} - 0,01 SO_3) V_{RS} \rho_{SO_2} (\lambda_l / \lambda_{ig})$ [g/kg]				
дел од сулфурни оксиди кој се врзува со летечка пепел во гасни канали на котелот	η_{SO_2}	[-]	0,1	0,1
дел од сулфурни оксиди кој се одвојува од гасовите во отпепелувачот	$\eta_{SO_2}^{**}$	[-]	0	0
емисија на сулфурни оксиди	M_{SO2}	[g/s]	5,958	5,894
маса на SO₂ за единица маса гориво во излезни гасови				
$g_{SO_2} = 10^3 (r_{SO_2} - 0,01 SO_3) V_{RS} \rho_{SO_2} (\lambda_l / \lambda_{ig})$ [g/kg]				
волуменско учество на SO ₂ во суви продукти на согорување	r_{SO_2}	[m ³ /m ³]	0,0003	0,0003
$r_{SO_2} = V_{SO_2} / V_{RS}$				
процентна содржина на SO ₃ во продукти на согорување	SO ₃	[%]	0,0001	0,0001
$SO_3 = 0,424 r_{SO_2} O_2^{0,5} q_A (Q / Q_M)^2$ [%]				
волумен на суви продукти на согорување за коефициент на вишок на воздух во ложиште λ_l	V _{RS}	[m ³ /kg]	5,64	6,81
густина на SO ₂ при нормални услови	ρ_{SO_2}	[kg/m ³]	2,86	2,86
коефициент на вишок на воздух во ложиште	λ_l	[-]	1,2	1,2
коефициент на вишок на воздух во гасовите на излез од оцак	λ_{ig}	[-]	1,2	1,2
процентна содржина на SO₃ во продукти на согорување				
$SO_3 = 0,424 r_{SO_2} O_2^{0,5} q_A (Q / Q_M)^2$ [%]				
процентна содржина на вишокот кислород по согорувањето на горивото	O ₂	[%]	3,59	3,62
$O_2 = \frac{21(\lambda_l - 1)V_{RS}}{V_{RS}}$ [%]				
специфично топлинско оптоварување на напречен пресек на ложиште	q _A	[MW/m ²]	0,28	0,33
$q_A = \frac{BH_z}{a_l b_l}$ [MW/m ²]				
пресметковна количина топлина внесена во котел	Q	[MW]	22,90	26,39
максимална количина топлина внесена во котел	Q _M	[MW]	25,44	29,33

Ѓ.2. 100% комунален цврст отпад

СУЛФУРНИ ОКСИДИ				
SO₂ и SO₃				
емисија на сулфурни оксиди			PI2	MacM2
$\dot{M}_{SO_2} = B \cdot g_{SO_2} (1 - \eta_{SO_2}') (1 - \eta_{SO_2}'') \text{ [g/s]}$				
маса на SO ₂ за единица маса гориво во излезни гасови	g_{SO_2}	[g/kg]	5,2166	5,1559
$g_{SO_2} = 10^3 (r_{SO_2} - 0,01 SO_3) V_{RS} \rho_{SO_2} (\lambda_l / \lambda_{lg}) \text{ [g/kg]}$				
дел од сулфурни оксиди кој се врзува со летечка пепел во гасни канали на котелот	η_{SO_2}'	[-]	0,1	0,1
дел од сулфурни оксиди кој се одвојува од гасовите во отпепелувачот	η_{SO_2}''	[-]	0	0
емисија на сулфурни оксиди	M_{SO2}	[g/s]	23,700	23,425
маса на SO₂ за единица маса гориво во излезни гасови				
$g_{SO_2} = 10^3 (r_{SO_2} - 0,01 SO_3) V_{RS} \rho_{SO_2} (\lambda_l / \lambda_{lg}) \text{ [g/kg]}$				
волуменско учество на SO ₂ во суви продукти на согорување	r_{SO_2}	[m ³ /m ³]	0,0003	0,0003
$r_{SO_2} = V_{SO_2} / V_{RS}$				
процентна содржина на SO ₃ во продукти на согорување	SO ₃	[%]	0,0002	0,0002
$SO_3 = 0,424 r_{SO_2} O_2^{0,5} q_A (Q / Q_M)^2 \text{ [%]}$				
волумен на суви продукти на согорување за коефициент на вишок на воздух во ложиште λ_l	V _{RS}	[m ³ /kg]	5,64	6,81
густина на SO ₂ при нормални услови	ρ_{SO_2}	[kg/m ³]	2,86	2,86
коефициент на вишок на воздух во ложиште	λ_l	[-]	1,2	1,2
коефициент на вишок на воздух во гасовите на излез од оцак	λ_{lg}	[-]	1,2	1,2
процентна содржина на SO₃ во продукти на согорување				
$SO_3 = 0,424 r_{SO_2} O_2^{0,5} q_A (Q / Q_M)^2 \text{ [%]}$				
процентна содржина на вишокот кислород по согорувањето на горивото	O ₂	[%]	3,59	3,62
$O_2 = \frac{21(\lambda_l - 1)V_{RS}}{V_{RS}} \text{ [%]}$				
специфично топлинско оптоварување на напречен пресек на ложиште	q _A	[MW/m ²]	1,13	1,30
$q_A = \frac{BH_d}{a_i b_i} \text{ [MW/m}^2\text{]}$				
пресметковна количина топлина внесена во котел	Q	[MW]	91,58	105,57
максимална количина топлина внесена во котел	Q _M	[MW]	101,76	117,30

Ѓ.3. 100% јаглен

СУЛФУРНИ ОКСИДИ			
SO ₂ и SO ₃			
емисија на сулфурни оксиди			P12
$\dot{M}_{SO_2} = B g_{SO_2} (1 - \eta_{SO_2}') (1 - \eta_{SO_2}'') \text{ [g/s]}$			
маса на SO ₂ за единица маса гориво во излезни гасови	g _{SO2}	[g/kg]	19,8728
$g_{SO_2} = 10^3 (r_{SO_2} - 0,01 SO_3) V_{RS} \rho_{SO_2} (\lambda_l / \lambda_{ig}) \text{ [g/kg]}$			
дел од сулфурни оксиди кој се врзува со летечка пепел во гасни канали на котелот	η_{SO_2}'	[-]	0,1
дел од сулфурни оксиди кој се одвојува од гасовите во отпепелувачот	η_{SO_2}''	[-]	0
емисија на сулфурни оксиди	M _{SO2}	[g/s]	90,287
маса на SO ₂ за единица маса гориво во излезни гасови			
$g_{SO_2} = 10^3 (r_{SO_2} - 0,01 SO_3) V_{RS} \rho_{SO_2} (\lambda_l / \lambda_{ig}) \text{ [g/kg]}$			
волуменско учество на SO ₂ во суви продукти на согорување	r _{SO2}	[m ³ /m ³]	0,0011
$r_{SO_2} = V_{SO_2} / V_{RS}$			
процентна содржина на SO ₃ во продукти на согорување	SO ₃	[%]	0,0008
$SO_3 = 0,424 r_{SO_2} O_2^{0,5} q_A (Q / Q_M)^2 \text{ [%]}$			
волумен на суви продукти на согорување за коефициент на вишок на воздух во ложиште λ_l	V _{RS}	[m ³ /kg]	6,20
густина на SO ₂ при нормални услови	ρ_{SO_2}	[kg/m ³]	2,86
коефициент на вишок на воздух во ложиште	λ_l	[-]	1,2
коефициент на вишок на воздух во гасовите на излез од оцак	λ_{ig}	[-]	1,2
процентна содржина на SO ₃ во продукти на согорување			
$SO_3 = 0,424 r_{SO_2} O_2^{0,5} q_A (Q / Q_M)^2 \text{ [%]}$			
процентна содржина на вишокот кислород по согорувањето на горивото	O ₂	[%]	3,55
$O_2 = \frac{21(\lambda_l - 1)V_{RS}}{V_{RS}} \text{ [%]}$			
специфично топлинско оптоварување на напречен пресек на ложиште	q _A	[MW/m ²]	1,14
$q_A = \frac{BH_d}{a_l b_l} \text{ [MW/m}^2\text{]}$			
пресметковна количина топлина внесена во котел	Q	[MW]	92,00
максимална количина топлина внесена во котел	Q _M	[MW]	102,22

Ѓ.4. 100% биомаса

СУЛФУРНИ ОКСИДИ			
SO₂ и SO₃			
емисија на сулфурни оксиди			P12
$\dot{M}_{SO_2} = B g_{SO_2} (1 - \eta_{SO_2}') (1 - \eta_{SO_2}'') \text{ [g/s]}$			
маса на SO ₂ за единица маса гориво во излезни гасови	g_{SO_2}	[g/kg]	1,9907
$g_{SO_2} = 10^3 (r_{SO_2} - 0,01 SO_3) V_{RS} \rho_{SO_2} (\lambda_l / \lambda_{ig}) \text{ [g/kg]}$			
дел од сулфурни оксиди кој се врзува со летечка пепел во гасни канали на котелот	η_{SO_2}'	[-]	0,1
дел од сулфурни оксиди кој се одвојува од гасовите во отпепелувачот	η_{SO_2}''	[-]	0
емисија на сулфурни оксиди	M_{SO2}	[g/s]	9,044
маса на SO₂ за единица маса гориво во излезни гасови			
$g_{SO_2} = 10^3 (r_{SO_2} - 0,01 SO_3) V_{RS} \rho_{SO_2} (\lambda_l / \lambda_{ig}) \text{ [g/kg]}$			
волуменско учество на SO ₂ во суви продукти на согорување	r_{SO_2}	[m ³ /m ³]	0,0001
$r_{SO_2} = V_{SO_2} / V_{RS}$			
процентна содржина на SO ₃ во продукти на согорување	SO ₃	[%]	0,0001
$SO_3 = 0,424 r_{SO_2} O_2^{0,5} q_A (Q / Q_M)^2 \text{ [%]}$			
волумен на суви продукти на согорување за коефициент на вишок на воздух во ложиште λ_l	V _{RS}	[m ³ /kg]	4,97
густина на SO ₂ при нормални услови	ρ_{SO_2}	[kg/m ³]	2,86
коефициент на вишок на воздух во ложиште	λ_l	[-]	1,2
коефициент на вишок на воздух во гасовите на излез од оцак	λ_{ig}	[-]	1,2
процентна содржина на SO₃ во продукти на согорување			
$SO_3 = 0,424 r_{SO_2} O_2^{0,5} q_A (Q / Q_M)^2 \text{ [%]}$			
процентна содржина на вишокот кислород по согорувањето на горивото	O ₂	[%]	3,49
$O_2 = \frac{21(\lambda_l - 1)V_{l, \text{min}}}{V_{RS}} \text{ [%]}$			
специфично топлинско оптоварување на напречен пресек на ложиште	q _A	[MW/m ²]	0,88
$q_A = \frac{BH_d}{a_l b_l} \text{ [MW/m}^2\text{]}$			
пресметковна количина топлина внесена во котел	Q	[MW]	70,99
максимална количина топлина внесена во котел	Q _M	[MW]	78,88

Прилог Е. Емисии на азотни оксиди

коэффициент на вишок на воздух во ложиште	λ_i	[-]	1,2
коэффициент на вишок на воздух во гасовите на излез од оцак	λ_{ig}	[-]	1,2
коэффициент на вишок на воздух во зоната на согурување	λ_s	[-]	1,2

Е.1. 25% комунален цврст отпад

АЗОТНИ ОКСИДИ				
<i>емисија на азотни оксиди</i>				
емисија на азотни оксиди сведена на NO ₂ од парните котели во атмосферата	M _{NO2}	[g/s]	1,487	2,528
$\dot{M}_{NO_2} = B_g V_{RS} C_{NO_2} (\lambda_s / \lambda_{ig})$ [g/s]				
вкупна максимална концентрација на азотни оксиди во гасовите во зоната на согурување за λ_s сведена на NO ₂	C _{NO2}	[g/m ³]	0,20889	0,29435
$C_{NO_2} = C_{NO_2}^T + C_{NO_2}^G + C_{NO_2}^B$ [g/m ³]				
термички NO _x	C _{NO2} ^T	[g/m ³]	6,8391E-13	8,35354E-14
горивни NO _x	C _{NO2} ^G	[g/m ³]	0,20889	0,29435
брзи NO _x	C _{NO2} ^B	[g/m ³]		
$C_{NO_2}^G + C_{NO_2}^B = 1,25(0,40 - 0,1N)N \left(\frac{\lambda_s + r}{1 + r} \right)^2 \left(\frac{T_M - 800}{1000} \right)^{0,33}$ [g/m ³]				

Термички NO_x				
$C_{NO_2}^T = 7,03 \cdot 10^3 C_{O_2}^{0,5} e^{-\frac{10860}{T_M} \frac{\tau_r}{\tau_o}}$ [g/m ³]				
концентрација на вишокот кислород во зона на согурување	C _{O2}	[kg/m ³]	0,04453	0,04494
максимална температура во зоната на согурување	T _M	[K]	1.103,08	1.065,30
времетраење на реакциите на формирање на азотни оксиди во ложиштето	τ_r	[s]	0,05075	0,05010
теоретско време за постигнување на рамнотежна концентрација на азот монооксид при T _M	τ_o	[s]	5.834.618.266,67	33.414.414.414,36

концентрација на вишокот кислород во зона на согурување				
$C_{O_2} = \frac{0,21V_{Lmin}[(\lambda_s - 1) + r(\lambda_{rg} - \lambda_s)]C_{O_2}}{[V_{RS} + (\lambda_s - 1)V_{Lmin}](1 + r)}$ [kg/m ³]				
минимално потребен волумен воздух	V _{Lmin}	[m ³ /kg]	4,82	5,86
теоретски волумен на суви продукти на согурување за коэффициент на вишок на воздух во ложиште λ_l	V _{RS}	[m ³ /kg]	4,68	5,63
степен на рецикулација на гасови во зоната на согурување	r	[-]	0,15	0,15
коэффициент на вишок на воздух во рецикулациони гасови	λ_{rg}	[-]	1,2	1,2
коэффициент на вишок на воздух во зоната на согурување	λ_s	[-]	1,2	1,2
прираст на коэффициент на вишок на воздух во ложиште	$\Delta\lambda_i$	[-]	0	0
густина на O ₂ при нормални услови	ρ_{O2}	[kg/m ³]	1,428	1,428

максимална температура во зоната на согурување				
$T_M = \beta_s T_a' (1 - \psi_{zs})^{0,25} (1 - r^{1+r}) m_g$ [K]				
дел од гориво што согурува од излезот од пламениците до завршувањето на интензивното високотемпературно согурување	β_s	[-]	0,96	0,96
условна адијабатска температура на гасови во зоната на согурување	T _a '	[K]	2.141,37	2.068,04
коэффициент на топлинска ефективност на екраните во зоната на јадрото на пламенот	$\psi_{zs} = \psi_{sr}$	[-]	0,9	0,9
коэффициент со кој се зема во предвид начинот на внесување на рецикулационите гасови во ложиштето	n	[-]	5	5
коэффициент со кој се зема во предвид видот на пламениците	m _g	[-]	0,99	0,99
брзина на воздух на излез од пламеници	w	[m/s]		

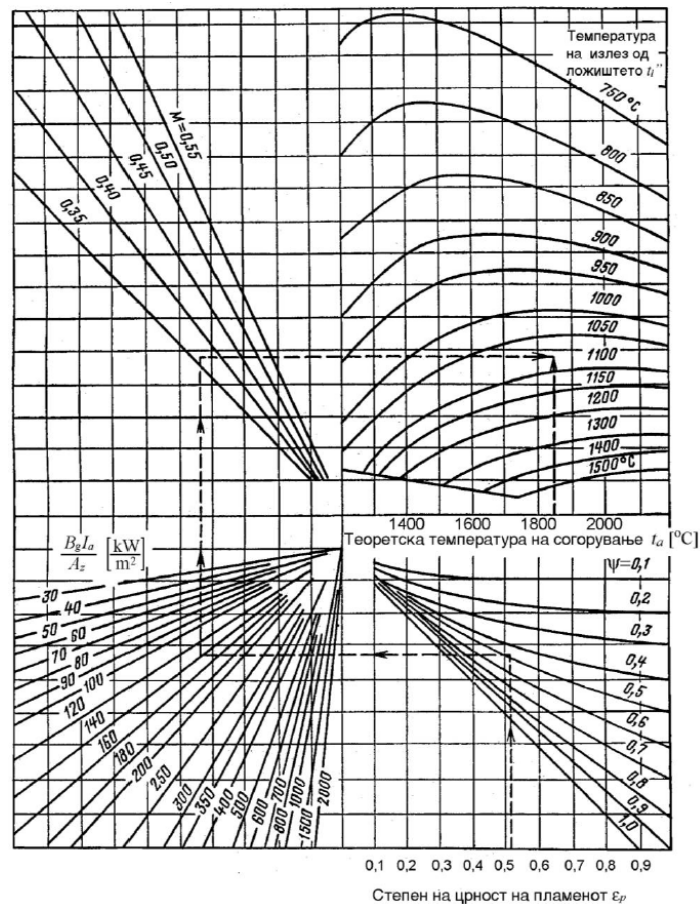
условна адијабатска температура на гасови во зоната на согорување				
$T_a' = \frac{q_l'}{V_{Rm} c_g + 1.0161(\lambda_z - 1) V_{Lmin} c_v} + 273$ [K]				
ослободена топлина во зоната на согорување	q_l'	[kJ/kg]	20.157,35	23.237,33
теоретски волумен на влажни продукти на согорување за коефициент на вишок на воздух во ложиште λ_l	V_{Rwt}	[m ³ /kg]	5,56	6,62
среден специфичен топлински капацитет на гасови за очекувана адијабатска температура (t_a)	c_g	[kJ/m ³ K]	1,67	1,68
Минимално потребен волумен воздух за целосно согорување	V_{Lmin}	[m ³ /kg]	4,82	5,86
среден специфичен топлински капацитет на воздух за очекувана адијабатска температура (t_a)	c_v	[kJ/m ³ K]	1,51542	1,51967
$c_v = 1,46 + 0,092 k_f$ [kJ/m ³ K]				

ослободена топлина во зоната на согорување				
$q_l' = H_d + q_{zv} + q_G$				
долна топлинска моќ на горивото	H_d	[kJ/kg]	20.157,35	23.237,33
топлина внесена во ложиште со загреан воздух	q_{zv}	[kJ/kg]	0	0
физичка топлина на гориво	q_G	[kJ/kg]	0	0

среден специфичен топлински капацитет на гасови за очекувана адијабатска температура (t_a)				
$\hat{c}_g = (1,59 + 0,004 W_s) + 0,14 k_f$ [kJ/m ³ K]				
сведена содржина на влага во гориво	W_s	[%kg/MJ]	0,16	0,12
$W_s = W/H_d$ [%kg/MJ]				
температурен коефициент на промената на специфичниот топлински капацитет	k_f	[K ⁻¹]	0,60236	0,64856
$k_f = (t_a - 1200)/1000$				
очекувана адијабатска температура на гасовите	t_a	[°C]	1.802,36	1.848,56
$t_a = \frac{1800}{\lambda_z} (1 + 10^{-5} q_l')$ [°C]		[K]	2.075,51	2.121,71

времетраење на одвивање на реакциите на формирање на азотни оксиди во ложиштето				
$\tau_r = \frac{\Delta T_r}{T_a' - T_i''} \left(\frac{q_d L}{300} \right)^{0,5} \tau_z$ [s]				
температурен интервал во кој се одвиваат активните реакции на формирање азотни оксиди	ΔT_r	[K]	19,47	18,17
$\Delta T_r = \frac{T_M^2 \cdot 10^{-5}}{0,614 + T_M \cdot 10^{-5}}$ [K]				
периметар на ложиштето	L	[m]	30,00	30,00
апсолутна температура на гасовите на излез од ложиштето	T_i''	[K]	1.148,15	1.123,15
	t_i''	[°C]	875,00	850,00
време на задржување на гасови во ложиште	τ_z	[s]	15,93	14,23

Апсолутната температура на гасовите на излез од ложиштето се пресметува со примена на Номограм претставен на Слика 7.1. За номограм се потребни податоци за ефективен степен на црност на пламенот ε_p , коефициент на топлинска ефективност на екраните во зоната на јадрото на пламенот ψ , изразот $\frac{BI_a}{A_z}$, коефициент на температурно поле во ложиштето M и очекувана адијабатска температура на гасовите t_a . Очекуваната адијабатска температура на гасовите t_a е пресметана погоре, додека останатите параметри ќе бидат претставени подолу.



Слика 7.1. Номограм за определување на апсолутна температура на гасови на излез од ложиште

време на задржување на гасови во ложиште				
$\tau_z = \frac{273\xi}{q_v T_{g,s} v_{g,s} \lambda_i (1+r)}$				
коефициент на исполнетост на напречниот пресек на ложиштето со гасови	ξ	[-]	0,8	0,8
специфично топлинско оптоварување на волуменот на ложиштето	q_v	[MW/m³]	0,03	0,04
$q_{v,M} = \frac{Q_M}{V_i} = \frac{B_M H_d}{V_i}$				
средна пресметковна апсолутна температура на гасовите во волуменот на ложиштето	$T_{g,st}$	[K]	1.125,09	1.094,20
среден сведен волумен на гасовите при $\lambda=1$	$v_{g,s}$	[m³/MJ]	0,28	0,28
$v_{g,s}=0,278+0,001W$				
волумен на ложиште	V_l	[m³]	810,00	810,00
степен на рецикулација на гасови во зоната на согурување	r	[-]	0,15	0,15

коэффициент на температурно поле во ложистето	M	[-]	0,46	0,46
ефективен степен на црност на пламенот	ε_p	[-]	0,23350	0,21149
$\varepsilon_p = 1 - e^{-kps}$				
коэффициент на слабеење на зраци во ложистна средина	k	[1/m*bar]	0,04104	0,03667
притисок на гасовите	p	[bar]	1	1
ефективна дебелина на гасен слој кој зрачи	s	[m]	6,48	6,48
коэффициент на слабеење на зраци во ложистна средина				
$k = k_g r_n = \left(\frac{0,78 + 1,6 r_{H_2O}}{\sqrt{p_g s}} - 0,1 \right) \left(1 - 0,37 \frac{T_g}{1000} \right) r_n$				
волуменско учество на водена пареа	r_{H_2O}	[m ³ /m ³]	0,13688	0,12914
$r_{H_2O} = V_{H_2O} / V_{RIV}$				
парцијален притисок на троатомните гасови	p_n	[bar]	0,26971	0,25627
$p_n = p r_n$				
вкупно волуменско учество на троатомни гасови	r_n	[m ³ /m ³]	0,26971	0,25627
$r_n = r_{RO_2} + r_{H_2O}$				
волуменско учество на троатомни гасови CO ₂ и SO ₂	r_{RO_2}	[m ³ /m ³]	0,13282	0,12714
$r_{RO_2} = V_{RO_2} / V_{RIV}$				
апсолутна температура на гасовите	T_g	[K]	2.075,51	2.121,71
$T_{g,sv} = 0,84 (T_M^{A_1} + T_l^{A_1})^{0,25}$ [K]				
максимална температура во зоната на согорување	T_M	[K]	1.103,08	1.065,30
апсолутна температура на гасовите на излез од ложистето	T_l	[K]	1.148,15	1.123,15
ефективна дебелина на гасен слој кој зрачи				
$s = 3,6 \frac{V}{A_2}$ [m]				
волумен на ложисте	V_l	[m ³]	810,00	810,00
површина на сидови на ложисте	A_z	[m ²]	450,00	450,00
израз - производ				
$\frac{B_g I_a}{A_z}$		[kW/m ²]	64,58	74,47
теоретска енталпија на гасови	I_a	[kJ/kg]	23.027,31	26.555,67
$I_a = q_l = q \left(1 - \frac{u_3 + u_6}{100 - u_4} \right) + (q_v - q_w) + q_r$				
загуба поради хемиски нецелосно согорување	u_3	[%]	0,25	0,25
загуба поради механички нецелосно согорување	u_4	[%]	1,25	1,25
загуба поради физичка топлина на шљака	u_6	[%]	1,25	1,25
количество топлина што се внесува во ложистето со загреаниот и ладниот воздух што навлегува во ложистето и во системот за подготовка на јагленов прав од околината	q_v	[kJ/kg]	152,54	185,72
$q_v = \lambda_l I_l^t$				
енталпија на теоретско количество ладен воздух	I_l^t	[kJ/kg]	127,11	154,76
$I_l^t = V_{Lmin} c_{pv} t_l$				
специфичен топлински капацитет на воздух при t_l	c_{pv}	[kJ/m ³ K]	1,3197	1,3197
температура на околн воздух	t_l	[°C]	20	20
		[K]	293,15	293,15
количество топлина што се внесува во ложистето со предзагреан воздух со надворешен извор на топлина	q_{vv}	[kJ/kg]	0	0
топлина на рециркулирачки гасови (20%*q)	q_r	[kJ/kg]	3.023,60	3.485,60

Е.2. 100% комунален цврст отпад

АЗОТНИ ОКСИДИ				
<i>емисија на азотни оксиди</i>				
емисија на азотни оксиди сведена на NO ₂ од парните котели во атмосферата	M _{NO2}	[g/s]	5,947	10,112
$\dot{M}_{NO_2} = B_g V_{RS} C_{NO_2} (\lambda_g / \lambda_{ig})$ [g/s]				
вкупна максимална концентрација на азотни оксиди во гасовите во зоната на согорување за λs сведена на NO ₂	C _{NO2}	[g/m ³]	0,20889	0,29435
$C_{NO_2} = C_{NO_2}^T + C_{NO_2}^G + C_{NO_2}^B$ [g/m ³]				
термички NO _x	C _{NO2} ^T	[g/m ³]	3,41955E-13	4,17677E-14
горивни NO _x	C _{NO2} ^G	[g/m ³]	0,20889	0,29435
брзи NO _x	C _{NO2} ^B	[g/m ³]		
$C_{NO_2}^G + C_{NO_2}^B = 1,25(0,40 - 0,1N)N \left(\frac{\lambda_g + r}{1 + r} \right)^2 \left(\frac{T_M - 800}{1000} \right)^{0,33}$ [g/m ³]				
Термички NOx				
$C_{NO_2}^T = 7,03 \cdot 10^3 C_{O_2}^{0,5} e^{-\frac{10860}{T_M}} \frac{\tau_r}{\tau_o}$ [g/m ³]				
концентрација на вишокот кислород во зона на согорување	C _{O2}	[kg/m ³]	0,04453	0,04494
максимална температура во зоната на согорување	T _M	[K]	1.103,08	1.065,30
времетраење на реакциите на формирање на азотни оксиди во ложиштето	τ _r	[s]	0,02537	0,02505
теоретско време за постигнување на рамнотежна концентрација на азот монооксид при T _M	τ _o	[s]	5.834.618.266,67	33.414.414.414,36
концентрација на вишокот кислород во зона на согорување				
$C_{O_2} = \frac{0,21V'_{Lmin}[(\lambda_g - 1) + r(\lambda_{rg} - \lambda_g)]\rho_{O_2}}{[V'_{RS} + (\lambda_g - 1)V'_{Lmin}](1 + r)}$ [kg/m ³]				
минимално потребен волумен воздух	V _{Lmin}	[m ³ /kg]	4,82	5,86
теоретски волумен на суви продукти на согорување за коефициент на вишок на воздух во ложиште λl	V _{RS}	[m ³ /kg]	4,68	5,63
степен на рецикулација на гасови во зоната на согорување	r	[-]	0,15	0,15
коефициент на вишок на воздух во рецикулациони гасови	λ _{rg}	[-]	1,2	1,2
коефициент на вишок на воздух во зоната на согорување	λ _s	[-]	1,2	1,2
прираст на коефициент на вишок на воздух во ложиште	Δλ _i	[-]	0	0
густина на O ₂ при нормални услови	ρ _{O2}	[kg/m ³]	1,428	1,428
максимална температура во зоната на согорување				
$T_M = \beta_s T_a' (1 - \psi_{zs})^{0,25} (1 - r^{1+\eta r}) m_g$ [K]				
дел од гориво што согорува од излезот од пламениците до завршувањето на интензивното високотемпературно согорување	β _s	[-]	0,96	0,96
условна адијабатска температура на гасови во зоната на согорување	T _a '	[K]	2.141,37	2.068,04
коефициент на топлинска ефективност на екраните во зоната на јадрото на пламенот	ψ _{zs} =ψ _{sr}	[-]	0,9	0,9
коефициент со кој се зема во предвид начинот на внесување на рецикулационите гасови во ложиштето	n	[-]	5	5
коефициент со кој се зема во предвид видот на пламениците	m _g	[-]	0,99	0,99
брзина на воздух на излез од пламеници	w	[m/s]		
условна адијабатска температура на гасови во зоната на согорување				
$T_a' = \frac{q_i'}{V_{RM} c_g + 1,0161(\lambda_g - 1)V'_{Lmin} c_v} + 273$ [K]				
ослободена топлина во зоната на согорување	q _i '	[kJ/kg]	20.157,35	23.237,33
теоретски волумен на влажни продукти на согорување за коефициент на вишок на воздух во ложиште λl	V _{Rwt}	[m ³ /kg]	5,56	6,62
среден специфичен топлински капацитет на гасови за очекувана адијабатска температура (ta)	c _g	[kJ/m ³ K]	1,67	1,68
Минимално потребен волумен воздух за целосно согорување	V _{Lmin}	[m ³ /kg]	4,82	5,86
среден специфичен топлински капацитет на воздух за очекувана адијабатска температура (ta)	c _v	[kJ/m ³ K]	1,51542	1,51967
$c_v = 1,46 + 0,092k_f$ [kJ/m ³ K]				
ослободена топлина во зоната на согорување				
$q_i' = H_d + q_{zv} + q_G$				
долна топлинска моќ на горивото	H _d	[kJ/kg]	20.157,35	23.237,33
топлина внесена во ложиште со загреан воздух	q _{zv}	[kJ/kg]	0	0
физичка топлина на гориво	q _G	[kJ/kg]	0	0

среден специфичен топлински капацитет на гасови за очекувана адијабатска температура (t_a)				
$c_g = (1,59 + 0,004 W_s) + 0,14 k_t$ [kJ/m ³ K]				
сведена содржина на влага во гориво $W_s = W/H_d$ [%kg/MJ]	W_s	[%kg/MJ]	0,16	0,12
температурен коефициент на промената на специфичниот топлински капацитет $k_t = (t_a - 1200)/1000$	k_t	[K ⁻¹]	0,60236	0,64856
очекувана адијабатска температура на гасовите	t_a	[°C]	1.802,36	1.848,56
$t_a = \frac{1800}{\lambda_s} (1 + 10^{-5} q_{l,1})$ [°C]		[K]	2.075,51	2.121,71

времетраење на одвивање на реакциите на формирање на азотни оксиди во ложиштето				
$\tau_r = \frac{\Delta T_r}{T_a - T_{l,1}} \left(\frac{q_d L}{300} \right)^{0,5}$ [s]				
температурен интервал во кој се одвиваат активните реакции на формирање азотни оксиди $\Delta T_r = \frac{T_M^2 \cdot 10^{-5}}{0,614 + T_M \cdot 10^{-5}}$ [K]	ΔT_r	[K]	19,47	18,17
периметар на ложиштето	L	[m]	30,00	30,00
апсолутна температура на гасовите на излез од ложиштето	$T_{l,1}$	[K]	1.663,15	1.533,15
	$t_{l,1}$	[°C]	1.390,00	1.260,00
време на задржување на гасови во ложиште	τ_z	[s]	3,07	2,87

Апсолутната температура на гасовите на излез од ложиштето се пресметува со примена на Номограм претставен на Слика 7.1.

време на задржување на гасови во ложиште				
$\tau_z = \frac{273 \xi}{q_v T_{g,2} v_{g,2} \lambda_{t,1} (1 + r)}$				
коефициент на исполнетост на напречниот пресек на ложиштето со гасови	ξ	[-]	0,8	0,8
специфично топлинско оптоварување на волуменот на ложиштето $q_{v,M} = \frac{Q_M}{V_l} = \frac{B_M H_d}{V_l}$	q_v	[MW/m ³]	0,13	0,14
средна пресметковна апсолутна температура на гасовите во волуменот на ложиштето	$T_{g,st}$	[K]	1.460,22	1.357,11
среден сведен волумен на гасовите при $\lambda=1$ $v_{g,s} = 0,278 + 0,001 W$	$v_{g,s}$	[m ³ /MJ]	0,28	0,28
волумен на ложиште	V_l	[m ³]	810,00	810,00
степен на рецикулација на гасови во зоната на согорување	r	[-]	0,15	0,15

коэффициент на температурно поле во ложистето	M	[-]	0,46	0,46
ефективен степен на црност на пламенот	ε_p	[-]	0,23350	0,21149
$\varepsilon_p = 1 - e^{-kps}$				
коэффициент на слабеење на зраци во ложистна средина	k	[1/m*bar]	0,04104	0,03667
притисок на гасовите	p	[bar]	1	1
ефективна дебелина на гасен слој кој зрачи	s	[m]	6,48	6,48
коэффициент на слабеење на зраци во ложистна средина				
$k = k_g r_n = \left(\frac{0,78 + 1,6 r_{H_2O}}{\sqrt{p_g s}} - 0,1 \right) \left(1 - 0,37 \frac{T_g}{1000} \right) r_n$				
волуменско учество на водена пареа	r_{H_2O}	[m ³ /m ³]	0,13688	0,12914
$r_{H_2O} = V_{H_2O} / V_{RIV}$				
парцијален притисок на троатомните гасови	p_n	[bar]	0,26971	0,25627
$p_n = p r_n$				
вкупно волуменско учество на троатомни гасови	r_n	[m ³ /m ³]	0,26971	0,25627
$r_n = r_{CO_2} + r_{H_2O}$				
волуменско учество на троатомни гасови CO ₂ и SO ₂	r_{RO_2}	[m ³ /m ³]	0,13282	0,12714
$r_{RO_2} = V_{RO_2} / V_{RIV}$				
апсолутна температура на гасовите	T_g	[K]	2.075,51	2.121,71
$T_{g,sv} = 0,84 (T_M^{A_1} + T_l^{A_1})^{0,25}$ [K]				
максимална температура во зоната на согорување	T_M	[K]	1.103,08	1.065,30
апсолутна температура на гасовите на излез од ложистето	T_l	[K]	1.663,15	1.533,15
ефективна дебелина на гасен слој кој зрачи				
$s = 3,6 \frac{V}{A_z}$ [m]				
волумен на ложисте	V_l	[m ³]	810,00	810,00
површина на сидови на ложисте	A_z	[m ²]	450,00	450,00

израз - производ				
$\frac{B_g I_a}{A_z}$		[kW/m ²]	258,32	297,90
теоретска енталпија на гасови	I_a	[kJ/kg]	23.027,31	26.555,67
$I_a = q_l = q \left(1 - \frac{u_3 + u_6}{100 - u_4} \right) + (q_v - q_w) + q_r$				
загуба поради хемиски нецелосно согорување	u_3	[%]	0,25	0,25
загуба поради механички нецелосно согорување	u_4	[%]	1,25	1,25
загуба поради физичка топлина на шљака	u_6	[%]	1,25	1,25
количество топлина што се внесува во ложистето со загреаниот и ладниот воздух што навлегува во ложистето и во системот за подготовка на јагленов прав од околината	q_v	[kJ/kg]	152,54	185,72
$q_v = \lambda_l I_l^t$				
енталпија на теоретско количество ладен воздух	I_l^t	[kJ/kg]	127,11	154,76
$I_l^t = V_{Lmin} c_{pv} t_l$				
специфичен топлински капацитет на воздух при t_l	c_{pv}	[kJ/m ³ K]	1,3197	1,3197
температура на околн воздух	t_l	[°C]	20	20
		[K]	293,15	293,15
количество топлина што се внесува во ложистето со предзагреан воздух со надворешен извор на топлина	q_{vv}	[kJ/kg]	0	0
топлина на рециркулирачки гасови (20%*q)	q_r	[kJ/kg]	3.023,60	3.485,60

Е.3. 100% јаглен

АЗОТНИ ОКСИДИ			
<i>емисија на азотни оксиди</i>			
емисија на азотни оксиди сведена на NO ₂ од парните котели во атмосферата	M _{NO2}	[g/s]	10,287
$\dot{M}_{NO_2} = B_g V_{RS} C_{NO_2} (\lambda_s / \lambda_{ig})$ [g/s]			
вкупна максимална концентрација на азотни оксиди во гасовите во зоната на согорување за λ _s сведена на NO ₂	C _{NO2}	[g/m ³]	0,32882
$C_{NO_2} = C_{NO_2}^T + C_{NO_2}^G + C_{NO_2}^B$ [g/m ³]			
термички NO _x	C _{NO2} ^T	[g/m ³]	4,1253E-14
горивни NO _x	C _{NO2} ^G	[g/m ³]	0,32882
брзи NO _x	C _{NO2} ^B	[g/m ³]	
$C_{NO_2}^G + C_{NO_2}^B = 1,25(0,40 - 0,1N) \left(\frac{\lambda_s + r}{1 + r} \right)^2 \left(\frac{T_M - 800}{1000} \right)^{0,33}$ [g/m ³]			
Термички NO_x			
$C_{NO_2}^T = 7,03 \cdot 10^3 C_{O_2}^{0,5} e^{-\frac{10860}{T_M} \frac{\tau_r}{\tau_o}}$ [g/m ³]			
концентрација на вишокот кислород во зона на согорување	C _{O2}	[kg/m ³]	0,04414
максимална температура во зоната на согорување	T _M	[K]	1.054,10
времетраење на реакциите на формирање на азотни оксиди во ложиштето	τ _r	[s]	0,04781
теоретско време за постигнување на рамнотежна концентрација на азот монооксид при T _M	τ _o	[s]	57.427.606.153,13
концентрација на вишокот кислород во зона на согорување			
$C_{O_2} = \frac{0,21 V_{Lmin} [(\lambda_s - 1) + r(\lambda_{rg} - \lambda_s)] \rho_{O_2}}{[V_{RS} + (\lambda_s - 1) V_{Lmin}] (1 + r)}$ [kg/m ³]			
минимално потребен волумен воздух	V _{Lmin}	[m ³ /kg]	5,25
теоретски волумен на суви продукти на согорување за коефициент на вишок на воздух во ложиште λ _l	V _{RSt}	[m ³ /kg]	5,15
степен на рецикулација на гасови во зоната на согорување	r	[-]	0,15
коефициент на вишок на воздух во рецикулациони гасови	λ _{rg}	[-]	1,2
коефициент на вишок на воздух во зоната на согорување	λ _s	[-]	1,2
прираст на коефициент на вишок на воздух во ложиште	Δλ _l	[-]	0
густина на O ₂ при нормални услови	ρ _{O2}	[kg/m ³]	1,428
максимална температура во зоната на согорување			
$T_M = \beta_s T_a' (1 - \psi_{zs})^{0,25} (1 - r^{1+nr}) m_g$ [K]			
дел од гориво што согорува од излезот од пламениците до завршувањето на интензивното високотемпературно согорување	β _s	[-]	0,96
условна адијабатска температура на гасови во зоната на согорување	T _a '	[K]	2.046,30
коефициент на топлинска ефективност на екраните во зоната на јадрото на пламенот	ψ _{zs} = ψ _{sr}	[-]	0,9
коефициент со кој се зема во предвид начинот на внесување на рецикулационите гасови во ложиштето	n	[-]	5
коефициент со кој се зема во предвид видот на пламениците	m _g	[-]	0,99
брзина на воздух на излез од пламеници	w	[m/s]	

условна адијабатска температура на гасови во зоната на согорување			
$T_a' = \frac{q_i'}{V_{RM} c_g + 1.0161(\lambda_s - 1)V_{Lmin} c_v} + 273 \text{ [K]}$			
ослободена топлина во зоната на согорување	q_i'	[kJ/kg]	20.250,00
теоретски волумен на влажни продукти на согорување за коефициент на вишок на воздух во ложиште λ_l	V_{RWl}	[m ³ /kg]	5,85
среден специфичен топлински капацитет на гасови за очекувана адијабатска температура (t_a)	c_g	[kJ/m ³ K]	1,67
Минимално потребен волумен воздух за целосно согорување	V_{Lmin}	[m ³ /kg]	5,25
среден специфичен топлински капацитет на воздух за очекувана адијабатска температура (t_a)	c_v	[kJ/m ³ K]	1,51555
$c_v = 1,46 + 0,092k_f \text{ [kJ/m}_n^3\text{K]}$			

ослободена топлина во зоната на согорување			
$q_l' = H_d + q_{zv} + q_G$			
долна топлинска моќ на горивото	H_d	[kJ/kg]	20.250,00
топлина внесена во ложиште со загреан воздух	q_{zv}	[kJ/kg]	0
физичка топлина на гориво	q_G	[kJ/kg]	0

среден специфичен топлински капацитет на гасови за очекувана адијабатска температура (t_a)			
$\bar{c}_g = (1,59 + 0,004W_s) + 0,14k_f \text{ [kJ/m}_n^3\text{K]}$			
сведена содржина на влага во гориво	W_s	[%kg/MJ]	0,00
$W_s = W/H_d \text{ [%kg/MJ]}$			
температурен коефициент на промената на специфичниот топлински капацитет	k_f	[K ⁻¹]	0,60375
$k_f = (t_a - 1200)/1000$			
очекувана адијабатска температура на гасовите	t_a	[°C] [K]	1.803,75 2.076,90
$t_a = \frac{1800}{\lambda_s} (1 + 10^{-5} q_i') \text{ [°C]}$			

времетраење на одвивање на реакциите на формирање на азотни оксиди во ложиштето			
$\tau_r = \frac{\Delta T_r}{T_a - T_i''} \left(\frac{q_d L}{300} \right)^{0,5} \tau_z \text{ [s]}$			
температурен интервал во кој се одвиваат активните реакции на формирање азотни оксиди	ΔT_r	[K]	17,79
$\Delta T_r = \frac{T_M^2 \cdot 10^{-5}}{0,614 + T_M \cdot 10^{-5}} \text{ [K]}$			
периметар на ложиштето	L	[m]	30,00
апсолутна температура на гасовите на излез од ложиштето	T_i''	[K]	1.663,15
	t_i''	[°C]	1.390,00
време на задржување на гасови во ложиште	τ_z	[s]	3,06

Апсолутната температура на гасовите на излез од ложиштето се пресметува со примена на Номограм претставен на Слика 7.1.

време на задржување на гасови во ложиштето			
$\tau_z = \frac{273\xi}{q_V T_{g, sr} v_{g, s} \lambda_l (1+r)}$			
коефициент на исполнетост на напречниот пресек на ложиштето со гасови	ξ	[-]	0,8
специфично топлинско оптоварување на волуменот на ложиштето	q_V	[MW/m ³]	0,13
$q_{V, M} = \frac{Q_M}{V_l} = \frac{B_M H_d}{V_l}$			
средна пресметковна апсолутна температура на гасовите во волуменот на ложиштето	$T_{g, sr}$	[K]	1.450,28
среден сведен волумен на гасовите при $\lambda=1$	$v_{g, s}$	[m ³ /MJ]	0,28
$v_{g, s}=0,278+0,001W$			
волумен на ложиште	V_l	[m ³]	810,00
степен на рецикулација на гасови во зоната на согорување	r	[-]	0,15
коефициент на температурно поле во ложиштето	M	[-]	0,46
ефективен степен на црност на пламенот	ε_p	[-]	0,21419
$\varepsilon_p = 1 - e^{-kps}$			
коефициент на слабеење на зраци во ложишна средина	k	[1/m*bar]	0,03720
притисок на гасовите	p	[bar]	1
ефективна дебелина на гасен слој кој зрачи	s	[m]	6,48
коефициент на слабеење на зраци во ложишна средина			
$k = k_g r_n = \left(\frac{0,78 + 1,6 r_{H_2O}}{\sqrt{p_n s}} - 0,1 \right) \left(1 - 0,37 \frac{T_g}{1000} \right) r_n$			
волуменско учество на водена пареа	r_{H_2O}	[m ³ /m ³]	0,10452
$r_{H_2O} = V_{H_2O} / V_{RW}$			
парцијален притисок на троатомните гасови	p_n	[bar]	0,24851
$p_n = p r_n$			
вкупно волуменско учество на троатомни гасови	r_n	[m ³ /m ³]	0,24851
$r_n = r_{RO_2} + r_{H_2O}$			
волуменско учество на троатомни гасови CO ₂ и SO ₂	r_{RO_2}	[m ³ /m ³]	0,14399
$r_{RO_2} = V_{RO_2} / V_{RW}$			
апсолутна температура на гасовите	T_g	[K]	2.076,90
$T_{g, sr}=0,84(T_M^4+T_l^{*4})^{0,25}$ [K]			
максимална температура во зоната на согорување	T_M	[K]	1.054,10
апсолутна температура на гасовите на излез од ложиштето	T_l^{*}	[K]	1.663,15
ефективна дебелина на гасен слој кој зрачи			
$s = 3,6 \frac{V}{A_z}$ [m]			
волумен на ложиште	V_l	[m ³]	810,00
површина на сидови на ложиште	A_z	[m ²]	450,00

израз - производ			
$\frac{B_g I_a}{A_z}$		[kW/m ²]	259,65
теоретска енталпија на гасови	I _a	[kJ/kg]	23.146,04
$I_a = q_l = q \left(1 - \frac{u_3 + u_6}{100 - u_4} \right) + (q_v - q_w) + q_r$			
загуба поради хемиски нецелосно согорување	u ₃	[%]	0,25
загуба поради механички нецелосно согорување	u ₄	[%]	1,25
загуба поради физичка топлина на шљака	u ₆	[%]	1,25
количество топлина што се внесува во ложиштето со загреаниот и ладниот воздух што навлегува во ложиштето и во системот за подготовка на јагленов прав од околината	q _v	[kJ/kg]	166,13
$q_v = \lambda_i I_i^t$			
енталпија на теоретско количество ладен воздух	I _i ^t	[kJ/kg]	138,44
$I_i^t = V_{Lmin} c_{pv} t_l$			
специфичен топлински капацитет на воздух при t _l	c _{pv}	[kJ/m ³ K]	1,3197
температура на околн воздух	t _l	[°C]	20
		[K]	293,15
количество топлина што се внесува во ложиштето со предзагреан воздух со надворешен извор на топлина	q _{vv}	[kJ/kg]	0
топлина на рециркулирачки гасови (20%*q)	q _r	[kJ/kg]	3.037,50

Е.4. 100% биомаса

АЗОТНИ ОКСИДИ			
емисија на азотни оксиди			
емисија на азотни оксиди сведена на NO ₂ од парните котели во атмосферата	M _{NO2}	[g/s]	2,844
$\dot{M}_{NO_2} = B_g V_{RS} C_{NO_2} (\lambda_s / \lambda_{ig})$ [g/s]			
вкупна максимална концентрација на азотни оксиди во гасовите во зоната на согорување за λ _s сведена на NO ₂	C _{NO2}	[g/m ³]	0,11341
$C_{NO_2} = C_{NO_2}^T + C_{NO_2}^G + C_{NO_2}^B$ [g/m ³]			
термички NO _x	C _{NO2} ^T	[g/m ³]	1,29545E-15
горивни NO _x	C _{NO2} ^G	[g/m ³]	0,11341
брзи NO _x	C _{NO2} ^B	[g/m ³]	
$C_{NO_2}^G + C_{NO_2}^B = 1,25(0,40 - 0,1N) \left(\frac{\lambda_s + r}{1 + r} \right)^2 \left(\frac{T_M - 800}{1000} \right)^{0,33}$ [g/m ³]			

Термички NO_x			
$C_{NO_2}^T = 7,03 \cdot 10^{-3} C_{O_2}^{0,5} e^{-\frac{10860}{T_M}} \frac{\tau_r}{\tau_o}$ [g/m ³]			
концентрација на вишокот кислород во зона на согорување	C _{O2}	[kg/m ³]	0,04334
максимална температура во зоната на согорување	T _M	[K]	1.005,36
времетраење на реакциите на формирање на азотни оксиди во ложиштето	τ _r	[s]	0,03033
теоретско време за постигнување на рамнотежна концентрација на азот монооксид при T _M	τ _o	[s]	697.533.620.732,56

концентрација на вишокот кислород во зона на согорување			
$C_{O_2} = \frac{0,21V_{Lmin}[(\lambda_s - 1) + r(\lambda_{tg} - \lambda_s)]\rho_{O_2}}{[V_{RSr} + (\lambda_s - 1)V_{Lmin}](1 + r)}$ [kg/m ³]			
минимално потребен волумен воздух	V_{Lmin}	[m ³ /kg]	4,13
теоретски волумен на суви продукти на согорување за коефициент на вишок на воздух во ложиште λ_l	V_{RSr}	[m ³ /kg]	4,14
степен на рецикулација на гасови во зоната на согорување	r	[-]	0,15
коефициент на вишок на воздух во рецикулациони гасови	λ_{tg}	[-]	1,2
коефициент на вишок на воздух во зоната на согорување	λ_s	[-]	1,2
прираст на коефициент на вишок на воздух во ложиште	$\Delta\lambda_l$	[-]	0
густина на O ₂ при нормални услови	ρ_{O_2}	[kg/m ³]	1,428
максимална температура во зоната на согорување			
$T_M = \beta_s T_a' (1 - \psi_{zs})^{0,25} (1 - r^{1 + nr}) m_g$ [K]			
дел од гориво што согорува од излезот од пламениците до завршувањето на интензивното високотемпературно согорување	β_s	[-]	0,96
условна адијабатска температура на гасови во зоната на согорување	T_a'	[K]	1.951,68
коефициент на топлинска ефективност на екраните во зоната на јадрото на пламенот	$\psi_{zs} = \psi_{sr}$	[-]	0,9
коефициент со кој се зема во предвид начинот на внесување на рецикулационите гасови во ложиштето	n	[-]	5
коефициент со кој се зема во предвид видот на пламениците	m_g	[-]	0,99
условна адијабатска температура на гасови во зоната на согорување			
$T_a' = \frac{q_l'}{V_{RM} c_g + 1,0161(\lambda_s - 1)V_{Lmin} c_v} + 273$ [K]			
ослободена топлина во зоната на согорување	q_l'	[kJ/kg]	15.625,50
теоретски волумен на влажни продукти на согорување за коефициент на вишок на воздух во ложиште λ_l	V_{RWt}	[m ³ /kg]	4,83
среден специфичен топлински капацитет на гасови за очекувана адијабатска температура (ta)	c_g	[kJ/m ³ K]	1,66
Минимално потребен волумен воздух за целосно согорување	V_{Lmin}	[m ³ /kg]	4,13
среден специфичен топлински капацитет на воздух за очекувана адијабатска температура (ta)	c_v	[kJ/m ³ K]	1,50916
$c_v = 1,46 + 0,092k_t$ [kJ/m ³ K]			
ослободена топлина во зоната на согорување			
$q_l' = H_d + q_{zv} + q_G$			
долна топлинска моќ на горивото	H_d	[kJ/kg]	15.625,50
топлина внесена во ложиште со загреан воздух	q_{zv}	[kJ/kg]	0
физичка топлина на гориво	q_G	[kJ/kg]	0
среден специфичен топлински капацитет на гасови за очекувана адијабатска температура (ta)			
$\tilde{c}_g = (1,59 + 0,004W_s) + 0,14k_t$ [kJ/m ³ K]			
сведена содржина на влага во гориво	W_s	[%kg/MJ]	0,00
$W_s = W/H_d$ [%kg/MJ]			
температурен коефициент на промената на специфичниот топлински капацитет	k_t	[K ⁻¹]	0,53438
$k_t = (t_a - 1200)/1000$			
очекувана адијабатска температура на гасовите	t_a	[°C]	1.734,38
$t_a = \frac{1800}{\lambda_s} (1 + 10^{-5} q_l')$ [°C]		[K]	2.007,53

времетраење на одвивање на реакциите на формирање на азотни оксиди во ложиштето			
$\tau_r = \frac{\Delta T_r}{T_a - T_l''} \left(\frac{q_A L}{300} \right)^{0.5} \tau_z$ [s]			
температурен интервал во кој се одвиваат активните реакции на формирање азотни оксиди	ΔT_r	[K]	16,20
$\Delta T_r = \frac{T_M^2 \cdot 10^{-5}}{0,614 + T_M \cdot 10^{-5}}$ [K]			
периметар на ложиштето	L	[m]	30,00
апсолутна температура на гасовите на излез од ложиштето	T_l''	[K]	1.443,15
	t_l''	[°C]	1.170,00
време на задржување на гасови во ложиште	τ_z	[s]	4,49

Апсолутната температура на гасовите на излез од ложиштето се пресметува со примена на Номограм претставен на Слика 7.1.

време на задржување на гасови во ложиште			
$\tau_z = \frac{273\xi}{q_V T_{g, sr} v_{g, s} \lambda_1 (1+r)}$			
коэффициент на исполнетост на напречниот пресек на ложиштето со гасови	ξ	[-]	0,8
специфично топлинско оптоварување на волуменот на ложиштето	q_V	[MW/m ³]	0,10
$q_{V, M} = \frac{Q_M}{V_l} = \frac{B_M H_d}{V_l}$			
средна пресметковна апсолутна температура на гасовите во волуменот на ложиштето	$T_{g, sr}$	[K]	1.278,07
среден сведен волумен на гасовите при $\lambda=1$ $v_{g, s}=0,278+0,001 W$	$v_{g, s}$	[m ³ /MJ]	0,28
волумен на ложиште	V_l	[m ³]	810,00
степен на рецикулација на гасови во зоната на согорување	r	[-]	0,15

коэффициент на температурно поле во ложиштето	M	[-]	0,46
ефективен степен на црност на пламенот	ε_p	[-]	0,25294
$\varepsilon_p = 1 - e^{-kps}$			
коэффициент на слабеење на зраци во ложишна средина	k	[1/m*bar]	0,04500
притисок на гасовите	p	[bar]	1
ефективна дебелина на гасен слој кој зрачи	s	[m]	6,48
коэффициент на слабеење на зраци во ложишна средина			
$k = k_g r_n = \left(\frac{0,78 + 1,6 r_{H_2O}}{\sqrt{p_n s}} - 0,1 \right) \left(1 - 0,37 \frac{T_g}{1000} \right) r_n$			
волуменско учество на водена пареа $r_{H_2O} = V_{H_2O} / V_{RW}$	r_{H_2O}	[m ³ /m ³]	0,12378
парцијален притисок на троатомните гасови $p_n = p r_n$	p_n	[bar]	0,27867
вкупно волуменско учество на троатомни гасови $r_n = r_{RO_2} + r_{H_2O}$	r_n	[m ³ /m ³]	0,27867
волуменско учество на троатомни гасови CO ₂ и SO ₂ $r_{RO_2} = V_{RO_2} / V_{RW}$	r_{RO_2}	[m ³ /m ³]	0,15489
апсолутна температура на гасовите $T_{g, sr}=0,84(T_M^4 + T_l''^4)^{0,25}$ [K]	T_g	[K]	2.007,53
максимална температура во зоната на согорување	T_M	[K]	1.005,36
апсолутна температура на гасовите на излез од ложиштето	T_l''	[K]	1.443,15
ефективна дебелина на гасен слој кој зрачи			
$s = 3,6 \frac{V}{A_z}$ [m]			
волумен на ложиште	V_l	[m ³]	810,00
површина на сидови на ложиште	A_z	[m ²]	450,00

израз - производ			
$\frac{B_g I_a}{A_z}$		[kW/m ²]	200,38
теоретска енталпија на гасови	I_a	[kJ/kg]	17.862,74
$I_a = q_l = q \left(1 - \frac{u_3 + u_6}{100 - u_4} \right) + (q_v - q_{vv}) + q_r$			
загуба поради хемиски нецелосно согорување	u_3	[%]	0,25
загуба поради механички нецелосно согорување	u_4	[%]	1,25
загуба поради физичка топлина на шљака	u_6	[%]	1,25
количество топлина што се внесува во ложиштето со загреаниот и ладниот воздух што навлегува во ложиштето и во системот за подготовка на јагленов прав од околината	q_v	[kJ/kg]	130,76
$q_v = \lambda_l I_l^t$			
енталпија на теоретско количество ладен воздух	I_l^t	[kJ/kg]	108,97
$I_l^t = V_{Lmin} c_{pv} t_l$			
специфичен топлински капацитет на воздух при t_l	c_{pv}	[kJ/m ³ K]	1,3197
температура на околн воздух	t_l	[°C]	20
		[K]	293,15
количество топлина што се внесува во ложиштето со предзагреан воздух со надворешен извор на топлина	q_{vv}	[kJ/kg]	0
топлина на рециркулирачки гасови (20%*q)	q_r	[kJ/kg]	2.343,83