

Analiza životnog ciklusa električnog automobila

Radić, Gabrijel

Undergraduate thesis / Završni rad

2025

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:482385>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-25**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Gabrijel Radić

Zagreb, 2025.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Izv. prof. dr. sc. Tihomir Opetuk, dipl. ing.
Dr. sc. tech. Maja Trstenjak

Student:

Gabrijel Radić

Zagreb, 2025.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentorima na pomoći prilikom izrade završnog rada. Posebnu zahvalu upućujem svojim roditeljima za podršku i financijsku potporu tijekom studija.

Gabrijel Radić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 25 – 06 / 1	
Ur.broj: 15 – 25 –	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Gabrijel Radić** JMBAG: **0035236461**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza životnog ciklusa električnog automobila**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Lifecycle Analysis of an Electric Car**

Opis zadatka:

LCA (eng. Life Cycle Assessment - LCA) analiza je sustavni pristup procjeni ekološkog utjecaja proizvoda, procesa ili usluge tijekom cijelog njegovog životnog ciklusa. Ova analiza obuhvaća sve faze, od ekstrakcije sirovina, preko proizvodnje, distribucije i upotrebe, do zbrinjavanja ili reciklaže na kraju životnog vijeka. Cilj LCA analize je identificirati i kvantificirati potrošnju resursa i emisije u okoliš kako bi se omogućilo donošenje informiranih odluka koje smanjuju negativne ekološke učinke i poboljšavaju održivost proizvoda ili usluga.

U završnom radu potrebno je:

- Navesti definiciju i značaj LCA analize te objasniti osnovne korake ove analize prema normama.
- Dati pregled ključnih faza životnog ciklusa proizvoda (sirovina, proizvodnja, korištenje i zbrinjavanje).
- Dati kratki pregled električnih automobila i njihove uloge u smanjenju emisija stakleničkih plinova.
- Provesti i objasniti LCA analizu električnog automobila te komentirati rezultate.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. 11. 2024.

Datum predaje rada:

1. rok: 20. i 21. 2. 2025.
2. rok: 10. i 11. 7. 2025.
3. rok: 18. i 19. 9. 2025.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 24. 2. – 28. 2. 2025.
2. rok: 15. 7. – 18. 7. 2025.
3. rok: 22. 9. – 26. 9. 2025.

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Tihomir Opetuk
Dr. sc. Maja Trstenjak

Predsjednik Povjerenstva:
Prof. dr. sc. Damir Godec

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY	VI
1. ANALIZA ŽIVOTNOG CIKLUSA (eng. <i>LIFE CYCLE ASSESSMENT, LCA</i>).....	1
1.1. Definiranje cilja i opsega (eng. <i>Goal and Scope Definition</i>)	2
1.2. Prikupljanje i analiza podataka (eng. <i>Life Cycle Inventory, LCI</i>).....	3
1.3. Određivanje utjecaja na okoliš (eng. <i>Life Cycle Impact Assessment, LCIA</i>)	6
1.4. Interpretacija (eng. <i>Interpretation</i>)	8
2. PREGLED KLJUČNIH FAZA ŽIVOTNOG CIKLUSA	9
2.1. Sirovine	10
2.2. Proizvodnja	12
2.3. Korištenje (eksploatacija)	14
2.4. Zbrinjavanje	15
3. ELEKTRIČNI AUTOMOBILI	17
3.1. Vrste električnih automobila	18
3.1.1. Blagi hibridi (eng. <i>Mild Hybrid Electric Vehicles, MHEV</i>)	19
3.1.2. Puni hibridi (eng. <i>Full Hybrid Electric Vehicles, HEV</i>).....	19
3.1.3. Priključni hibridi (eng. <i>Plug-in Hybrid Electric Vehicles, PHEV</i>).....	20
3.1.4. Baterijska električna vozila (eng. <i>Battery Electric Vehicles, BEV</i>)	20
3.1.5. Električna vozila na gorive članke (eng. <i>Fuel Cell Electric Vehicles, FCEV</i>) ...	20
3.2. Baterija električnog vozila	21
3.3. Utjecaj električnih automobila na smanjenje stakleničkih plinova.....	22
4. LCA ANALIZA ELEKTRIČNOG AUTOMOBILA.....	24
4.1. Korišteni alati	24
4.2. Definiranje cilja i opsega LCA analize	25
4.3. Prikupljanje i analiza podataka za LCA analizu	27
4.3.1. Proizvodnja materijala i rafiniranje.....	27
4.3.2. Proizvodnja i logistika	29
4.3.3. Korištenje i održavanje	30
4.3.4. Kraj životnog vijeka vozila	31
4.4. Određivanje utjecaja na okoliš LCA analize.....	31
4.4.1. Rezultati LCIA.....	32
4.5. Diskusija.....	36
5. ZAKLJUČAK.....	38
LITERATURA.....	39

POPIS SLIKA

Slika 1. Koraci LCA analize	2
Slika 2. Primjer elementarnog toka	4
Slika 3. Utjecaji na klimatske promjene	7
Slika 4. Praćenje životnog ciklusa	9
Slika 5. Ekološko opterećenje za proizvodnju milijun vrećica	12
Slika 6. Prvi električni automobil.....	17
Slika 7. Vrste električnih vozila	19
Slika 8. Cijene litij ionskih baterija.....	21
Slika 9. Godišnja prodaja električnih automobila u svijetu	24
Slika 10. Udjeli kategorija materijala ukupne težine automobila	28
Slika 11. Postavke projekta u OpenLCA softveru	32
Slika 12. Prikaz rezultata procjene utjecaja na okoliš vozila s dvije različite baterije.....	33
Slika 13. Rezultati uz različite kombinacije izvora energije	35

POPIS TABLICA

Tablica 1. Popis često korištenih sirovina.....	11
-------------------------------------------------	----

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
BEV	-	Battery Electric Vehicles
CO ₂	-	Ugljikov dioksid
CH ₄	-	Metan
ELCD	-	European Reference Life Cycle Database
EU	-	Europska unija
EV	-	Electric Vehicles
FCEV	-	Fuel Cell Electric Vehicles
HEV	-	Full Hybrid Electric Vehicles
LCA	-	Life Cycle Assessment
LCI	-	Life Cycle Inventory
LCIA	-	Life Cycle Impact Assessment
LFP	-	Baterija (litij-željezo-fosfat)
MHEV	-	Mild Hybrid Electric Vehicles
NMC	-	Baterija (nikal-mangan-kobalt)
PHEV	-	Plug-in Hybrid Electric Vehicles
vkm	-	vozilo-kilometar

SAŽETAK

Ovaj završni rad bavi se analizom životnog ciklusa (LCA) električnog automobila s ciljem prikaza ekološkog utjecaja vozila tijekom svih faza njegova vijeka – od vađenja sirovina, proizvodnje, preko eksploatacije do konačnog zbrinjavanja. LCA metoda primijenjena je kao alat za sveobuhvatnu procjenu okolišnog otiska, naglašavajući njezinu važnost u kontekstu održive mobilnosti i razvoja ekološki prihvatljivih tehnologija. Rad se temelji na provođenju LCA analize prema međunarodnim standardima ISO 14040 i 14044, gdje su opisane sve ključne faze: definiranje ciljeva i opsega, prikupljanje podataka (LCI), procjena utjecaja na okoliš (LCIA) te interpretacija rezultata. U analizi je korišten softver OpenLCA i ELCD baza podataka, čime su modelirani procesi i osigurana točnost podataka. Poseban naglasak stavljen je na važnost LCA metode kao alata za donošenje informiranih odluka u industriji električnih vozila, što omogućuje bolje razumijevanje ekoloških izazova i prilika za optimizaciju proizvodnih procesa.

Ključne riječi: LCA analiza, električni automobil, okoliš, održivost, OpenLCA

SUMMARY

This thesis focuses on the life cycle assessment (LCA) of an electric vehicle, aiming to present the environmental impact of the vehicle throughout all stages of its life cycle – from raw material extraction and production to usage and final disposal. The LCA method is applied as a tool for comprehensive evaluation of the environmental footprint, highlighting its importance in the context of sustainable mobility and the development of eco-friendly technologies. The study is based on conducting an LCA analysis following international standards ISO 14040 and 14044, covering all key phases: goal and scope definition, life cycle inventory (LCI), life cycle impact assessment (LCIA) and results interpretation. The analysis was performed using OpenLCA software and the ELCD database, ensuring accurate process modeling and reliable data collection. Special emphasis is placed on the importance of the LCA method as a decision-making tool in the electric vehicle industry, enabling a better understanding of environmental challenges and opportunities for optimizing production processes.

Key words: LCA analysis, electric vehicle, environment, sustainability, OpenLCA

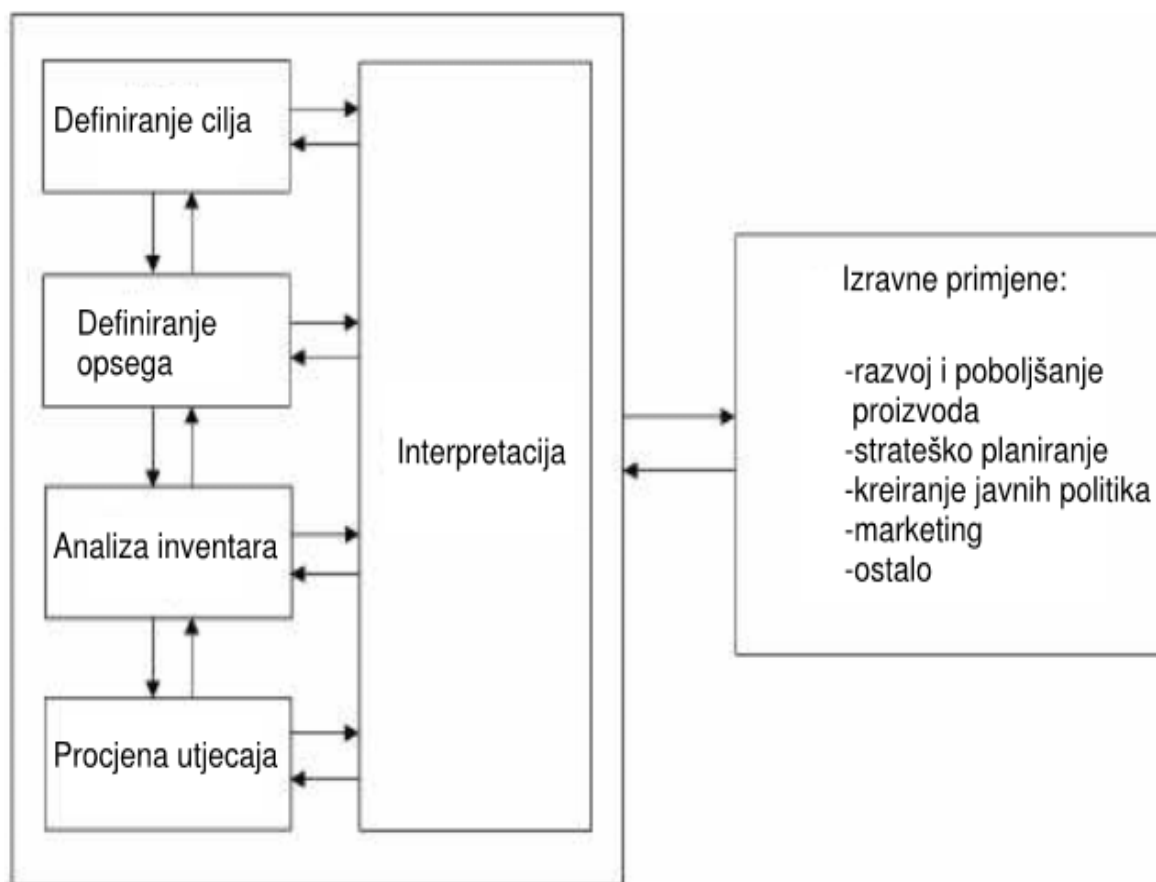
1. ANALIZA ŽIVOTNOG CIKLUSA (eng. *LIFE CYCLE ASSESSMENT, LCA*)

Zadnjih pedesetak godina društvo se suočava s izazovnim klimatskim promjenama i sve većim pritiskom na okoliš. Ekološka degradacija i prekomjerno iscrpljivanje prirodnih resursa predstavljaju ključne izazove suvremenog društva [1]. S razvojem industrijskih procesa i rastom globalne populacije, prirodni sustavi suočavaju se s povećanim ekološkim pritiskom koji često nadilazi njihovu sposobnost regeneracije. Posljedice su vidljive u zagađenju vode i zraka, glavnih elemenata za ljudsku egzistenciju. Stoga mnoge tvrtke teže izradi „zelenijih“ proizvoda ili pružanju „zelenijih“ usluga, odnosno javlja se potreba za sveobuhvatnim pristupom koji omogućuje sagledavanje ukupnog učinka ljudskih djelovanja na prirodu. Analiza životnog ciklusa (eng. *Life Cycle Assessment, LCA*) iterativni je alat koji omogućuje promatranje i mjerenje ukupnog otiska na okoliš koji uzrokuje određeni proizvod. Ova metoda poznata je po nazivu „od kolijevke do groba“ zbog toga što svojim pristupom obuhvaća sve faze životnog vijeka proizvoda, od ekstrakcije sirovine, proizvodnje i transporta, do upotrebe, ponovne uporabe i konačnog zbrinjavanja. Rastuća svijest o potrebi za održivim razvojem potaknula je brojne industrije na korištenje LCA analize kako bi smanjile svoj negativan utjecaj na okoliš. Pomoću ove metode industrije imaju mogućnost identificiranja kritičnih točaka u svojim procesima, što im omogućuje fokusiranje na poboljšanja [1].

Značaj LCA analize raste s potrebom za održivim praksama i zelenim tehnologijama, jer omogućuje donošenje odluka temeljenih na podacima, smanjenje okolišnih utjecaja, unapređenje kvalitete života i podizanje svijesti potrošača i proizvođača. Prema ISO normama 14040 i 14044 provodi se kroz četiri ključna koraka [2]:

- Definiranje cilja i opsega (eng. *Goal and Scope Definition*);
- Prikupljanje i analiza podataka (eng. *Life Cycle Inventory, LCI*);
- Određivanje utjecaja na okoliš (eng. *Life Cycle Impact Assessment, LCIA*);
- Interpretacija (eng. *Interpretation*).

Shematski prikaz koraka LCA analize prikazan je na Slici 1.



Slika 1. Koraci LCA analize [3]

Koraci LCA analize pružaju strukturiran pristup analizi i kvantifikaciji okolišnih utjecaja proizvoda, procesa ili usluge. Na slici 1. pomoću strelica u oba smjera prikazan je naglasak na međusobnu povezanost i iterativnu prirodu koraka. Na primjer, rezultati iz procjene utjecaja mogu zahtijevati povratak na analizu inventara radi dodatnih podataka. Također, vidljiva je i široka primjena analize. Od razvoja i poboljšanja proizvoda, u kojem se optimizira dizajn kako bi se smanjio ekološki utjecaj, preko pružanja važnih podataka koji podržavaju donošenje dugoročnih poslovnih i ekoloških odluka koji služi kao temelj za oblikovanje zakona i propisa koji potiču održivost, pa sve do marketinških promidžbi poput eko-oznaka [3].

1.1. Definiranje cilja i opsega (eng. *Goal and Scope Definition*)

Definiranje cilja prvi je korak LCA analize, u njemu je svrha studije precizno opisana. Međunarodni standard ISO 14044, čija je zadaća pružanje detaljnih smjernica poput specifičnih zahtjeva, metoda i preporuka za svaki korak LCA analize, zahtijeva da prilikom

definiranja cilja ne postoji dvosmislenost informacija. Njegovim određivanjem trebaju biti potpuno jasni razlozi provođenja istraživanja i planirana primjena [3]. Ovaj korak znatno utječe na konačni ishod analize, njegovim odabirom iduće faze moraju biti u skladu s definicijom cilja. Također, cilj treba biti usmjeren prema jasno definiranoj skupini za relevantnost istraživanja. Radi lakšeg razumijevanja cilja LCA analiza mora odgovoriti na dva ključna pitanja [4]:

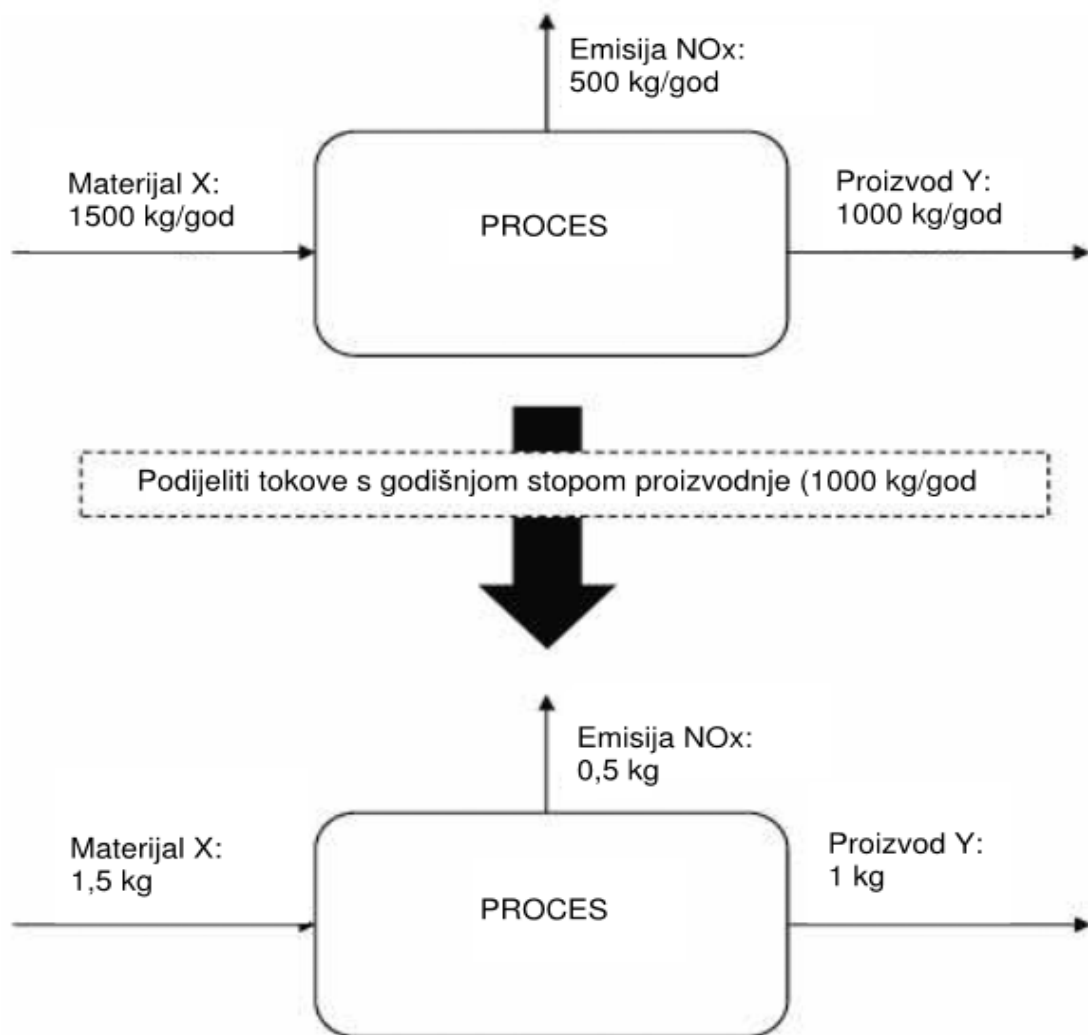
(1) „Kome bi ovo moglo biti korisno i zašto?“

(2) „Zašto smo ovo proveli i što planiramo učiniti s rezultatima?“

Kako je već spomenuto, LCA analiza spada u iterativne procese. Time je moguća promjena cilja tijekom istraživanja ukoliko se može postići više ili manje s obzirom na početni cilj. Definiranje opsega ključan je korak u provedbi analize, određivanjem opsega postavlja se okvir za iduće faze. Prilikom odabira opsega nužno je znati koje će faze životnog ciklusa biti uključene (od ekstrakcije sirovine do zbrinjavanja ili samo neka od tih faza). Granice sustava određuju koliko daleko seže analiza, lošim odabirom faza rezultati mogu značajno odstupati. Važan aspekt definicije opsega je funkcionalna jedinica. Njena glavna svrha je standardizacija funkcije koju proizvodi ili sustavi obavljaju, kako bi se omogućilo uspoređivanje njihovih utjecaja na okoliš na temelju istih kriterija. Na primjer, funkcionalna jedinica može biti 1 kilometar tijekom životnog vijeka vozila od 150 000 kilometara. Time uzima u obzir cijeli životni vijek vozila, čime se standardizira procjena utjecaja. Poput emisije CO₂, potrošnja energije i upotreba resursa mogu se izraziti kao "emisije po kilometru" ili "potrošnja energije po kilometru."

1.2. Prikupljanje i analiza podataka (eng. *Life Cycle Inventory, LCI*)

Prikupljanje i analiza podataka često predstavlja najduži segment LCA analize jer prikupljanje podataka mora biti unaprijed isplanirano. Relevantnost podataka i informacija ima posebnu važnost, zato je nužno napraviti cilj u kojem će se težiti prikupiti što veći broj visokokvalitetnih podataka i informacija. LCI je proces u kojem se kvantificiraju potrebe različitih ulaznih i izlaznih tokova iz prirode, to jest elementarnih tokova prema/iz ekosfere ili tehnosfere. Primjer elementarnog toka prikazan je na Slici 2.



Slika 2. Primjer elementarnog toka [3]

Elementarni tok na slici 2 podijeljen je u dvije faze. U prvoj fazi prikazuje se prikupljanje sirovih podataka koji su obično izraženi u godišnjoj količini. Međutim, prikaz ulaznih i izlaznih elementarnih tokova na godišnjoj razini nije praktičan za usporedbu s drugim procesima ili analizama jer podaci nisu standardizirani po jedinici proizvoda. Stoga iduća faza obuhvaća normalizaciju tokova dijeljenjem s godišnjom proizvodnjom. Ovim postupkom podatci se standardiziraju na 1 kg proizvoda Y, što omogućuje lakšu usporedbu s drugim procesima ili proizvodima [3]. Na primjer, tvrtkama može biti od pomoći u odabiru materijala za određeni proizvod uzimajući u obzir okolišne čimbenike (manja potrošnja energije ili vode). Također, ova faza može imati veliku ulogu u politici, na način da vlada razvija svoje regulative (smanjenje stakleničkih plinova ili poticanje recikliranja) na temelju podataka LCI-a [1].

Svaka faza u LCA analizi utječe na sljedeće faze, stoga LCI postaje ključan jer točnost i preciznost u ovoj fazi su od esencijalne važnosti za konačne rezultate. Postoje četiri ključna koraka za provedbu LCI analize [1]:

- **Postavljanje dijagrama toka na kojem se vrši analiza.** Ovaj korak započinje identificiranjem svih relevantnih procesa i aktivnosti unutar granica sustava, koje su definirane u fazi postavljanja ciljeva i opsega studije. Dijagram toka uključuje sve faze životnog ciklusa proizvoda, od nabave sirovina, proizvodnje, distribucije, korištenja, pa sve do zbrinjavanja otpada ili recikliranja. Svaki proces prikazan je kao “jedinični proces” koji ima specifične ulaze (sirovine, energija, pomoćni materijali) i izlaze (emisije u zrak, vodu, tlo, te nusproizvodi ili otpad). Dijagram toka pomaže u vizualizaciji kompleksnosti sustava i služi kao temelj za organizaciju prikupljanja podataka.
- **Razrađivanje plana za prikupljanje podataka.** Prije samog prikupljanja podataka, potrebno je razviti plan koji definira točne zahtjeve za podatke i kako će se oni prikupljati. Plan uključuje identificiranje izvora podataka (primarni izvori poput mjerenja u tvornicama, sekundarni izvori poput baze podataka i znanstvenih publikacija) i određivanje potrebne razine točnosti i pouzdanosti. Također, definiraju se indikatori kvalitete podataka, kao što su točnost, dosljednost, vremenska i geografska relevantnost. Plan uključuje i obrasce koji pomažu standardizirati proces prikupljanja, čime se smanjuje mogućnost pogrešaka.
- **Prikupljanje podataka.** Ovaj korak uključuje prikupljanje stvarnih kvantitativnih podataka o korištenju resursa i emisijama u okoliš za svaki proces unutar životnog ciklusa proizvoda. Prikupljeni podatci uključuju ulaze poput sirovina, energije, vode, pomoćnih materijala, te izlaze poput emisija u zrak (npr. CO₂), emisija u vodu, emisija na tlo i količine otpada. Prikupljanje podataka može biti vrlo zahtjevno, osobito ako se radi o kompleksnim proizvodnim lancima, pa je važno pratiti kvalitetu podataka i osigurati njihovu konzistentnost s ciljevima studije.
- **Evaluacija rezultata.** Nakon što su podatci prikupljeni, slijedi njihova evaluacija kako bi se osigurala konzistentnost, cjelovitost i pouzdanost. Provjerava se jesu li obuhvaćeni svi ključni procesi i tokovi.

1.3. Određivanje utjecaja na okoliš (eng. *Life Cycle Impact Assessment, LCIA*)

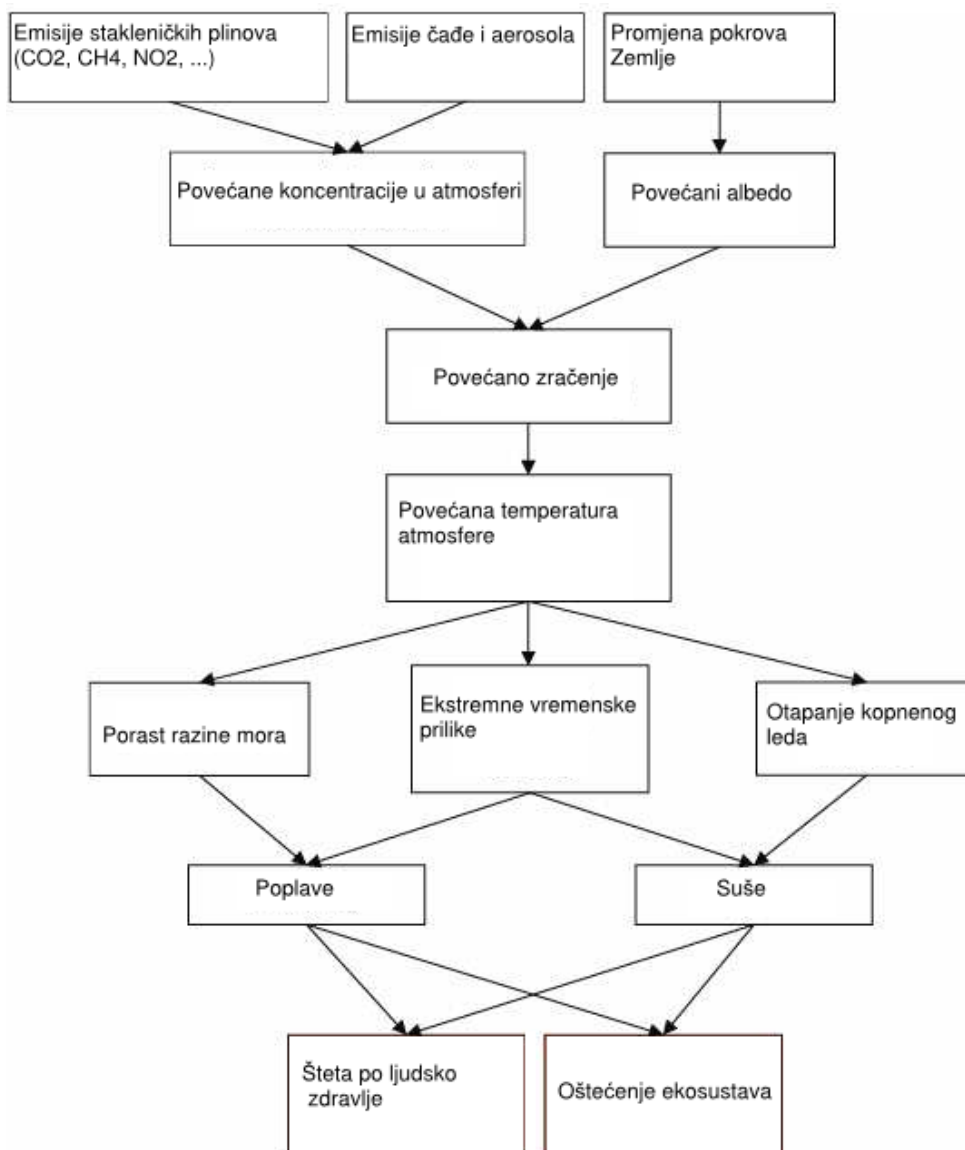
Određivanje utjecaja na okoliš faza je LCA analize koja je usmjerena na vrednovanje učinka na okoliš povezanih s proizvodnim sustavom tijekom cijelog njegovog životnog ciklusa. Nakon prikupljanja i analize podataka (LCI), započinje LCIA, čija je osnovna zadaća utvrđivanje osnovnih elementarnih tokova. Kategoriziranjem tokova, primjerice klimatskih promjena i iscrpljivanja resursa, cilj je prevesti te tokove u utjecaje na okoliš. Svaka kategorija predstavlja specifičan okolišni problem, dok pokazatelji kvantificiraju doprinos osnovnih tokova tim problemima. Na primjer, posljednjih godina staklenički plinovi (CO₂, CH₄,...) znatno utječu na promjenu klime, u LCIA fazi njihov utjecaj mjeri se prema njihovom potencijalnom globalnom zagrijavanju. Rezultat konačnog utjecaja dobije se izračunavanjem u odnosu na referentnu tvar, time se omogućuje jednostavna mjera utjecaja na okoliš [3].

LCIA sastoji se od tri obavezna koraka [1]:

- **Odabir kategorija utjecaja i pokazatelja.** Prvi korak LCIA analize uključuje identifikaciju relevantnih kategorija okolišnog utjecaja koje će biti analizirane. Ove kategorije mogu uključivati globalno zagrijavanje, zakiseljavanje okoliša, toksičnost za kopneni ekosustav i iscrpljivanje resursa. Ovaj korak se često provodi paralelno s definiranjem ciljeva i opsega analize kako bi se usmjerilo prikupljanje podataka. Kategorije utjecaja pomažu u identificiranju potencijalnih utjecaja na ljudsko zdravlje, ekosustave i dostupnost prirodnih resursa.
- **Klasifikacija.** Proces organiziranja rezultata iz LCI analize u odgovarajuće kategorije utjecaja. Emisije i korištenje resursa dodjeljuju se specifičnim kategorijama utjecaja. Na primjer, emisije ugljičnog dioksida klasificiraju se pod globalno zagrijavanje, dok se sumporni oksidi mogu klasificirati pod zakiseljavanje okoliša. U slučajevima kada emisije utječu na više kategorija, mogu se koristiti različiti pristupi, kao što je dodjela proporcionalnog dijela emisija svakoj kategoriji ili potpuno uključivanje emisija u sve relevantne kategorije.
- **Karakterizacija.** Uključuje korištenje znanstveno utemeljenih faktora konverzije, poznatih kao faktori karakterizacije, kako bi se rezultati iz LCI analize pretvorili u mjerljive indikatore utjecaja. Ovi faktori omogućuju kvantificiranje relativne važnosti različitih emisija unutar svake kategorije utjecaja. Na primjer,

emisije metana i ugljičnog dioksida mogu se pretvoriti u ekvivalente CO₂ kako bi se procijenio njihov doprinos globalnom zagrijavanju. Ovaj korak omogućuje usporedbu različitih emisija unutar iste kategorije utjecaja.

Slika 3. prikazuje povezanost uzročno-posljedičnih veza koje se analiziraju tijekom LCIA analize.



Slika 3. Utjecaji na klimatske promjene [3]

Na slici 3 prikazan je uzročno-posljedični lanac koji ilustrira kako emisije stakleničkih plinova i promjene u okolišu dovode do globalnog zagrijavanja i ekstremnih vremenskih uvjeta te posljedično štete po ljudsko zdravlje i ekosustave. Primarni cilj LCIA pružiti je uvid

u osnove za poboljšanje proizvoda ili procesa, omogućujući razumijevanje koje faze životnog ciklusa imaju najveći negativni utjecaj na okoliš. Rezultati LCIA-a pružaju značajne informacije, međutim konačni rezultati ovise o točnosti ulaznih podataka.

1.4. Interpretacija (eng. *Interpretation*)

Interpretacija životnog ciklusa posljednji je korak LCA analize u kojem se identificiraju, kvantificiraju i provjeravaju rezultati prijašnjih koraka, s ciljem utvrđivanja ključnih elemenata koji imaju najveći utjecaj na konačni rezultat LCA analize kako bi se donijeli preporuke i zaključci. Zaključci moraju biti usklađeni s definiranim ciljevima i opsegom analize, dok preporuke trebaju pružiti praktične smjernice za poboljšanje okolišnih performansi proizvoda ili procesa. Bit interpretacije je aktivno podržavanje ekoloških inovacija i održivog razvoja, a ne samo iznošenje informacija [3].

Prema ISO 14044 interpretacija životnog ciklusa treba [1]:

- (1) Analizirati rezultate, donijeti zaključke, objasniti ograničenja i pružiti preporuke temeljene na nalazima prethodnih faza LCA analize te transparentno izvijestiti o rezultatima interpretacije životnog ciklusa.
- (2) Osigurati lako razumljivu, cjelovitu i konzistentnu prezentaciju rezultata studije LCA, u skladu s ciljevima i opsegom studije.

2. PREGLED KLJUČNIH FAZA ŽIVOTNOG CIKLUSA

U globalnim raspravama o klimatskim promjenama i iscrpljivanju resursa neizbježno je pitanje održivosti proizvodnje i potrošnje [5]. Bez razumijevanja faza životnog ciklusa proizvoda teško je procijeniti njegov utjecaj na okoliš i društvo. Svaki proizvod, od nastanka do zbrinjavanja, prolazi kroz niz različitih procesa koji su povezani na neki način [5].



Slika 4. prikazuje te procese.

Slika 4. Praćenje životnog ciklusa [5]

Slika 4 prikazuje životni ciklus proizvoda, odnosno sve faze kroz koje proizvod prolazi od vađenja sirovina do kraja svog vijeka trajanja. Ovaj ciklus je ključan za analizu okolišnog utjecaja proizvoda, posebno u kontekstu LCA analize.

Faze prikazane na slici uključuju:

- Ekstrakcija materijala: vađenje sirovina iz prirode;
- Proizvodnja i izrada: obrada sirovina i izrada proizvoda;
- Konstrukcija: sastavljanje ili izgradnja proizvoda;
- Upotreba: faza korištenja proizvoda od strane krajnjeg korisnika;
- Održavanje i ponovna upotreba: produženje životnog vijeka proizvoda kroz održavanje ili preinake;
- Rušenje: demontaža ili rastavljanje proizvoda na kraju njegove korisne upotrebe;
- Odlaganje: zbrinjavanje proizvoda kao otpada;
- Recikliranje: ponovna obrada materijala u nove proizvode.

Također, slika prikazuje dva moguća puta proizvoda. Tradicionalni linearni model „od kolijevke do groba“ (eng. „*cradle to grave*“) u kojem proizvod nakon upotrebe završava kao otpad, čime se ciklus prekida odlaganjem. Česti rezultat je stvaranje otpada i negativnih utjecaja na okoliš. Ovaj koncept se koristi za analizu ukupnog okolišnog utjecaja proizvoda tijekom cijelog njegovog životnog ciklusa. Za razliku od prvog modela, „od kolijevke do kolijevke“ (eng. „*cradle-to-cradle*“) model temelji se na ideji kružnog gospodarstva, gdje proizvod nakon upotrebe ne postaje otpad, već se reciklira ili ponovno koristi kao sirovina za nove proizvode. Umjesto završetka na odlagalištu, materijali ulaze u novi ciklus upotrebe, čime se minimizira otpad i negativni utjecaji na okoliš. Ovaj pristup promiče održivi dizajn proizvoda s ciljem stvaranja zatvorenog kruga materijala [5].

2.1. Sirovine

Sirovine su osnovni materijali ili prirodni resursi koji su temeljni element svakog proizvodnog procesa. Kroz industrijske procese transformiraju se u poluproizvode ili gotove proizvode. Dijele se na primarne i sekundarne sirovine [6]. U primarne sirovine spadaju materijali koji su crpljeni izravno iz prirodnih izvora poput drva, ruda, fosilnih goriva i vode. Karakteristično za njih je da nisu prethodno reciklirane te većinom zahtijevaju vrlo složeni proces vađenja, transporta i obrade. Također, primarne sirovine mogu se klasificirati prema obnovljivosti, na obnovljive i neobnovljive sirovine. Obnovljive sirovine (poljoprivredne kulture, drvne

mase,...) imaju mogućnost brzog regeneriranja, dok se neobnovljive sirovine (nafta, prirodni plin,...) troše znatno brže nego što se obnavljaju prirodnim procesima. S druge strane, sekundarne sirovine odnose se na već korištene materijale, koji su reciklirani ili ponovno upotrijebljeni sa ciljem minimiziranja potreba za eksploatacijom primarnih resursa. U modernim industrijskim procesima smatraju se izrazito bitnima jer smanjuju ekološki otisak proizvodnje i teže tranziciji prema kružnom gospodarstvu. One uključuju reciklirani metal, papir, plastiku i ostale nusproizvode koji se mogu ponovno upotrijebiti. Time pomažu u smanjenju otpada na odlagalištima i rješavanju problema zagađenja. Usprkos mnogim prednostima sekundarnih sirovina, njihova uporaba je izazovna, poput dodatne obrade materijala ili potencijalnog smanjenja kvalitete u usporedbi s primarnim materijalom [6].

Sirovine		
Barit	Željezna ruda	Voda
Boksit	Kromat željeza	Drvo
Biomasa (pamuk, vuna...)	Olovo	Cink
Slana voda	Vapnenac	Zlato
Kreda	Magnezij	Srebro
Kalcijev sulfat (CaSO ₄)	Uranij	Platina
Glina	Ugljen	Prirodni plin
Bakar	Natrijev nitrat	Nafta

Tablica 1. Popis često korištenih sirovina [6]

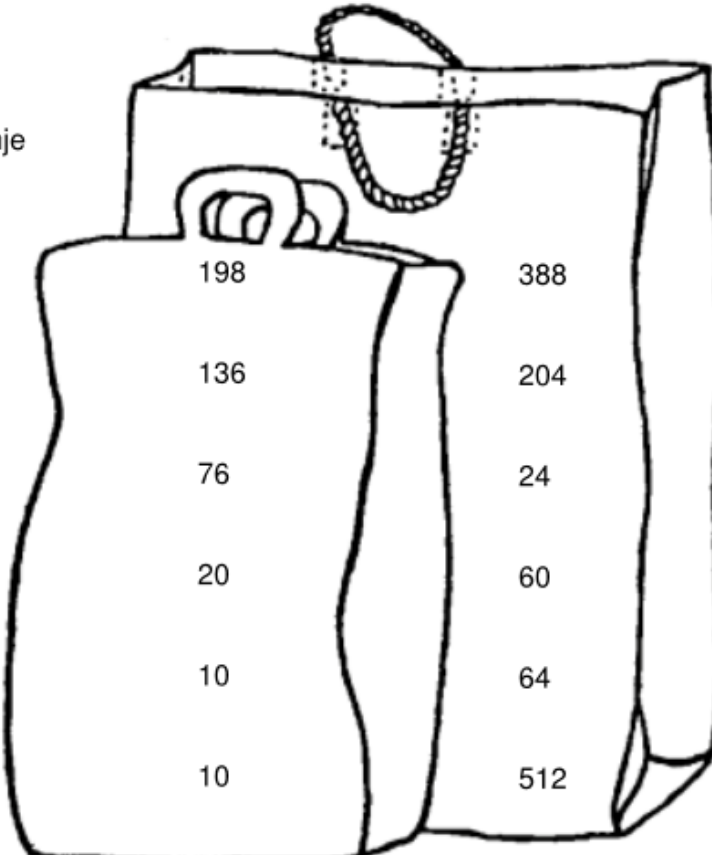
Ekstrakcija i obrada nekih sirovina iz Tablice 1. imaju bitan utjecaj na okoliš. Ekstrakcija nafte i prirodnog plina zahtijeva izgradnju složenih infrastruktura poput bušotina i cjevovoda, čime se uvelike utječe na promjenu staništa. Rudarenje boksita i željezne rude jedni su od najintenzivnijih procesa ekstrakcije sirovine jer zahtijevaju veliko korištenje energije i uzrokuju emisije čvrstih čestica u atmosferu. Stoga je bitna upotreba sekundarnih sirovina i recikliranja kako bi ovi procesi bili održiviji. Primjerice, recikliranje aluminijske sirovine zahtijeva samo 5% ukupne energije potrebne za rudarenje boksita [6].

Za provođenje LCA analize, sirovine su jedan od ključnih elemenata. Prilikom točne procjene energetskog utjecaja tijekom životnog ciklusa proizvoda nužni su podaci o vrstama i izvorima energije korištenima za ekstrakciju i obradu sirovina. Razumijevanje ovih utjecaja ključno je za stvaranje održivijih sustava proizvodnje i smanjenje ukupnog ekološkog otiska.

2.2. Proizvodnja

Proizvodnja je faza životnog proizvoda u kojoj se kroz različite procese iz sirovina dobivaju poluproizvodi ili gotovi proizvodi. Sastoji se od međusobno povezanih koraka poput planiranja, dizajniranja, obrade, montaže i kontrole kvalitete, s ciljem zadovoljenja potreba tržišta i krajnjih korisnika. Proizvodnja doprinosi ekonomskom razvoju, no svaka proizvodnja ima utjecaj na okoliš. Posljedice proizvodnih procesa manifestiraju se kroz emisije u -vodu, zrak i tlo, stvaranje otpada i potrošnju prirodnih resursa [6].

	Polietilenske vrećice	Papirnatere vrećice
Potrebna energija	580 000 MJ	1 340 000 MJ
Proizvedeno onečišćenje zraka (kilogrami)		
Sumporov dioksid	198	388
Dušikovi oksidi	136	204
Ugljikovodici	76	24
Ugljični monoksid	20	60
Prašina	10	64
Ispuštene otpadne vode (kilogrami)	10	512



Slika 5. Ekološko opterećenje za proizvodnju milijun vrećica [6]

Zanimljiv primjer uključuje usporedbu proizvodnje papirnatih i plastičnih vrećica. Na prvi pogled, papirnatere vrećice čine se kao održivija opcija zbog njihovog prirodnog porijekla i

biorazgradivosti. Međutim, proizvodnja papirnatih vrećica zahtijeva složenije procese. Plastične vrećice koriste naftne derivate, koji su neobnovljivi resursi, ali njihova ekstrakcija i obrada troše manje vode i energije nego kod papira. Slika 5. prikazuje usporedbu kroz nekoliko ključnih parametara u kojoj je za proizvodnju milijun plastičnih vrećica potrebno dvostruko manje energije u odnosu na papirnate vrećice, zbog kompleksnog procesa obrade drveta u celulozu te sušenja i oblikovanja vrećica. Također, papirnate vrećice proizvode čak 512 kilograma otpadnih voda, dok plastične vrećice samo 10 kilograma [6]. Ovo je značajna razlika koja pokazuje dodatni pritisak na resurse vode i ekosustave kod proizvodnje papirnatih vrećica. Podaci na slici 5. jasno pokazuju da proizvodnja papirnatih vrećica ima znatno veći okolišni otisak u smislu potrošnje energije, emisija onečišćujućih tvari u zrak i količine otpadnih voda. Iako su papirnate vrećice biorazgradive, njihov ukupni utjecaj na okoliš tijekom proizvodnog procesa često je veći od plastičnih vrećica. S druge strane, plastične vrećice uzrokuju dugotrajne probleme zbog svoje nerazgradivosti, što nameće potrebu za recikliranjem i smanjenjem upotrebe [6].

S obzirom na primjer proizvodnje vrećica naglašava se važnost cjelovitog razmatranja okolišnog utjecaja putem LCA analize kako bi se donijele odluke o upotrebi različitih materijala. Stoga tvrtke koje implementiraju zelene tehnologije često imaju bolje pozicioniranje na tržištu zbog sve većih zahtjeva za održivim proizvodima. Uvođenje održivih praksi u proizvodnju važno je ne samo za zaštitu okoliša, već i za dugoročni uspjeh u poslovanju. Primjeri takvih praksi su [6]:

- **Prevenција zagađenja i smanjenje otpada.** Ova praksa podrazumijeva identificiranje i uklanjanje procesa koji generiraju otpad ili zagađenje prije nego što oni nastanu. Umjesto fokusiranja na sanaciju štete, prevencija zagađenja nastoji optimizirati proizvodne procese kako bi se spriječilo stvaranje otpada. To uključuje optimizaciju proizvodnih procesa korištenjem tehnologija koje smanjuju količinu otpada, zamjenu štetnih materijala manje toksičnima te redizajn proizvoda kako bi se smanjio otpad tijekom upotrebe i olakšala reciklaža. Dugoročno, ova praksa smanjuje troškove obrade otpada, povećava konkurentnost na tržištu i poboljšava reputaciju brenda kao ekološki odgovornog.
- **Učinkovito korištenje resursa.** Podrazumijeva optimizaciju potrošnje prirodnih resursa poput vode, energije i sirovina. Cilj je postići maksimalnu produktivnost uz minimalnu potrošnju resursa. To se postiže zamjenom zastarjele opreme energetski učinkovitijim modelima, recikliranjem vode unutar proizvodnog

procesa i korištenjem materijala koji su lakši i manje štetni za okoliš. Dugoročne koristi uključuju smanjene operativne troškove i smanjenje emisija stakleničkih plinova.

- **Dizajn za okoliš (eng. *Design for Environment*).** Uključuje integraciju ekoloških aspekata već u ranim fazama dizajniranja proizvoda. Proizvodi se dizajniraju kako bi tijekom svog životnog ciklusa imali minimalan utjecaj na okoliš. To podrazumijeva dizajn proizvoda koji se lako rastavljaju i recikliraju, smanjenje nepotrebnog pakiranja i korištenje ekološki prihvatljivih materijala. Korištenje ove prakse omogućava proizvođačima da zadovolje stroge ekološke regulative, poboljšaju konkurentnost na tržištu i povećaju lojalnost kupaca.
- **Usklađenost s međunarodnim regulativama.** Ključni je korak za dugoročni uspjeh u poslovanju. Ova praksa ne samo da pomaže u izbjegavanju pravnih problema, već otvara vrata međunarodnim tržištima gdje su ekološki zahtjevi stroži. Implementacija sustava upravljanja okolišem prema međunarodno priznatim standardima i prilagodba poslovanja zakonima zemalja poput Njemačke ili Singapura povećavaju reputaciju brenda i omogućavaju pristup širim tržištima.
- **Programi reciklaže i ponovne upotrebe.** Omogućuju tvrtkama da smanje svoj ekološki otisak i operativne troškove. Ova praksa uključuje povrat proizvoda nakon upotrebe, recikliranje proizvodnog otpada i sekundarnu upotrebu materijala. Primjerice, proizvođači mogu poticati kupce na vraćanje iskorištenih proizvoda ili reciklirati otpad nastao tijekom proizvodnje. Cilj je smanjenje količine otpada, snižavanje troškova i stvaranje dodatne vrijednost kroz sekundarne proizvode.
- **Podrška i angažman menadžmenta.** Menadžment mora biti uključen u sve faze, od donošenja odluka do provedbe strategija za održivost. To uključuje strateško planiranje, edukaciju zaposlenika o važnosti održivih praksi i angažman svih odjela u organizaciji. Dugoročne koristi uključuju povećanu učinkovitost, stvaranje korporativne kulture odgovorne prema okolišu i konkurentsku prednost na tržištu.

2.3. Korištenje (eksploatacija)

Korištenje je faza životnog ciklusa koja počinje nakon distribucije proizvoda, kada ga krajnji korisnik preuzme i počne upotrebljavati, a traje sve dok proizvod ne bude odbačen ili uključen u sustav za upravljanje otpadom [6]. U ovom koraku proizvod se koristi ili troši od strane krajnjeg korisnika, uključujući sve aktivnosti povezane s njegovom upotrebom.

Prilikom korištenja proizvoda nužno je znati koliko se materijala, energije, vode i drugih resursa troši za njegovu upotrebu. Ovi podaci pomažu bolje razumijevanje utjecaja proizvoda na okoliš tijekom upotrebe. Naravno, količina potrebnih resursa ovisi o vrsti proizvoda i načinu na koji se koristi. Sve te informacije prikupljaju se kako bi se mogle koristiti u LCA analizi [3].

Također, faza korištenja uključuje održavanje proizvoda. Tijekom korištenja proizvoda bitno je njegovo održavanje kako bi proizvod imao duži vijek trajanja. Pravilno održavanje ključno je za osiguravanje dugovječnosti i učinkovitog rada proizvoda [6]. Međutim, održavanje ima značajan utjecaj na okoliš zbog korištenja resursa, potrošnje energije i stvaranja otpada. Primjerice, kod automobila s unutarnjim izgaranjem, učestala zamjena dijelova poput filtera ulja, rashladnih tekućina i guma dodatno pridonosi ukupnom ekološkom opterećenju [7]. Stoga je bitno uzeti u obzir sve materijale i procese povezane s održavanjem tijekom životnog vijeka vozila. Na primjer, za filter ulja potrebno je odrediti koliko često se mijenja tijekom prosječnog vijeka trajanja vozila, koliko ulja i materijala sadrži te kako se odlaže nakon upotrebe. Slično vrijedi i za rashladne tekućine, gdje se analizira učestalost zamjene, količina tekućine koja se koristi i njezin kemijski sastav, a samim time i utjecaj na okoliš. Kod guma potrebno je uzeti u obzir prosječni vijek trajanja jednog seta, koliko će kompleta biti potrebno tijekom životnog vijeka vozila te kakav je utjecaj proizvodnje i odlaganja istih na okoliš. Nakon prikupljanja podataka važnih za održavanje moguće je detaljnije provesti LCA analizi [7].

2.4. Zbrinjavanje

Nakon prolaska svih faza životnog ciklusa, proizvod je dosegnuo kraj svog predviđenog vijeka trajanja. U prošlosti, proizvodi su na kraju svojeg životnog ciklusa obično završavali na odlagalištima otpada ako su bili čvrsti, u slučaju tekućina odvodili su se u kanalizaciju prema postrojenjima za obradu otpadnih voda. Primjerice, tisuće sušila za kosu godišnje su završila na odlagalištima, i to najčešće zbog kvara jednostavnog dijela poput prekidača za uključivanje i isključivanje, zbog čega cijeli uređaj postaje otpad. Analizom tih praksi uočeni su brojni negativni učinci što je potaknulo društvo na rješavanje problema sve bržeg punjenja odlagališta i velikih količina otpada koje završavaju u kanalizaciji [6].

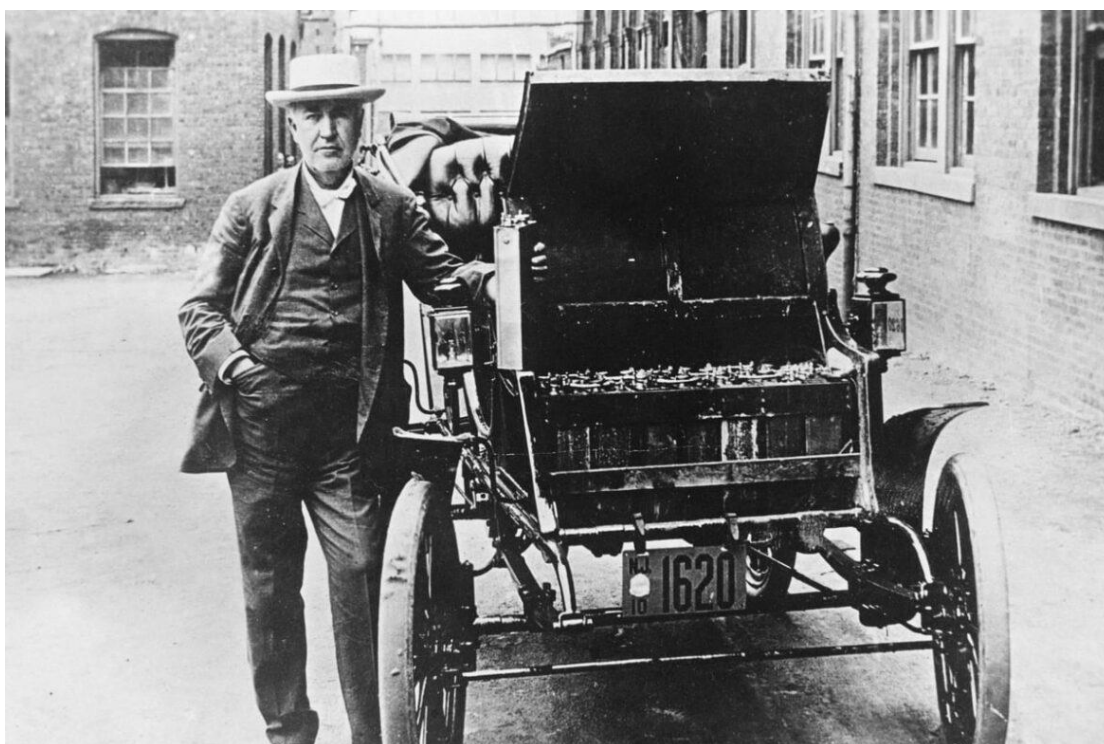
U novije vrijeme, društvo se okreće zbrinjavanju proizvoda na održivije načine. Proizvodi se prebacuju na lokacije za recikliranje, gdje se rastavljaju i izdvajaju korisni materijali i komponente. Podsklopovi i komponente mogu se vratiti izvornom proizvođaču radi čišćenja, obnove i ponovne upotrebe u novom proizvodu. Kako bi se smanjila količina otpada, ključno

je primijeniti strategije minimizacije otpada. Te strategije uključuju dizajn proizvoda i procesa koji generiraju manje otpada tijekom cijelog životnog ciklusa. Na primjer, optimizacija proizvodnih metoda i implementacija održivih materijala može značajno smanjiti otpad. Također, neizostavan element zbrinjavanja su zakonodavni okviri i usklađenost s lokalnim i međunarodnim propisima. Poštivanje standarda kao što je ISO 14001 osigurava odgovoran pristup upravljanju otpadom te doprinosi globalnim ciljevima održivosti. Uspješno zbrinjavanje zahtijeva kontinuirano praćenje propisa i prilagodbu praksi kako bi se osigurala usklađenost. Stoga je pravilan način zbrinjavanja izrazito bitan te se ponekad ispostavlja vrlo složenim procesom u LCA analizi [6].

3. ELEKTRIČNI AUTOMOBILI

Električni automobili predstavljaju tehnologiju koja seže u same početke automobilizma, istovremeno se razvijajući s parnim i benzinskim automobilima. Njihova povijest obilježena je brojnim usponima i padovima, uvjetovanim tehnološkim inovacijama, infrastrukturnim ograničenjima i ekonomskim okolnostima.

Temelj za današnju električnu mobilnost postavio je škotski izumitelj Robert Anderson (slika 6.) konstrukcijom prvog električnog vozila sredinom 19. stoljeća.



Slika 6. Prvi električni automobil [8]

Na slici 6. prikazan je Andersonov izum koji je koristio primitivne neregulirajuće galvanijske baterije, koje su omogućavale ograničen izvor energije. Iako je ovo vozilo predstavljalo inovaciju svog vremena, praktična primjena bila je vrlo ograničena zbog nemogućnosti ponovnog punjenja baterija, visoke cijene i kratkog trajanja rada [8]. Daljnji razvoj električnih automobila omogućio je francuski fizičar Gaston Planté 1859. godine izumom olovno-kiselinske baterije, prve punjive baterije koja je postavila temelje za razvoj moderne tehnologije pohrane energije. Iako je bila teška i imala ograničen kapacitet u usporedbi s modernim baterijama, njezina pouzdanost i mogućnost punjenja činile su je ključnim korakom za napredak. Ovaj izum poslužio je kao osnova za daljnja istraživanja i unapređenja,

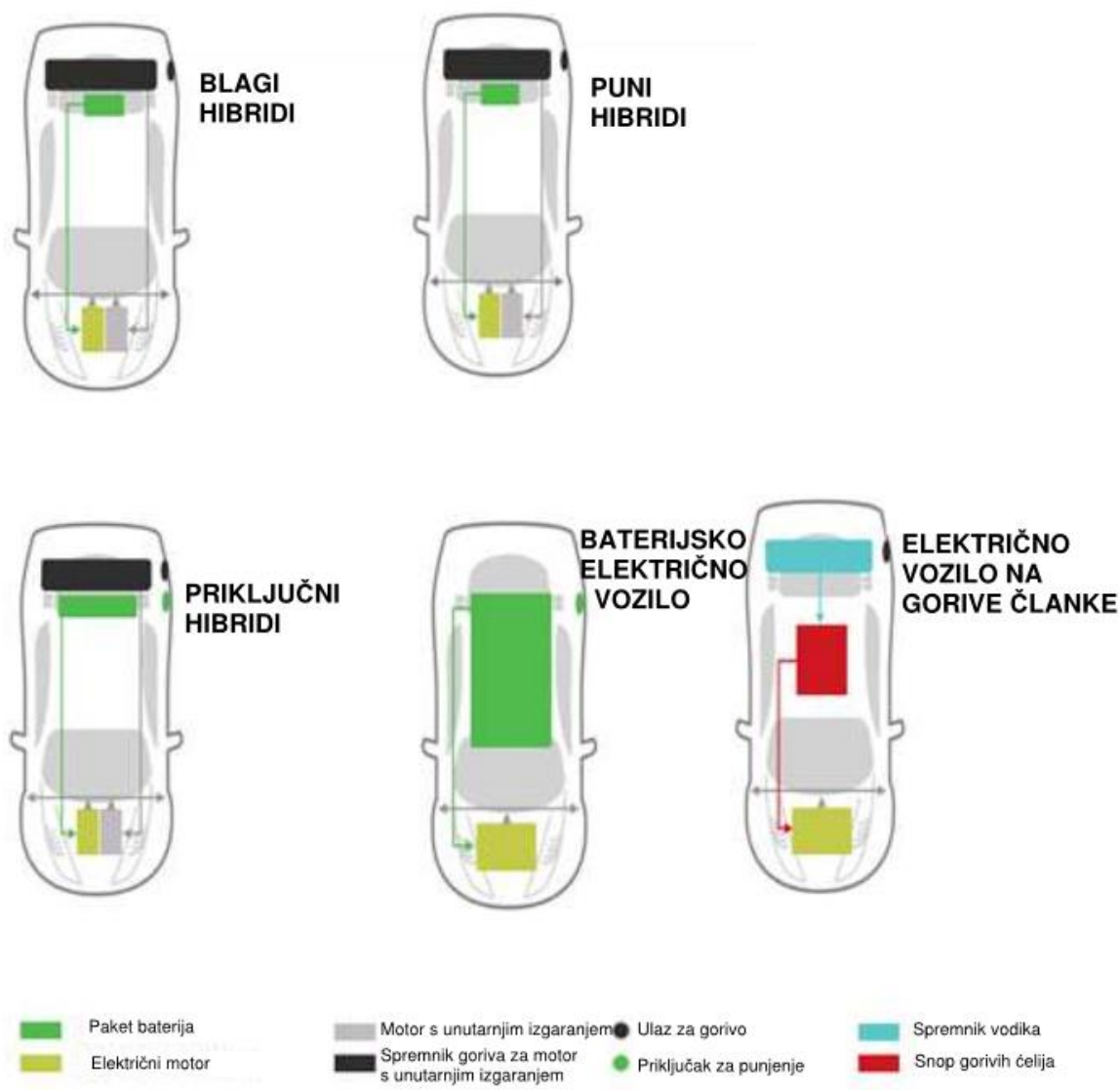
uključujući razvoj lakših i učinkovitijih baterija, koje su kasnije omogućile širu primjenu električnih vozila [8].

Početak 20. stoljeća u SAD-u 38% automobila bilo je električno, njihova ključna prednost bila je sposobnost tihog rada, visoki okretni moment pri niskim brzinama i nepostojanje lokalnih emisija [8]. Međutim, infrastruktura za punjenje električnih vozila u to vrijeme bila je vrlo ograničena. Do 1917. godine, samo trećina američkih kućanstava bila je priključena na električnu mrežu, dok su benzinske postaje već tada bile široko dostupne. Glavni razlog početka opadanja proizvodnje električnih automobila pojava je masovne proizvodnje Fordovog Modela T. Zahvaljujući inovativnim metodama proizvodnje na pokretnoj traci, Ford je uspio značajno smanjiti troškove proizvodnje, što je omogućilo drastično smanjenje cijene automobila. Model T, poznat i kao "automobil za mase", postao je pristupačan široj populaciji, posebno srednjoj klasi, koja ranije nije mogla priuštiti vlasništvo nad automobilom. 1923. godine cijena Modela T iznosila je oko 300\$, dok je u to vrijeme cijena električnog automobila bila i do 10 puta veća [8, 9].

Ponovni interes za električna vozila pojavio se sredinom 20. stoljeća, potaknut rastućom zabrinutošću zbog zagađenja zraka i problema s energetsom sigurnošću. Međutim, pravi tehnološki pomaci dogodili su se krajem 20. i početkom 21. stoljeća, pojavom novih baterijskih tehnologija, uključujući litij-ionske baterije. Ove baterije ponudile su značajno veću energetska gustoću, veću pouzdanost i mogućnost bržeg punjenja u usporedbi s prethodnim tehnologijama poput olovno-kiselinskih baterija. Time je električnim automobilima omogućeno postizanje većeg dometa i boljih performansi, čime su postali ozbiljna alternativa vozilima s unutarnjim izgaranjem [9].

3.1. Vrste električnih automobila

Vrste električnih automobila razvile su se kroz različite tehnologije kako bi zadovoljile specifične potrebe potrošača, industrije i okoliša. Svaka vrsta ima svoje karakteristike, prednosti i ograničenja, što je važno razumjeti kako bi se omogućio daljnji razvoj i prelazak na održiviji prometni sustav. Slika 7. prikazuje vrste električnih vozila i njihove najvažnije komponente koje će biti opisane u nastavku.



Slika 7. Vrste električnih vozila [10]

3.1.1. Blagi hibridi (eng. *Mild Hybrid Electric Vehicles*, MHEV)

Blagi hibridi predstavljaju početni korak u prijelazu s tradicionalnih vozila na elektrifikaciju. Ova vozila koriste konvencionalni motor s unutarnjim izgaranjem uz dodatnu 48V bateriju. Baterija se puni regenerativnim kočenjem, što znači da kinetička energija, koja bi se inače izgubila, puni bateriju tijekom kočenja. Njena glavna uloga je podržati motor pri ubrzavanju, omogućiti funkciju start-stop te napajati pomoćne sustave poput klimatizacije. Iako ne nude mogućnost vožnje isključivo na električnu energiju, blagi hibridi smanjuju potrošnju goriva i emisije. Primjer ovakvog vozila je Suzuki Baleno [10].

3.1.2. Puni hibridi (eng. *Full Hybrid Electric Vehicles*, HEV)

Puni hibridi koriste složeniji sustav u kojem motor s unutarnjim izgaranjem i elektromotor surađuju na različite načine. Postoje dva glavna tipa punih hibrida [10]:

- **Serijski hibridi:** Motor s unutarnjim izgaranjem služi kao generator električne energije koja se koristi za pogon kotača putem elektromotora.
- **Paralelni hibridi:** Kombiniraju snagu motora s unutarnjim izgaranjem i elektromotora za pogon vozila, pri čemu oba izvora mogu raditi istovremeno ili pojedinačno. Osim toga, puni hibridi mogu raditi isključivo na električnu energiju pri manjim brzinama ili u uvjetima niske potrošnje energije. Ova vrsta hibridnog vozila idealna je za vožnju u urbanim sredinama jer nudi visoku učinkovitost i smanjenu emisiju. Jedan od poznatih primjera je Toyota Camry.

3.1.3. Priključni hibridi (eng. *Plug-in Hybrid Electric Vehicles, PHEV*)

Priključni hibridi predstavljaju daljnji korak u razvoju hibridnih vozila jer imaju baterije znatno većeg kapaciteta koje se mogu puniti putem vanjske električne mreže. Ova vozila omogućuju vožnju u potpuno električnom modu na većim udaljenostima, nakon čega prelaze na hibridni način rada koristeći motor s unutarnjim izgaranjem kao dodatni izvor energije. Time se povećava ukupna autonomija vozila, što ih čini privlačnima za vozače koji žele prednosti električnih vozila bez brige o punjenju na dugim putovanjima. Primjeri *plug-in* hibrida uključuju Mitsubishi Outlander i Volvo XC90 [10].

3.1.4. Baterijska električna vozila (eng. *Battery Electric Vehicles, BEV*)

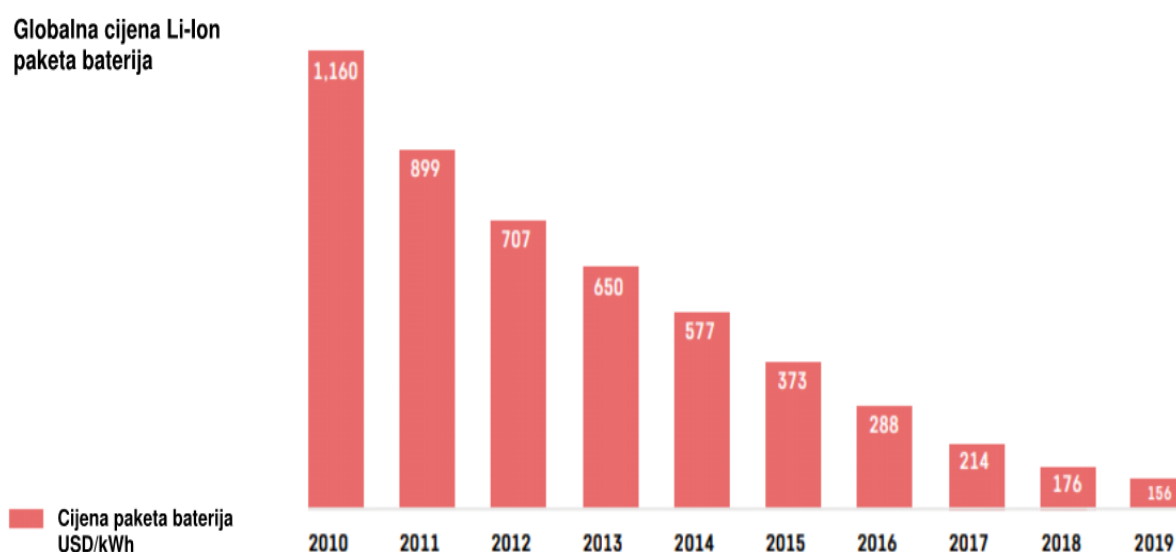
Baterijska električna vozila su vozila koja koriste isključivo električnu energiju pohranjenu u baterijama za pogon elektromotora. Za razliku od hibrida, BEV-ovi nemaju motor s unutarnjim sagorijevanjem, što ih čini potpuno bez emisija tijekom vožnje. Baterije u ovim vozilima mogu se puniti putem kućnih ili javnih punionica, a tehnologija brzog punjenja omogućava punjenje u kratkom vremenu. BEV-ovi su idealni za okoliš, osobito ako se energija za njihovo punjenje dobiva iz obnovljivih izvora. Popularni primjer ove vrste vozila uključuje Tesla Model 3 [10].

3.1.5. Električna vozila na gorive ćlanke (eng. *Fuel Cell Electric Vehicles, FCEV*)

Električna vozila na gorive ćlanke koriste vodik kao glavni izvor energije. Umjesto baterije, gorive ćelije pretvaraju vodik i kisik u električnu energiju, pri čemu je jedini nusprodukt voda. Ova tehnologija nudi iznimno visoku energetska gustoću i omogućuje brzo punjenje vodikom, slično punjenju goriva kod tradicionalnih vozila. Međutim, infrastruktura za proizvodnju i distribuciju vodika još uvijek je nedovoljno razvijena, što predstavlja veliki izazov za širu primjenu FCEV-a. Toyota Mirai jedan je od poznatih primjera FCEV-a [10].

3.2. Baterija električnog vozila

U sustavu napajanja vozila, baterija je osnovna komponentna koja služi kao spremnik električne energije. Ona pohranjuje energiju koja se koristi za napajanje električnog motora i ostalih sustava vozila, uključujući elektroniku, grijanje i klimatizaciju. Litij-ionske (Li-ion) baterije trenutno predstavljaju najnapredniju i najrazvijeniju tehnologiju za električna vozila. Odlikuju se dugim vijekom trajanja i povoljnom cijenom po jedinici kapaciteta [10]. Slika 8. prikazuje pad cijena litij ionskih baterija u različitim godinama.



Slika 8. Cijene litij ionskih baterija [10]

Iako baterije trenutno iznose 35% ukupne cijene električnog automobila, prema slici 8. ilustrira se veliki napredak u tehnologiji i ekonomiji Li-ion baterija, koji je ključan za transformaciju automobilske industrije i prelazak na održiviju budućnost mobilnosti [10]. Pad cijene baterija ne utječe samo na ekonomsku dostupnost, već i na ekološki otisak električnih vozila kroz cijeli njihov životni ciklus, što je ključno za LCA analizu. U fazi proizvodnje, tehnološki napredak smanjuje energetske intenzivnost proizvodnje baterija, dok optimizacija materijala poput smanjenja upotrebe rijetkih i ekološki štetnih materijala kao što je kobalt, smanjuje negativan utjecaj na okoliš. Tijekom uporabe, povećana energetska gustoća baterija omogućuje veću autonomiju vozila bez povećanja težine, čime se smanjuje potrošnja energije po kilometru. Također, korištene baterije iz električnih vozila mogu se koristiti za stacionarno skladištenje energije, produžujući njihov koristan vijek i dodatno smanjujući utjecaj na okoliš [10].

3.3. Utjecaj električnih automobila na smanjenje stakleničkih plinova

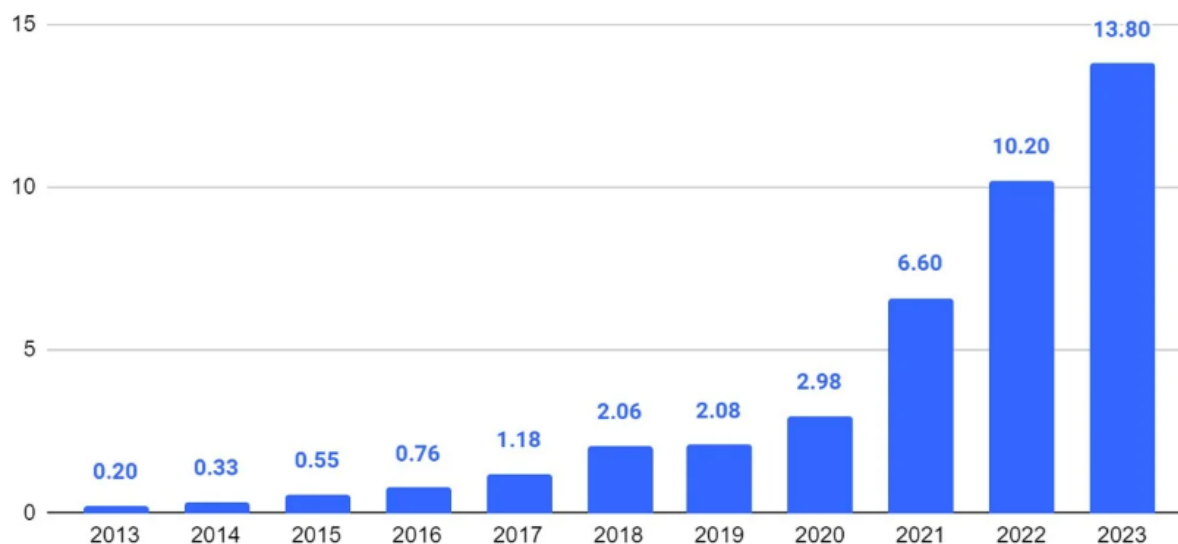
Promjena klimatskih uvjeta i sve izraženiji efekti globalnog zatopljenja postavili su smanjenje emisija stakleničkih plinova kao jedan od najvažnijih ciljeva današnjeg društva. Stoga električni automobili imaju važnu ulogu jer ne proizvode izravne emisije stakleničkih plinova tijekom vožnje. Oslanjaju se na električne motore i baterije, za razliku od tradicionalnih automobila s unutarnjim izgaranjem koji sagorijevaju fosilna goriva. Kod automobila s unutarnjim izgaranjem, čak 99,6% potrošnje benzina i 67% potrošnje dizela dolazi iz sektora automobila, čime se značajno povećava emisija stakleničkih plinova u urbanim područjima [10]. Međutim, važno je naglasiti da tijekom proizvodnje baterija električnih automobila dolazi do emisije stakleničkih plinova, koje značajno doprinose ukupnom ugljičnom otisku ovih vozila. Eksploatacije i prerade sirovina poput litija, kobalta i nikla, koji su ključni materijali za proizvodnju litij-ionskih baterija, zahtijevaju velike količine energije često dobivene iz fosilnih goriva, što rezultira značajnim emisijama ugljičnog dioksida. Na primjer, većina kobalta dolazi iz Demokratske Republike Kongo, dok se prerada u velikoj mjeri odvija u Kini, što dodatno povećava emisije zbog dugih transportnih ruta i energetski intenzivnih procesa prerade [10]. Zbog toga proces proizvodnje baterija električnih automobila ostaje izazov kada je riječ o emisijama stakleničkih plinova iako električna vozila nude prednosti u smislu smanjenja emisija tijekom korištenja.

Europski zeleni plan (eng. *European Green Deal*) je strategija Europske unije (EU) usmjerena na transformaciju EU-a u moderno, resursno učinkovito i konkurentno gospodarstvo, s ciljem postizanja klimatske neutralnosti do 2050. godine [11]. To podrazumijeva smanjenje neto emisija stakleničkih plinova na nulu, odvajanje gospodarskog rasta od korištenja resursa te osiguranje da nijedna osoba niti regija ne budu zapostavljene tijekom ove tranzicije. Ova strategija ima izravnu vezu s električnim automobilima jer je dekarbonizacija prometa jedan od ključnih stupova ovog plana. Transportni sektor je odgovoran za oko 25% emisija stakleničkih plinova u EU, a cestovni promet čini većinu tih emisija. Prelazak na električna vozila ključan je za postizanje ciljeva smanjenja emisija. Jedna od najznačajnijih mjera proizašlih iz EU Green Deal-a je zabrana prodaje novih vozila na pogon pomoću fosilnih goriva od 2035. godine. Ova zabrana će potaknuti potpunu tranziciju prema električnim vozilima, dok su hibridna vozila predviđena kao privremeno rješenje. Kako bi se ubrzao prelazak na električna vozila, EU pruža subvencije i financijske poticaje za kupnju EV-a. Također, znatna sredstva ulažu se u razvoj infrastrukture za punjenje. Cilj je osigurati punionice svakih 60 km na glavnim prometnicama diljem EU do 2025. godine, čime se

uklanja jedan od najvećih izazova za širu prihvaćenost električnih vozila – nedostatak dostupne infrastrukture. Također, u okviru EU Green Deal-a, LCA analiza postaje ključan alat za procjenu stvarnog utjecaja električnih vozila na okoliš. LCA analiza ne uzima u obzir samo emisije tijekom vožnje, već i emisije nastale tijekom proizvodnje baterija, kao i emisije povezane s izvorima energije korištenim za punjenje. Ovo je osobito važno jer električna vozila ostvaruju puni potencijal smanjenja emisija samo kada se pune energijom iz obnovljivih izvora [11].

4. LCA ANALIZA ELEKTRIČNOG AUTOMOBILA

U posljednjih godina zabilježen je porast prodaje električnih vozila, što je i prikazano na slici 9.



Slika 9. Godišnja prodaja električnih automobila u svijetu [12]

Jasno je vidljiv stalni rast godišnje globalne prodaje električnih automobila od 2013. do 2023. godine. 2013. godine prodaja električnih vozila bila je gotovo zanemariva, s minimalnim brojem prodanih jedinica, već od 2018. godine primjetan je značajan porast. Ovaj trend naglo se povećao nakon 2021. godine, a vrhunac ovog rasta zabilježen je 2023. godine, kada je broj prodanih električnih vozila skoro dostigao 14 milijuna, što predstavlja dvostruko povećanje u usporedbi s 2021. godinom [12].

Upravo ovi podatci bitni su za provedbu LCA analize električnog automobila zbog toga što simboliziraju transformaciju automobilske industrije i prelazak na održivu mobilnost. Međutim, tek nakon provedene LCA analize moguće je objektivno procijeniti i razumjeti ukupni utjecaj električnih vozila na okoliš kroz sve faze njihovog životnog ciklusa.

4.1. Korišteni alati

U ovome radu korišten je OpenLCA softver namijenjen provođenju analize životnog ciklusa, analize toka materijala, kao i srodnih metoda procjene održivosti. Razvijen je od strane njemačke tvrtke GreenDelta. OpenLCA omogućava sveobuhvatnu procjenu okolišnog

utjecaja proizvoda, procesa ili usluga kroz cijeli njihov životni ciklus – od ekstrakcije sirovina, preko proizvodnje i korištenja, do kraja životnog vijeka i zbrinjavanja otpada. Softver podržava rad s raznim bazama podataka poput ELCD (eng. *European Reference Life Cycle Database*), Ecoinvent i drugih, čime korisnicima omogućava precizno modeliranje različitih scenarija i procesa. Za potrebe ovoga rada korištena je navedena literatura i ELCD baza podataka koja pruža visokokvalitetne i konzistentne podatke o životnom ciklusu proizvoda i procesa. ELCD baza podataka pokriva širok spektar industrijskih sektora i procesa te nudi detaljne podatke o materijalima i sirovinama, transportnih usluga, krajnjim proizvodima i procesu zbrinjavanja otpada i recikliranja. Besplatna je i dostupna za preuzimanje, čime omogućava široku upotrebu među istraživačima, studentima i industrijom [13]. OpenLCA softver uključuje fleksibilnost u modeliranju procesa, gdje korisnici mogu definirati ulazno-izlazne tokove, povezivati procese i kreirati kompleksne sustave proizvoda. Također, omogućuje vizualizaciju i analizu rezultata uključujući dijagrame i usporedne analize različitih scenarija. Zahvaljujući ovim mogućnostima, OpenLCA postao je jedan od najčešće korištenih alata za akademska istraživanja [13].

4.2. Definiranje cilja i opsega LCA analize

Cilj LCA analize biti će doprinos transparentnosti u vezi s emisijama ugljičnog dioksida (CO₂) električnih vozila. Pomoću ove analize identificirati će se faze životnog ciklusa vozila koje najviše doprinose emisijama CO₂, kako bi se omogućile informirane odluke o smanjenju klimatskog utjecaja. Time proizvođači i inženjeri mogu usmjeriti napore na smanjenje emisija kroz optimizaciju proizvodnih procesa, korištenje održivijih materijala ili poboljšanje energetske učinkovitosti.

Kako bi analiza bila precizna i relevantna, definirane su specifične karakteristike vozila koje se analizira:

- Vozilo: baterijsko električno vozilo (BEV), mase 1800 kg.
- Varijante baterija [14]:
 - LFP baterija (litij-željezo-fosfat) kapaciteta 51 kWh, mase 350 kg. Katoda (LiFePO₄) se sastoji od litija (2% mase), željeza (15% mase), fosfora (15% mase) i kisika, a anoda od grafita (10%). Prednosti ove baterije su dulji vijek trajanja, viša sigurnost (manji rizik od zapaljenja) i stabilnost pri višim temperaturama.

- NMC baterija (nikal-mangan-kobalt) kapaciteta 69 kWh, mase 450 kg. Katoda (LiNiMnCoO_2) se sastoji od litija (2% mase), nikla (20% mase), mangana (10% mase), kobalta (5% mase) i kisika, a anoda od grafita (15% mase). Omjeri nikla, mangana i kobalta mogu varirati pri čemu veći udio nikla povećava kapacitet, ali smanjuje sigurnost. Prednosti ove baterije su veći kapacitet i dulji domet vozila.

Opseg ove LCA analize definira granice sustava, korištene metode, pretpostavke i ograničenja. Analiza je usredotočena na procjenu emisija CO_2 tijekom cijelog životnog ciklusa vozila, od vađenja sirovina do kraja životnog vijeka.

Granice sustava uključuju sljedeće faze:

1. Vađenje i rafiniranje sirovina:

- Vađenje materijala poput aluminijskog i čelika.
- Vađenje materijala za izradu baterije.

2. Proizvodnja i sklapanje vozila:

- Proizvodnja i sklapanje vozila.
- Uključen je transport materijala od dobavljača do tvornice.

3. Faza korištenja vozila:

- Potrošnja električne energije tijekom vožnje na ukupno 200 000 km.
- Održavanje vozila (zamjena guma, brisača...).

4. Kraj životnog vijeka:

- Demontaža vozila, recikliranje materijala i obrada otpada.
- Transport vozila do reciklažnih centara.

Funkcionalna jedinica za ovu analizu je vozilo-kilometar (vkm), ona predstavlja udaljenost od jednog kilometra koju prijeđe vozilo. To jest prikazuje emisije na temelju prijeđenog kilometra ($\text{kg CO}_2\text{-eq/vkm}$). Time se dobiva precizna slika o učinkovitosti vozila tijekom vožnje. Na primjer, ako vozilo emitira $0,1 \text{ kg CO}_2\text{-eq/vkm}$, to znači da za svaki prijeđeni

kilometar vozilo emitira 100 grama CO₂ ekvivalenta. Time se omogućuje izravna usporedba s drugim vrstama vozila, uključujući vozila na fosilna goriva.

Glavne pretpostavke analize:

- Životni vijek vozila: Pretpostavlja se da vozilo ima životni vijek od 200 000 km tijekom 15 godina.
- Baterije: Pretpostavlja se da baterija traje cijeli životni vijek vozila.
- Recikliranje materijala: U obzir su uzeti udjeli recikliranog aluminijskog, čelika i plastike. Primjerice, 31% aluminijskog dolazi iz recikliranih izvora.

Ograničenja analize:

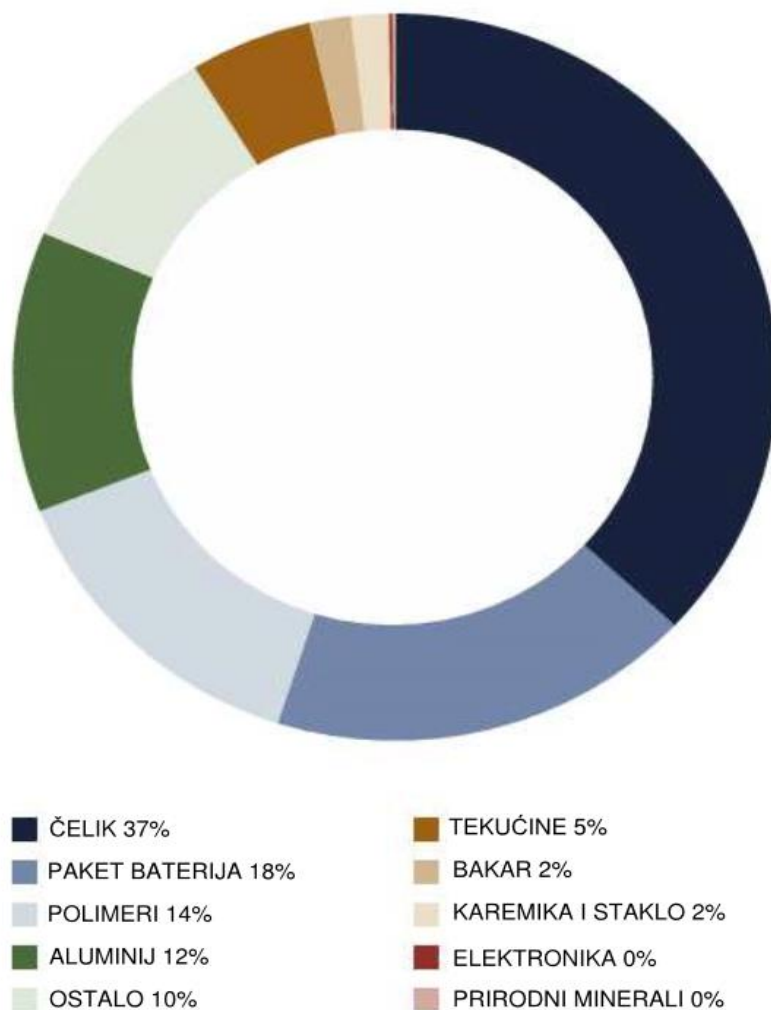
- Isključene kategorije:
 - Emisije povezane s izgradnjom infrastrukture (npr. punionice, ceste).
 - Kapitalna dobra (strojevi, oprema) korištena u proizvodnji.

4.3. Prikupljanje i analiza podataka za LCA analizu

Ova faza LCA analize obuhvaća prikupljanje svih podataka o ulazima i izlazima tijekom cijelog životnog ciklusa vozila. Inventar uključuje sve materijale, energiju i emisije povezane s proizvodnjom, korištenjem i recikliranjem vozila.

4.3.1. Proizvodnja materijala i rafiniranje

Proizvodnja materijala i njihovo rafiniranje predstavljaju ključnu fazu u analizi životnog ciklusa električnog vozila. Slika 10. prikazuje udjele kategorija materijala ukupne težine automobila.



Slika 10. Udjeli kategorija materijala ukupne težine automobila [7]

Kao što je i na slici 10 prikazano, aluminij je jedan od najznačajnijih materijala u konstrukciji vozila, čineći 12% ukupne mase vozila. Korišteni aluminij dolazi iz tri izvora [15]:

- Primarni aluminij: Čini 37% ukupne količine aluminija. Proizvodnja primarnog aluminija je energetski intenzivan proces koji uključuje vađenje boksita, rafinaciju u glinicu i elektrolitičku redukciju u čisti aluminij. Ovaj proces troši velike količine električne energije (15 kWh/kg proizvedenog aluminija), što rezultira visokom razinom emisija CO₂.

- Reciklirani aluminij: Čini 31% ukupne količine aluminija. Recikliranje aluminija znatno smanjuje potrošnju energije u usporedbi s primarnom proizvodnjom jer se za taljenje otpada koristi znatno manje energije (0,7 kWh/kg proizvedenog aluminija). Time se smanjuje i ukupni ugljični otisak vozila.
- Primarni aluminij proizveden s obnovljivom energijom: Čini 32% ukupne količine aluminija. Ova vrsta aluminija proizvedena je procesima koji koriste električnu energiju iz obnovljivih izvora, što dodatno smanjuje emisije stakleničkih plinova.

Važan je podatak da svi izvori aluminija korišteni za ovo vozilo dolaze iz Kine, zemlje koja još uvijek u velikoj mjeri ovisi o fosilnim gorivima. Time se povećava ugljični otisak povezan s transportom i proizvodnjom materijala. U konačnu analizu biti će uključen transport brodom.

Čelik čini najveći udio u strukturi vozila (slika 10.), s udjelom od 37% ukupne mase. Proces proizvodnje čelika obuhvaća sljedeće korake [7]:

- Proizvodnja sirovog čelika: Uključuje vađenje željezne rude, njeno taljenje u visokim pećima i preradu u valjani i pocinčani čelik (35 MJ/kg čelika).
- Reciklirani čelik: 17,5% čelika dolazi iz recikliranih izvora. Recikliranje čelika ima znatno niži ugljični otisak od primarne proizvodnje.

4.3.2. Proizvodnja i logistika

Proizvodnja vozila odvija se u modernim proizvodnim pogonima u kojima se koriste kombinacije električne energije i toplinske energije. Uključuju se emisije iz direktne potrošnje energije u tvornicama. S obzirom na nedostatak tih informacija, potrošena energija nadomjestit će se uzimanjem najveće moguće potrošene energije za svaki materijal prilikom rudarenja i rafinacije za baterije.

Baterijski paketi predstavljaju jedan od najvećih izvora emisija u proizvodnji materijala. Proizvodnja baterija uključuje više faza [10]:

- Vađenje sirovina: Uključuje rudarenje i rafinaciju ključnih materijala poput litija, nikla, kobalta i grafita. Ovi materijali se uglavnom vade u zemljama poput Konga (kobalt), Australije (litij) i Kine (grafit). Proces vađenja je energetski intenzivan proces u

kojem se troši 50-200 MJ/kg za navedene materijale. Uzima se 200 MJ/kg za svaki materijal.

- **Proizvodnja ćelija:** Aktivni materijali se prerađuju i kombiniraju u katodne i anodne materijale. NMC baterije koriste mješavinu nikal-mangan-kobalt, dok LFP baterije koriste litij-željezo-fosfat, koji ima niži ekološki otisak zbog izostanka kobalta.
- **Potrošnja energije:** Proizvodnja baterija je izuzetno energetska intenzivna, s procijenjenom potrošnjom energije od 75 kWh/kWh kapaciteta baterije. Za LFP bateriju iznosi 3825 kWh, dok za NMC bateriju iznosi 5175 kWh.

Za proizvodnju ostalih dijelova električnog automobila potrebno je 41,8 MJ/kg [16].

Logistika uključuje transport materijala do tvornica i dostavu gotovih vozila do krajnjih korisnika. Ova faza doprinosi ukupnim emisijama zbog potrošnje goriva i energije u transportnim procesima.

- **Transport materijala:** Sirovine i komponente se transportiraju iz različitih dijelova svijeta, uključujući Aziju, Europu i Australiju. Većina materijala dolazi iz Kine, čime se povećavaju emisije zbog dugih transportnih ruta.
- **Vrste transporta:** Koristi se kombinacija kopnenog, pomorskog i zračnog prijevoza. Pomorski prijevoz ima relativno nižu emisiju po jedinici transportirane mase, dok zračni prijevoz ima visoku razinu emisija.

4.3.3. Korištenje i održavanje

Faza korištenja vozila obuhvaća sve emisije i potrošnju energije povezane s vožnjom tijekom njegovog predviđenog životnog vijeka od 200 000 km. Ova faza uključuje potrošnju električne energije za pogon vozila, kao i emisije povezane s proizvodnjom te energije. Potrošnja energije za LFP baterije (51 kWh) iznosi 17,1 kWh/100 km, dok za NMC baterije (69 kWh) potrošnja energije iznosi 17,5 kWh/100 km [14].

Emisije u fazi korištenja značajno ovise o izvoru električne energije korištene za punjenje vozila (u OpenLCA softveru svaki izvor će biti posebno uključen pomoću ELCD-a):

- **Globalni energetska miks:** Uključuje visoki udio fosilnih goriva, kao što su ugljen i nafta, što značajno povećava emisije stakleničkih plinova. U globalnom prosjeku, fosilna

goriva često dominiraju energetskim miksom, što rezultira višim emisijama CO₂ tijekom punjenja električnog vozila.

- **Europski energetski miks:** Odražava viši udio obnovljivih izvora energije, poput vjetra, sunca i hidroenergije. Iako fosilna goriva još uvijek često doprinose ukupnoj proizvodnji energije, udio obnovljivih izvora značajno smanjuje ukupne emisije stakleničkih plinova u usporedbi s globalnim prosjekom. Rezultat je niži ugljični otisak tijekom faze korištenja vozila.
- **Energija iz vjetra:** Korištenje 100% obnovljive energije iz vjetra rezultira minimalnim emisijama stakleničkih plinova. Vjetroelektrane proizvode električnu energiju bez izravnih emisija CO₂, čime se faza korištenja vozila približava nultom ugljičnom otisku. Ovaj scenarij predstavlja optimalan pristup za minimizaciju okolišnog utjecaja električnih vozila.

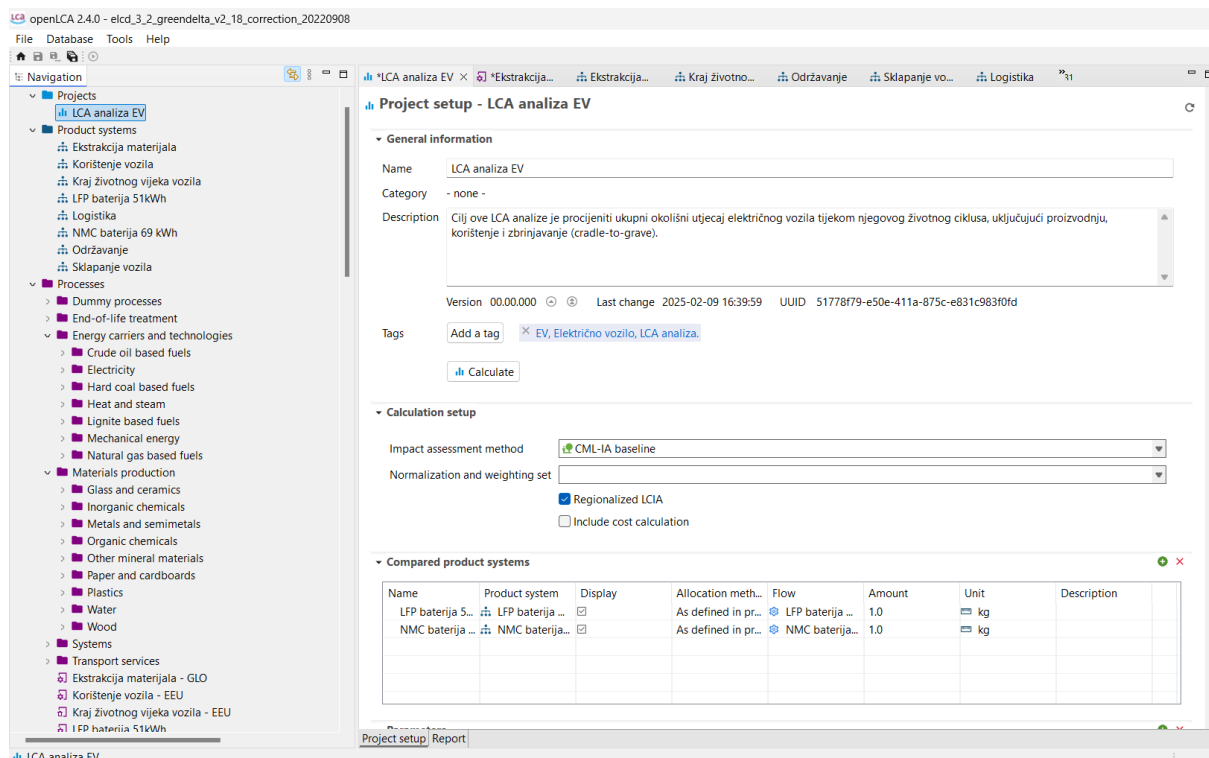
Održavanje tijekom njegovog predviđenog životnog vijeka od 15 godina i ukupne vožnje od 200 000 km uključuje zamjenu ključnih potrošnih dijelova i redovito servisiranje. Očekuje se zamjena 16 guma tijekom vijeka trajanja vozila. Gume su dizajnirane da traju oko 40 000 km u uvjetima EU, što zahtijeva četiri kompleta tijekom 200 000 km [17]. Pretpostavlja se da se gume ne mijenjaju neposredno prije kraja životnog vijeka vozila.

4.3.4. Kraj životnog vijeka vozila

Kraj životnog vijeka vozila obuhvaća procese demontaže i konačnog zbrinjavanja vozila nakon što više nije u upotrebi. Ova faza ima značajan utjecaj na okoliš kroz recikliranje i uporabu materijala. Demontaža je prvi korak koji uključuje ručno uklanjanje komponenti iz vozila, uključujući bateriju, kotače i gume, tekućine, ulja te filtere za ulje. Nakon demontaže, većina materijala iz vozila, šalje se na daljnju preradu i recikliranje. Reciklirani metali ponovno se koriste u industriji, čime se smanjuje potreba za vađenjem novih sirovina i smanjuje ekološki otisak.

4.4. Određivanje utjecaja na okoliš LCA analize

Nakon prikupljenih podataka i njihove analize, -podatke je potrebno unijeti u OpenLCA softver kako bi se odredio utjecaj na okoliš. Slika 11. prikazuje postavke projekta u softveru OpenLCA za provođenje LCA analize električnog vozila.

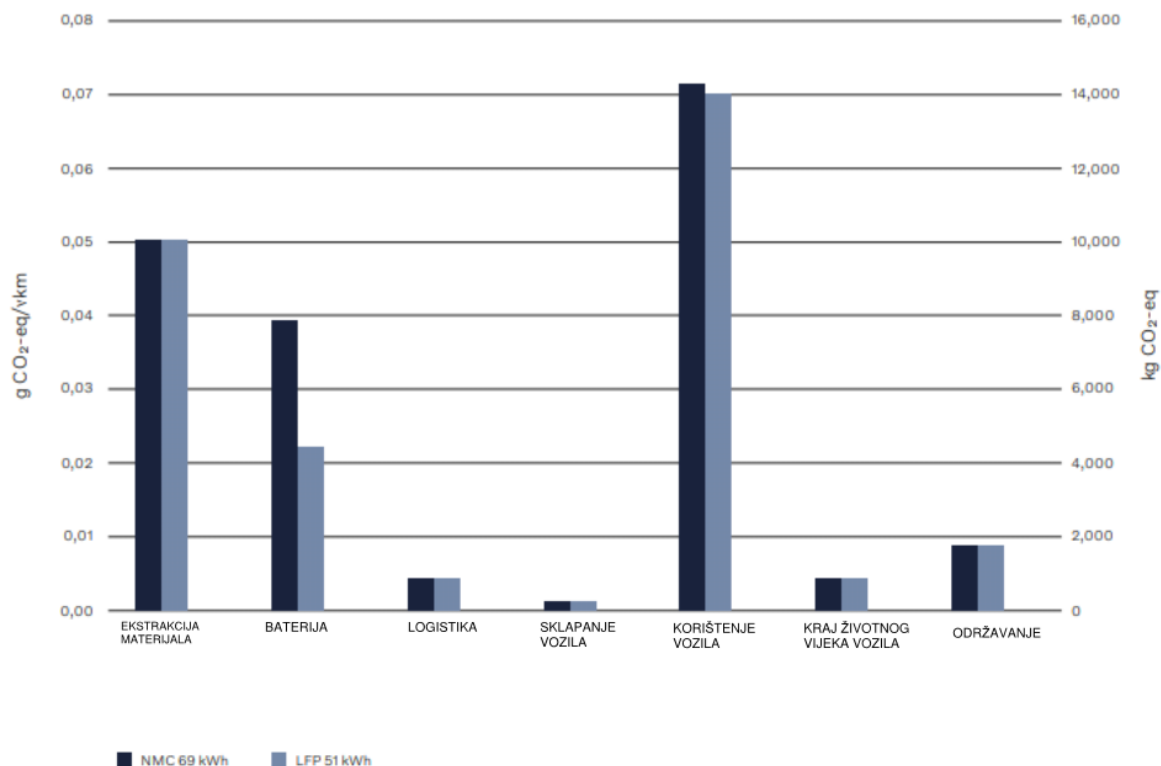


Slika 11. Postavke projekta u OpenLCA softveru

Na slici 11 prikazana je struktura projekta „LCA analiza EV“, koja uključuje sve potrebne kreirane „Sustave proizvoda (eng. *Product Systems*)“ i „Procese (eng. *Processes*)“ za analizu. Nakon izrade svakog „Procesa“ potrebno je bilo definirati inpute (npr. potrebne materijale i energiju) i outpute (npr. emisije i proizvodi) te ih povezati s bazom podataka ELCD. Zatim je trebalo odabrati metodu ocjenjivanja. U ovom slučaju korištena je CML metoda koja je jedna od najčešće korištenih metoda za procjenu utjecaja na okoliš u LCA analizama. Koristi se za kvantifikaciju i klasifikaciju okolišnih utjecaja koji proizlaze iz proizvodnih procesa, korištenja proizvoda i upravljanja otpadom. Fokusira se na međufazne pokazatelje (npr. količina emisija CO₂ ili kiselih plinova), što je potrebno u ovoj analizi. Također, kao što je i vidljivo na slici 11 u sekciji „Usporedba sustava proizvoda (eng. *Compared product systems*)“ definirani su sustavi proizvoda koji će se uspoređivati (LFP i NMC baterije).

4.4.1. Rezultati LCIA

Slika 12 prikazuje vizualizirane rezultate procjene utjecaja na okoliš za električno vozilo.



Slika 12. Prikaz rezultata procjene utjecaja na okoliš vozila s dvije različite baterije

Na prikazanoj slici 12 vizualizirani su rezultati procjene utjecaja na okoliš (LCIA) za električno vozilo, koristeći dvije različite vrste baterija:

- NMC baterija (69 kWh) - prikazana tamnijom bojom.
- LFP baterija (51 kWh) - prikazana svjetlijom bojom.

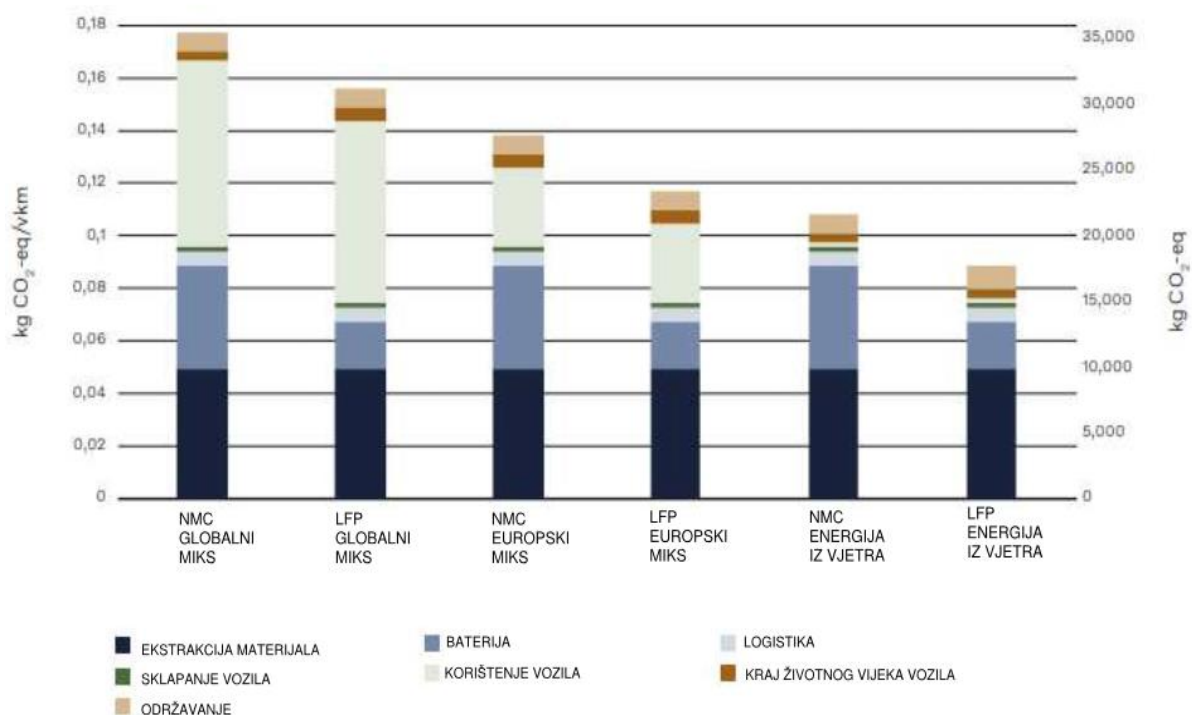
Kategorije prikazane na slici 12:

- Ekstrakcija materijala:
 - Ova faza uključuje vađenje i preradu sirovina potrebnih za izradu vozila i baterija.
 - Emisije CO₂-eq su približno iste za auto koristeći LFP ili NMC bateriju, oko 0,05 kg CO₂-eq/km.
- Baterija:
 - NMC 69 kWh baterija ima značajno veći ugljični otisak (~0,039 kg CO₂-eq/km) u usporedbi s LFP 51 kWh baterijom (~0,023 kg CO₂-eq/km).

- To je zbog veće energetske intenzivnosti proizvodnje NMC baterija koje sadrže nikal, mangan i kobalt.
- Logistika:
 - Utjecaj logistike, uključujući transport materijala i dijelova, relativno je nizak za obje vrste automobila, manji od 0,005 kg CO₂-eq/km.
- Sklapanje vozila:
 - Utjecaj procesa sklapanja vozila je sličan za obje verzije, minimalan u ukupnom LCA.
- Korištenje vozila:
 - Ova faza ima najveći doprinos ukupnom ugljičnom otisku, posebno kod vozila s NMC baterijom.
 - Za vozilo s NMC baterijom iznosi približno 0,072 kg CO₂-eq/km, dok je za vozilo s LFP baterijom malo manje.
 - Uključuje emisije iz potrošnje električne energije tijekom vožnje.
- Kraj životnog vijeka vozila:
 - Utjecaj na okoliš tijekom procesa recikliranja i zbrinjavanja vozila je nizak, ali značajan u ukupnom ciklusu.
- Održavanje:
 - Emisije povezane s održavanjem su također prikazane, slične za oba vozila.

Najveći utjecaj dolazi iz faze korištenja vozila, što znači da izbor izvora energije može značajno smanjiti ukupni ugljični otisak. NMC baterije imaju veći ugljični otisak u fazi proizvodnje u usporedbi s LFP baterijama, zbog složenije proizvodnje i korištenja resursa poput kobalta i nikla. LFP baterije su ekološki povoljnije u fazi proizvodnje, ali razlike u fazi korištenja su minimalne jer obje koriste električnu energiju sličnog izvora. Međutim, rezultati ove LCA analize upućuju na korištenje različitih izvora energije kako bi se smanjile emisije u fazi korištenja.

Slika 13 prikazuje rezultate procjene utjecaja na okoliš (LCIA) za električno vozilo, koristeći dvije različite vrste baterija uz tri različite kombinacije izvora energije.



Slika 13. Rezultati uz različite kombinacije izvora energije

Na slici 13 su prikazani ukupni ugljični otisci svih faza zajedno. Međutim, važno je obratiti pažnju na promjenu faze korištenja vozila uslijed različitih izvora energije, dok ostale faze ostaju jednake.

Rezultati i usporedbe sa slike 13:

- NMC Globalni miks:
 - Ukupni ugljični otisak približno iznosi 0,18 kg CO₂-eq/km.
 - Najveći doprinos ima faza korištenja vozila koja ima najviši udio zbog ovisnosti o globalnom miksiju energije, koji uključuje fosilna goriva.
- LFP Globalni miks:
 - Ukupni ugljični otisak približno iznosi 0,16 kg CO₂-eq/km.
 - Smanjenje emisija u usporedbi s NMC baterijom dolazi iz manje energetske intenzivne proizvodnje baterije i nižih emisija tijekom korištenja.
- NMC Europski miks:
 - Ukupni ugljični otisak približno iznosi 0,14 kg CO₂-eq/km.

- Smanjenje emisija za 23% u usporedbi s globalnim miksom, zahvaljujući većem udjelu obnovljivih izvora u europskom elektroenergetskom miks.
- LFP Europski miks:
 - Ukupni ugljični otisak približno iznosi 0,12 kg CO₂-eq/km.
 - 25% niže emisije u odnosu na globalni miks. LFP baterija u kombinaciji s europskim miksom dodatno smanjuje ugljični otisak.
- NMC Energija iz vjetra:
 - Ukupni ugljični otisak približno iznosi 0,11 kg CO₂-eq/km.
 - Smanjenje emisija za 39% u fazi korištenja vozila u odnosu na globalni miks. To potvrđuje koliko obnovljiva energija značajno smanjuje ugljični otisak.
- LFP Energija iz vjetra:
 - Ukupni ugljični otisak približno iznosi 0,09 kg CO₂-eq/km.
 - Najniži ukupni ugljični otisak među svim prikazanim kombinacijama. Smanjenje od 44% u odnosu na globalni miks pokazuje prednosti korištenja obnovljivih izvora energije i manje energetske zahtjevne baterije.

Rezultati jasno pokazuju da elektroenergetski miks ima ključnu ulogu u ukupnom ugljičnom otisku vozila. Najveći utjecaj na emisije stakleničkih plinova dolazi iz faze korištenja vozila, što znači da izbor izvora energije direktno utječe na okolišnu prihvatljivost električnog vozila. Korištenje globalnog elektroenergetskog miksa, koji uključuje velik udio fosilnih goriva, rezultira najvećim emisijama, dok prelazak na obnovljive izvore energije, poput energije iz vjetra, smanjuje emisije.

4.5. Diskusija

Rezultati LCA analize pokazuju da električno vozilo s dvije različite vrste baterija, NMC i LFP, ima različite utjecaje na okoliš, pri čemu su te razlike prvenstveno uzrokovane karakteristikama same baterije. Proizvodnja NMC baterije, zbog složenijeg procesa i korištenja materijala poput nikla i kobalta, ima značajno veći ekološki otisak u usporedbi s LFP baterijom, koja koristi manje energetske zahtjevne materijale. Kada se promatra cijeli životni ciklus vozila, model s LFP baterijom pokazuje najniži ukupni utjecaj na okoliš, što ga čini ekološki prihvatljivijom opcijom. Međutim, osim vrste baterije, važan čimbenik koji oblikuje ukupni ugljični otisak vozila je energetske miks korišten tijekom njegove uporabe.

Emisije stakleničkih plinova povezane s fazom korištenja vozila, koja uključuje potrošnju električne energije tijekom 15 godina i 200 000 kilometara, uvelike ovise o izvoru energije. Najveći utjecaj bilježi se kod korištenja globalnog energetskeg miksa, koji uključuje značajan udio fosilnih goriva, dok europski energetskeg miks, s većim udjelom obnovljivih izvora, smanjuje emisije. Najniži ekološki otisak zabilježen je kod korištenja energije iz vjetra, čime se dodatno potvrđuje važnost prelaska na obnovljive izvore energije.

Kako bi LCA analiza imala smisao i bila mjerodavna, važno ju je staviti u kontekst i usporediti s relevantnim podacima iz drugih izvora. U ovoj diskusiji analiziraju se rezultati LCA analize električnog vozila iz ovog rada u odnosu na podatke o emisijama CO₂eq/km za dizelske, benzinske i električne automobile iz znanstvenog članka u kojem su konačni rezultati [18]:

- Električno vozilo (baterija 40 kWh): 146 – 197 g CO₂eq/km
- Dizelski automobil: 286 g CO₂eq/km
- Benzinski automobil: 330 g CO₂eq/km

Rezultati ovog rada s obzirom na globalni energetskeg miks (160 – 180 g CO₂eq/km) nalaze se unutar raspona vrijednosti iz članka (146 – 197 g CO₂eq/km) koji je računat na osnovu globalnog energetskeg miksa. Razlika u rasponima može se pripisati različitim pretpostavkama u modeliranju, poput baze podataka i razlike u veličini baterija i njihovom kapacitetu. Također, u odnosu na konvencionalna vozila, električna vozila iz ovog rada prikazuju znatnu ekološku prednost. Električni automobil s LFP baterijom uz najštetniji izvor struje pruža 44% manje emisija u odnosu na dizelski automobil, dok iznosi u odnosu na benzinski automobil iznosi čak 51%. Usporedba rezultata s podacima iz znanstvenog članka naglašava ekološku prednost električnih vozila u odnosu na vozila s unutarnjim izgaranjem [18]. Unatoč emisijama iz proizvodnje baterija, električna vozila ostaju ekološki prihvatljivija opcija, a ključne prilike za daljnje smanjenje emisija leže u korištenju obnovljivih izvora energije za punjenje te optimizaciji procesa recikliranja baterija.

5. ZAKLJUČAK

Provedena analiza životnog ciklusa (LCA) električnog automobila pružila je cjelovit uvid u okolišne utjecaje vozila kroz sve faze životnog ciklusa, od ekstrakcije sirovina, proizvodnje, korištenja, do zbrinjavanja. Rezultati dobiveni korištenjem OpenLCA softvera, ELCD baze podataka i navedene literature jasno su identificirali kritične točke u ekološkom otisku električnih vozila te omogućili usporedbu s konvencionalnim vozilima na fosilna goriva.

Usporedba LFP i NMC baterija ukazala je na ekološke razlike među tehnologijama. LFP baterije su dugotrajnije i ekološki prihvatljivije, dok NMC baterije iako omogućuju veći domet, imaju viši okolišni otisak zbog korištenja rijetkih metala. Također, LCA analiza je pokazala da faza korištenja (eksploatacije) električnog automobila ima najveći udio u emisijama stakleničkih plinova, no taj utjecaj uvelike ovisi o izvoru električne energije. Usporedba s konvencionalnim vozilima jasno pokazuje ekološke prednosti električnih automobila, posebno kada se uzmu u obzir emisije tijekom korištenja. Iako proizvodnja električnih vozila, posebice baterija, ima veći početni ekološki otisak, ukupne emisije kroz životni vijek značajno su niže u usporedbi s vozilima na fosilna goriva. Kada se koriste obnovljivi izvori, ekološki otisak električnih vozila znatno je manji u usporedbi s konvencionalnim vozilima, čija potrošnja fosilnih goriva uzrokuje kontinuirane emisije tijekom cijelog vijeka eksploatacije.

Zaključno, LCA analiza potvrđuje da električna vozila imaju značajan potencijal za smanjenje ukupnih emisija stakleničkih plinova i negativnog utjecaja na okoliš, osobito kada se integriraju obnovljivi izvori energije i razvijaju održive strategije reciklaže. Usporedba s konvencionalnim vozilima dodatno ističe važnost tranzicije prema električnoj mobilnosti kao ključnog koraka prema održivom razvoju i smanjenju emisija u prometnom sektoru.

LITERATURA

- [1] Life Cycle Assessment: Principles and Practice, 2006.,
<http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P1000L86.PDF?Dockey=P1000L86.PDF>,
(pristupljeno 3.12.2024.)
- [2] Ashby, M.: Materials and Environment, Oxford OX2, 2009.
- [3] Hauschild, M. Z., Rosenbaum, R. K., Olsen, S. I.: Life Cycle Assessment: Theory and Practice, 2018.
- [4] Matthews, H. S., Hendrickson, C. T., Matthews, D. H.: Life Cycle Assessment: Quantitative Approaches for Decisions That Matter, 2015.
- [5] Simonen, K.: Life Cycle Assessment: Technical Design Series, 2014.
- [6] Giamborne, D. F.: Environmental Life Cycle Analysis, 1997.
- [7] San Miguel, G., Alvarez, S.: Life Cycle Assessment of Energy Systems, 2021.
- [8] Wilson, K. A.: Worth the Watt: A Brief History of the Electric Car, 1830 to Present,
<https://www.caranddriver.com/features/g43480930/history-of-electric-cars/>
(pristupljeno 12. 1. 2025.)
- [9] Santini, D. J.: Electric Vehicle Waves of History: Lessons Learned about Market Deployment of Electric Vehicles, 2011.
- [10] Bhattacharya, K.: Electric Vehicles: Charging Towards a Bright Future, 2020.
- [11] The European Green Deal, https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en, (pristupljeno 5.2.2025.)
- [12] Avodele, B. V.: Life Cycle Cost Assessment of Electric Vehicles: A Review and Bibliometric Analysis (2020), 2-3
- [13] UN Environment Programme: Database, <https://globalabc.org/database> (pristupljeno 6.2.2025.)
- [14] EV Battery Chemistry Outlook: High-Nickel NMC & LFP Cathode Types To Gain Market Share, NM & ASSBs Eventual Market Disruptors,
<https://www.fitchsolutions.com/bmi/autos/ev-battery-chemistry-outlook-high-nickel-nmc-lfp-cathode-types-gain-market-share-nm-assbs-eventual-market-disruptors-20-05-2021> (pristupljeno 7.2.2025.)
- [15] Dolić, N.: Metalurgija aluminija, Sisak, 2015.

-
- [16] Sajith, S.: Life cycle assessment of electric vehicles: a systematic review of literature (2023), 7
- [17] Koliko traju gume za auto?, <https://cijene-goriva.com.hr/blog/koliko-traju-gume-za-auto/> (pristupljeno 7.2.2025.)
- [18] Temporelli A., Carvalho M. L., Girardi P.: Life Cycle Assessment of Electric Vehicle Batteries: An Overview of Recent Literature (2020), 8