

Analiza mogućnosti kraja životnog vijeka otpadnih fluorescentnih lampi

Golub, Ivona

Master's thesis / Diplomski rad

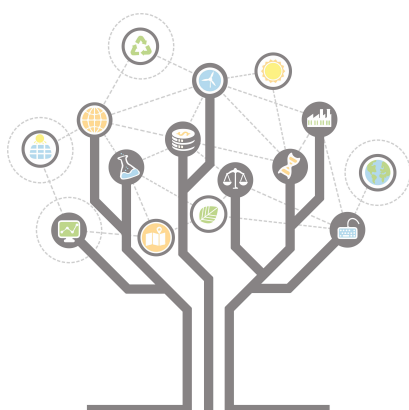
2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:583030>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-19**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET

IVONA GOLUB

ANALIZA MOGUĆNOSTI KRAJA ŽIVOTNOG VIJEKA OTPADNIH
FLUORESCENTNIH LAMPI

DIPLOMSKI RAD

VARAŽDIN, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEOTEHNIČKI FAKULTET

DIPLOMSKI RAD

**ANALIZA MOGUĆNOSTI KRAJA ŽIVOTNOG VIJEKA OTPADNIH
FLUORESCENTNIH LAMPI**

KANDIDAT:

Ivona Golub

MENTOR:

izv. prof. dr. sc. Aleksandra

Anić Vučinić

VARAŽDIN, 2019.



Sveučilište u Zagrebu
Geotehnički fakultet



ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnica: IVONA GOLUB
Matični broj: 207 - 2017./2018.
Smjer: UPRAVLJANJE OKOLIŠEM

NASLOV DIPLOMSKOG RADA:

ANALIZA MOGUĆNOSTI KRAJA ŽIVOTNOG VIJEKA OTPADNIH
FLUORESCENTNIH LAMPI

Rad treba sadržati: 1. Uvod
2. Električni i elektronički uređaji
3. Gospodarenje EE otpadom
4. Mogućnosti kraja životnog vijeka fluorescentnih lampi
5. Materijali i metode
6. Rezultati i rasprava
7. Zaključak

Pristupnica je dužna predati mentoru jedan uvezen primjerak diplomskog rada sa sažetkom. Vrijeme izrade diplomskog rada je od 45 do 90 dana.

Zadatak zadan: 18.03.2019.

Rok predaje: 03.02.2020.

Mentor:

Izv.prof.dr.sc. Aleksandra Anić Vučinić

Predsjednik Odbora za nastavu:

Izv.prof.dr.sc. Igor Petrović



IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je diplomski rad pod naslovom

ANALIZA MOGUĆNOSTI KRAJA ŽIVOTNOG VIJEKA OTPADNIH FLUORESCENTNIH LAMPI

(naslov diplomskog rada)

rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom **izv. prof. dr. sc. Aleksandre Anić Vučinić.**

Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

U Varaždinu, 10. 02. 2020.

Ivona Golub
(Ime i prezime)



(Vlastoručni potpis)

SAŽETAK

Ime i prezime: Ivona Golub

Naslov rada: Analiza mogućnosti kraja životnog vijeka otpadnih fluorescentnih lampi

Električni i elektronički otpad jedan je od najbrže rastućih vrsta otpada u Europi, zbog čega se sustavi gospodarenja otpadom na razini svake države sve više unaprjeđuju. Otpadne fluorescentne žarulje posebno su izdvojene zbog komponenti koje sadrže, među kojima je najopasnija za okoliš živa.

Analizom kraja životnog vijeka otpadnih fluorescentnih lampi u programu openLCA želi se utvrditi koji sustav obrade ima najmanji utjecaj na okoliš, a koji najveći u određenom razdoblju. U Republici Hrvatskoj najveći potencijalni utjecaj na okolišne kategorije (potencijal globalnog zatopljenja, toksičnost za ljude, ekotoksičnost za morske i slatkovodne sustave) ima transport te skladištenje otpadnih fluorescentnih lampi za realne količine u 2018. godini. Transport ima naročito veliki potencijalni utjecaj na globalno zatopljenje radi emisije stakleničkih plinova. Ako bi se iste količine otpada isključivo oporabljale (definirani proces na razini prosjeka EU temeljem podataka Ecoinvent), utjecaj na okoliš bio bi minimalan. Posebno ranjiva okolišna kategorija su slatkovodni i morski sustavi na koje se može potencijalno negativno utjecati procesom odlaganja otpadnih fluorescentnih žarulja.

Ključne riječi: LCA metoda, fluorescentne žarulje, EE otpad

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. ELEKTRIČNI I ELEKTRONIČKI UREĐAJI.....	2
2.1 Fluorescentne žarulje.....	3
2.1.1 Kompaktne fluorescentne žarulje	4
2.1.2 Linearne fluorescentne žarulje.....	6
2.1.3 Žarulje sa živinom parom	6
2.1.4 Ostale fluorescentne žarulje	6
2.2 Utjecaj na okoliš i ljudsko zdravlje.....	7
3. GOSPODARENJE EE OTPADOM	10
3.1 Zakonska regulativa u Europskoj uniji.....	12
3.2 Zakonska regulativa u Republici Hrvatskoj	14
3.3 Gospodarenje otpadnim fluorescentnim žaruljama	16
3.4 Postojeće svjetske tehnologije obrade otpadnih fluorescentnih lampi	20
4. MOGUĆNOSTI KRAJA ŽIVOTNOG VIJEKA FLUORESCENTNIH LAMPI	23
5. MATERIJALI I METODE.....	26
5.1 Definicija cilja i opsega.....	26
5.2 Bilanca životnog ciklusa	33
6. REZULTATI I RASPRAVA	36
6.1 Acidifikacijski potencijal (eng. <i>acidification</i>).....	36
6.2 Eutrofikacijski potencijal (eng. <i>eutrophication</i>)	37
6.3 Potencijal globalnog zatopljenja (eng. <i>global warming</i>).....	38
6.4 Potencijal nastanka fotokemijskog ozona	39
6.5 Ekotoksičnost za slatkovodne vodene sustave (eng. <i>Fresh water aquatic ecotox.</i>).....	41
6.6 Ekotoksičnost za slatkovodne sedimente (eng. <i>Freshwater sediment ecotox.</i>).....	42

6.7	Ekotoksičnost za morske vodene sustave (eng. <i>marine aquatic ecotox.</i>)	43
6.8	Ekotoksičnost za morske sedimente (eng. <i>marine sediment ecotox.</i>)	45
6.9	Ekotoksičnost za tlo (eng. <i>terrestrial ecotoxicity</i>)	46
6.10	Toksičnost za ljude (eng. <i>human toxicity</i>)	47
6.11	Normalizacija	49
7.	ZAKLJUČAK	51
8.	POPIS LITERATURE	52
9.	POPIS SLIKA	58
10.	POPIS TABLICA	61
11.	POPIS KRATICA	63
12.	POPIS PRILOGA	64
13.	PRILOZI	65

1. UVOD

Otpadna električna i elektronička oprema (EE otpad) jedna je od najbrže rastućih tokova otpada u Europi. Prema podacima Eurostata [1], svake godine se u Europskoj uniji proizvede od 3 do 5 % više EE otpada u odnosu na referentnu godinu. U 2016. godini količina prikupljenog EE otpada u Europskoj uniji bila je 49 % u odnosu na prosječnu količinu električne i elektroničke opreme (EE oprema) stavljene na tržište u razdoblju od 2013. do 2015. godine.

Analiza industrije za razvoj rasvjete pokazuje trend prelaska s upotrebe žarulja sa žarnom niti na fluorescentne žarulje i svjetleće diode poznatije kao LED (eng. *Light Emitting Diode*). Jedan od razloga tome jest što žarulje sa žarnom niti troše više energije, skuplje su i manje učinkovite od fluorescentnih žarulja zbog količine umjetne svjetlosti koju proizvode. S druge strane, zbog prisutnosti opasnih tvari, kao što su teški metali (na primjer, živa i olovo), na kraju svog životnog vijeka, fluorescentne žarulje nakon što postanu otpad, predstavljaju značajni rizik za zdravlje ljudi i okoliša.

Poradi toga, održivo korištenje resursa je na vrhu europskih prioriteta kako bi se što više smanjila proizvodnja otpada, a nastali otpad propisno zbrinuo.

Cilj ovog diplomskog rada je provesti analizu mogućnosti kraja životnog vijeka otpadnih fluorescentnih lampi na području Republike Hrvatske, a s usporedbom potencijalnih utjecaja na okoliš ukoliko bi se navedene količine otpada zbrinjavale sukladno definiranim procesima na razini prosjeka u Europske unije, koristeći standardiziranu metodologiju analize životnog vijeka proizvoda.

2. ELEKTRIČNI I ELEKTRONIČKI UREĐAJI

EE oprema predstavlja sve proizvode i njihove sastavne dijelove koji su za svoje primarno i pravilno djelovanje ovisni o električnoj energiji ili elektromagnetskim poljima kao primarnom izvoru energije kao i proizvode za proizvodnju, prijenos i mjerenje struje ili jakosti elektromagnetskog polja, a koji se mogu svrstati u popis vrsta proizvoda koji su po svojoj svrsi i namjeni slični i koji su namijenjeni za korištenje pri naponu koji ne prelazi 1.000 V za izmjeničnu i 1.500 V za istosmjernu struju [2].

EE oprema uključuje širok izbor proizvoda, od jednostavnijih uređaja poput sušila za kosu do visoko integriranih sustava poput računala, zbog čega je gospodarenje otpadnom EE opremom vrlo kompleksno. Ukupna količina EE opreme stavljene na tržište RH u 2017. godini iznosila je 54 395 tona [3]. Uz to, tehnološke inovacije konstantno ubrzavaju promjene u sastavu proizvodnje, npr. zamjena CRT monitora (eng. *Cathode Ray Tube*) s LCD zaslonima (eng. *Liquid Cristal Display*) [4].

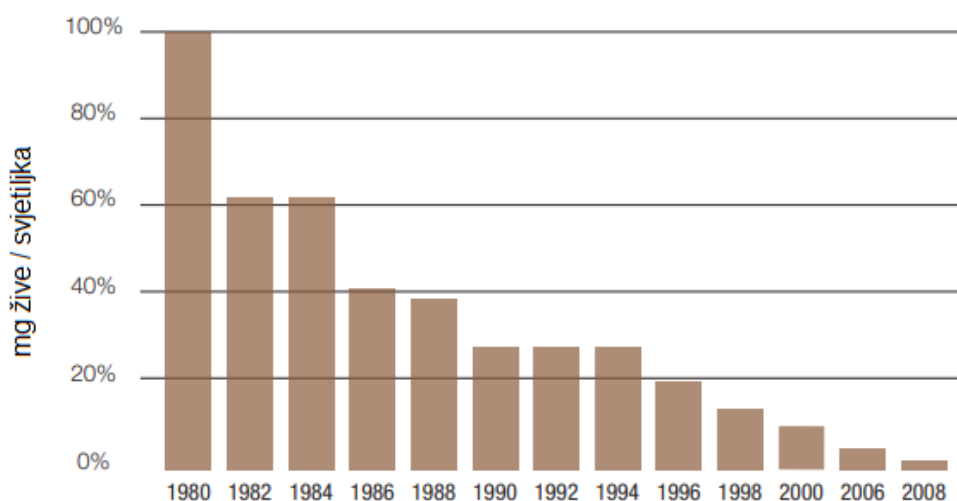
Između 2015. i 2016. količina EE opreme stavljene na tržište u Europskoj uniji (EU) povećala se za 2,9 %, odnosno s 9,8 milijuna tona na 10,1 milijun tona. Veliki kućanski aparati su dominantna kategorija EE proizvoda u svim zemljama EU. Zbog tako velikih količina EE proizvoda, postoji veliki potencijal ponovne upotrebe istih ili njihovih komponenti koje su funkcionalne i nakon što proizvod postane otpad. Međutim kako bi se ti procesi potaknuli u praksi, potrebna je bolja zakonska regulativa ponovne upotrebe EE otpada na državnoj razini kao i poboljšanje kvalitete proizvoda. Financijska isplativost ponovne upotrebe može se opisati na primjeru iPhone-a, koji zadržava 48 % svoje vrijednosti kada se ponovno upotrijebi, a kada se reciklira samo 0,24 % početne vrijednosti [1].

2.1 Fluorescentne žarulje

Fluorescentnost ili fluorescentni izvor svjetlosti (FL, eng. *Fluorescent Lighting*) znači pojava ili izvor svjetlosti u kojem svjetlost nastaje plinskim električnim izbojem, u niskotlačnom živinom izvoru svjetlosti te se većina svjetlosti emitira iz jednog ili više slojeva fosfora pobuđenih ultraljubičastim zračenjem iz izboja. Fluorescentni izvori svjetlosti mogu imati jedan ili dva spoja (podnoška) za napajanje električnom energijom [5].

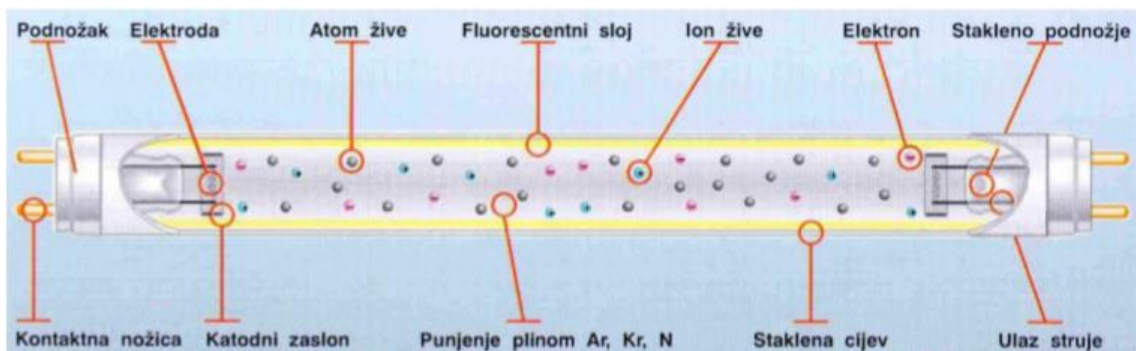
Fluorescentne žarulje su energetske štedljivi izvor svjetlosti čija se svjetlost stvara propuštanjem električne struje kroz paru žive. Fluorescentne žarulje troše od 2 do 5 puta manje snage i vijek im je od 8 do 10 puta dulji od žarulja sa žarnom niti [6].

Procjenjuje se da se 22 % svjetske potrošnje žive koristi u EE opremi [7]. Standardna fluorescentna žarulja sadrži oko 20 miligrama žive. U razdoblju od 1980. do 2008. značajno je smanjena upotreba žive u proizvodnji fluorescentnih žarulja što je prikazano na slici 1. Upotreba sigurnijih tehnika proizvodnje sa sve strožim ograničavanjima upotrebe opasnih tvari može učinkovito smanjiti koncentraciju žive u žaruljama te na taj način osigurati zaštitu ljudskog zdravlja i okoliša [8].



Slika 1 Smanjenje količine žive u fluorescentnim žaruljama u razdoblju od 1980. do 2008. godine [9]

U cijevima fluorescentnih žarulja nalaze se dva filameta presvučena materijalima za emitiranje elektrona, što je vidljivo na slici 2. Pod djelovanjem izmjeničnog napona, niti se izmjenjuju kao katoda i anoda u skladu s određenom frekvencijom. Unutarnji zid cijevi fluorescentnih žarulja obložen je fluorescentnim prahom i ispunjen inertnim plinom te malom količinom žive. Živa je pri sobnoj temperaturi u tekućem agregatnom stanju, međutim vrlo lako isparava u svom elementarnom stanju. Pod utjecajem električnog polja atomi žive kontinuirano se stimuliraju iz osnovnog u pobuđeno stanje, nakon čega ponovno slijedi osnovno stanje. Istodobno, emitira se UV spektar zračenja kao posljedica oslobođanja suvišne energije. Fluorescentni prah emitira vidljiv spektar zračenja nakon apsorpcije UV zračenja [10].



Slika 2 Shematski prikaz fluorescentne žarulje [11]

Fluorescentne žarulje mogu se prema obliku kategorizirati u tri vrste:

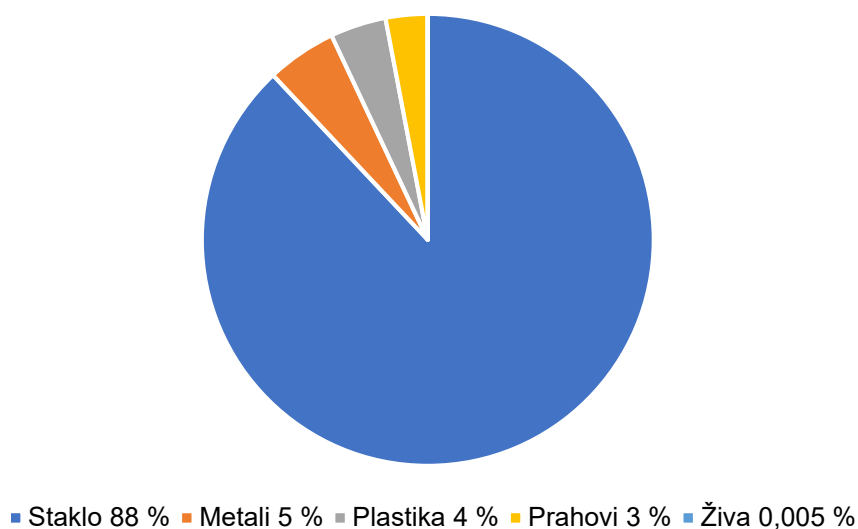
- kompaktne fluorescentne žarulje (CFL, eng. *Compact Fluorescent Lamps*),
- duge cijevi,
- svjetiljke u obliku kruga i U.

2.1.1 Kompaktne fluorescentne žarulje

Kompaktni fluorescentni izvor svjetlosti je fluorescentna žarulja s jednim podnoškom čija je konstrukcija sa svijenom cijevi namijenjena za smještanje u

male prostore [12]. Životni vijek CFL-ova je između 6.000 i 15.000 sati, ovisno o vrsti i uporabi, za razliku od 1.000 sati za žarulje sa žarnom niti [13].

Izrađene su od stakla, metala (aluminij, nikal, željezo, volfram i ponekad olovo), plastike, aditiva koja usporavaju gorenje i fosfora [9]. Na slici 3 grafički je prikazan prosječan udio materijala koji sačinjavaju fluorescentne žarulje, međutim ne odnosi se na sve vrste žarulja.



Slika 3 Grafički prikaz sastava fluorescentnih žarulja [14]

CFL-ovi mogu prvenstveno biti oblikovani u obliku zavojnice (primjerice u obliku spirale) ili kao spojene paralelne cijevi s drugom ovojnicom u obliku žarulje ili bez takve ovojnice. Dostupni su CFL-ovi s fizički integriranim predspojnim napravama (CFLi) ili bez takve naprave (CFLni) [12].

Trenutno se CFL-ovi najčešće koriste umjesto tradicionalnih žarulja u ugostiteljstvu, uredima i sustavima kućne rasvjete, dok se fluorescentne U-cijevi koriste u uređajima, stropnim rasvjetnim tijelima te izložbenim prostorima. Oblik takvih žarulja vrlo je koristan kada postoji potreba za FL, ali je raspoloživi prostor premali za tradicionalne linearne svjetiljke [15].

2.1.2 Linearne fluorescentne žarulje

2.1.2 Linearne fluorescentne žarulje (LFL, eng. *Linear Fluorescent Lamps*) su zatvorene staklene cijevi koje sadrže malu količinu žive (bitna komponenta), inertni plin i fosforni prah obložen duž unutrašnjosti cijevi. Visoko su učinkovite zato što za proizvodnju UV energije koriste električno pražnjenje kroz paru žive niskog tlaka. Obično se koriste za osvijetljavanje ureda, trgovina, skladišta, uglova i kuća. Općenito, LFL imaju promjer od 2,54 do 3,81 centimetara, dok je duljina od 0,61 do 2,44 metra. Proizvođači LFL-a koji ugrađuju manje žive u žarulje mogu svoje proizvode označiti zelenim pojasom ili natpisom na krajevima cijevi [15].

2.1.3 Žarulje sa živinom parom

Svjetiljke sa živinom parom primjenjuju se u nekoliko oblika visokog intenziteta pražnjenja kao što su ulična rasvjeta, parkirališta i farme. Svjetlost ovakvih svjetiljki može se prepoznati po plavkastoj boji, što čini kvalitetu reprodukcije boja svjetlosti lošom. Svjetiljka se sastoji od staklene ovojnice izrađene od kvarca unutar koje se nalaze razne metalne elektrode. Električna struja prenosi se kroz luk ovojnice za reprodukciju svjetla [15].

2.1.4 Ostale fluorescentne žarulje

Glavna karakteristika fluornih svjetiljki je njihov dugotrajan životni vijek (do 20 000 sati) zbog čega se često koriste u vanjskim prostorima. Fluorne svjetiljke visoke snage koriste se kao industrijska i ulična rasvjeta, na pročeljima zgrada, kao sigurnosna rasvjeta, panoi i u sportskim arenama. U javnim ustanovama i trgovinama koriste se fluorne svjetiljke manje snage. Izgled ovih svjetiljki je vrlo sličan žaruljama sa žarnom niti. Osim tog standardnog oblika, proizvode se i u obliku reflektora za vanjske prostore. Staklo u proizvodnji može biti prozirno ili zamagljeno [15].

Najsvjetlije dostupno svjetlo emitiraju metalne halogene svjetiljke zbog čega se primjenjuju na stadionima i velikim sportskim terenima gdje je potrebno jako

osvjetljenje. Nakon uključivanja potrebno je i do 5 minuta da ova vrsta svjetiljki postigne potpunu osvjetljenost. Metalne halogene svjetiljke emitiraju svjetlo bijele boje. Sastoje se od staklene ovojnice sa prstenastom staklenom cijevi od

Svjetiljke s natrijevom parom su ekonomične svjetiljke visokog intenziteta koje se koriste za osvjetljavanje vanjskih i javnih prostora. Boja svjetlosti koju emitiraju je žućkasta i stoga ugodnija oku za razliku od plave. Sastoje se od staklene ovojnice unutar koje su elektrode, a prolaskom električne struje kroz staklo nastaje svjetlo. Postoje dva općenita modela ove vrste svjetiljki ovisno o tlaku natrijeve pare: visokotlačni natrij (70-1000 vata) i natrij niskog tlaka (35-180 vata) [15].

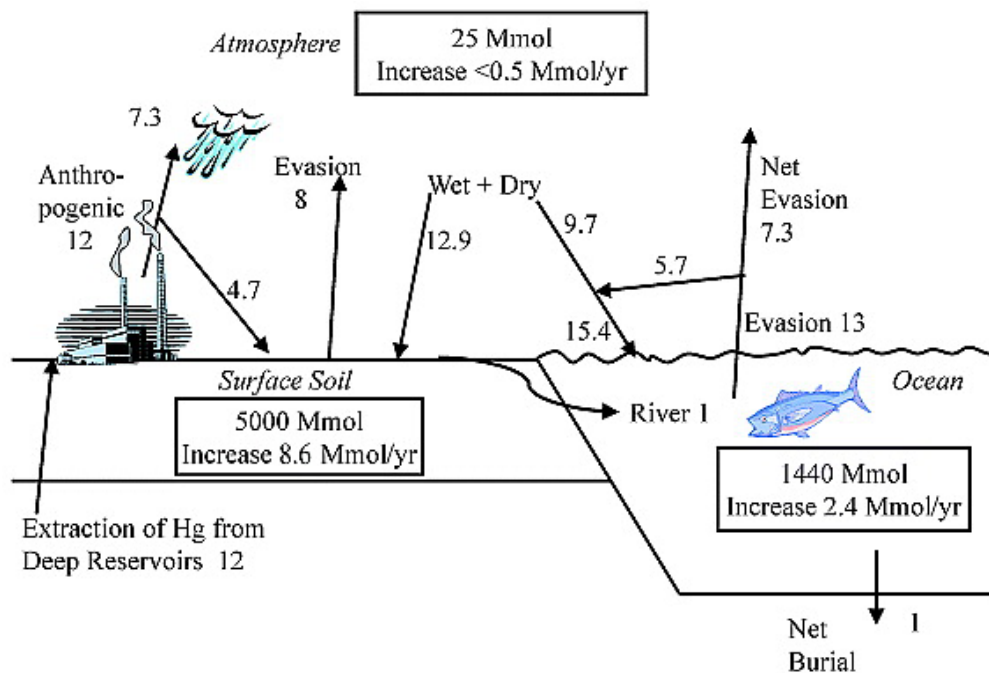
2.2 Utjecaj na okoliš i ljudsko zdravlje

Kako bi se bolje opisao utjecaj fluorescentnih žarulja na okoliš, važno je usporediti tri faze životnog vijeka proizvoda: proizvodnju, korištenje i kraj životnog vijeka tj. kada proizvod postane otpad. Tijekom proizvodnje, utjecaj fluorescentnih žarulja na okoliš je vrlo nizak u usporedbi s ostalim fazama. Najveći utjecaj na okoliš ostvaruje se u fazi korištenja, a odnosi se na trošenje električne energije. Također, u vanjskim prostorima, posebice noću jačina osvjetljenja može biti neprihvatljiva za okoliš čime nastaje svjetlosno onečišćenje. Recikliranje fluorescentnih žarulja ima manji okolišni utjecaj nego faza korištenja. Međutim, ako fluorescentne žarulje na kraju životnog vijeka nisu oporabljene, predstavljaju potencijalni rizik za okoliš zbog komponenti koje su sadržane u njima. Jedna od njih je i živa koja je sastavni dio većine fluorescentnih žarulja, a toksična je za ljudski organizam i okoliš [16].

Živa se u fluorescentnoj žarulji nalazi vezana na fosfornom prahu i u obliku živinih para. Temeljem dosadašnjih istraživanja, može se reći da je u najvećoj mjeri (97 %) dvovalentna, adsorbirana na fosfornom prahu tj. luminoforu. Talište žive je - 38,84 °C, a vrelište 356,6 °C. Sadržaj žive unutar žarulje iznosi 1-100 mg, a ovisi o širini, dužini, obliku i namjeni žarulje, odnosno o proizvođaču [17].

Živa je najperzistentniji onečišćivač od svih teških metala, a može migrirati i prenositi se putem vode i atmosfere te se kontinuirano akumulirati u organizmima. Objavljeno je da oko 50 % žive u okolišu dolazi iz antropogenih izvora. Taloženje žive poraslo je relativno linearno tijekom posljednjih 100 godina kako je zabilježeno u sedimentima teže dostupnih jezera. Ako se pretpostavi da se distribucija u taloženju nije promijenila, tada se u zemlji istaložilo 430 Mmol žive antropogenog postanka tijekom prošlog stoljeća dok se u oceanu istaložilo oko 120 Mmol žive, što je prikazano na slici 4 [18].

Atmosferski transport žive je brz, a vremenska skala za globalno miješanje troposfere procjenjuje se na oko godinu dana, uglavnom ograničena izmjenom zraka između sjeverne i južne hemisfere. Zbog toga je vjerojatnije da će onečišćenje atmosfere živom brže uzrokovati prekograničnu štetu u odnosu na učinak na okoliš uzrokovan taloženjem žive u zemlji [19].



Slika 4 Kruženje žive u okolišu pretpostavljeno za 2002. godinu. Svi tokovi izraženi su u Mmol god^{-1} [18]

Američka Agencija za zaštitu okoliša uvela je u zakonodavstvo TCLP test (eng. *The toxicity characteristic leaching potential*) koji se koristi da bi se pojedine vrste

otpada klasificirale kao opasne ili neopasne te se u skladu s tim adekvatno odlažu i recikliraju. Prije nego se opasan otpad koji sadrži živu odlaže na odlagališta potrebno je napraviti TCLP test kojim se mjeri potencijal žive koja bi se mogla otpustiti u procjednim vodama odlagališta, a posljedično završiti i u podzemlju. Granična vrijednost za živu sadržanu u uzorku je 0,025 mg/L prema LDR (eng. *Land disposal restriction*) standardima. U slučaju recikliranja žarulja koje sadrže živu, nije potrebno provoditi TCLP test [20].

Kako bi se spriječilo i kontroliralo onečišćenje okoliša živom, potrebno je izvore emisija žive smanjiti na najmanju moguću mjeru. Iako je fosilno gorivo najveći izvor onečišćenja okoliša živom, neadekvatno zbrinjavanje fluorescentnih žarulja predstavlja drugi po značaju izvor onečišćenja okoliša živom. Pri nekontroliranom razbijanju fluorescentne žarulje, dio živinih para odlazi u atmosferu dok dio ostaje vezan na staklo i fosforni prah. Odlaganjem fluorescentnih žarulja zajedno s komunalnim otpadom dolazi do emisija živinih para u atmosferu te do emisija u tlo i podzemne vode uslijed procjeđivanja nastalih procjednih voda odlagališta [17].

3. GOSPODARENJE EE OTPADOM

Gospodarenje EE otpadom su djelatnosti sakupljanja, prijevoza, uporabe i zbrinjavanja i druge obrade EE otpada, uključujući nadzor nad tim postupcima te nadzor i mjere koje se provode na lokacijama nakon zbrinjavanja ostataka od uporabe EE otpada, te radnje koje poduzimaju posrednik ili trgovac EE otpadom [2].

Sakupljanje EE otpada sastoji se od prikupljanja, razvrstavanja i privremenog skladištenja u svrhu prijevoza na obradu. Sakupljač EE otpada je pravna ili fizička osoba - obrtnik koja sukladno *Zakonu o održivom gospodarenju otpadom*¹ ima dozvolu za obavljanje djelatnosti sakupljanja EE otpada. Obvezan je od posjednika preuzeti EE otpad u cijelosti, bez naplate i unutar 20 dana od poziva i predati ga obrađivaču [2].

Ovlašteni sakupljači u sustavu gospodarenja EE otpadom kojim upravlja Fond za zaštitu okoliša i energetske učinkovitost su [21]:

- Tvrtka Flora VTC d.o.o., Virovitica, ovlašteni sakupljač 1. do 10. kategorije EE otpada za cijelu Republiku Hrvatsku,
- Tvrtka CE-ZA-R d.o.o., Zagreb, ovlašteni sakupljač 1. kategorije EE otpada za Grad Zagreb, Zagrebačku županiju i Krapinsko-zagorsku županiju,
- Tvrtka METIS d.d., Kukuljanovo, ovlašteni sakupljač 1. kategorije EE otpada za Primorsko-goransku županiju, Istarsku županiju i Ličko-senjsku županiju.

Za posjednika EE otpada zbrinjavanje je potpuno besplatno. Sukladno *Pravilniku o gospodarenju otpadom električnom i elektroničkom opremom* (NN 42/14) naknadu gospodarenja EE otpadom plaćaju proizvođači i/ili uvoznici i/ili unosnici

¹ NN 94/13, 73/17, 14/19, 98/19

EE opreme odnosno pravne i fizičke osobe – obrtnici koji EE opremu stavljaju na tržište (uvoz/unos/proizvodnja) u Republici Hrvatskoj [2].

Ministarstvo zaštite okoliša i energetike izdalo je 2019. godine *Izvješće o gospodarenju otpadnom električnom i elektroničkom opremom u 2017. godini*. Izvješće navodi da je količina EE opreme stavljene na tržište Republike Hrvatske u 2017. godini iznosila je 54.395 t EE opreme što ukazuje na povećanje potrošnje za 9 % u odnosu na 2016. godinu. Ukupna količina sakupljenog EE otpada u 2017. godini iznosila je 36.434 t što je u odnosu na prethodnu godinu pad od 6 %. Godišnja količina sakupljenog EE otpada iznosi 8,8 kg po stanovniku svrstavajući Hrvatsku u sredinu na ljestvici zemalja članica EU (koja se kreće od 1,6 kg po stanovniku u Rumunjskoj do 16,5 kg po stanovniku u Švedskoj, prema podacima iz 2016. godine) [3].

Prema podacima Eurostata o količini sakupljenog EE otpada, u Republici Hrvatskoj je u 2017. godini ukupno prikupljeno 253 t otpadne rasvjetne opreme, dok je reciklirano ili ponovno korišteno 229 t otpadne rasvjetne opreme [1].

Sukladno članku 3. Uredbe 2017/699 postignuta je stopa sakupljanja od 82 % što znači da je u 2017. godini Republika Hrvatska postigla cilj sakupljanja EE otpada koji iznosi 45 % (izraženo kao odnos godišnje masene količine sakupljenog EE otpada i prosjeka masenih količina stavljenih na tržište u prethodne tri godine). U tablici 1. prikazane su stope oporabe i recikliranja za 2017. godinu za kategorije rasvjetne opreme i usporedba sa zadanim ciljevima, a koje su relevantne za ovaj rad. Od sakupljenih količina oporabljeno je 34.812 t EE otpada (95,5 %), od čega recikliranjem 34.697 t. U 2017. godini ostvareni su svi propisani minimalni ciljevi za oporabu i recikliranje koji se primjenjuju po kategorijama EE uređaja i opreme iz priloga V Direktive 2012/19/EU, a koji iznose od 70 do 80 % za oporabu i 50 do 80 % za recikliranje, ovisno o kategoriji EE opreme prema prilogu I Pravilnika (NN 42/14) [3].

Tablica 1 Stope uporabe i recikliranja za 2017. godinu po kategorijama EE uređaja i opreme i usporedba sa zadanim ciljevima [3]

Kategorija	Sakupljeno (t)	Oporaba (t)	Recikliranje (t)	Stupanj uporabe	Stupanj recikliranja	Cilj uporabe	Cilj recikliranja
5. Rasvjetna oprema (osim žarulja s plinskim izbijanjem)	253	229	229	90%	90%	75%	55%
5.a Žarulje s plinskim izbijanjem	123	109	109	88%	88%	n.p.	80%

3.1 Zakonska regulativa u Europskoj uniji

Europska unija ima neke od najvećih svjetskih standarda zaštite okoliša koji su razvijani desetljećima. Politika zaštite okoliša pomaže i gospodarstvu da postane ekološki prihvatljivo, štiti europske prirodne resurse i čuva zdravlje i dobrobit ljudi koji žive u EU. Međutim, kvaliteta okoliša suočava se s nekoliko ozbiljnih izazova, onih klimatskih promjena, neodržive potrošnje i proizvodnje, kao i različitih oblika onečišćenja. Poradi toga, politike i zakonodavstvo EU-a u području zaštite okoliša štite prirodna staništa, održavaju čist zrak i vodu, osiguravaju pravilno odlaganje otpada, poboljšavaju znanje o otrovnim kemikalijama i pomažu tvrtkama da se okrenu održivom gospodarstvu [22]. U tom pogledu, u daljnjem tekstu navedeni su značajniji propisi koji su indirektno ili direktno povezani s gospodarenjem otpadnim fluorescentnim žaruljama.

Direktiva 2008/98/EZ Europskog parlamenta i Vijeća od 19. studenoga 2008. o otpadu i stavljanju izvan snage određenih direktiva utvrđuje pravni okvir obrade otpada u EU-u. Osmišljena je radi zaštite okoliša i zdravlja ljudi naglašavanjem važnosti odgovarajućeg gospodarenja otpadom, tehnika uporabe i zbrinjavanja radi smanjenja pritiska na resurse i poboljšanja njihove uporabe. Neke od ključnih točaka Direktive 2008/98/EZ o otpadu su zakonodavno utvrđivanje hijerarhije otpada, načelo „Onečišćivač plaća” prema kojemu troškove gospodarenja otpadom mora snositi izvorni proizvođač otpada, razlikuje otpad i

nusproizvode te uvodi ciljeve recikliranja i uporabe koje treba postići do 2020. za otpad iz kućanstva (50 %) i građevinski otpad (70 %) [23].

Direktiva 2012/19/EU Europskog parlamenta i Vijeća od 4. srpnja 2012. o otpadnoj električnoj i elektroničkoj opremi (OEEO) za postavljeni cilj ima zaštitu okoliša i zdravlje ljudi uz doprinos održivoj proizvodnji i potrošnji. To postiže uvođenjem odredbi u smjeru sprječavanja stvaranja otpadne OEEO, promicanjem ponovne uporabe i recikliranja te podržavanjem učinkovitog iskorištavanja resursa i dobivanja vrijednih sekundarnih sirovina [24].

Direktiva 2011/65/EU Europskog parlamenta i Vijeća od 8. lipnja 2011. o ograničenju uporabe određenih opasnih tvari u električnoj i elektroničkoj opremi, RoHS, (eng. *Restriction of Hazardous Substances Directive*) postavlja referentne vrijednosti za međunarodne standarde najbolje prakse za reguliranje uporabe i razine opasnih tvari u sektoru EE opreme. Ovom se Direktivom postavljaju ograničenja opasnih tvari za sve vrste žarulja koje se koriste za opću i posebnu rasvjetu. U RoHS direktivi pooštrena su ograničenja upotrebe žive u proizvodnji žarulja. Zahtjevi postaju zakon u svim zemljama članicama EU-e. RoHS ograničava uporabu šest opasnih tvari u proizvodnji različitih vrsta EE opreme. RoHS direktiva učinkovito je zabranila uvođenje nove OEEO koja sadrži olovo, kadmij, živu, šesterovalentni krom, bromirani bifenil i polibromirani difenil eter u EU od 1. srpnja 2006 [9].

Uredba (EZ) br. 1013/2006 Europskog parlamenta i Vijeća od 14. lipnja 2006. o pošiljkama otpada postavlja pravila za kontrolu otpremanja otpada kako bi se poboljšala zaštita okoliša. EU ima sustav nadgledanja i kontroliranja otpremanja otpada unutar svojih granica i s državama članicama Europske udruge slobodne trgovine (EFTA, eng. *European Free Trade Association*), Organizacije za ekonomsku suradnju i razvoj (OECD, eng. *Organization for Economic Cooperation and Development*) i trećih zemalja, a koje su potpisale Bazelsku konvenciju. Obuhvaća gotovo sve vrste otpada osim radioaktivnog otpada, otpada nastalog na brodovima, pošiljke podložne uredbi o životinjskim

nusproizvodima, pošiljke otpada s Antarktika, uvoz u EU otpada koji proizvedu oružane snage ili humanitarne organizacije u kriznim stanjima i slično [25].

3.2 Zakonska regulativa u Republici Hrvatskoj

Najvažniji dokument o gospodarenju otpadom u Republici Hrvatskoj je *Zakon o održivom gospodarenju otpadom*² u kojemu su u članku 53. navedeni svi pravilnici i uredbe o gospodarenju posebnim kategorijama otpada [26]. EE otpad spada u posebne kategorije otpada (PKO) zato što sadrži opasne supstance kao npr. teške metale (berilij, kadmij, olovo, živa). Minimalni cilj uporabe i pripreme za ponovnu uporabu EE otpada primjenjiv od 15. 8. 2018. te za kategoriju žarulja je da se 80% mase sakupljenog EE otpada mora reciklirati [2].

Prema hijerarhiji gospodarenja otpadom propisanoj *Pravilnikom o gospodarenju otpadom* (NN 177/17), otpadne fluorescentne žarulje trebaju se odlagati u reciklažnim dvorištima gdje ih je nadležna osoba dužna zaprimiti [27]. Dalje se s istim otpadom postupa kako je propisano *Pravilnikom o načinima i uvjetima odlaganja otpada, kategorijama i uvjetima rada za odlagališta otpada*³. Tim se Pravilnikom propisuju kategorije odlagališta otpada, postupci i drugi uvjeti za odlaganje otpada te granične vrijednosti emisija u okoliš kod odlaganja otpada [28].

Granične vrijednosti parametara eluata otpada za otpad koji je prikladan za prihvrat na odlagališta inertnog otpada određene su u *Odluci 2003/33/EZ – Prilog Kriteriji i postupci za prihvrat otpada na odlagališta – odjeljak 2.1.2.1*. Koriste se granične vrijednosti parametara eluata otpada izračunate na temelju omjera tekuće-čvrsto (T/K) od 10 l/kg. Za živu ta vrijednost iznosi 0,2 mg/kg suhe tvari [28].

Pravilnikom o gospodarenju otpadom električnom i elektroničkom opremom (NN 42/14) u Republici Hrvatskoj propisana je obaveza odvojenog sakupljanja i

² NN 94/13, 73/17, 14/19, 98/19

³ NN 114/15, 103/18, 56/19

oporabe fluorescentnih svjetiljki. Od 2019. godine cilj odvojenog sakupljanja je postizanje stope od 65 % izračunato na temelju ukupne mase EE otpada sakupljenog iz kućanstva i registriranih osoba u promatranoj godini u Republici Hrvatskoj, izražene u obliku postotka prosječne mase EE opreme stavljene na tržište u prethodne tri godine ili 85 % nastalog EE otpada [2].

Sukladno Pravilniku o katalogu otpada (NN 90/15), u Republici Hrvatskoj je definiran ključni broj otpada za fluorescentne cijevi i ostali otpad koji sadrži živu - 20 01 21* [27]. Oznaka zvjezdica (*) dodaje se uz ključni broj za opasni otpad. Katalog otpada [29] navodi karakteristična opasna svojstva fluorescentnih cijevi i otpada koji sadrži živu, a to su: zapaljivo (H3-B) i visoko zapaljivo (H3-A), opasno (H5), otrovno (H6), kancerogeno (H7), teratogeno (H10), mutageno (H11) i ekotoksično (H14).

Prema izmjenama *Pravilnika o gospodarenju električnim i elektroničkim uređajima i opremom* iz 2019. godine, od 15.08.2018. navodi se 6 kategorija EE opreme [2]:

- oprema za izmjenu topline,
- zasloni, monitori i oprema koja sadrži zaslone površine veće od 100 cm²,
- žarulje,
- velika oprema (bilo koja vanjska dimenzija veća od 50 cm),
- mala oprema (nijedna vanjska dimenzija nije veća od 50 cm),
- mala oprema informatičke tehnike (IT) i oprema za telekomunikacije (nijedna vanjska dimenzija nije veća od 50 cm).

Sukladno novoj kategorizaciji EE opreme od 15. 08. 2018. u kategoriji žarulja navodi se sljedeće [2]:

- ravne fluorescentne žarulje,
- kompaktne fluorescentne žarulje,
- fluorescentne žarulje,
- žarulje s izbijanjem, uključujući visokotlačne žarulje s natrijevim parama i žarulje s metalnim parama,
- niskotlačne natrijeve žarulje,

- LED,
- ostale žarulje.

Iz odvojeno sakupljenog EE otpada obavezno je:

- odstraniti fluorescentni sloj iz katodnih cijevi,
- izdvojiti i obraditi plinove koji oštećuju ozonski omotač ili imaju potencijal globalnoga zagrijavanja iznad 15,
- izdvojeni plinovi moraju se obraditi u skladu s posebnim propisima,
- odstraniti živu iz plinskih izbojnih svjetiljki.

Nadalje, prema *Pravilniku o ograničavanju uporabe određenih opasnih tvari u električnoj i elektroničkoj opremi* navedene su maksimalne dopuštene vrijednosti masenih koncentracija sljedećih opasnih tvari u homogenim materijalima:

- olovo (0,1 %),
- živa (0,1 %),
- kadmij (0,01 %),
- šesterovalentni krom (0,1 %),
- polibromirani bifenili (PBB) (0,1 %),
- polibromirani difenileteri (PBDE) (0,1 %).

3.3 Gospodarenje otpadnim fluorescentnim žaruljama

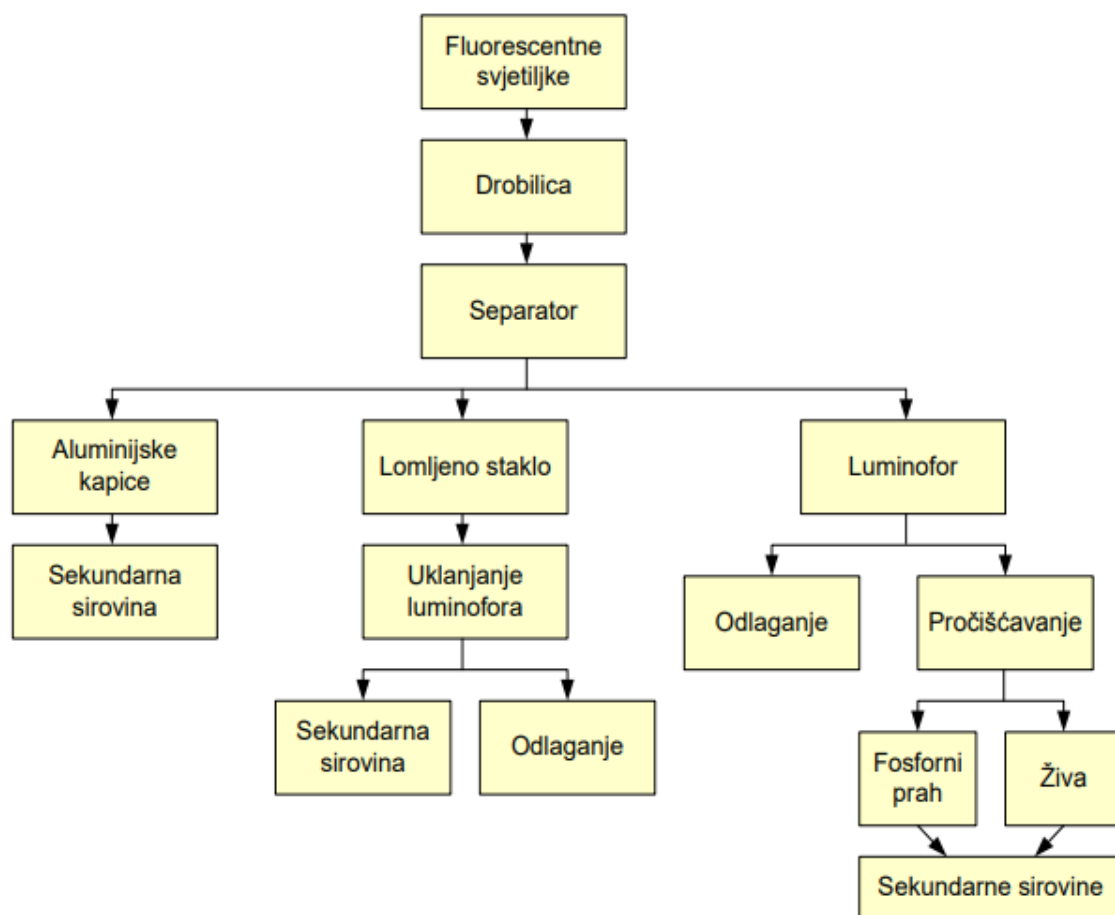
Ponajprije, zbog sadržaja opasnih tvari poput žive, glavni cilj sustava za sakupljanje fluorescentnih žarulja je sprječavanje emitiranja živinih para i fosfora u prahu koji sadrži živu u okoliš zbog čega je naglasak na skladištenju žarulja ili korištenju opreme za mehaničku obradu žarulja čime se uklanja mogućnost razbijanja i nekontroliranog emitiranja. U tablici 2 prikazane su količine žive sadržane u različitim vrstama fluorescentnih žarulja. Sustavi gospodarenja otpadnim žaruljama koje sadrže živu obično uključuju sljedeće korake: usitnjavanje žarulja, razdvajanje usitnjenog materijala na različite komponente za naknadnu obradu poput uporabe žive i/ili fosfornog prah, izdvajanje korisnih sekundarnih metalnih sirovina poput aluminija te zbrinjavanje preostalog otpada [9].

Tablica 2 Količine žive u energetski učinkovitim žaruljama i žaruljama sa smanjenom količinom žive [15]

Vrsta svjetiljke	Prosječna količina (mg)
Kompaktne fluorescentne svjetiljke	1-25
Fluorescentne U-cijevi	3-12
Fluorne svjetiljke	2
Linearne fluorescentne svjetiljke (LFL)	10-50
LFL sa smanjenom živom	3-12
Lampe sa živinom parom	25-225
Metalne halogene svjetiljke	25-225
Lampe s natrijevom parom	20-145

Mehaničkom obradom otpadnih fluorescentnih žarulja dobivaju se sljedeći produkti: luminofor, filteri onečišćeni živom, lomljeno staklo i aluminijske kapice. Sustav se provodi pri negativnom tlaku kako bi se smanjile emisije žive u atmosferu [17]. Shematski prikaz postupka recikliranja vidljiv je na slici 5. Učinkovita uporaba obnovljenog materijala zahtijeva stalnu suradnju među dionicima, posebice između proizvođača žarulja i reciklažera [9].

Pri procesu mehaničke obrade, odvaja se aluminij koji se potom koristi kao sekundarna sirovina te lomljeno staklo koje se nakon uklanjanja fosfornog praha koji sadrži živu, kategorizira kao neopasan ili inertan otpad. Uklonjeni luminofor kategorizira se kao opasan otpad te ga je osim odlaganja moguće reciklirati i ponovno koristiti kao sastavni materijal žarulja [17].



Slika 5 Shematski prikaz procesa recikliranja fluorescentnih svjetiljki [17]

Prema literaturnim podacima, tijekom obrade otpadnih fluorescentnih žarulja živa se uklanja na 4 načina [30]:

- mehaničkim uklanjanjem fosfornog praha,
- termičkom desorpcijom,
- mokrim postupkom pranja kiselinom,
- elektrokemijskim postupkom.

Prvi korak mehaničke obrade fluorescentnih žarulja je usitnjavanje u jedinici za drobljenje. Tijekom drobljenja, vakuumski sustav smješten ispod drobilice sakuplja zrak i lomljeni materijal, sprječavajući emisije žive kroz ulaznu cijev u okoliš. Materijali nakon mehaničke obrade prolaze kroz separator gdje se odvajaju aluminijske kapice i lomljeno staklo od luminofora. Analizom postojeće

literature, može se zaključiti da je mehaničko uklanjanje fosfornog praha moguće u iznosu od 1-2 % od ukupno reciklirane mase [31].

Tijekom mokrog postupka obrade otpadnih fluorescentnih žarulja, lomljeno staklo onečišćeno luminoforom ispire se vodom ili kiselinom. Na taj način, nastaje mulj koji se nakon taloženja podvrgava toplinskom tretmanu i pročišćavanju kako bi se izdvojila živa [32].

U Japanu je za obradu otpadnih fluorescentnih žarulja najzastupljeniji mokri postupak pranja kiselinom, koji uključuje drobljenje i ispiranje stakla s jakom fluorovodičnom kiselinom radi uklanjanja žive te ponovno ispiranje čistom vodom kako bi se uklonila suvišna kiselina. Otopina kiseline prolazi kroz apsorvent žive, a obrađena kiselina ponovno se koristi za pranje usitnjenog stakla. Apsorbent se na poslijetku cementira i odlaže. Međutim, ovaj je postupak složen i ima problema vezanih uz izluživanje žive iz cementiranih blokova [30].

U usporedbi s mokrim postupkom obrade otpadnih fluorescentnih žarulja, učinkovitija metoda oporabe žive je postupak termičke desorpcije. Na temperaturama iznad 400 °C, živa je gotovo u potpunosti oporabljena, iako se neke vrste stakla jako dobro vežu sa živom [33].

Elektrokemijski postupak obrade otpadnih fluorescentnih žarulja razvijen je za oporabu žive u plinskoj fazi [34]. Većina postrojenja za obradu otpadnih fluorescentnih žarulja u Sjedinjenim Američkim Državama koristi suhi postupak, gdje se žarulje usitnjavaju, a živina para zadržava na ugljičnim filterima. Otpad koji sadrži živu transportira se na daljnji tretman [33].

Unatoč postignutom, potrebno je razvijati praktičnije i ekonomičnije pristupe za tretiranje otpadnih fluorescentnih žarulja, s naglaskom na oporabu žive i sigurnost pri rukovanju s tretiranim uzorkom [30].

3.4 Postojeće svjetske tehnologije obrade otpadnih fluorescentnih lampi

Glavni uzrok obrade otpadnih fluorescentnih žarulja je smanjenje utjecaja na okoliš i ljudsko zdravlje. Osim toga, utvrđena je i ekonomska isplativost korištenja otpadnih materijala u proizvodnji poput sekundarnih sirovina. Mnogi autori bavili su se istraživanjem opasnih svojstava i s time povezanim, različitim mogućnostima iskorištavanja vrijednih svojstava. U daljnjem tekstu navedeno je nekoliko primjera.

U Japanu, primjerice, tehnologija obrade otpadnih fluorescentnih žarulja uključuje korake mehaničkog usitnjavanja žarulja i razvrstavanja metalnih komponenti nakon čega slijedi izdvajanje i pročišćavanje fosfora te destilacija žive u zatvorenom okruženju. Pri mehaničkom usitnjavanju, metalne kapice i druge komponente koje se nalaze na krajevima žarulje režu se i odvajaju. Potom slijedi ispuhivanje fluorescentnog praha i žive, tzv. luminofera. Nakon uklanjanja luminofera, staklena cijev se usitjava i transportira u industriju proizvodnje stakla. Aluminij i drugi metali se razvrstavaju. Dobiveni ostaci u procesu rezanja i ispuhivanja, poput žive i fosfora, su obrađeni te se također mogu koristiti kao sirovine u proizvodnji. Godišnja procijenjena količina iskorištenih i odbačenih fluorescentnih žarulja iznosi oko 350 milijuna žarulja, što je količinski oko 60.000 tona [35].

U Švedskoj je razvijena tehnologija za oporabu žive (MRT, eng. *Mercury Recovery Technology*) te se može primjenjivati i šire budući da se tehnologija za obradu otpadnih cijevi fluorescentnih žarulja plasira na tržište [36]. U MRT stroju 5000 (ECM 5000) za obradu ravnih cijevi, tijek procesa je sljedeći:

- unos otpadnih fluorescentnih žarulja u stroj,
- identifikacija vrste fluorescentnog praha u žarulji,
- stvaranje otvora malim plamenom i spaljivanje krajeva žarulje koncentriranim malim plamenom,
- uklanjanje metalnih komponenti na oba kraja cijevi,
- ispuhivanje fluorescentnog praha unutar cijevi fluorescentne žarulje u odgovarajući spremnik za skupljanje te

- lom i prikupljanje staklenog praha.

Uklonjeni metalni poklopci sakupljaju se u dezintegracijski sustav za daljnje odvajanje aluminija, željeza i drugih materijala. Postupak se provodi pod negativnim tlakom radi sakupljanja praha koji sadrži živine pare i filtrira se kroz vreće filtra i aktivnog ugljena. Čisti komadi stakla mogu se reciklirati kao sekundarna sirovina za proizvodnju novih staklenih cijevi [36].

MRT navodi da njihov sustav upravljanja ECM 5000 može postići učinkovitost do 5000 cijevi/h za ravne fluorescentne žarulje. Reciklirano staklo može se taliti kao sirovina za nove cijevi fluorescentnih žarulja, dok se reciklirani fluorescentni prah bez komada stakla može ponovno upotrijebiti kao fluorescentni prah. Pored navedenog, MRT posjeduje sustav za recikliranje žive postupkom destilacije [36].

Na drugom kraju svijeta, u Brazilu, kao i u ostalim zemljama u razvoju, upotreba fluorescentnih žarulja eksponencijalno raste zbog programa zamjene žarulja sa žarnom niti. Posljedica toga je onečišćenje tvarima koje sadržavaju žarulje, a naročito se očekuje onečišćenje nastalo zbog odbacivanja fluorescentnih žarulja koje predstavljaju rizik po okoliš pri nepropisnom zbrinjavanju. Poradi toga, provedeno je istraživanje o mogućnostima upotrebe otpadnog stakla fluorescentnih žarulja koje ne završava direktno u reciklaži. Ispitivani stakleni otpad fluorescentnih žarulja ima kemijski sastav sličan uobičajenom staklu, ali sadrži i fosforne prevlake i priključke za svjetiljku [37].

U Latviji je provedeno istraživanje o korištenju otpadnog fluorescentnog stakla u betonu. Zbog sve većih troškova uporabe otpadnog stakla, korištenje stakla kao agregata u betonu privlači pozornost znanstvenika. U istraživanju, cement u betonu je zamijenjen otpadnim staklom fluorescentnih žarulja u količinama 20 %, 30 % i 40 %. Pri tome su količine agregata održavane stalnima, dok je količina vode varirala. Ispitivanja su otkrila da su sve mješavine staklenog betona imale veću čvrstoću od kontrolne betonske smjese, osim što je čvrstoća betonske smjese koja sadrži 40% fluorescentnog otpadnog stakla bila najmanja nakon 56

dana očvršćivanja. Iz rezultata je vidljivo da što je manja veličina drobljenog stakla to je veća čvrstoća betonske smjese [38].

Portugalski znanstvenici proučavali su mogućnost korištenja otpadnih fluorescentnih žarulja na kraju životnog vijeka kao sirovine za proizvodnju geopolimera. Na taj način željelo se djelomično smanjiti korištenje metakaolinita u proizvodnji. Struktura geopolimera obuhvaća SiO_4 i AlO_4 tetraedarske jedinice naizmjenično povezane zajedničkim atomima kisika. Za proizvodnju se najčešće koriste aluminosilikatni materijali poput metakaolinita, letećeg pepela i šljake, zbog visokog sadržaja silicija i glinice. Drugi izvori resursa koji se mogu koristiti u proizvodnji također moraju sadržavati visok udio amornog silicijevog dioksida i/ili glinice, kao što je staklo. Cilj industrije je što više smanjiti upotrebu metakaolinita i zamijeniti ga alternativnim sirovinama kao što je otpad. Na taj način bi se smanjio i ugljični otisak na okoliš [39].

4. MOGUĆNOSTI KRAJA ŽIVOTNOG VIJEKA FLUORESCENTNIH LAMPI

Procjena životnog ciklusa (LCA, eng. *Life Cycle Assessment*) je okvir i metodologija za procjenu utjecaja proizvoda ili procesa na okoliš. Karakterizirana je kao analiza kumulativnih utjecaja na okoliš unutar definiranih granica sustava [40]. U tablici 3 dan je pregled nekih od studija koje su radile LCA analizu fluorescentnih žarulja na određenim područjima svijeta. Gotovo sve studije prikazuju komparativnu analizu više vrsta žarulja kako bi se utvrdio koliki utjecaj imaju na određene okolišne komponente.

Tablica 3 Popis studija koje su provele LCA analizu žarulja

Studija	Autor	Godina
The environmental performance of fluorescent lamps in China, assessed with the LCA method [41]	Quanyin Tan	2015.
Life Cycle Assessment of Incandescent, Fluorescent, Compact Fluorescent and Light Emitting Diode Lamps in an Indian Scenario [42]	Kuldip Singh Sangwan	2014.
A comparative life cycle assessment of luminaires for general lighting for the office e compact fluorescent (CFL) vs Light Emitting Diode (LED) e a case study [43]	Paolo Principi	2014.
Life Cycle Assessment of Compact Fluorescent and Incandescent Lamps: Comparative Analysis [40]	Erika Elijošiutė	2012.
Environmental impacts of lighting technologies - Life cycle assessment and sensitivity analysis [16]	Tobias Welz	2010.

Pregledom literature, samo je jedna studija provela LCA analizu na jednoj vrsti rasvjetnih tijela, odnosno fluorescentnim žaruljama na području Kine [41], dok su

u ostalim studijama uspoređivane energetske učinkovitosti fluorescentnih žarulja s drugim vrstama žarulja kao i njihov utjecaj na okoliš [16, 40, 42, 43].

Sve studije navedene u tablici 3 su LCA analizom obuhvatile sve faze životnog vijeka proizvoda, a to su proizvodnja, korištenje te kraj životnog vijeka. Nadalje, sve su studije izrađene prema standardu ISO 14040, a neke i prema ISO 14044. Odabrane funkcionalne jedinice definirane su na temelju vremena rada žarulja, zbog čega svaka od studija koristi određenu iteraciju omjera lumena, luxa ili snage i vremena rada [16, 40, 41, 42, 43].

Najčešće korišteni software za provođenje LCA analize je SimaPro s bazom podataka Ecoinvent [16, 41, 43], dok su dvije studije koristile podatke iz drugih izvora tj. autorskih radova [40, 42]. Osim toga, korištena je u baza Umberto [42] te podaci različitih tvrtki i velikih kompanija [41].

Dvije metode procjene utjecaja životnog vijeka proizvoda najčešće se koriste u analizama, a to su središnja točka (eng. *Midpoint*) i krajnja točka (eng. *Endpoint*). Za *endpoint* pristup, dobiveni se rezultati mogu lako protumačiti, ali obično pokazuju veću nesigurnost u usporedbi s točnošću rezultata *midpoint* pristupom. S druge strane, nedostatak *endpoint* metode je takav da se različiti utjecaji zasebno tretiraju u pojedinim kategorijama. Jedna od najpoznatijih *endpoint* metoda za analizu utjecaja na okoliš je Eco-Indicator 99 (EI99), a definirana je u samo tri kategorije: ljudsko zdravlje, kvaliteta ekosustava i potrošnja resursa [16, 41]. *Midpoint* pristup obuhvaća nekoliko metoda analize, od kojih se prema literaturi najčešće koristi Centrum voor Milieuwetenschappen Leiden (CML) 2001 metoda [40, 41, 42] koja obuhvaća sljedeće kategorije utjecaja:

- abiotičko trošenje,
- acidifikacijski potencijal,
- eutrofikacijski potencijal,
- potencijal globalnog zatopljenja,
- potencijal trošenja ozonskog sloja,
- potencijal nastanka fotokemijskog ozona.

U literaturi se koriste i dodatne kategorije za istu CML 2001 metodu [41, 42, 43], a to su:

- klimatske promjene,
- ekotoksičnost za slatkovodne vodene sustave,
- ekotoksičnost za slatkovodne sedimente,
- ekotoksičnost za morske vodene sustave,
- ekotoksičnost za morske sedimente,
- ekotoksičnost za tlo,
- toksičnost za ljude,
- prostorno iskorištavanje zemlje,
- neugodni mirisi.

Analizom studija [16, 40, 41, 42, 43] može se zaključiti da imaju slične rezultate obzirom na definirane funkcionalne jedinice i obuhvat životnog vijeka, međutim razlikuju se u opsegu promatranih područja (različiti ulazni podaci). Najveći potencijalni utjecaj rasvjetnih tijela na okoliš je u fazi korištenja zbog potrošnje električne energije, dok recikliranje na kraju životnog vijeka ima najmanji utjecaj.

5. MATERIJALI I METODE

Analiza mogućnosti kraja životnog vijeka otpadnih fluorescentnih lampi u RH napravljena je primjenom LCA metodologije. LCA predstavlja postupak procjene utjecaja na okoliš povezanih s nekim proizvodom ili procesom putem identifikacije i kvantifikacije svih materijalnih (sirovine) i energetske ulaza u sustav te izlaza u obliku otpada i emisija (u zrak, vode i tlo). Ova analiza provodi se prema standardnom LCA postupku u četiri koraka sukladno ISO14040 / 14044 [44]:

- 1) cilj i opseg - definiranje cilja analize te opis funkcionalne cjeline i granica promatranog sustava;
- 2) bilanca životnog ciklusa (eng. *LCI – Life Cycle Inventory*) - prikupljanje podataka povezanih s analiziranim sustavom, odnosno kvantitativne podatke o energetskoj i masenoj bilanci promatranog sustava;
- 3) procjena utjecaja na okoliš (eng. *LCIA – Life Cycle Impact Assessment*) - izračun potencijalnih utjecaja na okoliš sukladno odabranoj metodologiji temeljem prikupljenih podataka;
- 4) interpretacija - procjena rezultata dobivenih u trećem koraku LCA poradi identificiranja glavnih utjecaja na okoliš i povezano s tim utvrđivanje cjelovitosti, osjetljivosti i dosljednosti provođenja analize.

Prva dva koraka LCA bit će pobliže opisani u narednim potpoglavljima, dok će se treći i četvrti korak LCA raspraviti unutar poglavlja Rezultati i rasprava.

5.1 Definicija cilja i opsega

Osnova provođenja LCA analize jest utvrditi cilj analize. U ovom radu, cilj provođenja LCA analize jest utvrđivanje potencijalnih utjecaja na okoliš koji ima sustav gospodarenja otpadnim fluorescentnim žaruljama u Hrvatskoj temeljem podataka prikupljenih u Registru onečišćivanja okoliša (ROO) [45] o prikupljanju i obradi otpada ključnog broja 20 01 21* u 2018. godini te usporediti potencijalne utjecaje na okoliš ukoliko bi se navedene količine otpada zbrinjavale sukladno

definiranim procesima na razini prosjeka u EU kad se koriste podaci iz LCA baze podataka (Ecoinvent).

Ovisno o području primjene ili potrebama LCA analize, utvrđivanje mogućeg utjecaja na okoliš provodi se u skladu s definiranom metodologijom. Metodologijom su definirani osnovni postupci trećeg koraka LCA za određeni set utjecajnih kategorija na okoliš, klasifikacija (kvalitativno pridruživanje parametara ulaza (input) i izlaza (output) promatranog sustava s definiranom kategorijom utjecaja na okoliš) i karakterizacija (kvantitativno pridruživanje parametara s odgovarajućim koeficijentom unutar utjecajne kategorije).

U ovom radu, mogući utjecaj na okoliš proveden je prema metodologiji CML 2001 (*all impacts categories*), pri čemu su kategorije utjecaja na okoliš koje metodologija obuhvaća navedene u tablici 4. Studije navedene u poglavlju 4 ovog rada [41, 42, 43] također su provele analizu na svom kategorijama utjecaja radi opsežnijeg prikaza rezultata.

Osim, utvrđivanja mogućeg utjecaja na okoliš u navedenim kategorijama, provest će se i normalizacija (*the Netherlands, 1997 - CML 2001 (all impact categories)*), odnosno postupak kojim se utvrđuje relativni udio utjecaja analiziranog sustava u ukupnom utjecaju po prosječnom građaninu ili globalno, po zemlji, itd., poradi mogućnosti definiranja koja kategorija utjecaja na okoliš ima veći potencijalno negativan učinak po okoliš. Navedena analiza provest će se uz pomoć besplatnog softvera za provođenje LCA analize, openLCA verzija 1.10.1.

Tablica 4 Kategorije utjecaja na okoliš prema metodologiji CML 2001 (all impacts categories) za provođenje LCIA

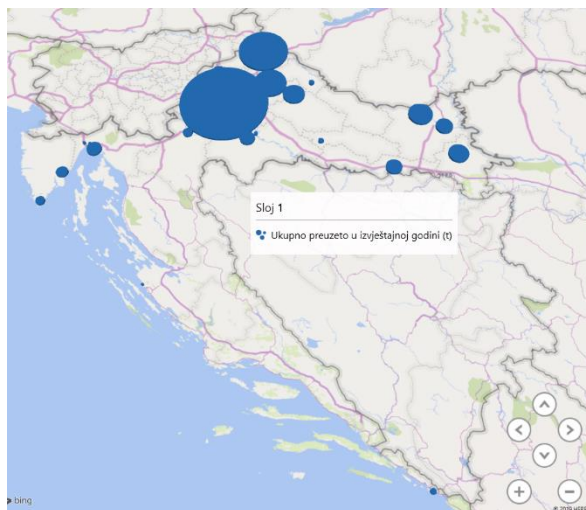
Kategorija utjecaja na okoliš	Jedinica
Abiotic depletion	kg Sb eq
Acidification	kg SO ₂ eq
Average European (kg NO _x eq)	kg NO _x eq
Average European (kg SO ₂ -Eq)	kg SO ₂ eq

Kategorija utjecaja na okoliš	Jedinica
Equal benefit incremental reactivity	kg formed O ₃
Eutrophication	kg PO ₄ ³⁻ eq
Fresh water aquatic ecotox. infinite	kg 1,4-DB eq
Freshwater aquatic ecotox. 100a	kg 1,4-DB eq
Freshwater aquatic ecotox. 20a	kg 1,4-DB eq
Freshwater aquatic ecotox. 500a	kg 1,4-DB eq
Freshwater sediment ecotox. 100a	kg 1,4-DB eq
Freshwater sediment ecotox. 20a	kg 1,4-DB eq
Freshwater sediment ecotox. 500a	kg 1,4-DB eq
Freshwater sediment ecotox. infinite	kg 1,4-DB eq
Global warming 100a	kg CO ₂ eq
Global warming 20a	kg CO ₂ eq
Global warming 500a	kg CO ₂ eq
Human toxicity 100a	kg 1,4-DB eq
Human toxicity 20a	kg 1,4-DB eq
Human toxicity 500a	kg 1,4-DB eq
Human toxicity infinite	kg 1,4-DB eq
Ionising radiation	DALYs
Land competition	m ² a
Lower limit of net global warming	kg CO ₂ eq
Malodours air	m ³ air
Marine aquatic ecotox. 100a	kg 1,4-DB eq
Marine aquatic ecotox. 20a	kg 1,4-DB eq
Marine aquatic ecotox. 500a	kg 1,4-DB eq
Marine aquatic ecotoxicity infinite	kg 1,4-DB eq
Marine sediment ecotox. 100a	kg 1,4-DB eq
Marine sediment ecotox. 20a	kg 1,4-DB eq
Marine sediment ecotox. 500a	kg 1,4-DB eq
Marine sediment ecotox. infinite	kg 1,4-DB eq
Max. incremental reactivity	kg formed O ₃
Max. ozone incremental reactivity	kg formed O ₃
Ozone layer depletion 10a	kg CFC-11 eq

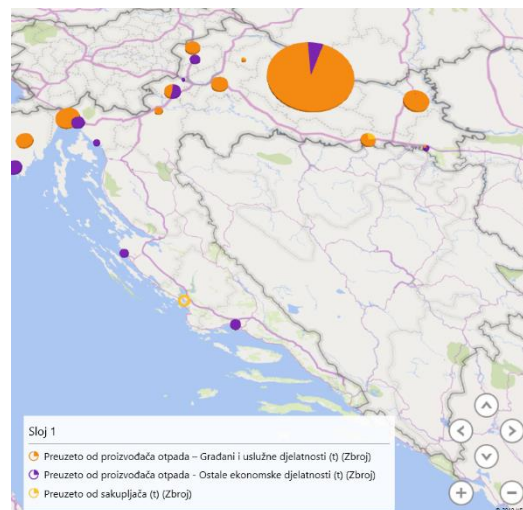
Kategorija utjecaja na okoliš	Jedinica
Ozone layer depletion 15a	kg CFC-11 eq
Ozone layer depletion 20a	kg CFC-11 eq
Ozone layer depletion 25a	kg CFC-11 eq
Ozone layer depletion 30a	kg CFC-11 eq
Ozone layer depletion 40a	kg CFC-11 eq
Ozone layer depletion 5a	kg CFC-11 eq
Ozone layer depletion steady state	kg CFC-11 eq
Photochemical oxidation (low NO _x)	kg C ₂ H ₄ eq
Photochemical oxidation	kg C ₂ H ₄ eq
Terrestrial ecotoxicity 100a	kg 1,4-DB eq
Terrestrial ecotoxicity 20a	kg 1,4-DB eq
Terrestrial ecotoxicity 500a	kg 1,4-DB eq
Terrestrial ecotoxicity infinite	kg 1,4-DB eq
Upper limit of net global warming	kg CO ₂ eq

Osnova za provođenje LCA jest definiranje funkcionalne jedinice promatranog sustava. Naime, svi proizvodi su proizvedeni za obavljanje jedne ili više funkcija, pružanje jedne ili više usluga, koji ispunjavaju zahtjeve jednog ili više kupaca. Kvantificiran opis funkcije promatranog sustava u LCA studiji jest zapravo definirana funkcionalna jedinica sustava koja pruža osnovu za definiranje masene i energetske bilance [46]. U ovom diplomskom radu, funkcionalna jedinica sustava definirana je sakupljenom masom (Prilog 1) otpadnih fluorescentnih lampi u Hrvatskoj tijekom 2018. godine, što iznosi 160.112 kg.

Do navedenog iznosa došlo se zbrajanjem sakupljenih količina otpada ključnog broja 20 01 21* postupcima sakupljanje otpada (osim komunalnog) i sakupljanje putem reciklažnih dvorišta dobivenih za 2018. godinu pretraživanjem ROO-a (Prilog 1 i 2). Prostorna raspodjela navedenih količina u Hrvatskoj se može vidjeti na sljedećim slikama (slika 6 i 7).



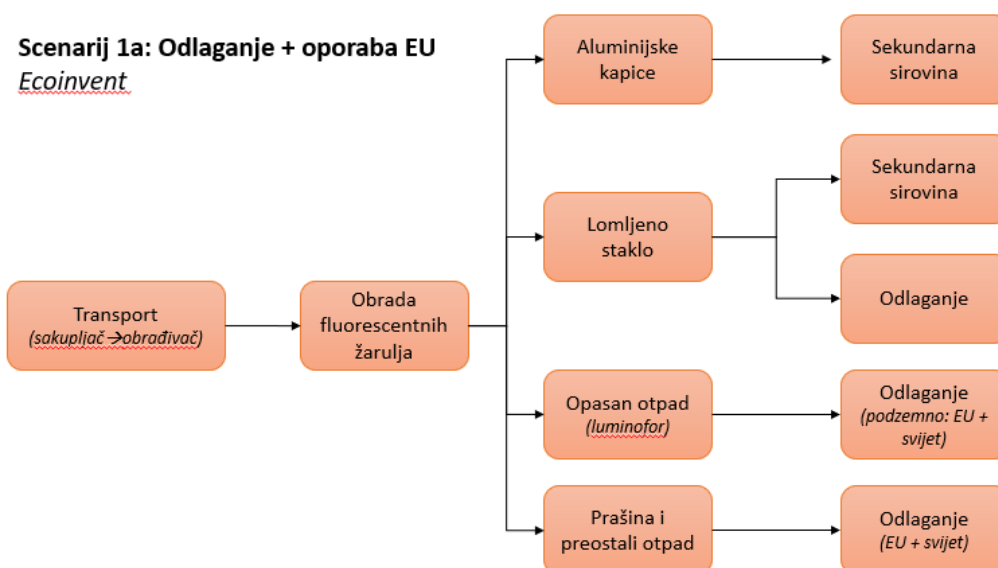
Slika 6 Sakupljen otpad (20 01 21) u reciklažnim dvorištima, 2018. godina*



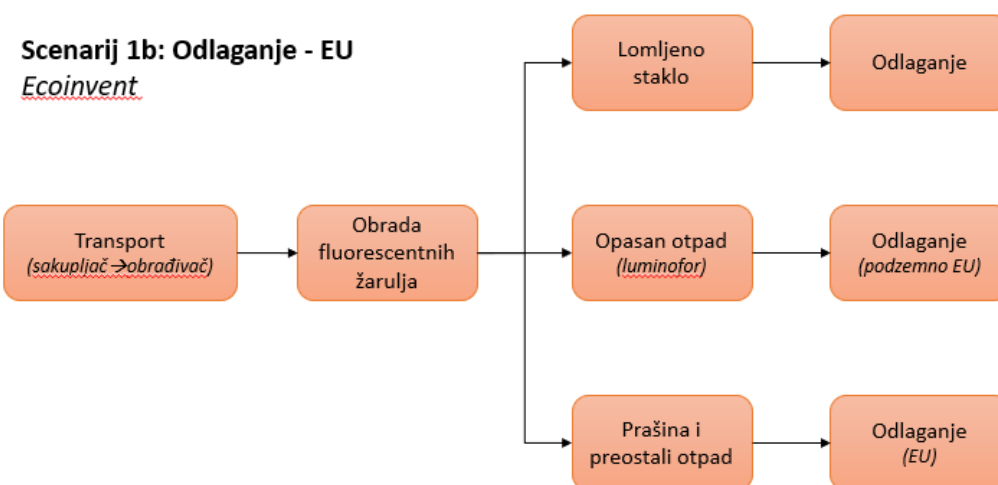
Slika 7 Sakupljen otpad (osim komunalnog) – 20 01 21, 2018. godina.*

Mogućnosti, a samim time i granice sustava koje će se analizirati s LCA, prikazani su na sljedećim slikama (slika 8 i 9, 10 i 11). Prva mogućnost ili scenarij 1 odnosi se na proces obrade otpadnih fluorescentnih lampi sukladno prosjeku koji je definiran za EU (Ecoinvent baza podataka) sa sakupljenim količinama za RH. Poradi boljeg uviđanja utjecaja na okoliš, za prvu mogućnost napravljeni su podscenariji, odnosno utvrđivanje mogućeg utjecaja na okoliš ukoliko se nastali otpad u pridruženim procesima isključivo odlaže (slika 9), tj. ukoliko se nastali otpad u pridruženim procesima isključivo oporabljuje (slika 10). Druga mogućnost ili scenarij 2 odnosi se na proces obrade otpadnih fluorescentnih lampi sukladno stanju u Hrvatskoj. Za sve mogućnosti, ulaz je isti i definiran je funkcionalnom jedinicom sustava. Razlika u dva scenarija odnosi se na usmjeravanje količina nastalog otpada, je li ono predefinirano bazom podataka ili su podaci modificirani kako bi realnije opisivali sustav gospodarenja u Hrvatskoj. U pogledu ovog rada, druga mogućnost uključuje modifikaciju podataka kako bi realnije opisala sustav; u obzir je uzeta točna količina oporabljene otpada (20 01 21*) u 2018. godini postupkom R5 (Recikliranje/obnavljanje drugih otpadnih anorganskih materijala) i realne udaljenosti od 14 definiranih sabirnih centara za prikupljanje EE otpada i usmjeravanje otpada prema državnom koncesionaru za recikliranje EE otpada dok se za ostatak temeljem izdanih dozvola za gospodarenje otpadom pretpostavilo da se ili skladištilo postupkom R13 (Skladištenje otpada prije bilo kojeg od postupaka uporabe R1 do R12 (osim privremenog skladištenja na

mjestu nastanka, prije skupljanja)) ili postupkom D15 (Skladištenje otpada prije primjene bilo kojeg od postupaka zbrinjavanja d 1 do d 14 (osim privremenog skladištenja otpada na mjestu nastanka, prije skupljanja)).



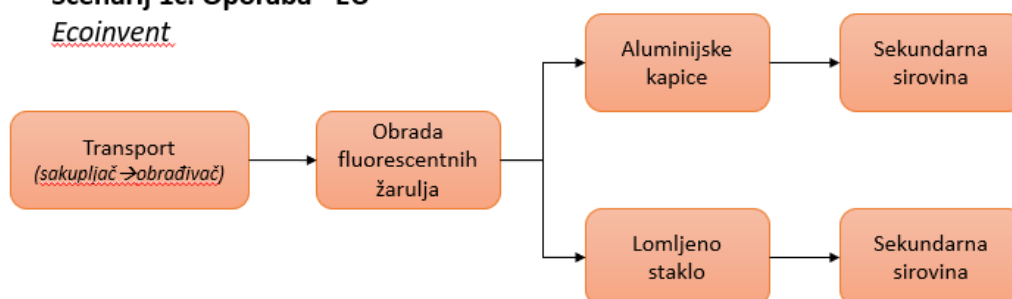
Slika 8 Sustav obrade otpadnih fluorescentnih lampi u EU (Ecoinvent baza podataka) – odlaganje i uporaba



Slika 9 Sustav obrade otpadnih fluorescentnih lampi u EU (Ecoinvent baza podataka) – odlaganje

Scenarij 1c: Oporaba - EU

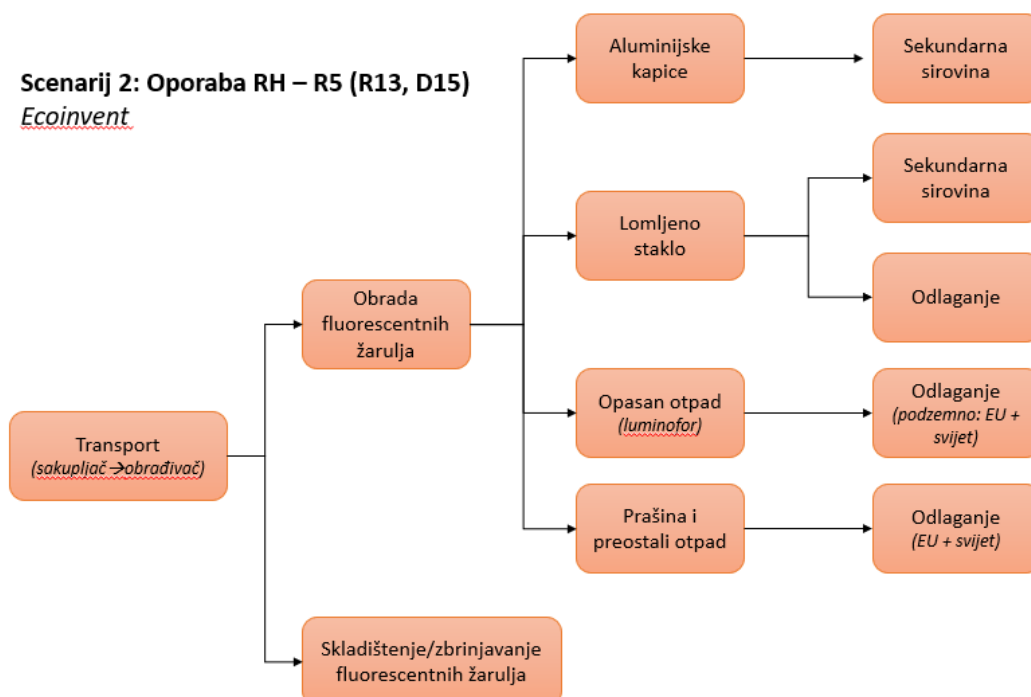
Ecoinvent



Slika 10 Sustav obrade otpadnih fluorescentnih lampi u EU (Ecoinvent baza podataka)
– oporaba

Scenarij 2: Oporaba RH – R5 (R13, D15)

Ecoinvent



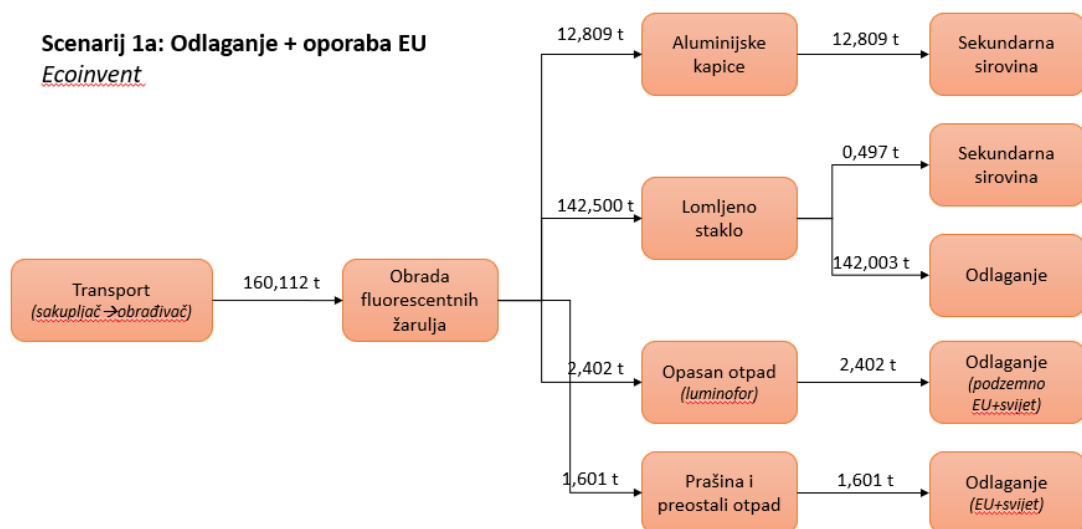
Slika 11 Sustav obrade otpadnih fluorescentnih lampi u RH (ROO) – sakupljeno te skladišteno (R13 ili D15) i oporabljeno (R5)

5.2 Bilanca životnog ciklusa

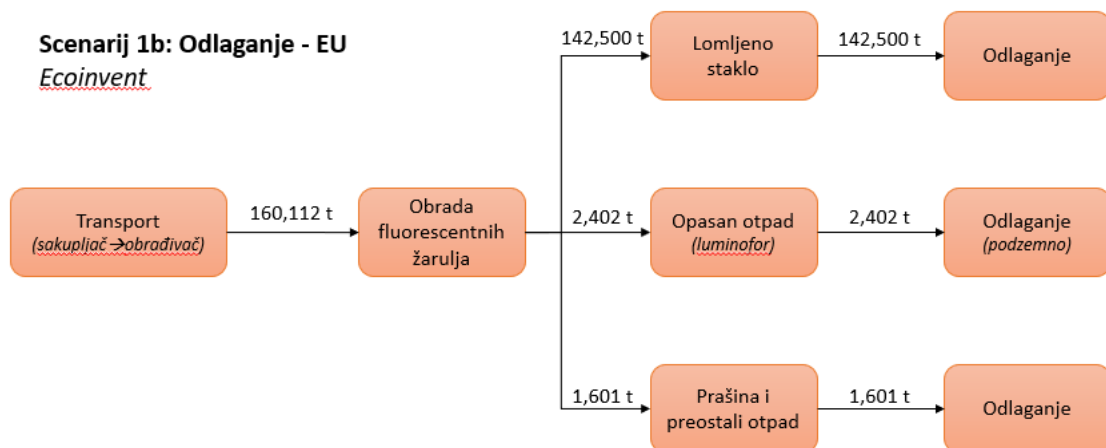
Bilanca životnog ciklusa ili analiza inventara jest korak LCA analize u kojem se definiraju podaci koji su prikupljeni za provođenje analize. Za potrebe ovog rada i LCA analize, korišteni su sekundarni i tercijarni podaci. Sekundarni podaci su podaci koji su prikupljeni i objavljeni u LCA bazama podataka poput: National Renewable Energy Laboratory (NREL) US LCI, ecoinvent (europski orijentirano), GaBi, Franklin US LCI Library, USDA National Agricultural Library Digital Commons, Athena Institute Database, GREET; dok su tercijarni podaci prikupljeni temeljem pretraživanja ostalih baza podataka (koje nisu isključivo napravljene za potrebe provođenja LCA analize) te podataka prikupljenih pretraživanjem literature ili izvješća [46].

U ovom radu korištena je Ecoinvent baza podataka s akademskom licencom za utvrđivanje utjecaja na okoliš temeljem europskog prosjeka obrade otpadnih fluorescentnih žarulja. Većina studija [16, 41, 43] spomenutih u poglavlju 4. ovog rada također koristi Ecoinvent bazu podataka bez obzira na to koje područje svijeta je bilo obrađivano. Ostali podaci prikupljeni su pregledom izdanih Rješenja za dozvolu gospodarenja opasnim otpadom za pravne subjekte koji imaju dozvolu za gospodarenje otpadom ključnog broja 20 01 21* (otpadne fluorescentne cijevi i ostali otpad koji sadrži živu) u Registru dozvola i potvrda za gospodarenje otpadom [47] te pregledom pravnih subjekata u Registra onečišćavanja okoliša koji sakupljaju otpad ključnog broja 20 01 21* [45] postupcima sakupljanje otpada (osim komunalnog) i sakupljanje putem reciklažnih dvorišta.

S obzirom na prethodno definirane granice sustava na sljedećim slikama (12, 13, 14 i 15) prikazani su tokovi (osnova za prikaz navedenih grafova nalazi se u Prilogu 2 i 3) koji su dobiveni nakon objedinjavanja i analize podataka u softveru openLCA sukladno CML 2001 metodologiji. Analizom LCA studija u poglavlju 4. ovog rada [41, 42, 43], utvrđeno je da većina koristi CML metodologiju za određivanje utjecajnih kategorija zbog detaljnijih prikaza rezultata.

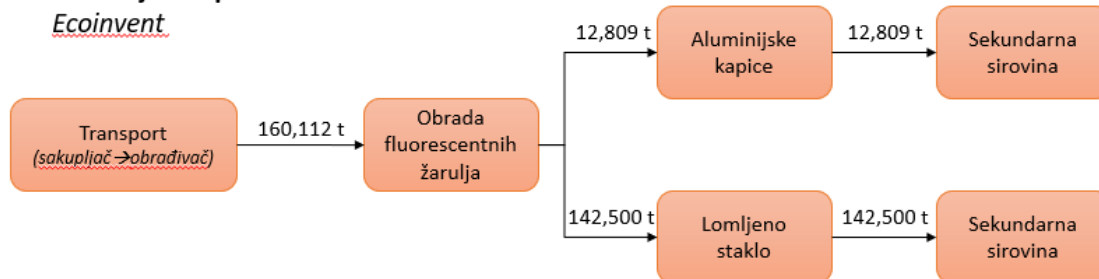


Slika 12 Sustav obrade otpadnih fluorescentnih lampi u EU (Ecoinvent baza podataka)
– odlaganje i uporaba – tok količina



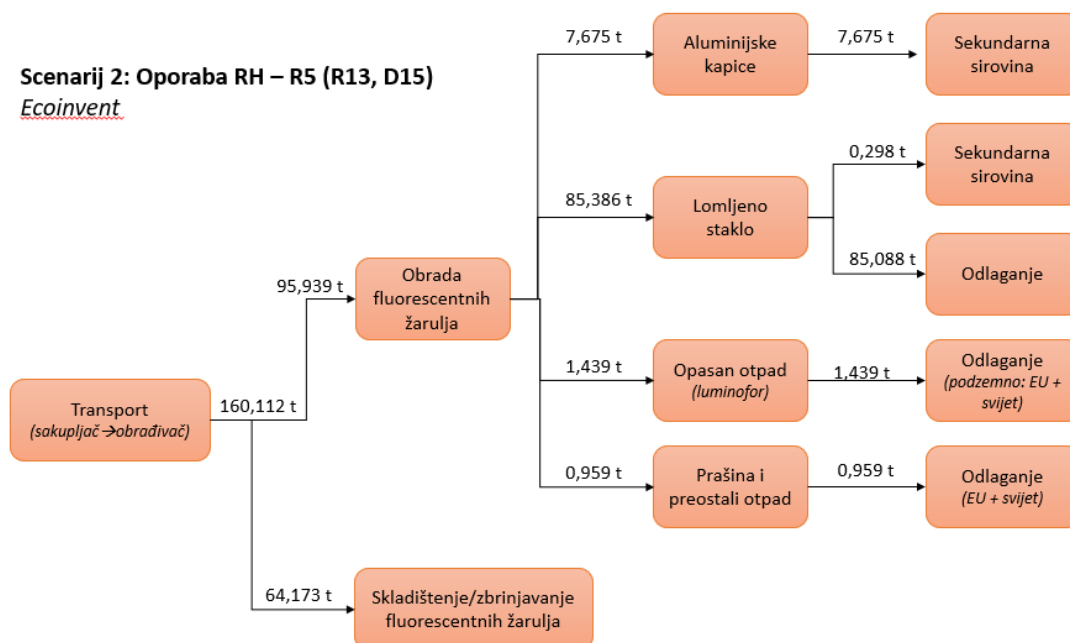
Slika 13 Sustav obrade otpadnih fluorescentnih lampi u EU (Ecoinvent baza podataka)
– odlaganje – tok količina

Scenarij 1c: Oporaba - EU
Ecoinvent



Slika 14 Sustav obrade otpadnih fluorescentnih lampi u EU (Ecoinvent baza podataka)
 – oporaba – tok količina

Scenarij 2: Oporaba RH – R5 (R13, D15)
Ecoinvent



Slika 15 Sustav obrade otpadnih fluorescentnih lampi u RH (ROO) – sakupljeno te skladišteno (R13 ili D15) i oporabljeno (R5) – tok količina

6. REZULTATI I RASPRAVA

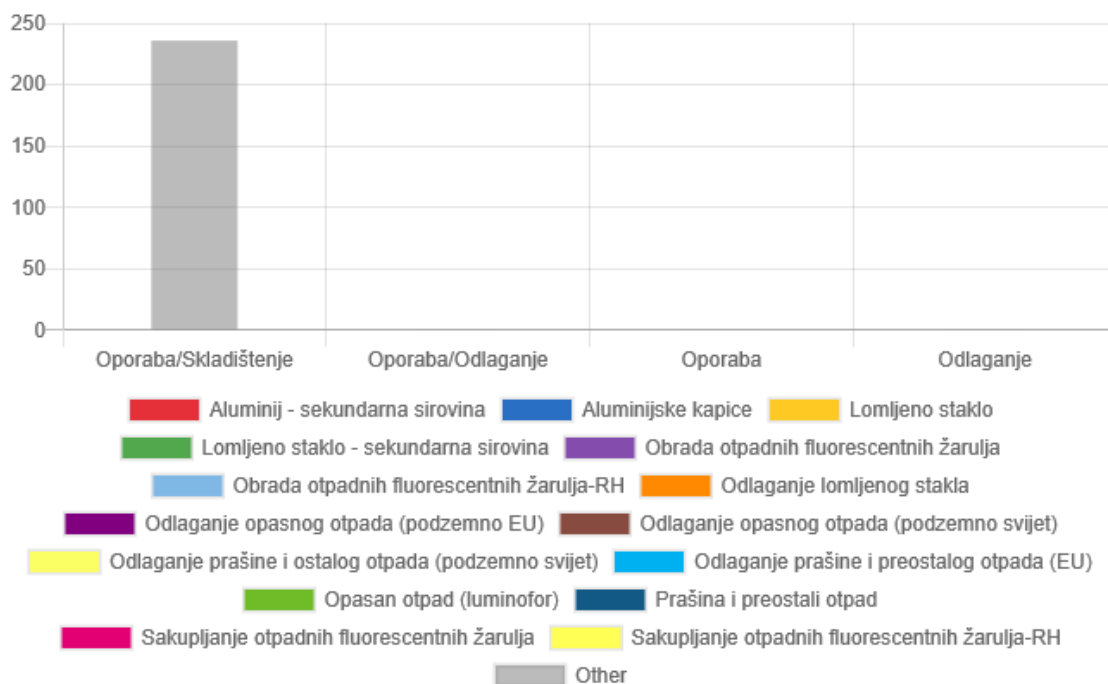
Nakon unošenja potrebnih podataka za pokretanje LCA analize u program openLCA, dobiveni su kvantitativni podaci za moguće utjecaje na okoliš nakon usporedbe različitih opcija, prethodno opisanih. Detaljniji prikaz i rasprava o potencijalnom utjecaju na okoliš u određenim kategorijama utjecaja koji se najčešće promatraju prilikom LCA analize, bit će detaljnije raspravljani u narednim podpoglavljima.

6.1 Acidifikacijski potencijal (eng. *acidification*)

Premda je uvidom u Tablicu 5 vidljiv mogući utjecaj na okoliš za sve četiri mogućnosti, kad ih se usporedi uočava se kako je najveći utjecaj na okoliš ima mogućnost 2 što se može vidjeti na sljedećoj slici 16.

Tablica 5 Mogući utjecaji na okoliš prema kategorijama utjecaja na okoliš acidifikacijski potencijal prema metodologiji CML 2001 (all impacts categories) za sve scenarije

Kategorija utjecaja na okoliš	Scenarij 2	Scenarij 1a	Scenarij 1c	Scenarij 1b	Jedinica
	Oporaba/ Skladištenje RH	Oporaba/ Odlaganje <i>Ecoinvent</i>	Oporaba <i>Ecoinvent</i>	Odlaganje <i>Ecoinvent</i>	
Acidification	2,36E+07	6,48E+03	6,48E+03	6,48E+03	kg SO ₂ eq



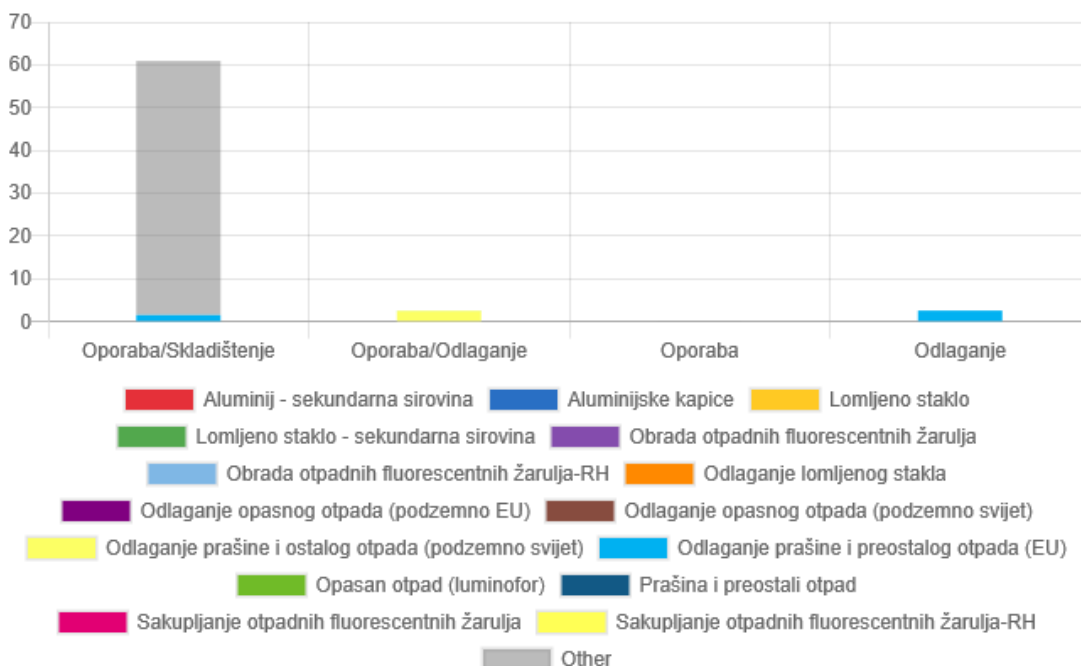
Slika 16 Mogući utjecaj na okoliš za različite mogućnosti u kategoriji utjecaja acidifikacija

6.2 Eutrofikacijski potencijal (eng. *eutrophication*)

Premda uvidom u Tablicu 6, je vidljiv mogući utjecaj na okoliš za sve četiri mogućnosti, kad ih se usporedi uočava se kako je najveći utjecaj na okoliš ima mogućnost 2 što se može vidjeti na sljedećoj slici 17.

Tablica 6 Mogući utjecaji na okoliš prema kategorijama utjecaja na okoliš eutrofikacijski potencijal prema metodologiji CML 2001 (all impacts categories) za sve scenarije

Kategorija utjecaja na okoliš	Scenarij 2	Scenarij 1a	Scenarij 1c	Scenarij 1b	Jedinica
	Oporaba/Skladištenje RH	Oporaba/Odlaganje Ecoinvent	Oporaba Ecoinvent	Odlaganje Ecoinvent	
Eutrophication	6,09E+06	2,54E+05	1,63E+03	2,54E+05	kg PO ₄ ³⁻ eq



Slika 17 Mogući utjecaj na okoliš za različite mogućnosti u kategoriji utjecaja eutrofikacija

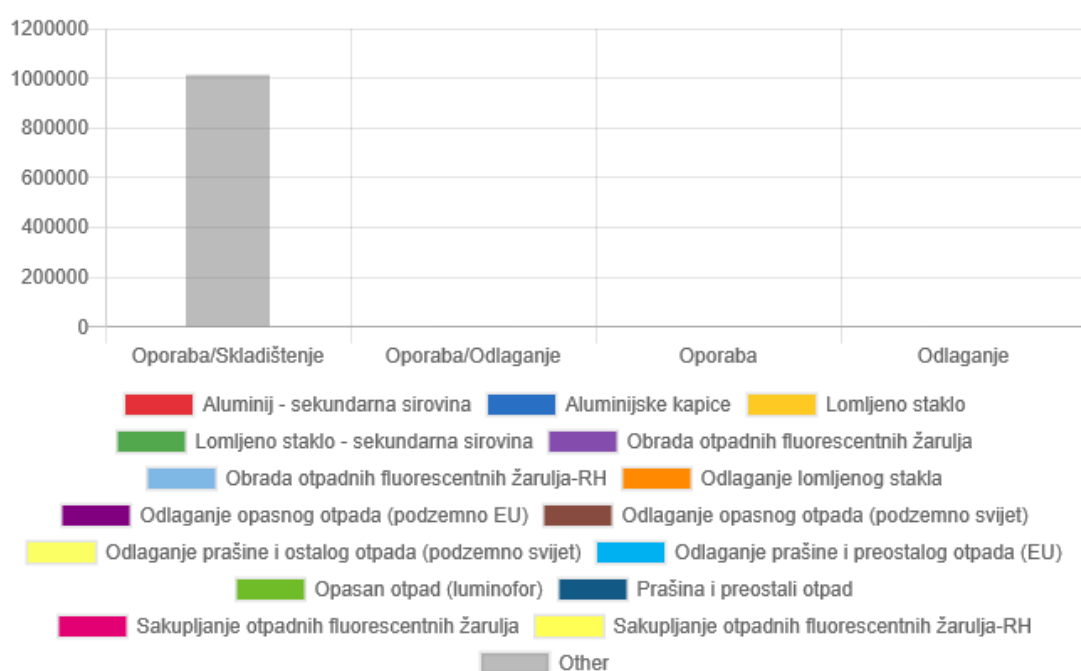
6.3 Potencijal globalnog zatopljenja (eng. *global warming*)

Premda uvidom u Tablicu 7, je vidljiv mogući utjecaj na okoliš za sve četiri mogućnosti, kad ih se usporedi uočava se kako je najveći utjecaj na okoliš ima mogućnost 2 što se može vidjeti na sljedećoj slici 18.

Tablica 7 Mogući utjecaji na okoliš prema kategorijama utjecaja na okoliš potencijal globalnog zatopljenja prema metodologiji CML 2001 (all impacts categories) za sve scenarije

Kategorija utjecaja na okoliš	Scenarij 2	Scenarij 1a	Scenarij 1c	Scenarij 1b	Jedinica
	Oporaba/Skladištenje RH	Oporaba/Odlaganje Ecoinvent	Oporaba Ecoinvent	Odlaganje Ecoinvent	
Global warming 100a	1,02E+11	2,81E+07	2,81E+07	2,81E+07	kg CO ₂ eq
Global warming 20a	1,02E+11	2,80E+07	2,80E+07	2,80E+07	
Global warming 500a	1,01E+11	2,79E+07	2,79E+07	2,79E+07	

Kategorija utjecaja na okoliš	Scenarij 2	Scenarij 1a	Scenarij 1c	Scenarij 1b	Jedinica
	Oporaba/ Skladištenje RH	Oporaba/ Odlaganje <i>Ecoinvent</i>	Oporaba <i>Ecoinvent</i>	Odlaganje <i>Ecoinvent</i>	
Lower limit of net global warming	1,02E+11	2,81E+07	2,81E+07	2,81E+07	
Upper limit of net global warming	1,02E+11	2,82E+07	2,82E+07	2,82E+07	



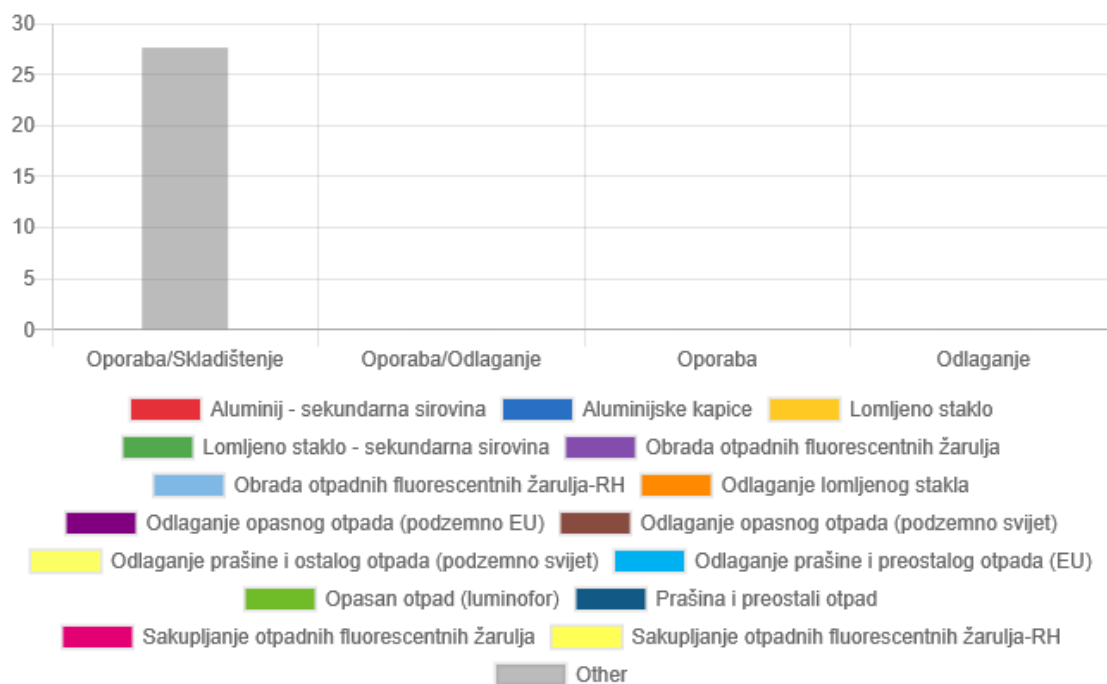
Slika 18 Mogući utjecaj na okoliš za različite mogućnosti u kategoriji utjecaja potencijal globalnog zatopljenja za 500-godišnje razdoblje

6.4 Potencijal nastanka fotokemijskog ozona

Premda uvidom u Tablicu 8, je vidljiv mogući utjecaj na okoliš za sve četiri mogućnosti, kad ih se usporedi uočava se kako je najveći utjecaj na okoliš ima mogućnost 2 što se može vidjeti na sljedećoj slici 19.

Tablica 8 Mogući utjecaji na okoliš prema kategorijama utjecaja na okoliš potencijal nastanka fotokemijskog ozona prema metodologiji CML 2001 (all impacts categories) za sve scenarije

Kategorija utjecaja na okoliš	Scenarij 2	Scenarij 1a	Scenarij 1c	Scenarij 1b	Jedinica
	Oporaba/ Skladištenje RH	Oporaba/ Odlaganje Ecoinvent	Oporaba Ecoinvent	Odlaganje Ecoinvent	
Photochemical oxidation (low NO _x)	3,84E+06	1,06E+03	1,06E+03	1,06E+03	kg C ₂ H ₄ eq
Photochemical oxidation	2,76E+06	7,60E+02	7,60E+02	7,60E+02	



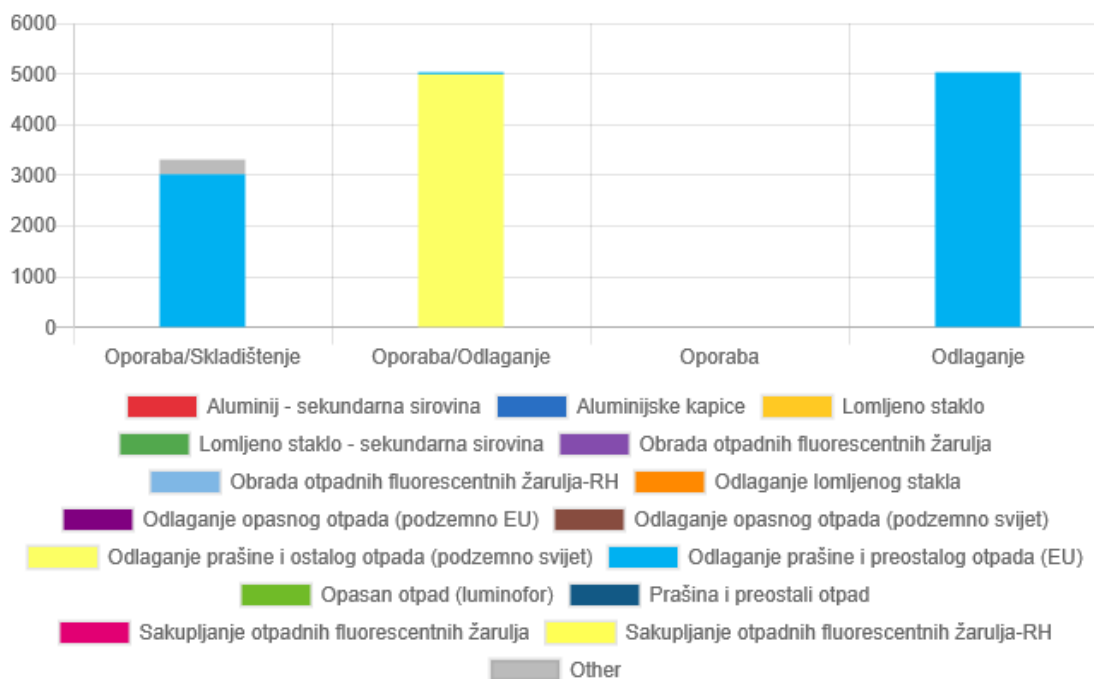
Slika 19 Mogući utjecaj na okoliš za različite mogućnosti u kategoriji utjecaja potencijal nastanka fotokemijskog ozona

6.5 Ekotoksičnost za slatkovodne vodene sustave (eng. *Fresh water aquatic ecotox.*)

Premda uvidom u Tablicu 9, je vidljiv mogući utjecaj na okoliš za sve četiri mogućnosti, kad ih se uspoređi uočava se kako je najveći utjecaj na okoliš imaju mogućnosti 1a i 1b što se može vidjeti na sljedećoj slici 20.

Tablica 9 Mogući utjecaji na okoliš prema kategorijama utjecaja na okoliš ekotoksičnost za slatkovodne vodene sustave prema metodologiji CML 2001 (all impacts categories) za sve scenarije

Kategorija utjecaja na okoliš	Scenarij 2	Scenarij 1a	Scenarij 1c	Scenarij 1b	Jedinica
	Oporaba/ Skladištenje RH	Oporaba/ Odlaganje <i>Ecoinvent</i>	Oporaba <i>Ecoinvent</i>	Odlaganje <i>Ecoinvent</i>	
Fresh water aquatic ecotox. infinite	3,31E+08	5,03E+08	8,10E+03	5,03E+08	kg 1,4-DB eq
Freshwater aquatic ecotox. 100a	3,28E+08	5,00E+08	7,74E+03	5,00E+08	
Freshwater aquatic ecotox. 20a	3,11E+08	4,72E+08	7,71E+03	4,72E+08	
Freshwater aquatic ecotox. 500a	3,28E+08	5,00E+08	7,84E+03	5,00E+08	



Slika 20 Mogući utjecaj na okoliš za različite mogućnosti u kategoriji utjecaja ekotoksičnost za slatkovodne vodene sustave (beskonačno)

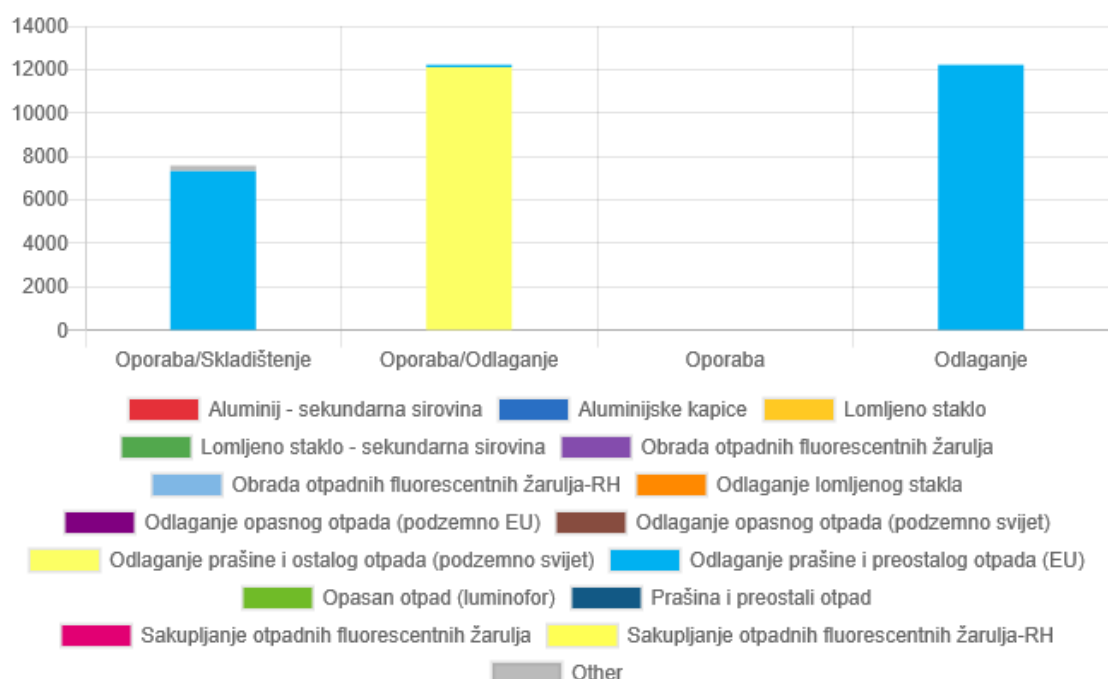
6.6 Ekotoksičnost za slatkovodne sedimente (eng *Freshwater sediment ecotox.*)

Premda uvidom u Tablicu 10, je vidljiv mogući utjecaj na okoliš za sve četiri mogućnosti, kad ih se usporedi uočava se kako je najveći utjecaj na okoliš imaju mogućnosti 1a i 1b što se može vidjeti na sljedećoj slici 21.

Tablica 10 Mogući utjecaji na okoliš prema kategorijama utjecaja na okoliš ekotoksičnost za slatkovodne sedimente prema metodologiji CML 2001 (all impacts categories) za sve scenarije

Kategorija utjecaja na okoliš	Scenarij 2	Scenarij 1a	Scenarij 1c	Scenarij 1b	Jedinica
	Oporaba/Skladištenje RH	Oporaba/Odlaganje Ecoinvent	Oporaba Ecoinvent	Odlaganje Ecoinvent	
Freshwater sediment ecotox. 100a	7,51E+08	1,22E+09	6,07E+03	1,22E+09	kg 1,4-DB eq
Freshwater sediment ecotox. 20a	7,06E+08	1,14E+09	5,99E+03	1,14E+09	

Kategorija utjecaja na okoliš	Scenarij 2	Scenarij 1a	Scenarij 1c	Scenarij 1b	Jedinica
	Oporaba/Skladištenje RH	Oporaba/Odlaganje Ecoinvent	Oporaba Ecoinvent	Odlaganje Ecoinvent	
Freshwater sediment ecotox. 500a	7,52E+08	1,22E+09	6,32E+03	1,22E+09	
Freshwater sediment ecotox. infinite	7,57E+08	1,22E+09	6,98E+03	1,22E+09	



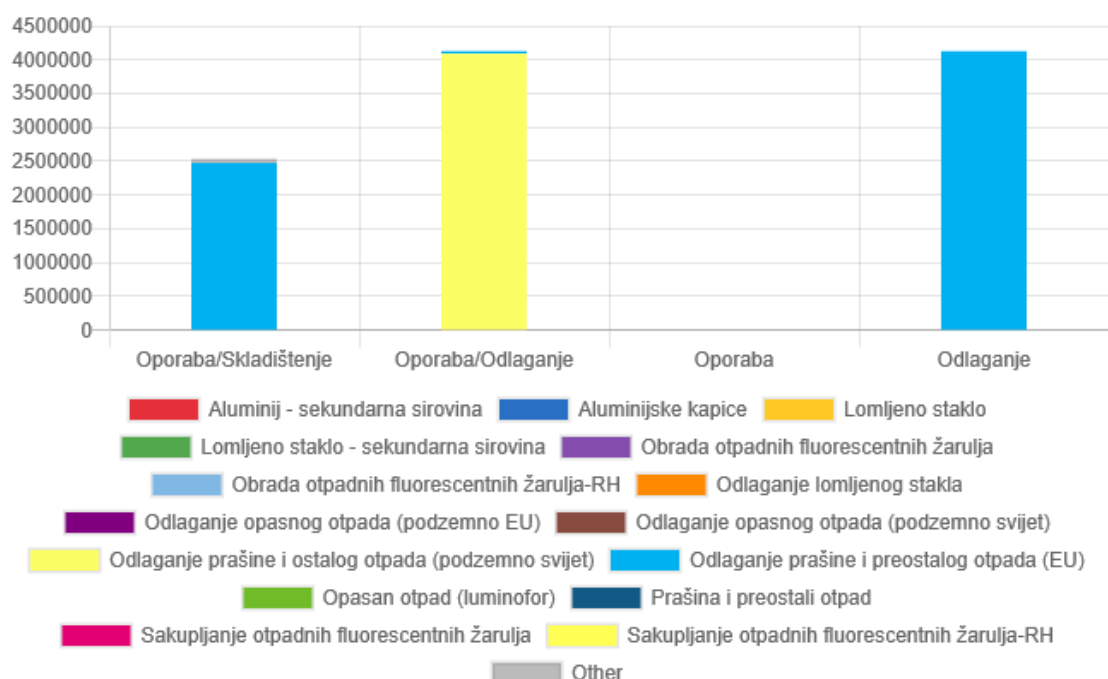
Slika 21 Mogući utjecaj na okoliš za različite mogućnosti u kategoriji utjecaja ekotoksičnost za slatkovodne sedimente (beskonačno)

6.7 Ekotoksičnost za morske vodene sustave (eng. *marine aquatic ecotox.*)

Premda uvidom u Tablicu 11, je vidljiv mogući utjecaj na okoliš za sve četiri mogućnosti, kad ih se usporedi uočava se kako je najveći utjecaj na okoliš imaju mogućnosti 1a i 1b što se može vidjeti na sljedećoj slici 22.

Tablica 11 Mogući utjecaji na okoliš prema kategorijama utjecaja na okoliš ekotoksičnost za morske vodene sustave prema metodologiji CML 2001 (all impacts categories) za sve scenarije

Kategorija utjecaja na okoliš	Scenarij 2	Scenarij 1a	Scenarij 1c	Scenarij 1b	Jedinica
	Oporaba/ Skladištenje RH	Oporaba/ Odlaganje Ecoinvent	Oporaba Ecoinvent	Odlaganje Ecoinvent	
Marine aquatic ecotox. 100a	1,15E+09	1,70E+09	3,81E+04	1,70E+09	kg 1,4-DB eq
Marine aquatic ecotox. 20a	1,96E+08	2,35E+08	1,52E+04	2,35E+08	
Marine aquatic ecotox. 500a	6,06E+09	9,14E+09	1,61E+05	9,14E+09	
Marine aquatic ecotoxicity infinite	2,53E+11	4,12E+11	1,69E+06	4,12E+11	



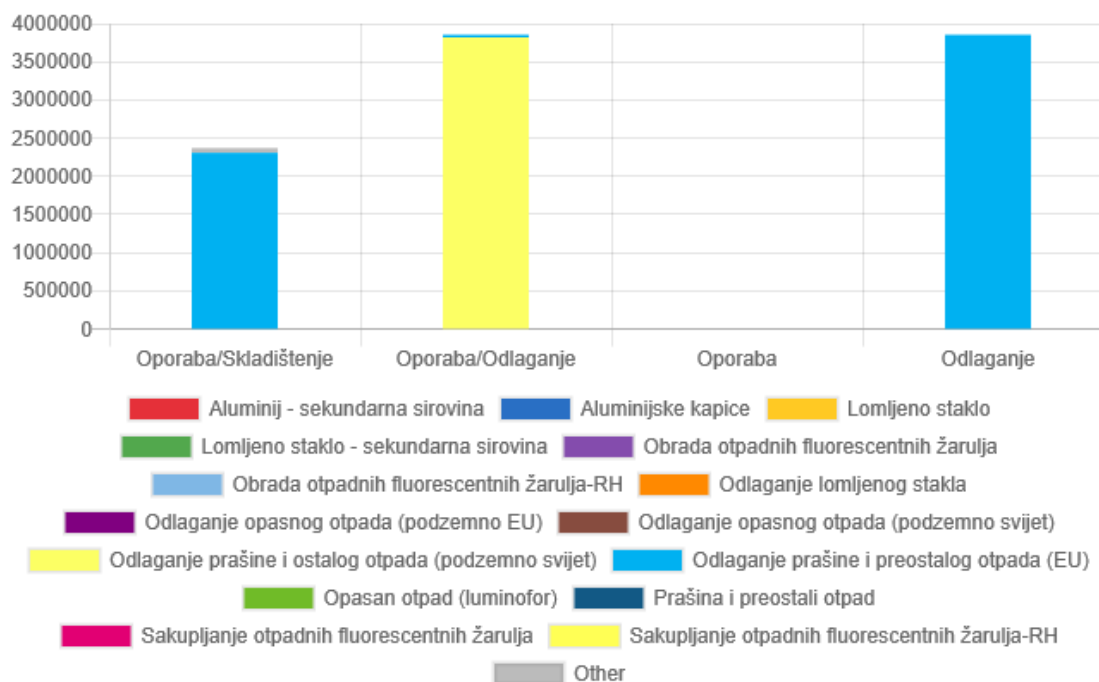
Slika 22 Mogući utjecaj na okoliš za različite mogućnosti u kategoriji utjecaja ekotoksičnost za morske vodene sustave (beskonačno)

6.8 Ekotoksičnost za morske sedimente (eng. *marine sediment ecotox.*)

Premda uvidom u Tablicu 5, je vidljiv mogući utjecaj na okoliš za sve četiri mogućnosti, kad ih se usporedi uočava se kako je najveći utjecaj na okoliš imaju mogućnosti 1a i 1b što se može vidjeti na sljedećoj slici 16.

Tablica 12 Mogući utjecaji na okoliš prema kategorijama utjecaja na okoliš ekotoksičnost za morske sedimente prema metodologiji CML 2001 (all impacts categories) za sve scenarije

Kategorija utjecaja na okoliš	Scenarij 2	Scenarij 1a	Scenarij 1c	Scenarij 1b	Jedinica
	Oporaba/ Skladištenje RH	Oporaba/ Odlaganje <i>Ecoinvent</i>	Oporaba <i>Ecoinvent</i>	Odlaganje <i>Ecoinvent</i>	
Marine sediment ecotox. 100a	1,43E+09	2,04E+09	5,66E+04	2,04E+09	kg 1,4-DB eq
Marine sediment ecotox. 20a	3,79E+08	4,64E+08	2,78E+04	4,64E+08	
Marine sediment ecotox. 500a	6,10E+09	9,08E+09	1,81E+05	9,08E+09	
Marine sediment ecotox. infinite	2,37E+11	3,85E+11	1,70E+06	3,85E+11	



Slika 23 Mogući utjecaj na okoliš za različite mogućnosti u kategoriji utjecaja ekotoksičnost za morske sedimente (beskonačno)

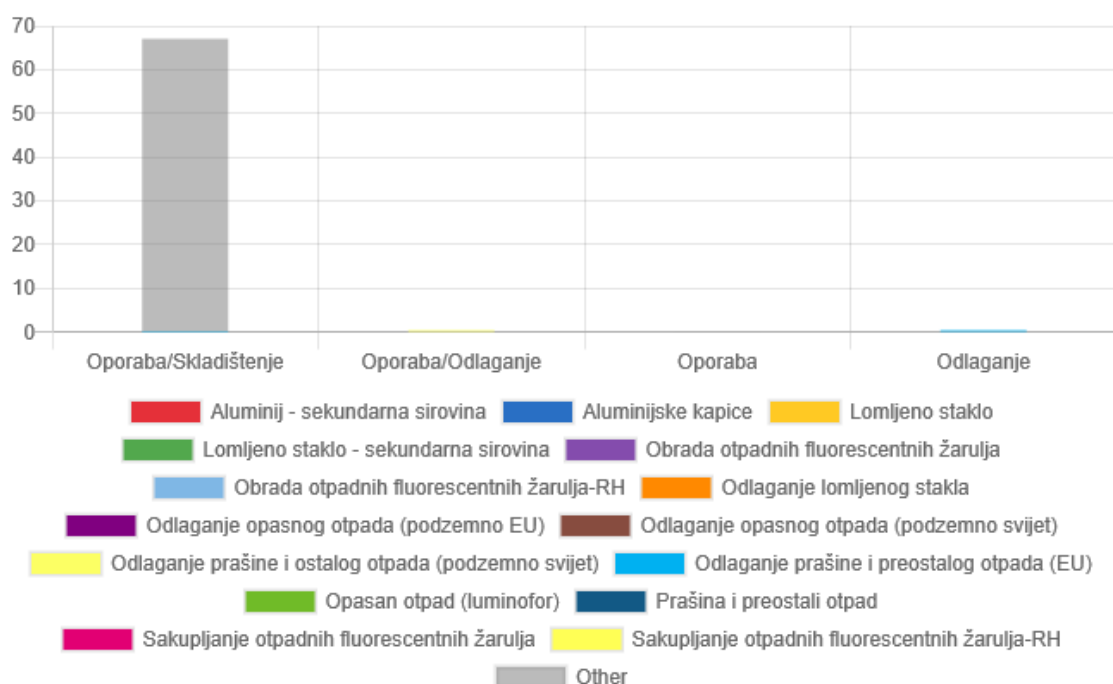
6.9 Ekotoksičnost za tlo (eng. *terrestrial ecotoxicity*)

Premda uvidom u Tablicu 13, je vidljiv mogući utjecaj na okoliš za sve četiri mogućnosti, kad ih se usporedi uočava se kako je najveći utjecaj na okoliš ima mogućnost 2 što se može vidjeti na sljedećoj slici 24.

Tablica 13 Mogući utjecaji na okoliš prema kategorijama utjecaja na okoliš ekotoksičnost za tlo prema metodologiji CML 2001 (all impacts categories) za sve scenarije

Kategorija utjecaja na okoliš	Scenarij 2	Scenarij 1a	Scenarij 1c	Scenarij 1b	Jedinica
	Oporaba/ Skladištenje RH	Oporaba/ Odlaganje <i>Ecoinvent</i>	Oporaba <i>Ecoinvent</i>	Odlaganje <i>Ecoinvent</i>	
Terrestrial ecotoxicity 100a	1,63E+06	8,43E+02	4,48E+02	8,43E+02	kg 1,4-DB eq
Terrestrial ecotoxicity 20a	1,15E+06	3,60E+02	3,17E+02	3,60E+02	kg 1,4-DB eq

Kategorija utjecaja na okoliš	Scenarij 2	Scenarij 1a	Scenarij 1c	Scenarij 1b	Jedinica
	Oporaba/ Skladištenje RH	Oporaba/ Odlaganje <i>Ecoinvent</i>	Oporaba <i>Ecoinvent</i>	Odlaganje <i>Ecoinvent</i>	
Terrestrial ecotoxicity 500a	3,38E+06	4,15E+03	9,29E+02	4,15E+03	kg 1,4-DB eq
Terrestrial ecotoxicity infinite	6,70E+06	3,89E+04	1,84E+03	3,89E+04	kg 1,4-DB eq



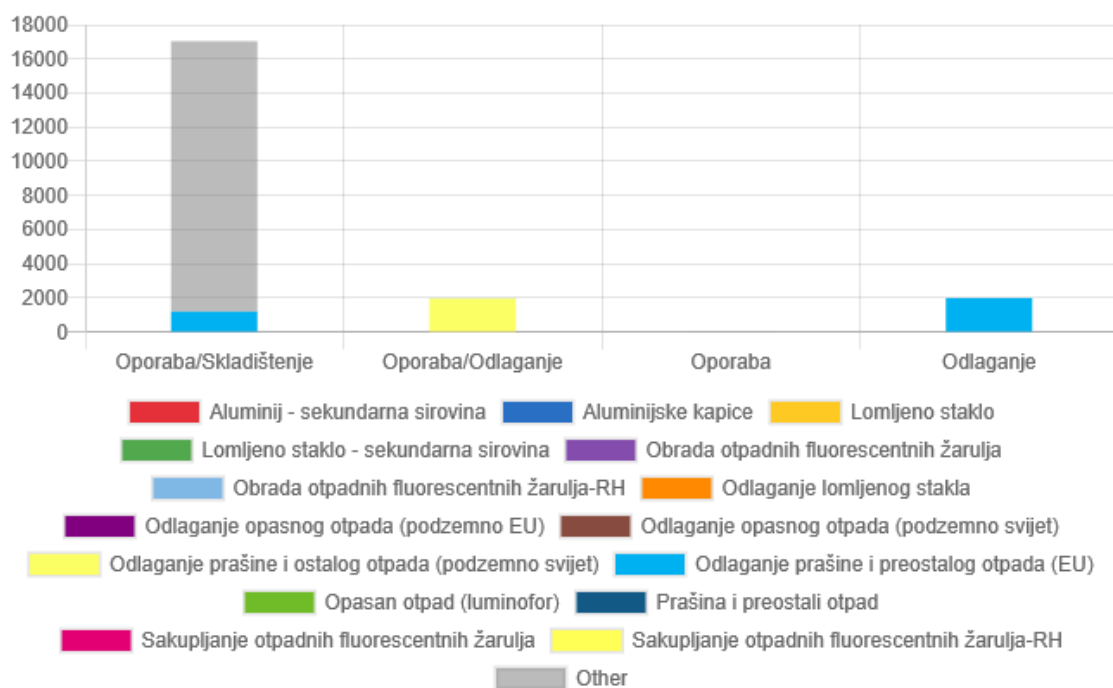
Slika 24 Moguć utjecaj na okoliš za različite mogućnosti u kategoriji utjecaja ekotoksičnost za tlo (beskonačno)

6.10 Toksičnost za ljude (eng. *human toxicity*)

Premda uvidom u Tablicu 14, je vidljiv mogući utjecaj na okoliš za sve četiri mogućnosti, kad ih se uspoređi uočava se kako je najveći utjecaj na okoliš ima mogućnost 2 što se može vidjeti na sljedećoj slici 25. Ako bi se isključili ostali utjecaji iz svih mogućnosti, najveći utjecaj imale bi mogućnosti 1a i 1b.

Tablica 14 Mogući utjecaji na okoliš prema kategorijama utjecaja na okoliš ekotoksičnost za ljude prema metodologiji CML 2001 (all impacts categories) za sve scenarije

Kategorija utjecaja na okoliš	Scenarij 2	Scenarij 1a	Scenarij 1c	Scenarij 1b	Jedinica
	Oporaba/ Skladištenje RH	Oporaba/ Odlaganje Ecoinvent	Oporaba Ecoinvent	Odlaganje Ecoinvent	
Human toxicity 100a	1,59E+09	2,12E+07	4,35E+05	2,12E+07	kg 1,4-DB eq
Human toxicity 20a	1,59E+09	1,91E+07	4,35E+05	1,91E+07	
Human toxicity 500a	1,60E+09	2,46E+07	4,35E+05	2,46E+07	
Human toxicity infinite	1,70E+09	1,99E+08	4,36E+05	1,99E+08	

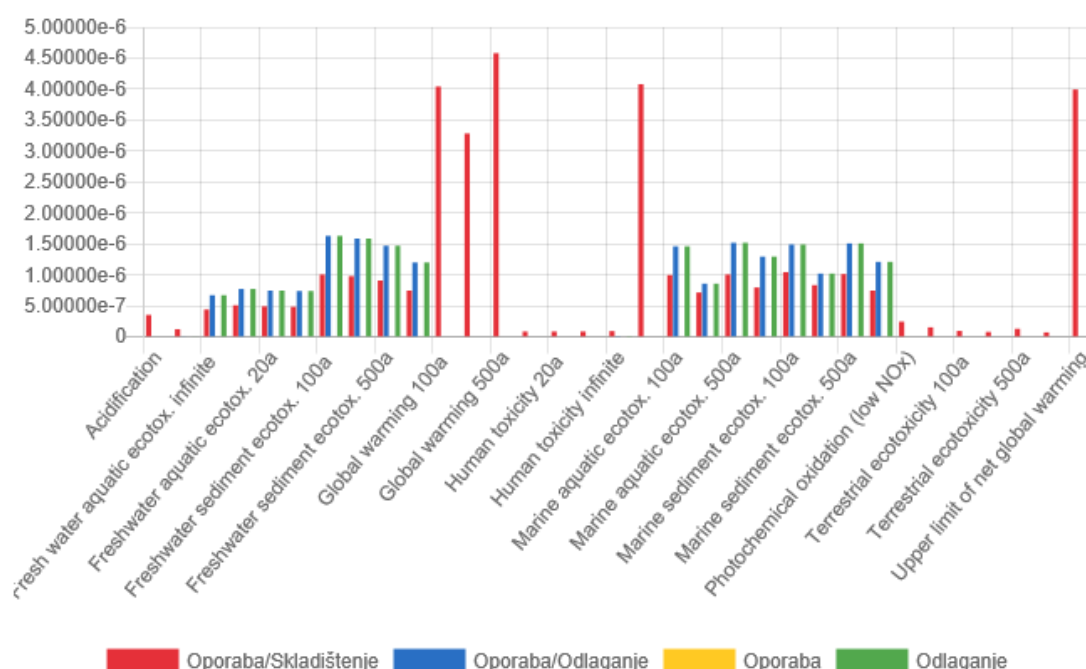


Slika 25 Mogući utjecaj na okoliš za različite mogućnosti u kategoriji utjecaja toksičnost za ljude (beskonačno)

6.11 Normalizacija

Provedenom LCA analizom utvrđen je potencijalni utjecaj na okoliš koji je imao sustav gospodarenja otpadnim fluorescentnim žaruljama u Hrvatskoj u 2018. godini. Rezultati prikazani na slici 26 pokazuju najveći potencijalni utjecaj uporabe/skladištenja (scenarij 2) za sljedeće utjecajne kategorije:

- potencijal globalnog zatopljenja za 100-godišnje razdoblje,
- potencijal globalnog zatopljenja za 500-godišnje razdoblje,
- toksičnost za ljude (beskonačno),
- potencijal globalnog zatopljenja do maksimalnog ograničenja emisija.



Slika 26 Prikaz rezultata dobivenih nakon normalizacije provedene u skladu s metodologijom CML 2001

U kategoriji potencijal globalnog zatopljenja za sva ispitivana razdoblja utjecaja rezultat je gotovo jednak te iznosi $1,02 \times 10^{11}$ kg CO₂ eq. Na slici 18 prikazan je najveći utjecaj ostalih procesa na potencijal globalnog zatopljenja, a ti procesi uključuju transport otpadnih fluorescentnih žarulja. U prilogu 1 ovog rada naveden je popis sabirnih centara EE otpada u Republici Hrvatskoj, dok su u prilogu 2 navedene udaljenosti sabirnih centara od glavnog sabirnog centra koji

se nalazi u Virovitici. Navedene udaljenosti u kilometrima su uključene u provedenu analizu, te pokazuju značajan utjecaj transporta na pojedine okolišne kategorije.

Najveći potencijal toksičnosti za ljude je u scenariju 2 zbog potencijalnog utjecaja odlaganja prašine i otpada te transporta koji iznosi $1,70\text{E}+09$ kg 1,4-DB eq za beskonačni vremenski period. Odlaganje se u ovom slučaju odnosi na vrijeme skladištenja otpadnih fluorescentnih žarulja.

Analizom scenarija 1a, 1b i 1c, može se utvrditi da najveći potencijalni utjecaj na kategorije okoliša imaju scenarij 1a (oporaba/odlaganje) te 1b (odlaganje). Prema tome se može zaključiti da samo odlaganje značajno pridonosi utjecaju na okoliš. Scenarij 1a i 1b imaju najveći potencijalni utjecaj na kategoriju ekotoksičnost za slatkovodne sedimente u svim vremenskim iteracijama u odnosu na kategorije: ekotoksičnost za morske sedimente, ekotoksičnost za morske vodene sustave te ekotoksičnost za slatkovodne vodene sustave, a iznosi $7,57\text{E}+08$ kg 1,4-DB eq za beskonačno vrijeme. Najveći utjecaj na te kategorije ima odlaganje prašine i ostalog otpada.

Jedini scenarij koji nije pokazao nikakav utjecaj na okolišne kategorije je 1c, tj. uporaba gdje nakon obrade otpadnih fluorescentnih žarulja nastaju isključivo sekundarne sirovine, te nema odlaganja.

7. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada bio je provesti LCA analizu kraja životnog vijeka otpadnih fluorescentnih žarulja kako bi se utvrdio potencijalni utjecaj na okoliš koji ima sustav gospodarenja otpadnim fluorescentnim žaruljama u Hrvatskoj temeljem podataka prikupljenih u Registru onečišćivanja u 2018. godini te usporediti potencijalne utjecaje na okoliš ukoliko bi se navedene količine otpada zbrinjavale sukladno definiranim procesima na razini prosjeka u EU.

LCA analiza pokazuje značajan potencijalni utjecaj uporabe i skladištenja na okoliš u Republici Hrvatskoj najviše zbog transporta otpadnih fluorescentnih žarulja iz 14 sabirnih centara za prikupljanje EE otpada prema državnom koncesionaru za recikliranje EE otpada koji se nalazi u Virovitici. Također, prisutnost prašine i dodatnog otpada tijekom navedenih procesa predstavlja rizik za okoliš, posebno za ljudsko zdravlje.

Uspoređujući sustave gospodarenja otpadnim fluorescentnim žaruljama u EU, može se zaključiti da sama uporaba ima najmanji potencijalni utjecaj na bilo koju od promatranih okolišnih kategorija. Poradi toga, može se zaključiti da se odlaganje otpadnih fluorescentnih žarulja treba maksimalno izbjegavati obzirom i na značajan potencijalni utjecaj na slatkovodne i morske sustave.

Otpadne fluorescentne žarulje, a posebno živa sadržana u njima, predstavljaju rizik za okoliš u najvećoj mjeri ako su odbačene i nisu ni na koji način oporabljene. Stoga je izvore emisija žive potrebno smanjiti na najmanju moguću mjeru kako bi se spriječilo i kontroliralo onečišćenje okoliša.

8. POPIS LITERATURE

- [1] Eurostat (2019) *Waste electrical and electronic equipment (WEEE) by waste management operations*. Dostupno na: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/main/home>. Datum pristupa: 28.11.2019.
- [2] *Pravilnik o gospodarenju otpadnom električnom i elektroničkom opremom*. Narodne novine. 2014. Broj 42. [02.04.2014.]
- [3] Ministarstvo zaštite okoliša i energetike (2019) *Izvešće o gospodarenju otpadnom električnom i elektroničkom opremom u 2017. godini*. Zagreb. Dostupno na: http://www.haop.hr/sites/default/files/uploads/dokumenti/021_otpad/Izvjesc/ostalo/OTP_Izvešće%20o%20EE%20otpadu_2017_final_WEB.PDF. Datum pristupa: 30.01.2020.
- [4] Europska okolišna agencija (2019) *Waste from electrical and electronic equipment*. Dostupno na: https://ec.europa.eu/environment/waste/weee/index_en.htm. Datum pristupa: 01.10.2019.
- [5] *Uredba komisije (EU) od 1.10.2019. o utvrđivanju zahtjeva za ekološki dizajn za izvore svjetlosti i zasebne predspojne naprave u skladu s Direktivom 2009/125/EZ Europskog parlamenta i Vijeća*. Službeni list Europske unije. 2019. [01.10.2019.]
- [6] Khan, N., Abas, N. (2011) *Comparative study of energy saving light sources*. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 1, pp. 296–309
- [7] Državni koncesionar za recikliranje EE otpada. *EE otpad - Opasne komponente električnog i elektroničkog otpada*. Dostupno na: <http://www.ee-otpad.com/opasne-komponente.php>. Datum pristupa: 18.08.2019.
- [8] Ceaser, M. (2019) *On Recycling of Fluorescent Bulbs*. Dostupno na: <https://www.ecomena.org/on-recycling-of-fluorescent-bulbs/>. Datum pristupa: 10.11.2019.

- [9] United Nations Environment Programme (2012) *Achieving the global transition to energy efficient lighting toolkit*. Dostupno na: https://www.thegef.org/sites/default/files/publications/Complete_Enlighten_Toolkit_1_1.pdf. Datum pristupa: 09.11.2019.
- [10] Li, T. H., Xiang, D. Q. (2013) *Study on recycling and disposal of waste fluorescent lamps*. *Appl. Mech. Mater.*, vol. 261–262, pp. 690–694
- [11] Alapić, Š. (2015) *Recikliranje fluorescentnih lampi*. Diplomski rad. Zagreb. Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet
- [12] *Prilozi uredbi komisije (EU) o utvrđivanju zahtjeva za ekološki dizajn za izvore svjetlosti i zasebne predspojne naprave u skladu s Direktivom 2009/125/EZ Europskog parlamenta i Vijeća te o stavljanju izvan snage uredbi Komisije (EZ) br. 244/2009, (EZ) br. 245/2009 i (EU) br. 1194/2012*. Službeni list Europske unije. 2019. [01.10.2019.]
- [13] European Commission. *FAQ: phasing out conventional incandescent bulbs*. Dostupno na: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/MEMO_09_368. Datum pristupa: 10.11.2019.
- [14] Solvay (2014) *Layman's Report EC Life + Programme*. Dostupno na: <https://www.solvay.com/sites/g/files/srpend221/files/2018-07/solvay-loop-project-it-en.pdf>. Datum pristupa: 10.11.2019.
- [15] Government of the Northwest Territories (Canada) (2012) *Guide to Recycling Mercury-Containing Lamps*. Dostupno na: https://www.enr.gov.nt.ca/sites/enr/files/brochures/mcl_recycling_per_web_2012_guide.pdf. Datum pristupa: 10.09.2019.
- [16] Welz, T., Hischer, R., Hilty, L. M. (2011) *Environmental impacts of lighting technologies - Life cycle assessment and sensitivity analysis*. *Environ. Impact Assess. Rev.*, vol. 31, no. 3, pp. 334–343
- [17] Anić Vučinić, A., Črnica, N., Filipan, V., Kosor, K., Tepeš, P. (2010) *Recikliranje rasvjetne opreme*. Znanstveni rad. XI Međunarodni simpozij Gospodarenje otpadom Zagreb, Zagreb, Hrvatska
- [18] Mason, R. P., Sheu, G.-R. (2002) *Role of the ocean in the global mercury*

cycle. *Global Biogeochem. Cycles*, vol. 16, no. 4, pp. 40-1-40-14

- [19] Li, Z., Jia, P., Zhao, F., Kang, Y. (2018) *Mercury Pollution, Treatment and Solutions in Spent Fluorescent Lamps in Mainland China*. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 15, no. 12, p. 2766
- [20] Cho, J. H., Eom, Y., Park, J.-M., Lee, S.-B., Hong, J.-H., Lee, T. G. (2013) *Mercury leaching characteristics of waste treatment residues generated from various sources in Korea*. *Waste Manag.*, vol. 33, no. 7, pp. 1675–1681
- [21] Fond za zaštitu okoliša i energetske učinkovitost (2019) *Električni i elektronički otpad*. Dostupno na: <http://www.fzoeu.hr/hr/gospodarenje-otpadom/posebne-kategorije-otpada/elektricni-i-elektronicki-otpad/>. Datum pristupa: 28.11.2019.
- [22] European union (2019) *Environment and Climate Change* Dostupno na: https://eur-lex.europa.eu/summary/chapter/environment.html?root_default=SUM_1_CODED=20. Datum pristupa: 27.01.2020.
- [19] Durão, W. A., de Castro, C. A., Windmüller, C. C. (2008) *Mercury reduction studies to facilitate the thermal decontamination of phosphor powder residues from spent fluorescent lamps*. *Waste Manag.*, vol. 28, no. 11, pp. 2311–2319
- [23] Europska unija. *Zakon EU-a o gospodarenju otpadom*. Dostupno na: [lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/HTML/?uri=LEGISSUM:ev0010&from=EN](http://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/HTML/?uri=LEGISSUM:ev0010&from=EN). Datum pristupa: 28.11.2019.
- [24] Europska unija (2019) *Iskorištavanje otpadne električne i elektroničke opreme na najbolji mogući način*. Dostupno na: [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/HTML/?uri=LEGISSUM:200403_1&from=EN](http://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/HTML/?uri=LEGISSUM:200403_1&from=EN). Datum pristupa: 28.11.2019.

- [25] *Uredba (EZ) br. 1013/2006 Europskog parlamenta i Vijeća od 14. lipnja 2006. o pošiljkama otpada.* Službeni list Europske unije. 2006. [14.06.2006.]
- [26] *Zakon o održivom gospodarenju otpadom.* Narodne novine, 2013. Broj 94. [22.07.2013.]
- [27] *Pravilnik o gospodarenju otpadom.* Narodne novine, 2017. Broj 117. [29.11.2017.]
- [28] *Pravilnik o načinima i uvjetima odlaganja otpada, kategorijama i uvjetima rada za odlagališta otpada.* Narodne novine, 2015. Broj 114. [29.10.2015.]
- [29] Hrvatska agencija za okoliš i prirodu (2015) *Izvod iz Pravilnika o katalogu otpada (NN 90/15).* Dostupno na: http://www.haop.hr/sites/default/files/uploads/dokumenti/021_otpad/Upute/OTP_D_Katalog_otpada_2015.pdf. Datum pristupa: 28.11.2019.
- [30] Wijesekara, R.G.S., Navarro, R.R., Matsumura, M. (2011) *Removal and recovery of mercury from used fluorescent lamp glass by pyrolysis.* Journal of the National Science Foundation of Sri Lanka, 39(3), pp.235–241
- [31] Asari, M., Fukui, K., Sakai, S. (2008) *Life-cycle flow of mercury and recycling scenario of fluorescent lamps in Japan.* Sci. Total Environ., vol. 393, no. 1, pp. 1–10
- [32] Marquardt, R. (2002) *Compact Fluorescent Lamp Recycling Project Phase I Draft Report.* Dostupno na: <https://www.yumpu.com/en/document/view/33598137/compact-fluorescent-lamp-recycling-project-phase-i-draft-report>. Datum pristupa: 01.12.2019.
- [33] Jang, M., Hong, S. M., Park, J. K. (2005) *Characterization and recovery of mercury from spent fluorescent lamps.* Waste Manag., vol. 25, no. 1, pp. 5–14
- [34] Bolger P. T., Szlag, D. C. (2002) *An Electrochemical System for Removing and Recovering Elemental Mercury from a Gas Stream.* Environ. Sci. Technol. 2002, vol. 36, no. 20, pp. 4430-4435

- [35] JFS (2004) *Fluorescent Light Bulb Recycling Gains Momentum*. Dostupno na: https://www.japanfs.org/en/news/archives/news_id025502.html. Datum pristupa: 28.01.2020.
- [36] MRT System (2019) *Mercury Recovery Technology*. Dostupno na: <https://mrtsystem.com/>. Datum pristupa: 28.01.2020.
- [37] Morais, A. S. C., da Costa Caldas, T. C., Monteiro, S. N., Vieira, C. M. F. (2012) *Characterization of Fluorescent Lamp Glass Waste Powders*. Mater. Sci. Forum, vol. 727–728, pp. 1579–1584
- [38] Kara, P., Korjakins, A., Kovalenko, K. (2012) *The usage of fluorescent waste glass powder in concrete*. Constr. Sci., vol. 13
- [39] Novais, R. M., Ascensão, G., Seabra, M. P., Labrincha, J. A. (2016) *Waste glass from end-of-life fluorescent lamps as raw material in geopolymers*. Waste Manag., vol. 52, pp. 245–255
- [40] Elijošiutė, E., Balciukevičiūtė, J., Denafas, G. (2012) *Life Cycle Assessment of Compact Fluorescent and Incandescent Lamps: Comparative Analysis*. Environ. Res. Eng. Manag., vol. 61, no. 3, pp. 65–72
- [41] Tan, Q., Song, Q., Li, J. (2015) *The environmental performance of fluorescent lamps in China, assessed with the LCA method*. Int. J. Life Cycle Assess., vol. 20, no. 6, pp. 807–818
- [42] Sangwan, K. S., Bhakar, V., Naik, S., Andrat, S. N. (2014) *Life Cycle Assessment of Incandescent, Fluorescent, Compact Fluorescent and Light Emitting Diode Lamps in an Indian Scenario*. Procedia CIRP, vol. 15, pp. 467–472
- [43] Principi, P., Fioretti, R. (2014) *A comparative life cycle assessment of luminaires for general lighting for the office – compact fluorescent (CFL) vs Light Emitting Diode (LED) – a case study*. J. Clean. Prod., vol. 83, pp. 96–107
- [44] ISO (2006) *ISO 14044:2006 - Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines*. Dostupno na: <https://www.iso.org/standard/38498.html>. Datum pristupa: 28.11.2019.

- [45] Hrvatska agencija za zaštitu okoliša i prirode (2017) *Registar onečišćavanja okoliša*. Dostupno na: <http://roo.azo.hr>. Datum pristupa: 16.01.2019.
- [46] de Bruijn, H., van Duin, R., Huijbregts, M. A. J. (2002) *Handbook on Life Cycle Assessment*. Dordrecht: Springer Netherlands, vol. 7.
- [47] Hrvatska agencija za zaštitu okoliša i prirode (2007) *Registar dozvola i potvrda za gospodarenje otpadom*. Dostupno na: <http://regdoz.azo.hr>. Datum pristupa: 02.01.2020.
- [48] EE otpad. *Sabirni centri za sakupljanje otpada*. Dostupno na: <https://www.ee-otpad.com/sabirni-centri.php>. Datum pristupa: 15.01.2020.

9. POPIS SLIKA

Slika 1 Smanjenje količine žive u fluorescentnim žaruljama u razdoblju od 1980. do 2008. godine [9]	3
Slika 2 Shematski prikaz fluorescentne žarulje [11]	4
Slika 3 Grafički prikaz sastava fluorescentnih žarulja [14].....	5
Slika 4 Kruženje žive u okolišu pretpostavljeno za 2002. godinu. Svi tokovi izraženi su u Mmol god ⁻¹ [18].....	8
Slika 5 Shematski prikaz procesa recikliranja fluorescentnih svjetiljki [17].....	18
Slika 6 Sakupljen otpad (20 01 21*) u reciklažnim dvorištima, 2018. godina ...	30
Slika 7 Sakupljen otpad (osim komunalnog) – 20 01 21*, 2018. godina.	30
Slika 8 Sustav obrade otpadnih fluorescentnih lampi u EU (Ecoinvent baza podataka) – odlaganje i uporaba.....	31
Slika 9 Sustav obrade otpadnih fluorescentnih lampi u EU (Ecoinvent baza podataka) – odlaganje.....	31
Slika 10 Sustav obrade otpadnih fluorescentnih lampi u EU (Ecoinvent baza podataka) – uporaba	32
Slika 11 Sustav obrade otpadnih fluorescentnih lampi u RH (ROO) – sakupljeno te skladišteno (R13 ili D15) i oporabljeno (R5)	32
Slika 12 Sustav obrade otpadnih fluorescentnih lampi u EU (Ecoinvent baza podataka) – odlaganje i uporaba – tok količina	34

Slika 13 Sustav obrade otpadnih fluorescentnih lampi u EU (Ecoinvent baza podataka) – odlaganje – tok količina	34
Slika 14 Sustav obrade otpadnih fluorescentnih lampi u EU (Ecoinvent baza podataka) – uporaba – tok količina	35
Slika 15 Sustav obrade otpadnih fluorescentnih lampi u RH (ROO) – sakupljeno te skladišteno (R13 ili D15) i oporabljeno (R5) – tok količina	35
Slika 16 Mogući utjecaj na okoliš za različite mogućnosti u kategoriji utjecaja acidifikacija.....	37
Slika 17 Mogući utjecaj na okoliš za različite mogućnosti u kategoriji utjecaja eutrofikacija.....	38
Slika 18 Mogući utjecaj na okoliš za različite mogućnosti u kategoriji utjecaja potencijal globalnog zatopljenja za 500-godišnje razdoblje.....	39
Slika 19 Mogući utjecaj na okoliš za različite mogućnosti u kategoriji utjecaja potencijal nastanka fotokemijskog ozona.....	40
Slika 20 Mogući utjecaj na okoliš za različite mogućnosti u kategoriji utjecaja ekotoksičnost za slatkovodne vodene sustave (beskonačno).....	42
Slika 21 Mogući utjecaj na okoliš za različite mogućnosti u kategoriji utjecaja ekotoksičnost za slatkovodne sedimente (beskonačno)	43
Slika 22 Mogući utjecaj na okoliš za različite mogućnosti u kategoriji utjecaja ekotoksičnost za morske vodene sustave (beskonačno)	44
Slika 23 Mogući utjecaj na okoliš za različite mogućnosti u kategoriji utjecaja ekotoksičnost za morske sedimente (beskonačno).....	46

Slika 24 Moguć utjecaj na okoliš za različite mogućnosti u kategoriji utjecaja ekotoksičnost za tlo (beskonačno)	47
Slika 25 Mogući utjecaj na okoliš za različite mogućnosti u kategoriji utjecaja toksičnost za ljude (beskonačno)	48
Slika 26 Prikaz rezultata dobivenih nakon normalizacije provedene u skladu s metodologijom CML 2001	49

10. POPIS TABLICA

Tablica 1 Stope uporabe i recikliranja za 2017. godinu po kategorijama EE uređaja i opreme i usporedba sa zadanim ciljevima [3].....	12
Tablica 2 Količine žive u energetske učinkovitim žaruljama i žaruljama sa smanjenom količinom žive [15]	17
Tablica 3 Popis studija koje su provele LCA analizu žarulja	23
Tablica 4 Kategorije utjecaja na okoliš prema metodologiji CML 2001 (all impacts categories) za provođenje LCIA	27
Tablica 5 Mogući utjecaji na okoliš prema kategorijama utjecaja na okoliš acidifikacijski potencijal prema metodologiji CML 2001 (all impacts categories) za sve scenarije	36
Tablica 6 Mogući utjecaji na okoliš prema kategorijama utjecaja na okoliš eutrofikacijski potencijal prema metodologiji CML 2001 (all impacts categories) za sve scenarije	37
Tablica 7 Mogući utjecaji na okoliš prema kategorijama utjecaja na okoliš potencijal globalnog zatopljenja prema metodologiji CML 2001 (all impacts categories) za sve scenarije	38
Tablica 8 Mogući utjecaji na okoliš prema kategorijama utjecaja na okoliš potencijal nastanka fotokemijskog ozona prema metodologiji CML 2001 (all impacts categories) za sve scenarije	40
Tablica 9 Mogući utjecaji na okoliš prema kategorijama utjecaja na okoliš ekotoksičnost za slatkovodne vodene sustave prema metodologiji CML 2001 (all impacts categories) za sve scenarije	41

Tablica 10 Mogući utjecaji na okoliš prema kategorijama utjecaja na okoliš ekotoksičnost za slatkovodne sedimente prema metodologiji CML 2001 (all impacts categories) za sve scenarije	42
Tablica 11 Mogući utjecaji na okoliš prema kategorijama utjecaja na okoliš ekotoksičnost za morske vodene sustave prema metodologiji CML 2001 (all impacts categories) za sve scenarije	44
Tablica 12 Mogući utjecaji na okoliš prema kategorijama utjecaja na okoliš ekotoksičnost za morske sedimente prema metodologiji CML 2001 (all impacts categories) za sve scenarije	45
Tablica 13 Mogući utjecaji na okoliš prema kategorijama utjecaja na okoliš ekotoksičnost za tlo prema metodologiji CML 2001 (all impacts categories) za sve scenarije	46
Tablica 14 Mogući utjecaji na okoliš prema kategorijama utjecaja na okoliš ekotoksičnost za ljude prema metodologiji CML 2001 (all impacts categories) za sve scenarije	48

11. POPIS KRATICA

EE otpad	električni i elektronički otpad
EE oprema	električna i elektronička oprema
LED	Light Emmiting Diode
EU	Europska unija
FL	Fluorescence lightinig
UV	ultraviolet, ultraljubičasto zračenje
CFL	Compound fluorescence lamp
LFL	Linear fluorescence lamp
OEEO	otpadna električna i električka oprema
EFTA	European Free Trade Association
OECD	The Organisation for Economic Co-operation and Development
PKO	posebne kategorije otpada
IT	informatičke tehnologije
RoHS	Restriction of hazardous supstances
WEEE	Waste electric and aletronic equipment
TCLP	Toxicity charasteristic leaching potential
LDR	land disposal restriction
LCA	Life cycle assessment
ROO	Registar onečišćavanja okolišem

12. POPIS PRILOGA

Prilog 1 Objedinjeni podaci o sakupljenom otpadu ključnog broja 20 01 21* postupkom sakupljanja (osim komunalnog otpada) i sakupljanja u reciklažnim dvorištima [45]..... 65

Prilog 2 Popis sabirnih centara za prikupljane EE otpada Spectra-Meda d.o.o. [48]..... 68

13. PRILOZI

Prilog 1 Objedinjeni podaci o sakupljenom otpadu ključnog broja 20 01 21 postupkom sakupljanja (osim komunalnog otpada) i sakupljanja u reciklažnim dvorištima [45]*

Operater	Naziv organizacijske jedinice na lokaciji	Ulica i kućni broj organizacijske jedinice	Grad/naselje organizacijske jedinice	Oznaka sabirnog centra	Ukupno preuzeto u izvještajnoj godini (t)
Kombel d.o.o. za	odjel gospodarenja otpadom	Radnička 1 B	Belišće	OS	0,19
Komunalac d.o.o.	Reciklažno dvorište	T.G. Massaryka 4b	Bjelovar	VT	0,157
GKP Čakom d.o.o.	Sektor odvoza otpada-Čistoća	Mihovljanska 10	Čakovec	VZ	0,841
Čistoća d.o.o. Dubrovnik	Čistoća d.o.o.	Put od Republike 14	Dubrovnik	MT	0,008
Obrt za "EE-otpad", Mladen Frković	Obrt za EE-otpad	Poslovni park Karlovac 2D	Duga Resa	KA	0,868
Kemokop d.o.o.	Kemokop	Industrijska ulica 10	Dugo Selo	ZG	0,013
Str "Akumulator"	Str Akumulator	Đure Basaričeka 43	Đurđevac	VT	0,164
Komunalne usluge Đurđevac d.o.o.	Reciklažno dvorište	Petra Zrinskog 69	Đurđevac	VT	0,01
Ekoplanet d.o.o.	Ekoplanet d.o.o.	Poduzetnička zona 33	Galižana	RI	0,03
ZAGREBPETROL d.o.o.	Podružnica 1 Grubišno Polje	I. N. Jemeršića 37	Grubišno Polje	VT	1,02
KEMIS-Termoclean d.o.o.	Jastrebarsko	V. Holjevca 20	Jastrebarsko	SS	3,775
Komunalac d.o.o.	R.J. Usluga - OJ Odvoz	Jušići bb	Jurdani	RI	0,003
ČISTOĆA d.o.o.	Odlagalište Ilovac	Zagrebačka 17 D	Karlovac	KA	0,029
Cian d.o.o.	Skladište opasnog otpada Kaštel Sućurac	Dr. Franje Tuđmana 197	Kaštel Sućurac	ST	1,118
Ivakop d.o.o.	Reciklažno dvorište Kloštar Ivanić	Čemernička 34	Kloštar Ivanić	VT	0,01
IND-EKO d.o.o.	pogon Urinj	Urinj 46	Kostrena	RI	0,057
Audio TV video servis Jurinjak	Audio-Tv-Video servis "jurinjak"	Trg Stjepana Radića 6	Krapina	KR	3,38
KRAKOM d.o.o.	Reciklažno dvorište	Bobovje 52F	Krapina	KR	0,04
Friš d.o.o.	Pogon Cubinec	Donji Cubinec 28b	Križevci	VT	0,285

Operater	Naziv organizacijske jedinice na lokaciji	Ulica i kućni broj organizacijske jedinice	Grad/naselje organizacijske jedinice	Oznaka sabirnog centra	Ukupno preuzeto u izvještajnoj godini (t)
Komunalno poduzeće d.o.o., Križevci	Reciklažno dvorište	CUBINEC bb	Križevci	VT	0,35
METIS d.d.	Kukuljanovo	Kukuljanovo 414	Kukuljanovo	RI	2,311
1. MAJ d.o.o.	sakupljanje i odvoz smeća	Vinež 81	Labin	RI	0,042
LIPKOM d.o.o.	lipkom d.o.o.	I. Mažuranića 81	Lipik	VT	0,01
MED EKO SERVIS d.o.o.	Komunalno poduzeće	Banjole, Kamik bb	Medulin	RI	0,025
Murs-ekom d.o.o.	Reciklažno dvorište	Martinska 151a	Mursko Središće	VZ	0,079
KEMIS-Termoclean d.o.o.	Novi Vinodolski	Dubrova 5	Novi Vinodolski	RI	0,614
C.I.A.K. d.o.o.	Skladište Osijek	Divaltova ulica 320	Osijek	OS	0,05
Kairos d.o.o.	Kairos d.o.o.-Osijek	Industrijska zona jug 9	Osijek	OS	0,004
Metal-zec d.o.o.	Skladište Vukovarska	Vukovarska 434	Osijek	OS	8,296
MS MOBILE d.o.o.	dispečerski centar	Vukovarska ulica 39 A	Osijek	OS	0,595
Unikom d.o.o.	Mehanička radiona, Lončarica	Ružina 11 a	Osijek	OS	0,093
METIS d.d.	Metis d.d.Rijeka PJ Otočac	Špilnički odvojak 11	Otočac	KA	0,012
Komunalac Petrinja d.o.o.	OJ Komunalac	Ivana Gundulića 14	Petrinja	VT	0,07
Usluga Poreč d.o.o.	OJ Čistoća	Garbina 10	Poreč	RI	0
METIS d.d.	Metis d.d. PC Pula	Valica 8	Pula	RI	3,006
KD Čistoća d.o.o.	Reciklažno dvorište Mihačeva draga	Mihačeva draga 37	Rijeka	RI	0,07
M SAN EKO d.o.o.	M san eko d.o.o.	Dugoselska cesta 5	Rugvica	ZG	4,017
Komunalac d.o.o.	Služba čistoće	Ulica 151. samoborske brigade HV 2	Samobor	SS	0,534
Zagrebački Holding d.o.o.	Reciklažno dvorište Sesvete	Jelkovečka bb	Sesvete	ZG	0,636
GAJETA, d.o.o.	obrađa	Strojarska bb	Sesvete-Kraljevec	ZG	0,027
Gospodarenje otpadom Sisak d.o.o	gospodarenje otpadom	Trg Josipa Mađerića 1	Sisak	VT	0,005
SLATINA KOM d.o.o.	Deponija Radosavci	Radosavci Batalije bb	Slatina	VT	0,084
MS MOBILE d.o.o.	dispečerski centar	Sjeverna vezna cesta 37	Slavonski Brod	SB	2,898
KOMUNALAC d.o.o.	Reciklažno dvorište	Gospodarska 4	Slavonski Brod	SB	0,025
KOMUNALAC d.o.o.	Reciklažno dvorište 1	Sjeverna vezna cesta 52 z	Slavonski Brod	SB	0,054

Operater	Naziv organizacijske jedinice na lokaciji	Ulica i kućni broj organizacijske jedinice	Grad/naselje organizacijske jedinice	Oznaka sabirnog centra	Ukupno preuzeto u izvještajnoj godini (t)
PREMIFAB d.o.o.	Premifab d.o.o./Premifab d.o.o. ESTILAB	Poduzetnička ulica 8	Sveta Nedelja	ZG	0,182
Krmek d.o.o.	Krmek d.o.o.	Ind zona Podi Dolačka 29	Šibenik	ZD	0
Excido d.o.o.	Excido d.o.o.	Josipa Kozarca 25	Tenja	OS	0,16
Čistoća d.o.o.	Reciklažno dvorište Gornji Knežinec	Mavra Schlengera BB	Turčin	VZ	0,071
6. maj d.o.o.	Servisna zona	Finida bb	Umag	RI	0,055
Urbanizam d.o.o.	Urbanizam d.o.o.	A. M. Reljkovića 16	Valpovo	IL	0
Čistoća d.o.o.	Reciklažno dvorište Varaždin	Mihovila Pavleka Miškine 67c	Varaždin	VZ	0,186
VG Čistoća d.o.o.	Čistoća	Kneza Ljudevita Posavskog 45	Velika Gorica	SS	0,819
NEVKOŠ d.o.o.	Mobilno reciklažno dvorište	Mobilna lokacija bb	Vinkovci	IL	0,061
NEVKOŠ d.o.o.	Reciklažno dvorište	Kumanova BB	Vinkovci	IL	0,066
FLORA Vtc d.o.o.	Sakupljanje korisnog otpada	Vukovarska cesta 5	Virovitica	VT	104,483
FRIGOMATIC ECO d.o.o.	FRIGOMATIC ECO d.o.o. Marinići	Marinići bb	Viškovo	RI	7,674
Komunalno društvo Viškovo d.o.o.	Reciklažno dvorište Viškovo	Marinići bb	Viškovo	RI	0,003
C.I.A.K. d.o.o.	C.I.A.K. skladište Zabok	Gubaševo 47C	Zabok	KR	1,561
Centar za otpad d.o.o.	Centar za otpad d.o.o. Zadar	Gaženička cesta 22	Zadar	ZD	0,361
Odlagalište sirovina d.o.o.	Odlagalište sirovina d.o.o.	Ive dulčića 6	Zadar	ZD	0,503
Čistoća d.o.o.	Odlagalište otpada "Diklo"	Diklo bb	Zadar	ZD	0,002
Zagrebački Holding d.o.o.	Reciklažno dvorište Dubrava	Osječka 25	Zagreb	ZG	0,647
Zagrebački Holding d.o.o.	Reciklažno dvorište Jakuševac	Sajmišna cesta bb	Zagreb	ZG	0,076
Zagrebački Holding d.o.o.	Reciklažno dvorište Kajzerica	Ulica Žarka Dolinara 5	Zagreb	ZG	0,226
Zagrebački Holding d.o.o.	Reciklažno dvorište Prilesje	Prilesje 1c	Zagreb	ZG	0,148
Zagrebački Holding d.o.o.	Reciklažno dvorište Stenjevec	Gospodska 20	Zagreb	ZG	0,565
Zagrebački Holding d.o.o.	Reciklažno dvorište Špansko	Dobriše Cesarića 2a	Zagreb	ZG	0,647
Zagrebački Holding d.o.o.	Reciklažno dvorište Tunel	Kvintićka bb	Zagreb	ZG	0,197
Zagrebački Holding d.o.o.	Podružnica Čistoća-skladište otpada na odlagalištu	Sajmišna cesta bb	Zagreb-Nov Zagreb	ZG	0,58

Operater	Naziv organizacijske jedinice na lokaciji	Ulica i kućni broj organizacijske jedinice	Grad/naselje organizacijske jedinice	Oznaka sabirnog centra	Ukupno preuzeto u izvještajnoj godini (t)
Zagrebački Holding d.o.o.	Reciklažno dvorište Klara	Sisačka cesta 10	Zagreb-Nov Zagreb	ZG	0,305
Zagrebački Holding d.o.o.	Reciklažno dvorište Trešnjevka sjever	Zagorska 3	Zagreb-Trešnjevka	ZG	0,442
FRIGOMATIC ECO d.o.o.	FRIGOMATIC ECO Žminj	Industrijska ulica bb	Žminj	ZM	3,719
Komunalije Hrgovčić d.o.o.	pogon	J.J. STROSSMAYERA 175A	Županja	SB	0,468
Ukupno					160,112

Prilog 2 Popis sabirnih centara za prikupljane EE otpada Spectra-Meda d.o.o. [48]

Sabirni centri		Oznaka sabirnog centra	Udaljenost do Virovitice (km)	Masa (t)
Virovitica	FLORA-VTC d.o.o.	VT	0	106,648
Strmec Samoborski	SPECTRA MEDIA d.o.o.	SS	173	5,128
Zagreb	INTERIJERI MUJKIĆ	ZG	153	8,708
Ilok	METAL ZEC d.o.o.	IL	194	0,127
Karlovac	MLADEN FRKOVIĆ - obrt	KA	202	0,909
Krapina	AUDIO-TV SERVIS JURINJAK	KR	211	4,981
Metković	TEHNOMOBIL - METKOVIĆ	MT	673	0,008
Osijek	METAL ZEC d.o.o.	OS	125	9,388
Rijeka	FRIGOMATIC ECO	RI	319	13,89
Slavonski Brod	MS-MOBILE	SB	127	3,445
Split	TEHNOMOBIL SPLIT	ST	559	1,118
Varaždin	DUMA ELEKTRONIKA	VZ	111	1,177
Zadar	SPECTRA-MEDIA	ZA	435	0,866
Žminj	FRIGOMATIC ECO	ZM	379	3,719

