ГОДИШНИК НА УНИВЕРСИТЕТА ПО АРХИТЕКТУРА, СТРОИТЕЛСТВО И ГЕОДЕЗИЯ СОФИЯ

Том Volume 59 2026 Брой Issue 3

ANNUAL OF THE UNIVERSITY OF ARCHITECTURE, CIVIL ENGINEERING AND GEODESY SOFIA

DOI: 10.71167/uaceg.2026.590302

Получена: 17.02.2026 г.
Приета: 26.02.2026 г.

ЧУВСТВИТЕЛНОСТ НА ОЦЕНКАТА НА ЖИЗНЕНИЯ ЦИКЪЛ КЪМ БАЗИ ДАННИ И СОФТУЕР: КАЗУС ЗА ТЕХНОЛОГИИ ЗА РЕДУЦИРАНЕ НА PFAS В ИНФИЛТРАТ ОТ ДЕПА

Д. Вълчев[1], И. Рибарова[2]

Ключови думи: *оценка на жизнения цикъл, LCA, PFAS, инфилтрат, депо за битови отпадъци, бази данни, OpenLCA, Umberto LCA*

РЕЗЮМЕ

Статията изследва доколко изборът на софтуер и база данни влияе върху резултатите за оценката на жизнения цикъл (LCA) на технологии за отстраняване на пер- и полифлуороалкилните вещества (PFAS) от инфилтрат от депа. Сравнени са три алтернативни технологии за третиране на концентрата от обратна осмоза (ОО), предвидена като последно стъпало след механично и биологично пречистване на инфилтрата: А1 – плазмен реактор; А2 – допълнително концентриране на PFAS с втори модул за ОО преди плазмения реактор; А3 – допълнително концентриране на PFAS с втори модул за ОО преди модул за изпарение с последващо транспортиране на твърдия остатък за изгаряне извън обекта. Анализът е изпълнен с Umberto LCA + Ecoinvent (ReCiPe 2016 в 18 категории и с нормализация) и OpenLCA 2.2.0 + ELCD (EN 15804+A2; EF 3.0 в 28 категории и с нормализация). Въпреки различните получени числени стойности и различен профил на водещите категории (при Umberto доминират токсичност/екотоксичност и еутрофикация, а при OpenLCA – прахови частици и подкиселяване), общото класиране е идентично: А2 е най-благоприятна, следвана от А1, а А3 е с най-високо потенциално въздействие. И в двата модела основното въздействие върху околната среда е доминирано от използваната електроенергия. Независимо от

[1] Добрил Вълчев, гл. ас. д-р инж., кат. „Водоснабдяване, канализация и пречистване на води“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: dvalchev_fhe@uacg.bg

[2] Ирина Рибарова, проф. д-р инж., кат. „Водоснабдяване, канализация и пречистване на води“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: ribarova_fhe@uacg.bg

огромните детайлни бази данни за LCA, PFAS са все още недостатъчно представени и в двата модела, поради началния етап на проучванията на техните специфични въздействия. Това показва необходимост от изследвания, обогатяване и актуализация за постигане на по-надеждни LCA оценки, касаещи PFAS. Плазмените решения (особено при по-силно концентриране на входния поток) са обещаващи, но също изискват експериментална верификация.

1. Въведение

Разбирането за неразривната и многостранна връзка между икономиката, човека и природата води до нов поглед върху постиженията на индустриалната революция. Технологични иновации, допринесли съществено за икономическото развитие и подобряването на бита, като например незалепващите тефлонови покрития, вече се преоценяват с оглед на дългосрочното им въздействие върху околната среда и човешкото здраве. Освен това, екологичните и здравните съображения заемат все по-значимо място в процеса на разработване и внедряване на съвременни иновации.

Настоящото изследване е мотивирано от необходимостта да се подпомогне вземането на информирано решение още на ранен етап от развитието на нововъзникваща технология, като потенциалното ѝ въздействие върху околната среда се оценява количествено чрез съвременни, утвърдени методики. Изследваната технология е насочена към отстраняване на пер- и полифлуороалкилни вещества (PFAS) от инфилтрат от регионални депа за твърди битови отпадъци (ТБО).

1.1. Пер- и полифлуороалкилни вещества (PFAS) в инфилтрата от регионални депа за ТБО

Пер- и полифлуороалкилните вещества (PFAS) са флуорирани съединения, съдържащи поне един напълно флуориран метилов или метиленов въглероден атом (т.е. без прикрепени атоми на водород, хлор, бром или йод) [1]. По данни от 2018 г. броят на регистрираните PFAS, които може да са налични на световния пазар, възлиза на 4730. Освен с големия си брой, тези съединения се характеризират със значително разнообразие в молекулярните си структури и във физико-химичните и биологичните си свойства [1]. Високата химична стабилност на PFAS, дължаща се на здравината на C-F връзката, обуславя тяхната устойчивост на разграждане в природни условия и натрупване в околната среда, което е довело до класифицирането им като „вечни химикали“ [2]. Това поражда значителни екологични и здравни предизвикателства и налага разработване и прилагане на технологии за ограничаване на емисиите на PFAS в природата.

Депата за ТБО са оценени като един от основните източници на тези вечни химикали в природата, тъй като в тях се депонират значителни количества PFAS-съдържащи продукти [3]. Поради това, именно инфилтратът от депата е обект на настоящото изследване.

1.2. Технологии за отстраняване на PFAS от води

Въпреки че негативните ефекти от въздействието на PFAS върху околната среда и човешкото здраве все още не са напълно изяснени, съществуващите научни изследвания

показват, че с напредването на познанието нараства и степента на загриженост за техния мащаб. В резултат на това, PFAS се изучават интензивно в различни научни области, включително аналитична химия, медицина, технологии за производство и технологии за пречистване.

По отношение на пречистване на води, съдържащи PFAS, технологиите могат условно да бъдат разделени в две основни групи:

1. технологии, които отстраняват PFAS от водната фаза, но ги концентрират в задържан отпадък, изискващ последващо управление;

2. технологии, които трансформират PFAS в по-малко токсични или нетоксични продукти, или ги елиминират напълно.

Към първата група принадлежат мембранните процеси, изпарението (дестилацията), технологиите с анионообменни смоли и адсорбционни материали, а към втората група се отнасят усъвършенстваните окислителни процеси (Advanced Oxidation Processes, AOPs), сред които и плазмените технологии.

В настоящото изследване сравнението е направено между две технологии: изпарение с последващо изгаряне на твърдия остатък (като представител на конвенционалните технологии, които генерират отпадък, изискващ последващо управление) и плазмено третиране (като нововъзникваща технология, която директно разгражда или елиминира PFAS). По този начин избраният подход позволява не само оценка на въздействието върху околната среда на нова технология, но и нейното съпоставяне с утвърдено технологично решение.

1.3. Избор на метод за количествено определяне на въздействието върху околната среда

За оценка на въздействието върху околната среда е избрана методиката за оценка на жизнения цикъл (Life Cycle Assessment, LCA), поради нейната всеобхватност, широка приложимост и наличието на международно утвърдени стандарти за прилагането ѝ – ISO 14040 и ISO 14044 [4, 5].

Въпреки, че LCA представлява мощен инструмент за сравнение на алтернативи, чувствителността на резултатите спрямо входните данни и използвания инструментариум остава съществено изследователско предизвикателство. Това се дължи на необходимостта от използване на голям брой входни параметри с различно качество и произход, както и на прилагането на обширни бази данни, които могат съществено да повлияят върху резултатите и да доведат до различни заключения [6]. Поради тази причина редица автори препоръчват, когато е възможно, използването на повече от един софтуерен инструмент или база данни с цел повишаване на надеждността на анализа и ограничаване на риска от методологична пристрастност [6].

Целта на настоящата статия е да анализира влиянието на два различни инструментариума за оценка на жизнения цикъл върху получените резултати и направените заключения, както и отражението им върху избора на технология за отстраняване на PFAS от инфилтрат от депа за ТБО. В научната литература не бяха намерени други статии по тази тема, освен една публикация на екипа, разглеждаща само един инструмент за LCA [7].

2. Материали и методи

2.1. Изследвани технологии и алтернативи

Изследването е проведено за реален казус на инфилтрата от депото на гр. София, управляван от Столично предприятие за третиране на отпадъци (СПТО). Освен предоставените данни от мониторинг от самото предприятие, допълнително са вземани проби за уточняване на специфични параметри, в т.ч. концентрациите на някои PFAS. Повече информация за цялата разработка може да бъде намерена в публикация на екипа [7].

Двете технологии, които са обект на анализа, са изпарение и плазмено третиране.

Технология с изпарение

Процесът на пречистване на води, съдържащи PFAS, чрез изпарение се основава на физическото отделяне на водната фаза от разтворените замърсители. В резултат на фазовия преход PFAS, поради ниската си летливост, се концентрират в остатъчната фаза, докато пречистената вода се отделя под формата на пара и се събира като кондензат. Методът позволява ефективно редуциране на концентрациите на PFAS във водния поток, но води до образуване на концентриран остатък, който изисква последващо третиране или обезвреждане. Поради това изпарението често се комбинира с допълнителни технологии, като изгаряне на остатъка, с цел цялостно управление на замърсителите. Поради високите енергийни нужди концентрирането на потока преди изпарение е силно препоръчително.

Технология с плазма

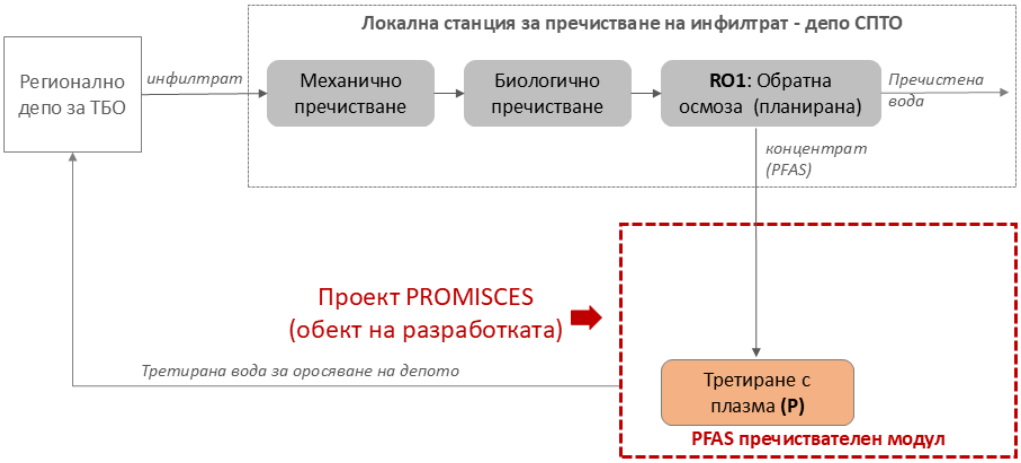
Плазмата, често наричана „четвърто агрегатно състояние на материята“, се състои от йони, електрони, неутрални частици и радикали, които взаимодействат интензивно със замърсителите в третираната среда. Основното предимство на плазмените процеси е способността им да разграждат стабилни химични връзки чрез комбинираното действие на силни окислители като хидроксилни радикали, озон, атомарен кислород и ултравиолетово лъчение. Въпреки потенциалните им предимства, широкото приложение на плазмените технологии е ограничено основно от предизвикателства, свързани с енергийната ефективност. Това също поражда необходимост от предварително концертиране на потока, който ще се третира.

Двете технологии са включени в цялостния процес на пречистване на инфилтрата от депото, със съответните предшестващи или последващи стъпала/модули. Инженерните съображения показват, че е целесъобразно да бъдат разгледани три алтернативи.

2.1.1. Алтернатива 1 (A1 – RO1/P): Модул за плазмена обработка (P) на концентрата от система обратна осмоза (RO1)

При тази алтернатива след съществуващото биологично пречистване на инфилтрата на депото е предвиден модул за обратна осмоза RO1, целящ концентриране на потока, съдържащ PFAS, за да се намали енергийният разход за плазмена обработка (фиг. 1). Съответно, плазменият модул се оразмерява само за концентрата на RO1.

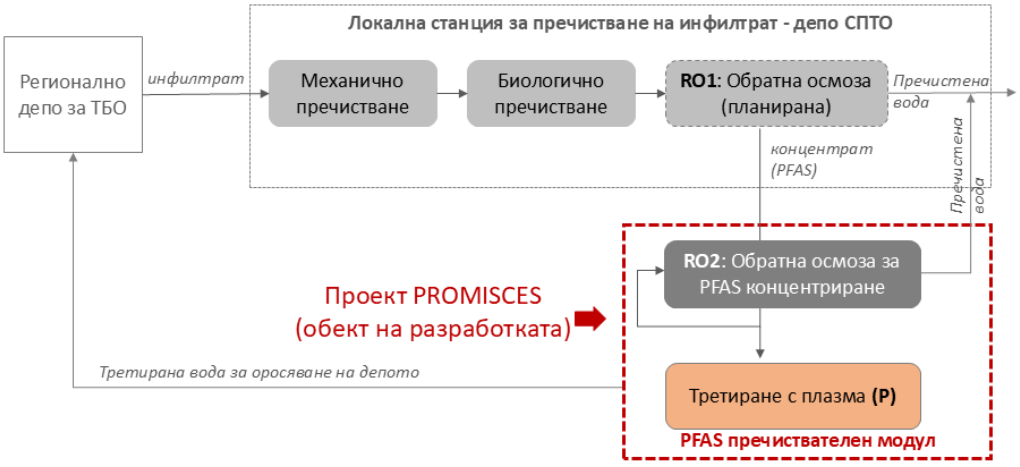
Дебитът на концентрата е по-нисък от този на дебита на инфилтрата от депото, но концентрацията е по-висока, което прави този поток икономически и енергийно по-изгодна опция за третиране от директното инсталиране на система за плазмена обработка в основния поток на инфилтрата от депото.



Фиг. 1. Технологична схема и граница на системата на Алтернатива 1 (A1 – RO1/P)

2.1.2. Алтернатива 2 (A2 – RO2/P): Добавяне на допълнителен модул за обратна осмоза (RO2) за допълнително концентриране на потока на концентрат, преди модула за плазмена обработка (P)

Тази алтернатива (фиг. 2) предлага допълнително концентриране на отпадъчния поток спрямо A1.



Фиг. 2. Технологична схема и граница на системата на Алтернатива 2 (A2 – RO2/P)

Инсталирането на допълнителна система за обратна осмоза (RO2) преди плазмения реактор има за цел да намали още повече дебита и да увеличи концентрацията на PFAS в сравнение с A1, с което се очаква да се намали общият разход на енергия за плазмения реактор.

2.1.3. Алтернатива 3 (А3 – RO2/E): Добавяне на модул RO2 за допълнително концентриране на потока на концентрат, преди модул за изпаряване (Е) и транспортиране на утайките/солите за изгаряне извън обекта

Тази алтернатива (фиг. 3) е аналогична на А2, но не включва плазмена обработка, а модул за изпарение (конвенционална технология). Твърдият остатък (утайки/соли с високо съдържание на PFAS) се транспортира до съоръжение за изгаряне извън обекта.



Фиг. 3. Технологична схема и граница на системата на Алтернатива 3 (А3 – RO2/E)

В този конкретен случай отстраняването на PFAS се извършва извън границите на системата, тъй като на място няма налично съоръжение за изгаряне. Следва да се отбележи, че в този конкретен случай не се наблюдава въздействие върху околната среда от изгарянето, но ще има въздействия, произтичащи от транспортирането.

2.2. Входни и изходни потоци

В проучването са взети предвид с техните количествени изражения три входни потока:

- поток на енергията;
- поток на материалите;
- поток на транспорта.

Изходните потоци, съответно, са следните:

- емисии във въздуха: те се генерират извън границите на системата (производство на енергия нагоре по веригата) и се изчисляват директно със софтуерите за LCA;
- емисии във водата: те включват PFAS, които не се редуцират по време на обработката, и нитрати, произведени от азота в околния въздух по време на процеса на плазмена обработка.

Оценените стойности на входящите и изходящите потоци са представени детайлно в [7] и приложенията към нея. В табл. 1 са показани обобщените входни и изходни потоци от [7] с цел по-ясно представяне на резултатите от настоящото изследване.

Таблица 1. Входни и изходни потоци за трите алтернативи съгласно [7]

Входни потоци			
Енергия, kWh/m^3 (вход система)			
Параметър/Алтернатива	A1	A2	A3
Генериране на плазма			
Електрозахранване високо напрежение – 40 kV, за генератора на плазма	26	18,72	не
Електрозахранване ниско напрежение – 210 – 230V, за охлаждане на трансформатора и кондензаторите – въздушно и водно	3,88	3,14	не
Аерация			
Компресор за рециркулация на газов носител аргон (99,35 % от потока)	1,16	0,33	не
Дозираща инсталация за реагент			
Разбъркване на съдовете за приготвяне на реагент и дозиране (вертикален миксер с пропелер и дозаторни помпи)	4,92	4,08	не
Изпарител[a]			
Енергийна консумация на системата за изпарение (загряване, създаване на вакуум, рециркулация, почистване и т.н.)	не	не	28
Система за обратна осмоза (RO)			
Препомпване, обратна промивка, подготовка и дозиране на реагенти (сярна киселина и антискалант)	не	6,55	6,55
Материали, kg/m^3 (вход система)			
Параметър/Алтернатива	A1	A2	A3
Аерация на плазмения реактор			
Газов носител (газ Аргон) – маса	0,70	0,28	не
Дозиране на реагент (сърфактант) за плазмения реактор			
Реагент цетримониев бромид (Cetrimonium bromide – CTAB) – 0,4 mM	0,15	0,06	не
Водна маса за подготовка на разтвора	492,85	197,14	не
Система за обратна осмоза (RO)			
Сярна киселина	не	6	6
Антискалант	не	0,005	0,005
Доставка, t* km/m^3 (вход система)			
Параметър/Алтернатива	A1	A2	A3
Плазмен реактор			
Доставка на аргон (съдове под налягане с вместимост 8,5 m^3)	1,33	0,54	не
Доставка на цетримониев бромид (CTAB)	0,06	0,02	не
Изпарител			
Транспорт на остатъчната твърда фаза (утайки/соли) след изпарение до най-близко разположената система за изгаряне	не	не	18,57
Система за обратна осмоза (RO)[b]			
Доставка на сярна киселина**	не	0	0
Доставка на антискалант**	не	0	0
Изходни потоци			
Емисии към водата[c]**, kg/m^3 (изход система)**			
Параметър/Алтернатива	A1	A2	A3
PFAS	$0{,}50\times10^{-6}$	$0{,}49\times10^{-6}$	не
Нитрати	0,10	0,04	не
Система за обратна осмоза (RO)			
PFAS	не	$0{,}60\times10^{-7}$	$0{,}60\times10^{-7}$

[a] *Взема се предвид само енергията за изпаряване, тъй като изгарянето се извършва извън обекта с незначителна енергийна консумация за утайките/солите, като се отчита цялостното количество отпадъци, които се вкарват в съществуващата инсталация.*

[b] *Поради малките количества материалите за втория модул RO ще бъдат доставени заедно с материалите за основния RO модул.*

[c] *Емисиите на PFAS са незначителни в изходните потоци след изпарение и изгаряне.*

2.3. Инструментариум

Оценката на въздействието върху околната среда се извършва в съответствие със серията стандарти ISO 14040 за оценка на жизнения цикъл (LCA). Най-голямото предизвикателство в четирифазния алгоритъм на стандарта е фаза 3 – количествено определяне на категориите на въздействие, тъй като тя зависи от размера на наличната база данни за необходимите изчисления, а този процес изисква използването на специализиран софтуер. В настоящото проучване се използват две софтуерни приложения със съответните им бази данни:

- софтуер Umberto LCA и база данни Ecoinvent;
- софтуер OpenLCA 2.2.0 (EN 15804 +A2 Method; EF 3.0 Hermalisation and weighting set) и база данни ELCD (European reference Life Cycle Database of the Joint Research Center, version 3.2 from October 2015).

Техният избор е продиктуван от следните съображения: достъпност и цена на базите данни и софтуера; ранния етап на развитие на едната технология (непълни данни) и енергоемкостта на процесите, изискваща включването на задълбочен анализ на използваната енергия в съответния софтуер [6].

2.3.1. Софтуер Umberto LCA

Този софтуер е разработен на базата на методиката ReCiPe 2016 [8]. Първичен резултат от използването на методиката и софтуера е изчисляването на осемнадесет междинни категории на въздействие, показани в табл. 2.

Таблица 2. Междинни категории на въздействие в двата използвани софтуера

Софтуер Umberto LCA (18 категории)	**Софтуер OpenLCA (28 категории)**
1.Подкиселяване (сухоземно) (**TAP**)	1.Подкиселяване (**TAP**)
2.Формиране на озон (тропосфера, хора) (**HOFP**)	2.Фотохимично образуване на озон (**HOFP**)
3.Формиране на озон (тропосфера, екосистеми) (**EOFP**)	
4.Глобално затопляне (**GWP**)	3.Изменение на климата (**GWP**)
	4.Изменение на климата – биогенно (**GWPb**)
	5.Изменение на климата – изкопаеми горива (**GWPf**)
	6.Изменение на климата – използване на земята и промяна в използването на земята (**GWPl**)
5.Използване на земята, трансформация (**LOP**)	7.Използване на земята (**LOP**)
6.Екотоксичност, сладководна (**FETP**)	8.Екотоксичност, сладководна (**FETP**)
7.Екотоксичност, морска (**METP**)	9.Екотоксичност, сладководна – неорганични вещества (**FETPi**)
8.Екотоксичност, сухоземна (**TETP**)	10.Екотоксичност, сладководна – органични вещества (**FETPo**)
	11.Екотоксичност, сладководна – метали (**FETPm**)
9.Изчерпване на озон (стратосфера) (**ODP**)	12.Изчерпване на озона (**ODP**)
10.Еутрофикация, сладководна (**FEP**)	13.Еутрофикация, сладководна (**FEP**)
11.Еутрофикация, морска (**MEP**)	14.Еутрофикация, морска (**MEP**)

	15.Еутрофикация, сухоземна (**TEP**)
12.Използване на водата (**WCP**)	16.Използване на водата (**WCP**)
13.Токсичност за човека, ракова (**HTPc**)	17.Токсичност за човека, ракова (**HTPc**)
	18.Токсичност за човека, ракова – неорганични вещества (**HTPci**)
	19.Токсичност за човека, ракова – метали (**HTPcm**)
	20.Токсичност за човека, ракова – органични вещества (**HTPco**)
14.Токсичност за човека, неракова (**HTPnc**)	21.Токсичност за човека, неракова (**HTPnc**)
	22.Токсичност за човека, неракова – неорганични вещества (**HTPnci**)
	23.Токсичност за човека, неракова – органични вещества (**HTPnco**)
	24.Токсичност за човека, неракова – метали (**HTPncm**)
15.Йонизираща радиация (**IRP**)	25.Йонизиращо лъчение (**IRP**)
16.Прахови частици (**PMFP**)	26.Прахови частици (**PMFP**)
17.Изчерпване на фосилни ресурси (**FFP**)	27.Изчерпване на фосилни ресурси (**FFP**)
18.Минерални ресурси (**SOP**)	28.Използване на ресурси, минерали и метали (**SOP**)

Забележка: В червено са показани категориите на въздействие, които са еднакви за двата софтуера.

След определяне на числеността изражение на тези осемнадесет категории с техните мерни единици, следващата стъпка включва нормализиране на получените стойности. Целта на процеса на нормализиране е да се преизчисли всяка категория, така че да се приложат еднакви мерни единици за всички тях, което да позволи тяхното сравнение и групиране. Често използвана референция е средното годишно екологично натоварване в дадена страна или континент, разделено на броя на жителите. В настоящото проучване нормализирането е извършено съгласно ревизираните нормализиращи коефициенти на ReCiPe 2016 [9]. На практика нормализацията се извършва чрез разделяне на характеризираната стойност за всяка категория на съответния нормализиращ коефициент за категорията, в резултат на което се получават нормализирани показатели. Това позволява да се оцени относителната значимост на отделните категории на въздействие и улеснява последващия сравнителен анализ и интерпретацията на резултатите.

2.3.2. Софтуер OpenLCA

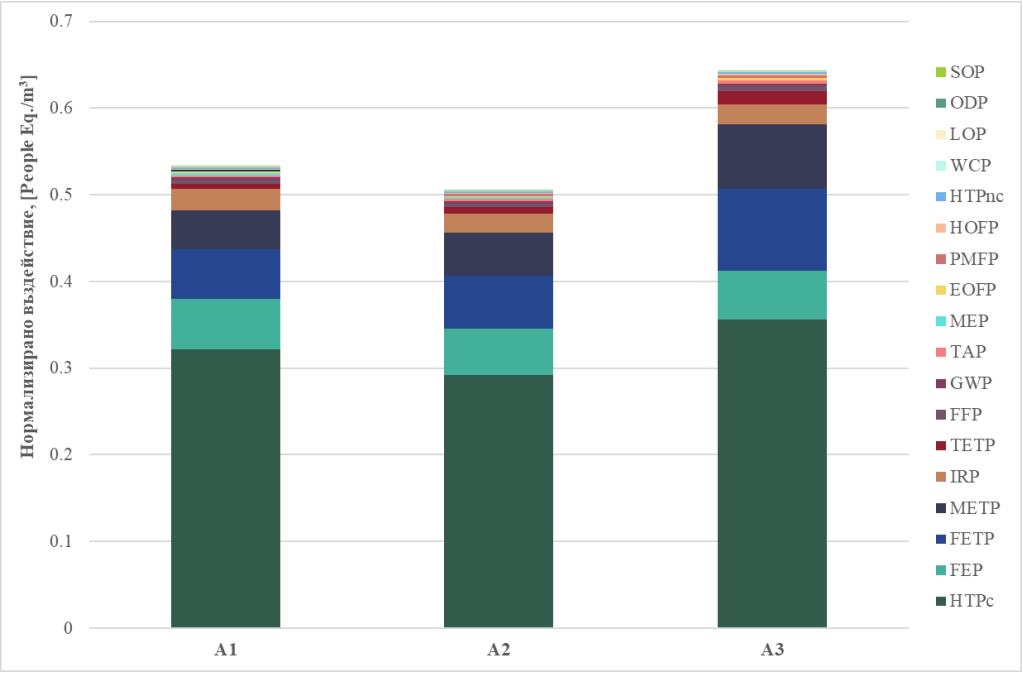
Стъпките при работа с този софтуер са идентични с по-горе дискутирания Umberto LCA, но той също така позволява избор на различни методи за изчисление, категории въздействие и фактори за нормализация. В настоящото проучване са избрани следните: метод EN 15804 +A2; нормализация EF 3.0 и набор от тежестни коефициенти. Методът EN 15804+A2 е избран поради съответствието му с „Екологичния отпечатък на продукта“ (PEF) на Европейската комисия (методология и стандарт, които ще насочват организациите към извършване на по-надеждни екологични измервания и имат за цел да създадат равни условия за всички държави членки на ЕС). Методът EN 15804 +A2 използва 28 категории на междинно въздействие (табл. 2). Наборът за нормализация и претегляне EF 3.0 е използван, за да се стандартизират стойностите, получени за категориите въздействие (равни единици), и да се изчисли крайната обща оценка.

3. Резултати и дискусия

3.1. Оценка на въздействието по категории

3.1.1. Софтуер Umberto LCA

Оценени са всички осемнадесет категории на средносрочно въздействие от методологията ReCiPe2016 (вж. също табл. 2). Потенциалното въздействие за всяка от тези осемнадесет категории е нормализирано и изразено като еквивалент хора за m^3 пречистена вода (People Eq./m^3). Потенциалното въздействие по всички категории, за всяка алтернатива, е показана на фиг. 4.



Фиг. 4. Потенциално въздействие по категории за всяка алтернатива, софтуер Umberto LCA

Общото точкуване за всяка алтернатива е изчислено като сума от всички категории, като е приета еднаква тежест за всяка от тях:

- A1: 0,5322 People Eq./m^3;
- A2: 0,5049 People Eq./m^3;
- A3: 0,6423 People Eq./m^3.

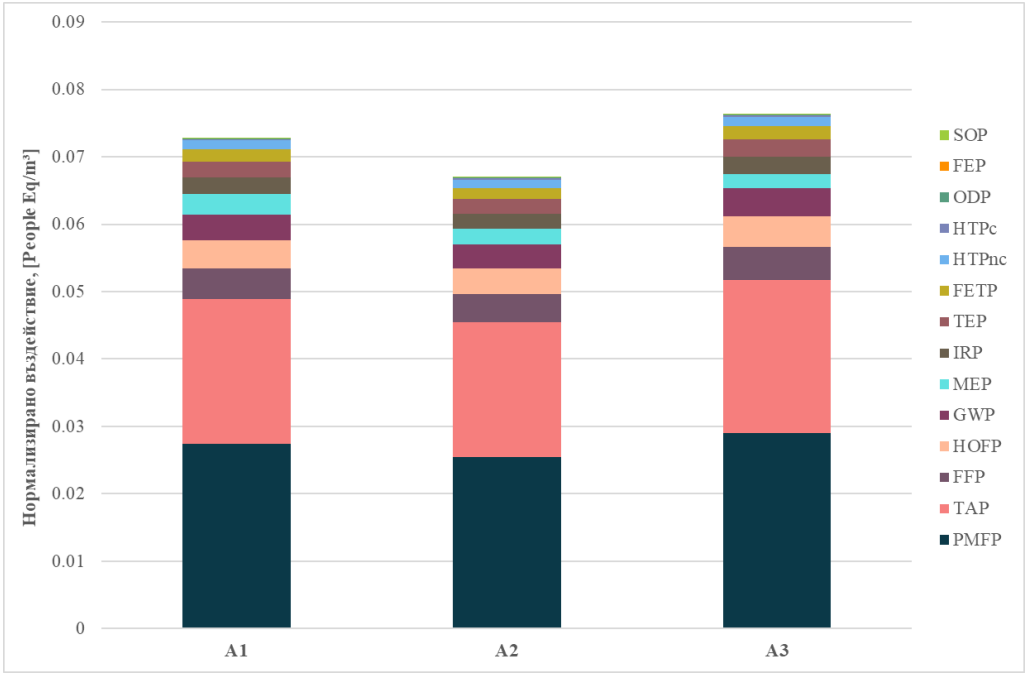
Общото точкуване показва, че този софтуер класира A2, като най-добрата алтернатива (най-малко въздействие върху околната среда и здравето). След нея е A1 и най-лош е резултатът за A3.

Както е показано на фиг. 4, четирите въздействия с най-високи стойности за всички алтернативи са: HTPc (ракова токсичност за човека) – многократно по-голяма от всички останали въздействия, FEP (сладководна еутрофикация), FETP (сладководна екотоксичност)

и METP (морска екотоксичност). Останалите категории са със значително по-слабо въздействие като част от тях остават слабо застъпени във фиг. 4.

3.1.2. Софтуер OpenLCA

Оценката е направена за всички двадесет и осем категории на средносрочно въздействие (вж. също табл. 2). Потенциалното въздействие за всяка от тези категории е нормализирано и изразено като еквивалент хора за m^3 пречистена вода (People Eq./m^3). От всички категории с по-значителен ефект на въздействие (над 0 People Eq./m^3) са 14 от тях, като потенциалното им въздействие, разпределено по категории за всяка алтернатива, е показано на фиг. 5.



Фиг. 5. Потенциално въздействие по категории за всяка алтернатива, софтуер OpenLCA

Подобно на Umberto LCA, OpenLCA също предоставя резултати с единични оценки, които се базират на обобщената оценка на въздействието, получена след претегляне. Единичните оценки на трите алтернативи са изчислени, както следва:

- A1: 0,00553 People Eq./m^3;
- A2: 0,00511 People Eq./m^3;
- A3: 0,00585 People Eq./m^3.

Най-благоприятният вариант, подобно на Umberto LCA, отново е A2, следван от A1 и A3. В този случай има две категории със значително по-голямо негативно въздействие от останалите – PMFP (прахови частици) и TAP (подкиселяване), като останалите категории остават със значително по-малко въздействие.

3.2. Оценка на приноса на входните потоци

Разгледани са подробно въздействията на всеки от входните потоци (енергия, материали и транспорт) за системите на трите алтернативи (за подробности относно точните входни и изходни потоци вж. табл. 1 и [7]) по категории. Независимо от разглежданата категория на въздействие, при който и да е от двата използвани софтуера, винаги най-голям принос към въздействието от трите входни потока има използваната електрическа енергия за захранване на системата.

Приносът на енергията към общото въздействие върху системата по най-широко разглежданата в световен мащаб категория – потенциал за глобално затопляне/изменение на климата (GWP), е представена в табл. 3.

Таблица 3. Процентна тежест на внесената електрическа енергия (сбор от високо и ниско напрежение) спрямо сумарното въздействие в категория GWP

Софтуер/Алтернатива	A1 – RO1/P	A2 – RO2/P	A3 – RO2/E
Umberto LCA	90,1 %	92,3 %	80,5 %
OpenLCA	97,2 %	98,6 %	97,1 %

От табл. 3 е видно, че двата софтуера дават сходни резултати. Класирането на алтернативите се запазва, като OpenLCA дава по-голяма тежест на енергията спрямо останалите потоци, отколкото Umberto LCA. Това явление се дължи на разликата в базите данни и оценителните методи, главно поради особеностите на всеки от входните потоци и приносите на елементарните потоци нагоре по веригата, извън границите на системата.

3.3. Сравнение на използваните софтуерни продукти

3.3.1. Категории за междинно въздействие

В частта за използваните методики беше пояснено, че двата софтуера използват както различни бази данни, така и различни изчислителни методики, водещи и до различни по вид и брой категории на междинно въздействие.

Сравнението между двата софтуерни пакета показва, че четиринадесет от категориите за междинно въздействие са идентични (табл. 2). Umberto LCA има само 3 категории, които не присъстват в OpenLCA и това са съответно формиране на озон в тропосферата, морска и сухоземна екотоксичност.

В OpenLCA (EN 15804 +A2 Method) определени категории въздействие са по-детайлизирани спрямо Umberto LCA. Например, потенциалът за глобално затопляне е разделен на три категории въздействие: климатични промени, свързани с изкопаеми горива, климатични промени, свързани с биогенно отстраняване и емисии, и климатични промени, свързани с използването на земята и промените в използването на земята. По същия начин еутрофикацията е разделена на три категории: еутрофикация на сладководните водни екосистеми, еутрофикация на морските водни екосистеми и еутрофикация на сухоземните екосистеми. Оценката на въздействието върху човешкото здраве се извършва чрез следните категории: емисии на прахови частици, йонизиращо лъчение, човешко здраве, токсичност за човека: ракови ефекти и токсичност за човека: неракови ефекти.

Разликата в категориите на въздействие не е само в техния брой, а и в тяхната същност и методика на изчисление и това е предпоставка за различните резултати по двете методики.

Сравнителният анализ на фиг. 4 и 5 показва, че двата софтуера дават превес на различни категории за въздействие. При Umberto LCA има една ясно изразена по-голяма категория на въздействие (ракова токсичност за човека), последвана от 3 сравнително еднакви по мащаб категории на въздействие – FEP (сладководна еутрофикация), FETP (сладководна екотоксичност) и METP (морска екотоксичност). При OpenLCA има само две категории със значително по-голямо негативно въздействие от останалите – PMFP (прахови частици) и TAP (подкиселяване).

3.3.2. Класиране на алтернативите

Независимо от различните числени изражения и двата софтуера класират алтернативите по един и същи начин. Резултатите недвусмислено показват, че:

- Плазмената обработка (A1 и A2) показва по-добри екологични показатели от конвенционалната технология с изпарение (A3).
- От плазмените алтернативи (A1 и A2), A2 превъзхожда A1 благодарение на допълнителния процес с обратна осмоза (RO2), който намалява обема на течността, като същевременно увеличава концентрацията на PFAS и така се намаляват енергийните нужди на плазмения реактор.

3.3.3. Необходимост от развитие на LCA оценката

И двете използвани методики и бази данни не включват оценка на въздействието на PFAS върху околната среда и здравето, което не позволява да се разгледа в достатъчна степен този критичен фактор в настоящото проучване. Следователно, необходимо е бъдещите разработки да включат последиците от PFAS, които към момента са все още в много ранен етап на изследване и разбиране. За да се преодолее липсата на оценка за PFAS в двата софтуера, в представеното изследване, като заместител за оценка на въздействието на PFAS върху околната среда и здравето, са използвани полихлорирани бифенили (PCB). Това решение се основава на изследване, което подчертава корелацията между въздействието на PCB и PFAS върху здравето [10].

Получените резултати отчитат основно приноса на използваната енергия за процесите. При разширяването на базата данни на LCA и включването на PFAS в нея, в подобни бъдещи изследвания е препоръчително сумарната оценка на алтернативите да се прави с различни тежестни коефициенти, за да се отчете основната цел на изследването.

В базата данни Ecoinvent липсва общо антискалантно средство, което води до използването на производството на фосфорна киселина като заместител в анализа. Също така, поради липсата на данни за цетримониев бромид, вместо него е използвано „производство на нейонни повърхностно активни вещества, производни на мастни киселини“. Това показва необходимостта от непрекъснато развитие на базите данни за LCA, за да включат всички продукти на пазара, което ще подобри точността на оценката.

4. Изводи

Използваните два софтуерни продукта водят до различия в числените стойности на получените резултати, но не променят същностните изводи, свързани с основната цел на оценката на жизнения цикъл. И в двата случая се идентифицират една и съща алтернатива

с най-ниско потенциално въздействие върху околната среда и човешкото здраве (плазмена обработка на концентриран поток), както и входен поток с най-значим принос към негативното въздействие (използваната енергия). Това позволява да се приеме, че чувствителността на анализа за разглеждания казус спрямо избора на софтуерен инструмент и база данни не е значима.

Следва да се отбележи, че въпреки големия обхват и детайлност на използваните бази данни, те все още имат ограничения по отношение на отразяването на специфичните екологични въздействия, свързани с пер- и полифлуороалкилните вещества (PFAS). Това подчертава необходимостта от по-нататъшното им развитие и актуализиране с цел повишаване на надеждността на бъдещи оценки.

Получените резултати показват, че нововъзникващите плазмени технологии имат потенциал да бъдат конкурентна алтернатива на конвенционалните процеси на изпарение и изгаряне. Въпреки това, тяхното практическо приложение изисква допълнителни изследвания, включително експериментална проверка и верификация на направените в рамките на настоящото изследване предположения.

Благодарности

Изследването, довело до тези резултати, е финансирано от програмата H2020 на Европейския съюз (H2020/2014–2020) по силата на споразумение за безвъзмездна помощ № 101036449 (проект PROMISCES). Авторите благодарят също така на операторите на Столично предприятие за третиране на отпадъци, София, България за предоставянето на достъп за вземане на проби и данни. Благодарности се изказват и към колегите MassimiliaHe Sgroi и Elisa Blumenthal от Marche Polytechnic University (UNIVPM), Анкона, Италия, за обработката на данните от казуса със софтуера Umberto и базата данни Ecoinvent.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. *Valchev, D., Ribarova, I., Blumenthal, E., Sgroi, M.* Is scaling plasma techHelogy for per- and polyfluoroalkyl substances removal from leachate worthwhile: Life cycle assessment perspective. // Results in Engineering, 2025, **27**, https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.106081.

2. ISO 14040:2006 Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. // https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:en, poseten na 14.02.2026.

3. ISO 14044:2006 Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines, // https://www.iso.org/standard/38498.html, poseten na 14.02.2026.

4. Hermalization Scores ReCiPe 2016. // National Institute for Public Health and the Environment, The Netherlands (RIVM), 2024, https://www.rivm.nl/en/documents /Hermalization-scores-recipe-2016, poseten na 14.02.2026.

5. *Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu* ReCiPe 2016 v1.1 a harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level report I: characterization. // National Institute for Public Health and the Environment, Netherlands RIVM, 2017, website www.rivm.nl/en, poseten na 14.02.2026.

6. *The Organisation for EcoHemic Co-operation and Development (OECD)* Reconciling TermiHelogy of the Universe of Per- and Polyfluoroalkyl Substances: Recommendations and Practical Guidance. 2021, // https://www.oecd.org/en/publication s/reconciling-termiHelogy-of-the-universe-of-per-and-polyfluoroalkyl-substances_e 458e796-en.html, poseten na 14.02.2026.

7. *Propp, V., De Silva, A., O., Spencer, C., Brown, S., Catingan, S., Smith, J., Roy, W.* Organic contaminants of emerging concern in leachate of historic municipal landfills. // Environmental Pollution, 2021, **276**: 116474.

8. *Ribarova, I., Valchev, D., Valentina, G., Frugis, A.* Presence of per- and polyfluoroalkyl substances in untreated leachate from regional municipal waste landfills: A first assessment for Bulgaria. // Journal of Ecological Engineering, 2025; **26(7)**, DOI: https://doi.org/10.12911/22998993/203255.

9. *Alves, V. S. da S., Bianchini, V. K., Bezerra, B. S., RazziHe, C. do A., Andrade, F. N. da S., Neme, S. S.* He One-Size-Fits-All: A Systematic Review of LCA Software and a Selection Framework. // Sustainability (Switzerland) **18(1)**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), https://doi.org/10.3390/su18010197.

10. *Feng, D., Song, C., Mo, W.* Environmental, human health, and ecoHemic implications of landfill leachate treatment for per- and polyfluoroalkyl substance removal. // Journal of Environmental Management, 2021, **289**, https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112558.

SENSITIVITY OF LIFE CYCLE ASSESSMENT TO DATABASES AND SOFTWARE: A CASE STUDY ON TECHNOLOGIES FOR REDUCING PFAS IN LANDFILL LEACHATE

D. Valchev[1], I. Ribarova[2]

Keywords: *life cycle assessment, LCA, PFAS, leachate, landfill, databases, OpenLCA, Umberto LCA*

ABSTRACT

The paper examines the extent to which the choice of software and database affects the results of the life cycle assessment (LCA) of technologies for removing per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) from landfill leachate. Three alternative technologies for treating reverse osmosis (RO) concentrate, intended as the final step after mechanical and biological treatment of the leachate, are compared: A1 – plasma reactor; A2 – additional concentration of PFAS with a second RO module before the plasma reactor; A3 – additional concentration of PFAS with a second RO module before the evaporation module, followed by transport of the solid residue for incineration off-site. The analysis was performed with Umberto LCA + Ecoinvent (ReCiPe 2016 in 18 categories and with Hermalization) and OpenLCA 2.2.0 + ELCD (EN 15804+A2; EF 3.0 in 28 categories and with Hermalization). Despite the different numerical values obtained and the different profile of the leading categories (toxicity/ecotoxicity and eutrophication dominate in Umberto, while particulate matter and acidification dominate in OpenLCA), the overall

[1] Dobril Valchev, Assist. Prof. Dr. Eng., Dept. "Water Supply, Sewerage, Water and Wastewater Treatment", Faculty of Hydraulic Engineering, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: dvalchev_fhe@uacg.bg

[2] Irina Ribarova, Prof. Dr. Eng., Dept. "Water Supply, Sewerage, Water and Wastewater Treatment", Faculty of Hydraulic Engineering, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: ribarova_fhe@uacg.bg

ranking is identical: A2 is the most favorable, followed by A1, while A3 has the highest potential impact. In both models, the main impact on the environment is dominated by the electricity used. Despite the vast detailed LCA databases, PFAS are still underrepresented in both models due to the early stage of research into their specific impacts. This indicates a need for research, enrichment, and updating to achieve more reliable LCA assessments for PFAS. Plasma solutions (especially with a higher concentration of the influent) are promising but also require further experimental verification.