

Analiza emisija CO₂ za životni ciklus vozila s različitim pogonom

Ronik, Denis

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:700764>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-29**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Darko Kozarac

Denis Ronik

0035234542

Zagreb, 2025.

Izjavljujem da sam samostalno izradio ovaj rad uz primjenu znanja koja sam stekao tijekom studija i uz korištenje literature.

Zahvaljujem se svojem mentoru, prof. dr. sc. Darku Kozarcu, na korisnim savjetima, stručnoj pomoći i podršci tijekom izrade završnog rada.

Također izražavam zahvalnost svojoj obitelji i prijateljima na njihovoj podršci tijekom pisanja rada i tijekom mog obrazovanja.

Denis Ronik



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite
Povjerenstvo za završne i diplomске ispite studija strojarstva za smjerove:
Procesno-energetski, konstrukcijski, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodstrojarski

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

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Denis Ronik** JMBAG: **0035234542**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza emisija CO₂ za životni ciklus vozila s različitim pogonom.**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Analysis of Life Cycle CO₂ Emissions for Vehicles with Different Propulsion.**

Opis zadatka:

Kao odgovor na izazov globalnog zagrijavanja uzrokovanog emisijama stakleničkih plinova definirani su ciljevi smanjenja emisija u svim sektorima poslovanja. U sektoru transporta elektrifikacija voznog parka je identificirana kao važna karika u globalnom smanjenju emisija stakleničkih plinova. Električna vozila se u dijelu određivanja emisija proizvođača vozila tretiraju kao vozila sa nultom emisijom jer ne postoji drugačija metrika. S obzirom na značajno različitu tehnologiju izrade i eksploatacije električnih vozila u odnosu na vozila s drugom vrstom pogona emisije stakleničkih plinova koje se stvaraju u različitim životnim fazama su značajno različita. Stoga je potrebno definirati metodu usporedbe vozila s različitim pogonom u pogledu emisija stakleničkih plinova koja uključuje cijeli životni vijek vozila.

Ovim zadatkom potrebno je izraditi proračun emisija CO₂ metodom analize životnog ciklusa vozila (Life Cycle Analysis) za vozila s električnim pogonom, hibridnim pogonom i pogonom s motorom s unutarnjim izgaranjem.

U radu je stoga potrebno:

Pripremiti izračun emisija CO₂ analizom životnog ciklusa za električno vozilo s dometom od 400 km.

Pripremiti izračun emisija CO₂ analizom životnog ciklusa za plug-in hibridno vozilo s električnim dometom od 100 km

Pripremiti izračun emisija CO₂ analizom životnog ciklusa za vozilo s motorom s unutarnjim izgaranjem

Usporediti dobivene rezultate za scenarij korištenja vozila u EU, SAD i Kini za period 5 i 10 god uz prosječnu vožnju od 20.000 km godišnje

Pri izradi se treba pridržavati pravila za izradu završnog rada. U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

30. 11. 2024.

1. rok: 20. i 21. 2. 2025.

1. rok: 24. 2. – 28. 2. 2025.

2. rok: 10. i 11. 7. 2025.

2. rok: 15. 7. – 18. 7. 2025.

3. rok: 18. i 19. 9. 2025.

3. rok: 22. 9. – 26. 9. 2025.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Darko Kozarac

Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

SADRŽAJ

SADRŽAJ.....	II
POPIS SLIKA.....	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA.....	IV
SAŽETAK.....	IV
SUMMARY.....	V
1. Uvod.....	1
2. Faze životnog ciklusa vozila.....	3
2.1 Prva faza - Definiranje svrhe i ciljeva analize.....	3
2.2 Druga faza – analiza inventara.....	3
2.3 Treća faza – Procjena utjecaja na okoliš.....	4
2.4 Četvrta faza – Analiza dobivenih rezultata.....	5
2.5 Važnost LCA metode za procjenu emisija CO ₂	6
3. Vrste vozila i njihov pogon.....	8
3.1 Električna vozila (EV).....	8
3.2 Plug-in hibridna vozila (PHEV).....	14
3.3 Vozila s motorom na fosilna goriva (ICEV).....	17
3.3.1.1 Dieslov motor.....	19
3.3.1.2 Ottov motor.....	20
4. Izračun emisija CO ₂ za tri vrste vozila.....	22
4.1 Proračun.....	23
4.1.1.1 Električna vozila (EV).....	23
4.1.1.2 Plug-in hibridno vozila (PHEV).....	30
4.1.1.3 Konvencionalna vozila (ICE).....	37
5. Usporedba CO ₂ emisija za različite vrste vozila.....	41
6. Zaključak.....	47
LITERATURA.....	48

POPIS SLIKA

Slika 1. Emisije CO ₂ nastale izgaranjem fosilnih goriva.....	1
Slika 2. Prikaz LCA procesa kroz faze.....	2
Slika 3. Shematski prikaz sustava LCA.....	4
Slika 4. Električno vozilo Tesla.....	8
Slika 5. Ford Model T.....	9
Slika 6. Prikaz baterije za električno vozilo.....	10
Slika 7. Prikaz punjenja baterije električnog vozila.....	11
Slika 8. Prikaz dijelova električnog vozila.....	12
Slika 9. Plug-in hibridno vozilo (PHEV).....	14
Slika 10. Motor s unutarnjim izgaranjem za plug-in hibridno vozilo.....	15
Slika 11. Punjenje plug-in hibridnog vozila.....	15
Slika 12. Lenoirov plinski motor.....	17
Slika 13. Rudolf Diesel.....	19
Slika 14. Dieslov motor.....	19
Slika 15. Nicolaus August Otto.....	20
Slika 16. Ottov motor.....	20
Slika 17. Tesla Model 3.....	23
Slika 18. Kapacitet baterije i emisije CO ₂ za BEV i ICEV vozilo.....	25
Slika 19. Volkswagen Passat GTE.....	30
Slika 20. Volkswagen Passat 2.0 TSI.....	37
Slika 21. Usporedba CO ₂ emisija za električno vozilo (EV).....	42
Slika 22. Usporedba CO ₂ emisija za plug-in hibridno vozilo (PHEV).....	43
Slika 23. Usporedba CO ₂ emisija za konvencionalno vozilo (ICEV).....	43
Slika 24. Usporedba CO ₂ emisija za EU.....	45
Slika 25. Usporedba CO ₂ emisija za SAD.....	45
Slika 26. Usporedba CO ₂ emisija za Kinu.....	46

POPIS TABLICA

Tablica 1. Glavne faze LCA analize.....	2
Tablica 2. Tehnički podaci električnog vozila Tesla model 3.....	23
Tablica 3. Tehnički podaci za plug-in hibridno vozilo Volkswagen Passat GTE.....	30
Tablica 4. Tehnički podaci konvencionalnog vozila Volkswagen Passat 2.0 TSI.....	37
Tablica 5. Usporedba CO ₂ emisija za scenarij korištenja vozila u EU, SAD-u i Kini.....	41

POPIS KRATICA

Oznaka	Jedinica	Opis
EV	/	Električno vozilo
PHEV	/	Plug-in hibridno vozilo
ICEV	/	Konvencionalno vozilo

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$E_{baterija}$	kWh	kapacitet baterije
$E_{proizvodnja, baterije}$	kWh	potrošnja električne energije proizvodnje baterije
$E_{proizvodnja, ostalih dijelova}$	kWh	potrošnja električne energije proizvodnje ostalih dijelova
$E_{proizvodnja}$	kWh	potrošnja električne energije proizvodnje
E_{ukupno}	kWh	ukupna potrošnja električne energije
$E_{uporaba}$	kWh	potrošnja električne energije pri uporabi
$E_{reciklaža,}$	kWh	potrošnja električne energije pri reciklaži
$E_{reciklaža, baterije}$	kWh	potrošnja električne energije reciklaže baterije
$E_{reciklaža, ostalih dijelova}$	kWh	potrošnja električne energije reciklaže ostalih dijelova

E_{kWh}	kg CO ₂ /kWh	prosječna emisija CO ₂ po kWh električne energije
$D_{električna\ energija}$	km	prosječna godišnja vožnja na električnu energiju
D_{gorivo}	km	prosječna godišnja vožnja na gorivo
$m_{baterije}$	kg	masa baterije
m_{vozila}	kg	masa vozila
$P_{električna}$	kWh/100 km	potrošnja električne energije
x	km	domet električnog vozila

Sažetak

Ovaj rad analizira emisije ugljikovog dioksida (CO₂) kroz cijeli životni ciklus različitih vrsta vozila: električnih vozila, plug-in hibridnih vozila i vozila s motorima s unutarnjim izgaranjem. Korištenjem analize životnog ciklusa (LCA), procjenjuju se emisije tijekom faze proizvodnje, uporabe i reciklaže vozila. U analizu su uključeni pojedini koncepti uporabe u EU, SAD-u i Kini, za razdoblja od 5 i 10 godina te prosječnu godišnju vožnju od 20 000 kilometara. Rezultati pokazuju da električna vozila imaju najniže emisije tijekom uporabe, posebno kada se električna energija dobiva iz obnovljivih izvora. Ipak, značajne emisije povezane su s proizvodnjom baterija i potrebnom reciklažom. Plug-in hibridna vozila pružaju ravnotežu između niskih emisija tijekom vožnje na električni pogon i mogućnosti korištenja fosilnih goriva. Vozila s motorima s unutarnjim izgaranjem imaju najveći izvor emisija zbog visokog udjela fosilnih goriva tijekom vožnje.

Rad naglašava potrebu za prelaskom na obnovljive izvore energije, poboljšanjem tehnologija baterija i razvojem održive prometne infrastrukture. U radu su iznesene preporuke za daljnja istraživanja koja bi mogla ubrzati smanjenje zagađivanja okoliša koji je uzrokovan prometom.

Ključne riječi: emisije ugljikovog dioksida (CO₂), (LCA) analiza životnog ciklusa vozila, električna vozila, emisije uzrokovane proizvodnjom baterije, utjecaj tehnologije na okoliš

Summary

This paper analyzes carbon dioxide (CO₂) emissions throughout the entire lifecycle of various types of vehicles: electric vehicles, plug-in hybrid vehicles, and vehicles with internal combustion engines. By utilizing life cycle analysis (LCA), emissions are assessed during the production, usage, and recycling phases of the vehicles. The analysis incorporates usage patterns in the EU, the US, and China over periods of 5 and 10 years, with an average annual driving distance of 20 000 kilometers.

The results show that electric vehicles have the lowest emissions during use, especially when electricity is sourced from renewable energy. However, significant emissions are associated with battery production and the necessary recycling process. Plug-in hybrid vehicles provide a balance between low emissions during electric driving and the flexibility to use fossil fuels. Vehicles with internal combustion engines have the highest emissions due to the significant reliance on fossil fuels during operation.

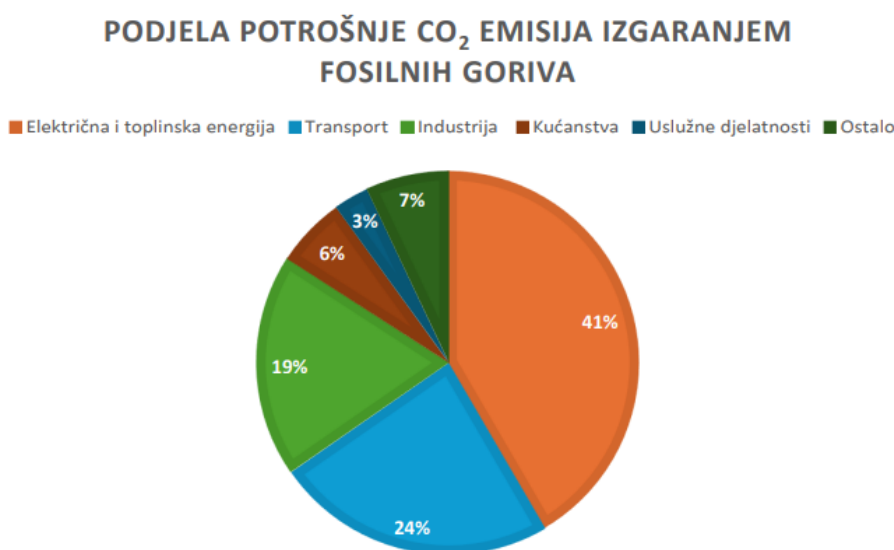
The paper emphasizes the need to transition to renewable energy sources, improve battery technologies, and develop sustainable transportation infrastructure. It also offers recommendations for further research that could accelerate the reduction of environmental pollution caused by transportation.

Key words: carbon dioxide (CO₂) emissions, Life Cycle Assessment (LCA) of vehicles, electric vehicles, emissions caused by battery production, environmental impact of technology.

1. Uvod

Zagađenje okoliša i klimatske promjene bitno utječu na globalno zagrijavanje. Sve veće emisije stakleničkih plinova, poput ugljikovog dioksida (CO₂), značajno utječu na globalno zatopljenje te stvaraju posljedice poput porasta prosječne temperature, podizanja razine mora i topljenja ledenjaka. Promet kao značajan izvor emisija CO₂, trebao bi smanjiti zagađivanje okoliša. Elektrifikacija voznog parka i uvođenje drugačijih pogonskih sustava prepoznati su kao bitni koraci prema boljoj budućnosti. Električna vozila se češće predstavljaju kao ekološki prihvatljiva u odnosu na vozila na fosilna goriva. Njihova glavna prednost je da tijekom vožnje ne emitiraju stakleničke plinove, što ih čini pogodnima za smanjenje zagađenja zraka, posebno u gradovima. Međutim, promatranje samo emisija tijekom vožnje nije dovoljno za procjenu njihovog ukupnog utjecaja na okoliš. Potrebno je uzeti u obzir emisije koje nastaju tijekom proizvodnje, korištenja i reciklaže tih vozila.

Prema podacima Međunarodne agencije za energiju, objavljeno 2017. godine, u transportnom sektoru bilo je proizvedeno čak 24%, slika 1, sveukupnih emisija stakleničkih plinova od čega je 74% uzrokovano cestovnim transportom. [1] U prometnom sektoru emisije CO₂ su porasle za 33,5 % u razdoblju između 1990. i 2019. godine prema podacima Europske agencije za okoliš. [2] Kako bi se riješile ogromne emisije CO₂ uzrokovane prometom traže se rješenja za budućnost transporta i ovisnost transporta o fosilnim gorivima. U pogledu emisija ugljikovog dioksida, automobilska industrija sve se više orijentira prema električnim vozilima.



Slika 1. Emisije CO₂ nastale izgaranjem fosilnih goriva

Cilj ovog rada je usporediti utjecaj emisija CO₂ tijekom životnog ciklusa vozila s različitim vrstama pogona. Koristimo metodu analize životnog ciklusa (LCA) za izračun ukupnih emisija CO₂ u svim fazama života jednog vozila. Na taj način mogu se usporediti različite vrste pogona, kao što su električni, hibridni i motori s unutarnjim izgaranjem. Svaka tehnologija ima svoje prednosti, ali i nedostatke u pogledu emisija i održivosti. Kroz usporedbu tih tehnologija, pružit će se uvid u njihov ukupni utjecaj na okoliš i pojedina rješenja kako je moguće smanjiti emisije stakleničkih plinova. Važno je analizirati emisije CO₂ tijekom životnog ciklusa vozila zbog razumijevanja njihovog ukupnog utjecaja na okoliš.

LCA (Life Cycle Assessment) je metoda koja proučava kako proizvod utječe na okoliš kroz sve faze, od početka proizvodnje, kroz uporabu, pa sve do njegove reciklaže, slika 2.



Slika 2. Prikaz LCA procesa kroz faze

Ova metoda se razvila tijekom 1960-ih godina, kada je Harold Smith predstavio način izračuna energetske potrošnje za proizvodnju kemijskih proizvoda na Svjetskoj energetskej konferenciji 1963. godine.

Proizvod se prati od trenutka kad se sirovine uzimaju za njegovu izradu, kroz sve faze proizvodnje i uporabe, pa sve do kraja kada se proizvod reciklira ili odlaže.

Jedna od prvih primjena LCA-a bio je projekt Coca-Cole 1969. godine, gdje su proučavali ekološke utjecaje svojih proizvoda. Ova istraživanja dovela su do smanjenja troškova ambalaže jer je razvijen sustav povratne ambalaže, što je smanjilo potrebu za novim ambalažama za čak 90%.

LCA analizira sve negativne utjecaje proizvoda na okoliš, uključujući energiju potrebnu za dobivanje sirovina, proizvodnju, transport, te sve nuspojave korištenja proizvoda.

Ova metoda omogućava bolje praćenje potrošnje resursa i smanjenje negativnih utjecaja na okoliš.

Ključna obilježja LCA metode su:

- Analizira se održivost proizvodnje kada se koriste prirodni materijali
- Proučava se kako proizvodnja utječe na okoliš, te kako korištenje proizvoda može štetiti okolišu
- LCA se bavi i načinima zbrinjavanja proizvoda, bilo kroz odlaganje, spaljivanje ili reciklažu

Za što preciznije i korisnije rezultate, analiza se provodi kroz nekoliko osnovnih faza. Te faze pomažu u stvaranju smjernica za daljnje aktivnosti i bolje planiranje.

Tablica 1. Glavne faze LCA analize

Faza LCA analize	Glavno obilježje faze
Prva faza	Definiranje svrhe i ciljeva analize
Druga faza	Analiza inventara
Treća faza	Procjena utjecaja na okoliš
Četvrta faza	Analiza dobivenih rezultata

2. Faze životnog ciklusa vozila

2.1 Prva faza - Definiranje svrhe i ciljeva analize

Prva faza LCA analize važna je jer postavlja temelje za cijeli proces. U ovoj fazi potrebno je jasno definirati svrhu analize i ciljeve koje želimo postići. To znači da treba biti jasno zašto se analiza provodi i što se time želi postići. Također, treba navesti kome će biti dostavljeni rezultati, jer to može utjecati na način analize i primjene tih podataka.

Prema ISO standardima, ova faza je ključna jer zahtijeva precizno definiranje ciljeva i analize. Bez toga, cijela analiza može biti nepouzdana. Osim toga, u ovoj fazi se definiraju tehnički detalji koji će oblikovati daljnje korake. Jedan od tih elemenata je funkcionalna jedinica, koja opisuje proizvod ili uslugu koja se analizira i pomaže u usporedbi različitih opcija. Također se postavljaju granice sustava, što znači da se odabiru procesi koji će biti uključeni u analizu, dok se drugi isključuju. Na kraju, u ovoj fazi se također navode sve pretpostavke i ograničenja koja mogu utjecati na tok analize i rezultate.

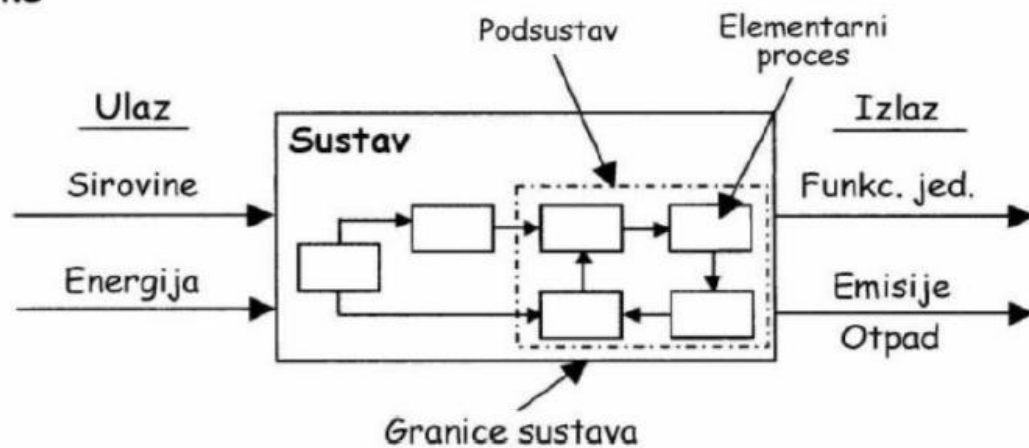
2.2 Druga faza – analiza inventara

Faza inventara životnog ciklusa je korak u kojem se prikupljaju svi važni podaci potrebni za analizu utjecaja proizvoda na okoliš. Ovdje se broje i mjere svi ulazi i izlazi u sustavu proizvoda. Ulazi mogu biti sirovine, materijali ili energija, ovisno o vrsti proizvoda, dok izlazi uključuju emisije u zrak, vodu i tlo, kao i otpad koji nastaje tijekom proizvodnje ili korištenja proizvoda.

U ovoj fazi pažljivo se prati svaki tok materijala i energije kroz sustav proizvoda. Prikupljaju se podaci o količini sirovina potrebnih za proizvodnju, energiju koja se koristi, te otpadnim tvarima koje se ispuštaju u okoliš. Granice sustava već su postavljene u prethodnoj fazi analize, pa su svi podaci prikupljeni unutar tih granica.

Sustav je podijeljen u nekoliko manjih dijelova, nazvanih podsustavi, kako bi se lakše pratili svi tokovi. Izlazi iz sustava uključuju funkcionalne jedinice, što označava osnovne mjere učinka proizvoda, te emisije koje nastaju u različitim fazama proizvodnje. Također, važan izlazni faktor je otpad, koji uključuje materijale koji su odbačeni ili koji ne mogu biti reciklirani ili ponovno iskorišteni, slika 3.

Okoliš



Slika 3. Shematski prikaz sustava LCA

Prikupljanje svih potrebnih podataka za LCA analizu može biti vrlo zahtjevno jer se moraju prikupiti i kvantitativni i kvalitativni podaci. Ulazne informacije, poput materijala i energije potrebne za proizvod, lakše je prikupiti dok su izlazni podaci složeniji i zahtijevaju više analiziranja.

2.3 Treća faza – Procjena utjecaja na okoliš

Treća faza LCA metode fokusira se na procjenu utjecaja proizvoda na okoliš. U ovoj fazi cilj je bolje razumjeti na koji način proizvod utječe na okoliš na temelju podataka o potrošnji resursa i emisijama koje nastaju tijekom njegovog životnog ciklusa. Ovaj korak pomaže otkriti sve negativne posljedice proizvoda na okoliš.

Ova faza također omogućuje procjenu koliko je proizvod štetan u različitim fazama njegovog životnog ciklusa, čime se omogućuje usporedba s drugim proizvodima. Na primjer, možemo analizirati potrošnju goriva u motoru vozila i izračunati koliko štete proizvod izaziva na temelju emisija koje motor proizvodi. Ako znamo sastav goriva i prosječnu potrošnju u jednoj satnoj vožnji, možemo izračunati koliko zagađuje zrak ili doprinosi globalnom zagrijavanju. Iako precizni brojevi često nisu lako dostupni, koristi se približna vrijednost koja daje dobar uvid u ukupne utjecaje.

U ovoj fazi uzimaju se u obzir dva ključna elementa:

1. **Obvezni elementi:** Ovo se odnosi na razvrstavanje i analizu podataka dobivenih u prethodnoj fazi inventara životnog ciklusa. Podaci se obrađuju te omogućuju mjerenje utjecaja resursa, emisija i otpada.
2. **Izborni elementi:** Ovdje se primjenjuju dvije tehnike. Prva je **normalizacija**, koja omogućuje usporedbu različitih utjecaja kako bi se lakše razumjeli njihovi relativni učinci. Druga tehnika je **grupiranje**, koja razdvaja utjecaje na okoliš u različite kategorije, što pomaže u boljem razumijevanju specifičnih učinaka na okoliš.

Ove dvije tehnike omogućuju bolje razumijevanje utjecaja proizvoda na okoliš i pomažu u donošenju boljih odluka o tome koji proizvod ima manji negativan utjecaj na okoliš.

2.4 Četvrta faza – Analiza dobivenih rezultata

Posljednja faza LCA postupka uključuje iznošenje rezultata koji su dobiveni tijekom analize. Ovdje se obrađuju svi podaci i analiziraju rezultati kako bi se razumjeli utjecaji proizvoda na okoliš. Ova faza također obuhvaća objašnjenje ograničenja procesa i pružanje povratnih informacija na temelju svih prikupljenih podataka.

Rezultati se obično prikazuju u nekoliko ključnih koraka:

1. **Identifikacija značajnih problema:** Ovdje se analiziraju rezultati koji su značajno izvan postavljenih granica prihvatljivih vrijednosti. Ti problemi mogu imati ozbiljne negativne učinke koje proizvod ili proces ima na okoliš. Otkrivanje tih problema pomaže u daljnjoj analizi i omogućuje lakše donošenje odluka u budućim koracima analize. Ovaj dio procesa pomaže u strukturiranju daljnjeg vrednovanja podataka.
2. **Vrednovanje rezultata:** Nastoji se povećati povjerenje u dobivene rezultate analize. Razmatraju se svi podaci koji su prikupljeni, a rezultati iz prve faze analiziraju se kako bi se utvrdila njihova pouzdanost. U ovoj fazi vrlo je važno osigurati da su svi relevantni podaci uključeni i da nijedna bitna informacija nije izostavljena. Svaka informacija koja može imati važan utjecaj na konačne zaključke mora biti uzeta u obzir kako bi se osigurala točnost i cjelovitost analize.

- Zaključivanje analize:** Na temelju svih prethodnih rezultata, donose se konačni zaključci koji obuhvaćaju cijeli LCA postupak. Ovdje se sažimaju svi podaci i otkrivaju problemi koji utječu na okoliš. Zaključci koji se izvode na temelju ove analize služe kao temelj za donošenje odluka o daljnjim koracima, poboljšanjima proizvoda ili promjenama u proizvodnim procesima kako bi se smanjio negativni utjecaj na okoliš. Ova faza LCA postupka bitna je jer omogućuje donošenje odluka o tome kako unaprijediti proizvode ili procese u cilju smanjenja njihove štetnosti za okoliš.

Korisni alati kojima je moguće provođenje LCA analize su: Sima Pro (Pre Consultants BV), EcoCalculator (The Athena Institute), ECO-it 1.3 (Pre Consultants BV), Gabi 4 (PE Product Engineering GmbH), LCAIT 4 (Chalmers Industriteknik Ekologik).

2.5 Važnost LCA metode za procjenu emisija CO₂

LCA (Life Cycle Assessment) metoda je važna za procjenu emisija CO₂ jer omogućuje analizu svih faza tijekom života proizvoda, od dobivanja sirovina do reciklaže na kraju životnog ciklusa. Ovaj pristup pomaže u razumijevanju kako svaki korak doprinosi emisijama CO₂, čime omogućuje precizno mjerenje utjecaja proizvoda na okoliš.

LCA metoda je važna za procjenu emisija CO₂ jer analizira životni ciklus proizvoda i uzima u obzir sve faze, od proizvodnje do reciklaže. Time se omogućuje procjena emisija CO₂ u svakoj fazi. To je važno jer se emisije mogu pojaviti u različitim fazama, a LCA pomaže u njihovu prepoznavanju.

LCA pomaže identificirati koje faze proizvodnje ili uporabe proizvoda najviše doprinose emisijama CO₂. Transport, proizvodnja energije ili reciklaža mogu biti značajni izvori emisija. Moguće je usporediti emisije CO₂ različitih proizvoda ili usluga i odabrati onu opciju koja ima manji utjecaj na okoliš. To pomaže u smanjenju emisija na globalnoj razini.

LCA pruža konkretne podatke o emisijama CO₂ temeljenima na stvarnim podacima o energiji, materijalima i procesima. Ti podaci pomažu tvrtkama i organizacijama da donesu bolje odluke o smanjenju emisija. Kroz analizu svakog koraka životnog ciklusa proizvoda, LCA omogućuje prepoznavanje načina za smanjenje emisija CO₂. Na temelju tih podataka, moguće je uvesti promjene koje će smanjiti emisije i doprinijeti smanjenu klimatskih promjena.

Međutim, postoje izazovi jer prikupljanje podataka može biti skupo, a rezultati nisu uvijek potpuno precizni. Ipak, LCA je bitna metoda u dizajniranju održivijih proizvoda i usluga.

3. Vrste vozila i njihov pogon

3.1 Električna vozila (EV)



Slika 4. Električno vozilo Tesla

Povijest električnih vozila započinje krajem 19. stoljeća. Godine 1881. francuski izumitelj Gustave Trouvé predstavio je električnu trokolicu, što se smatra prvim električnim vozilom. U Europi su započeli prvi pokušaji razvoja takvih vozila, gdje su izumitelji poput Roberta Andersona konstruirali prve prototipe s električnim pogonom. Zbog ograničene tehnologije baterija, ta su vozila imala vrlo mali doseg. Krajem 19. i početkom 20. stoljeća električni automobili stekli su popularnost u Americi i Europi, posebno među bogatijim slojevima društva. Modeli poput Columbia Electric bili su cijenjeni zbog tišeg rada, lakšeg upravljanja i manje fizičkog napora u vožnji u usporedbi s parnim ili benzinskim vozilima.

Henry Ford bio je osnivač poznate automobilske kompanije Ford, te je zaustavio razvoj električnih automobila. Iskoristio je bogata američka nalazišta nafte kako bi konstruirao Ford Model T – vozilo s benzinskim motorom, slika 5. Model je bio opremljen elektropokretačem koji je olakšao njegovo korištenje i omogućio da postane dostupan široj populaciji. Popularnost automobila na benzinski pogon bila je pristupačna cijena te su zbog toga počeli dominirati na tržištu. Nasuprot tome, električni automobili bili su znatno skuplji, što ih je činilo manje dostupnima većini ljudi.



Slika 5. Ford Model T

Tehnologija baterija bila je ograničena, a električna vozila nisu bila dovoljno praktična za širu upotrebu. U 1990-ima, General Motors predstavio je GM EV1, prvi potpuno električni automobil koji je proizvodio veliki proizvođač, ali je proizvodnja ubrzo obustavljena zbog nedostatka interesa i tehničkih problema s baterijama.

Veliki preokret dogodio se 2008. godine s lansiranjem Tesla Roadster modela, koji je omogućio vožnju na više od 300 kilometara na jednom punjenju baterije. Tesla Motors bila je pionir u električnim vozilima, a njihov uspjeh postavio je nove standarde za ostatak industrije. Danas, mnogi veliki automobilski proizvođači, poput Tesle, Nissana, BMW-a i Chevroleta, proizvode električna vozila koja postaju sve popularnija među potrošačima.

Električna vozila danas imaju važnu ulogu u održivom transportu. Iako još uvijek postoje izazovi, poput cijene vozila i dostupnosti punionica, napredak u tehnologiji baterija i poboljšanja u infrastrukturi za punjenje pomažu u njihovom daljnjem širenju. Električna vozila postaju neizostavan dio budućnosti transporta, sa sve većim naglaskom na smanjenje zagađenja i borbu protiv klimatskih promjena.

Električna vozila (EV) koriste električnu energiju umjesto fosilnih goriva poput benzina ili dizela. Ova vozila koriste električni motor koji se napaja iz baterija, što znači da ne stvaraju emisiju štetnih plinova tijekom vožnje, a to ovisi kako je proizvedena električna energija, čime značajno smanjuju zagađenje zraka. To ih čini ekološki prihvatljivijom opcijom za prijevoz. Osim toga, električna vozila zahtijevaju manje održavanja jer nemaju motor s unutarnjim izgaranjem, ispušni sustav niti mnoge druge komponente koje zahtijevaju redovito održavanje.

Električna vozila sastoje se od nekoliko ključnih komponenata, uključujući bateriju, električni motor i punjač. Baterija je ključna jer pohranjuje električnu energiju koja pokreće vozilo. Danas se najčešće koriste litij-ionske baterije, slika 6., jer su lagane, dugotrajne i omogućuju duži doseg. Automobili koji koriste litij-ionske baterije mogu imati u sebi oko 8 kg litija, 35 kg nikla, 20 kg mangana i 14 kg kobalta, ovisno o modelu. Ove baterije imaju veliki kapacitet za punjenje i pražnjenje te dug vijek trajanja, zbog čega se očekuje da će dominirati automobilskom industrijom. Iako su skupe, cijene litij-ionskih baterija danas su čak 30 puta niže nego kada su prvi put uvedene na tržište kao male prijenosne baterije početkom 90-ih godina. Punjenje i pražnjenje baterije sastoji se u prijenosu litijevih iona s jedne elektrode na drugu.

S druge strane, olovne baterije su najstariji tip punjivih baterija. Jeftine su, ali imaju nižu gustoću energije i manji broj ciklusa punjenja i pražnjenja. Također, njihov kapacitet brzo opada pri niskim temperaturama, a punjenje zahtijeva upotrebu struje koja ne prelazi 1/10 kapaciteta, što čini punjenje sporim.



Slika 6. Prikaz baterije za električno vozilo

Potpuno električna vozila (BEV) koriste elektromotor umjesto motora s unutarnjim izgaranjem. Energiju za pokretanje uzimaju iz baterije, koja zamjenjuje klasične spremnike za gorivo. Ova vozila postaju sve popularnija i dostupnija većini ljudi.

Princip rada električnih automobila je jednostavniji nego kod konvencionalnih vozila. Elektromotori omogućuju brži odgovor na gas i time bolje performanse vozila, a ne zahtijevaju promjenu brzina ili klasičan mjenjač. Vozač samo mijenja smjer vožnje, bilo unaprijed ili unazad.

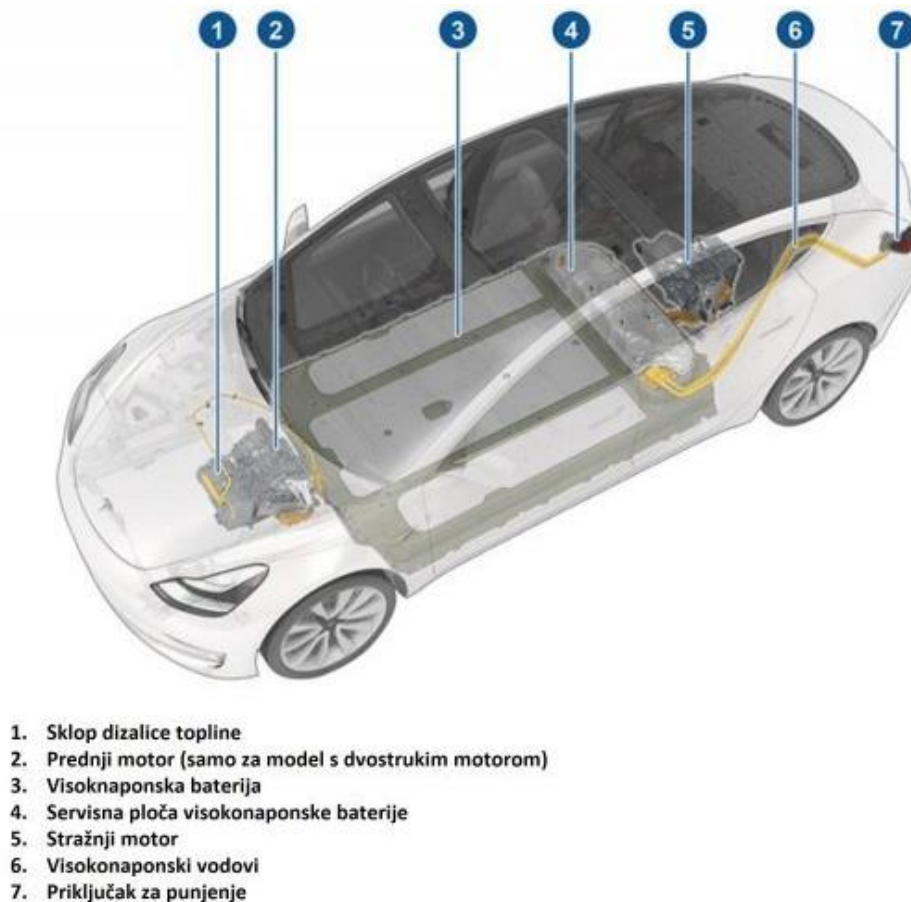
Električna vozila ne trebaju korištenje benzinskoj postaji. Umjesto toga, baterije se pune kod kuće uz pomoć kućnog punjača ili na brzim punionicama koje mogu napuniti bateriju za trideset minuta ili manje, slika 7. [4]



Slika 7. Prikaz punjenja baterije električnog vozila

Električni motor, slika 8., zamjena je za motor na benzin ili dizel. On je učinkovitiji jer pretvara većinu energije u pokretanje vozila, dok motori s unutarnjim izgaranjem koriste samo 30-40% energije iz goriva. Električni motori imaju manje pokretnih dijelova pa zahtijevaju manje održavanja.

Većina električnih vozila koristi sustav regenerativnog kočenja koji omogućava punjenje baterije dok vozilo usporava. To znači da se dio energije koja se inače gubi pri kočenju, koristi za punjenje baterije, čime se povećava ukupna energetska učinkovitost vozila.



Slika 8. Prikaz dijelova električnog vozila [3]

Električna vozila imaju mnoge prednosti. Imaju niže troškove održavanja jer nemaju motor s unutarnjim izgaranjem, ispušni sustav i mnoge druge dijelove koji zahtijevaju redovito servisiranje. Električni motori zahtijevaju manje održavanja jer imaju manje pokretnih dijelova. Druga velika prednost je energetska učinkovitost. Električni motori pretvaraju većinu električne energije u pokretanje vozila, dok motori na benzin i dizel gube veliku količinu energije kroz toplinu i trenje. Električna vozila smanjuju emisiju štetnih plinova, jer ne stvaraju nikakve emisije tijekom vožnje.

Međutim, električna vozila također imaju nedostatke. Jedan od najvećih izazova je njihov ograničen doseg. Iako je doseg električnih vozila značajno poboljšán u posljednjim godinama, mnogi modeli još uvijek ne mogu prijeći istu udaljenost kao vozila s motorima na fosilna goriva bez potrebe za punjenjem. Drugi izazov je infrastruktura za punjenje. Iako se mreža punionica širi, u mnogim regijama punjenje električnih vozila još uvijek nije dovoljno pristupačno.

Razvoj baterijske tehnologije omogućuje brzo punjenje vozila čime se povećava njihova praktičnost.

Sve više proizvođača u današnje vrijeme okreće se elektrifikaciji svojih vozila, a kompanije poput američke Tesle i hrvatskog Rimca nastoje postići visoku razinu inovacija i iskoristivosti električnih vozila.

3.2 Plug-in hibridna vozila (PHEV)



Slika 9. Plug-in hibridno vozilo (PHEV)

Razvoj PHEV vozila, slika 9., započeo je početkom 21. stoljeća kada su proizvođači automobila tražili načine za smanjenje emisije i veću energetska učinkovitost. Prvi PHEV modeli imali su ograničen električni domet, ali su postavljali temelje za modernu tehnologiju.

S napretkom u tehnologiji baterija, proizvođači su povećavali kapacitet baterija, čime se električni domet značajno povećao. Danas PHEV vozila s dometom od 100 km predstavljaju spoj praktičnosti i održivosti.

Plug-in hibridna vozila (PHEV) su vrsta automobila koja kombinira motor s unutarnjim izgaranjem, slika 10., i električni motor. Ova vozila mogu raditi na električnu energiju, gorivo ili oboje istovremeno. Glavna razlika između plug-in hibrida i običnih hibrida je to što PHEV vozila imaju veće baterije koje se mogu puniti iz vanjskog izvora, poput kućne utičnice ili javne punionice, slika 11..



Slika 10. Motor s unutarnjim izgaranjem za plug-in hibridno vozilo



Slika 11. Punjenje plug-in hibridnog vozila

PHEV vozila koriste električni motor za pogon vozila na kraće udaljenosti i motor s unutarnjim izgaranjem za duže vožnje ili kada je baterija prazna. Električni motor napaja baterija koja se može puniti, dok motor na gorivo koristi benzin ili dizel. Kada se baterija isprazni, vozilo automatski prelazi na rad na gorivo. To omogućava vozačima fleksibilnost, jer ne ovise isključivo o punionicama. PHEV vozila s električnim dometom od 100 kilometara omogućavaju vozačima da većinu svakodnevnih vožnji obave samo na električnu energiju. To znači da se takav automobil može voziti na posao, u trgovinu ili obavljati kratke vožnje bez korištenja goriva. Ovaj doseg je veći od standardnog za većinu PHEV vozila, čiji je električni domet obično između 30 i 60 km. Veći domet omogućuje značajne uštede na gorivu i smanjenje emisije štetnih plinova posebno u gradskim sredinama.

PHEV vozila imaju nekoliko ključnih dijelova od kojih se sastoje. Među najbitnijim dijelovima je baterija koja pohranjuje energiju za električni motor. PHEV s dometom od 100 km koristi veću bateriju od prosječnog plug-in hibrida, što omogućuje dulje vožnje na električni pogon. Električni motor pokreće vozilo na električnu energiju. Također pomaže smanjiti potrošnju goriva kada se koristi zajedno s motorom s unutarnjim izgaranjem. Motor s unutarnjim izgaranjem koristi gorivo za pogon vozila kada se baterija isprazni ili za vožnje na dulje udaljenosti. Punjač omogućuje punjenje baterije iz vanjskih izvora električne energije, a punjenje može trajati od nekoliko sati na kućnoj utičnici do sat vremena na brzom punionici.

Prednosti PHEV vozila su: smanjena potrošnja goriva jer PHEV vozila s električnim dometom od 100 km omogućuju vožnju na električnu energiju većinu vremena, čime se smanjuju troškovi goriva. Niže emisije su kada se koristi samo električni pogon, PHEV vozila ne emitiraju štetne plinove, što doprinosi čistijem zraku. Fleksibilnost omogućava vozačima da mogu koristiti električni pogon za kraće vožnje, dok motor na gorivo omogućuje vožnju na dulje udaljenosti bez brige o punjenju baterije. Nedostaci PHEV vozila su: visoka početna cijena jer takva vozila s većim električnim dometom obično su skuplja zbog većih baterija i složenije tehnologije. Imaju dulje vrijeme punjenja jer veće baterije zahtijevaju više vremena za punjenje, posebno na standardnim kućnim utičnicama. Veće baterije povećavaju težinu vozila, što može smanjiti ukupnu učinkovitost kada se koristi motor na gorivo. U nekim regijama još uvijek nema dovoljno javnih punionica za električna vozila.

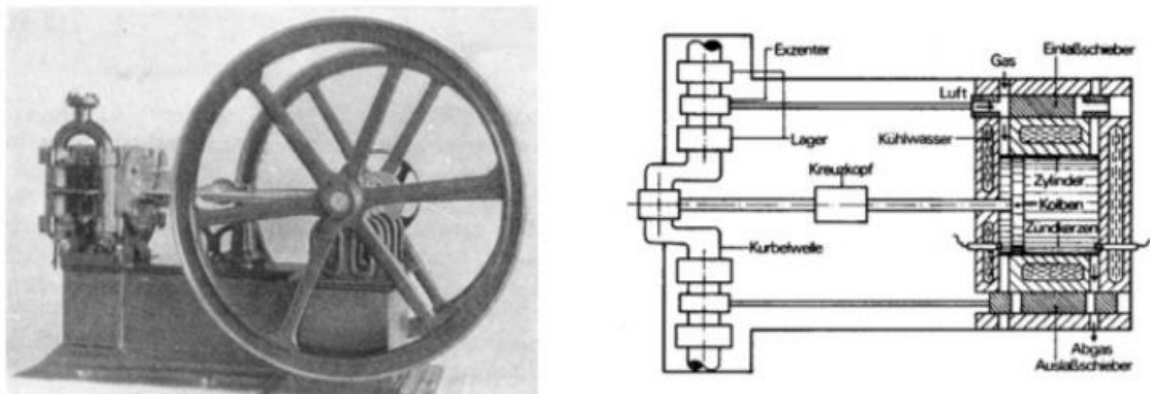
S povećanjem svijesti o zaštiti okoliša i strožim zakonima o emisijama, PHEV vozila postaju sve popularnija. U budućnosti se očekuje daljnji rast dometa, smanjenje cijena baterija i razvoj infrastrukture za punjenje. PHEV vozila s električnim dometom od 100 km predstavljaju prijelazno rješenje prema potpuno električnim vozilima i igraju važnu ulogu u prelasku na održiviji transport.

3.3 Vozila s motorom na fosilna goriva (ICEV)

Motor je stroj koji pretvara energiju u mehanički rad. Motor s unutarnjim izgaranjem vrsta je toplinskog stroja koji kemijsku energiju iz goriva pretvara u toplinsku energiju, a zatim toplinsku energiju pretvara u mehanički rad. Mehanički rad koji se dobiva koristi se za pokretanje vozila.

Prvi klipni motori s unutarnjim izgaranjem razvijeni su na temelju parnih strojeva, koji su tada bili jedini toplinski strojevi sposobni za proizvodnju mehaničkog rada. Parni strojevi bili su skupi i morali su zadovoljavati stroge standarde, pa su izumitelji tražili nove metode za pogon vozila.

Godine 1860. Jean Joseph Etienne Lenoir postigao je značajan napredak kada je izradio prvi motor s unutarnjim izgaranjem. Bio je to dvotaktni, dvoradni plinski motor. Njegova učinkovitost bila je niska, oko 3%, ali je bila usporediva s parnim strojevima tog razdoblja. Dizajn motora bio je inspiriran konstrukcijom parnog stroja. Na slici 12., prikazan je Lenoirov plinski motor.



Slika 12. Lenoirov plinski motor

Godine 1876., Nikolaus Otto razvio je četverotaktni motor koji je postao osnova za moderne motore. Kasnije su izumitelji poput Rudolfa Diesela unaprijedili tehnologiju razvojem dizelskog motora 1892. godine. Ovi motori su postali ključni za razvoj automobilske industrije i industrijalizacije u 20. stoljeću.

Motori s unutarnjim izgaranjem dobili su ime jer se proces izgaranja goriva događa unutar samog motora, u njegovim cilindrima. Ova vrsta motora unaprijedila je transport i industriju te postala temelj modernog svijeta.

Osnovne značajke motora s unutarnjim izgaranjem su: unutarnje izgaranje koje podrazumijeva da se gorivo miješa sa zrakom i pali u zatvorenom prostoru cilindra. Ovaj proces stvara toplinsku energiju koja se pretvara u mehanički rad. Koristi se gorivo poput benzina, dizela, plina ili biogoriva koje je lako dostupno i ima visok energetska sadržaj. Pokretni dijelovi motora su: klipovi, radilica i ventili koji omogućuju pretvaranje energije izgaranja u rotacijsko gibanje. Ovo gibanje koristi se za pokretanje kotača vozila, generatora ili drugih mehanizama. Većina modernih motora radi na temelju četverotaktnog ciklusa, koji uključuje usis, kompresiju, izgaranje i ispuh.

Rad MSUI temelji se na ciklusu koji se odvija unutar cilindra. Tijekom usisa klip se pomiče prema dolje, a ventil za ulaz zraka i goriva se otvara. Mješavina zraka i goriva ulazi u cilindar. U taktu kompresije klip se pomiče prema gore, sabijajući mješavinu. Sabijanje povećava temperaturu i tlak smjese, pripremajući je za izgaranje. U taktu izgaranja kada je smjesa maksimalno sabijena, svjećica (u Ottovim motorima) ili kompresija (u Dieselovim motorima) izaziva izgaranje. Ovo stvara veliku količinu toplinske energije, koja gura klip prema dolje. U taktu ispuha klip se ponovno pomiče prema gore, istiskujući ispušne plinove kroz ispušni ventil. Nakon toga ciklus se ponavlja.

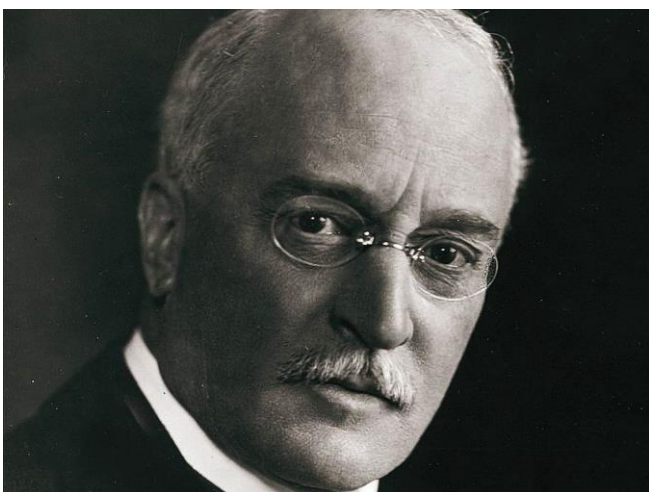
Tipovi motora s unutarnjim izgaranjem su: Ottovi motori koji koriste smjesu zraka i benzina te svjećice za paljenje. Imaju ravnomjerniji rad i često se koriste u osobnim vozilima. Dieselovi motori, koriste dizel gorivo koje se pali kompresijom. Ovi motori su učinkovitiji i izdržljiviji, a često se koriste u teškim vozilima poput kamiona i brodova. Plinski motori koriste prirodni plin, ukapljeni naftni plin (LPG) ili komprimirani prirodni plin (CNG). Imaju manju emisiju štetnih plinova u usporedbi s Ottovim i Dieselovim motorima. Dvotaktni motori završavaju cijeli ciklus u samo dva takta, što ih čini jednostavnijima i lakšima, ali manje učinkovitima. Najčešće se koriste u manjim uređajima poput kosilica ili motornih pila. Četverotaktni motori su najčešći tip motora, poznat po svojoj učinkovitosti i manjoj potrošnji goriva.

Kako bi se smanjila emisija štetnih plinova i povećala učinkovitost, razvijene su brojne tehnologije. Turbo punjači povećavaju snagu motora bez značajnog povećanja potrošnje goriva. Direktnim ubrizgavanjem poboljšava se miješanje goriva i zraka, smanjujući time gubitke energije. Sustavi za povrat ispušnih plinova (EGR) smanjuju emisiju dušikovih oksida na način da se pomoću EGR-a ispušni plinovi vraćaju ponovo u usisnu granu kako bi izgarali u cilindru. Na taj način se smanjuje temperatura izgaranja i količina dušikovih oksida u ispušnim plinovima. Start/stop sustavi automatski gase motor tijekom stajanja kako bi se smanjila potrošnja goriva, a time i zagađenje okoliša.

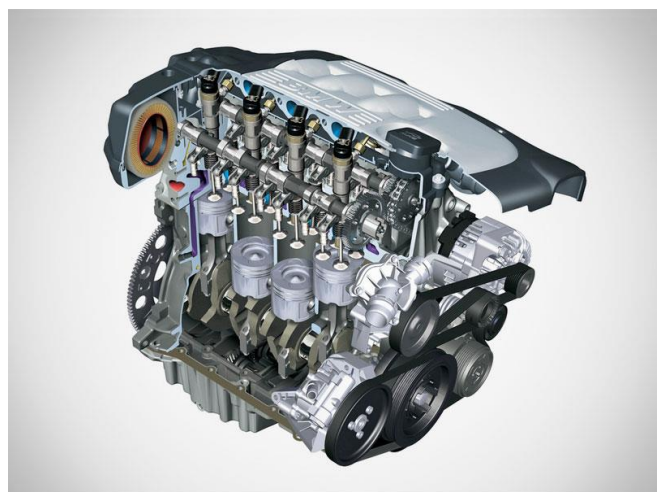
Motori s unutarnjim izgaranjem i dalje se unapređuju, ali istovremeno suočavaju s izazovima koje postavljaju stroži ekološki standardi i rast popularnosti električnih vozila.

3.3.1.1 Dieselov motor

Dieselov motor je vrsta motora s unutarnjim izgaranjem koji radi na dizelsko gorivo koje ima sklonost samozapaljenju uslijed visokog tlaka i temperature. Razvio ga je Rudolf Diesel, slika 13, 1892. godine. Za razliku od Ottovih motora, u Dieselovom motoru, slika 14., gorivo se ne pali svjećicom, već se ubrizgava u cilindar pun vrućeg komprimiranog zraka gdje se automatski zapali.



Slika 13. Rudolf Diesel



Slika 14. Dieselov motor

Rad Dieselog motora temelji se na četverotaktnom ciklusu. U prvom taktu, zrak ulazi u cilindar dok se klip pomiče prema dolje. Tijekom drugog takta klip sabija zrak, što povećava njegovu temperaturu do razine potrebne za izgaranje goriva. U trećem taktu, gorivo se ubrizgava u vrući komprimirani zrak što dovodi do samozapaljenja. Nastala eksplozija stvara tlak koji gura klip prema dolje. U posljednjem taktu klip se pomiče prema gore i izbacuje ispušne plinove kroz ispušni ventil.

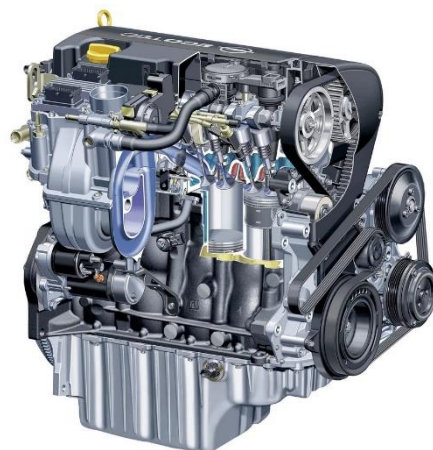
Dieselovi motori su poznati po visokoj učinkovitosti jer bolje iskorištavaju energiju goriva u usporedbi s Ottovim motorima. Troše manje goriva, što ih čini ekonomičnima za duge vožnje i teške strojeve. Zbog čvrstoće i pouzdanosti često se koriste u kamionima, brodovima i industrijskim strojevima. Međutim, njihov rad stvara više emisija dušikovih oksida NO_x i čestica, što je nepovoljno za okoliš.

3.3.1.2 Ottov motor

Ottov motor s unutarnjim izgaranjem izumio je Nikolaus Otto, slika 15., 1876. godine. To je bio prvi motor koji je uspješno koristio četverotaktni ciklus rada, što ga čini temeljem za većinu današnjih benzinskih motora. Ključna razlika Ottovog motora u odnosu na Dieslov motor je način paljenja smjese goriva i zraka – Ottov motor, slika 16., koristi svječiće za stvaranje iskre za početak izgaranja.



Slika 15. Nicolaus August Otto



Slika 16. Ottov motor

Ottov motor radi kroz četiri osnovna takta, poznata kao četverotaktni ciklus. U prvom taktu usisa klip se pomiče prema dolje, a ventil za ulaz se otvara što omogućuje ulazak mješavine goriva i zraka u cilindar. U drugom taktu kompresijom se klip vraća prema gore, sabijajući mješavinu goriva i zraka. Sabijanje povećava tlak i temperaturu smjese, pripremajući je za izgaranje. U trećem taktu izgaranja kada klip dosegne gornju mrtvu točku, svjećica izaziva iskrnu koja pali smjesu. Nastala eksplozija stvara tlak koji gura klip prema dolje, čime se stvara korisna energija. U taktu ispuha klip se ponovno pomiče prema gore, otvarajući ispušni ventil i izbacujući ispušne plinove iz cilindra. Nakon toga ciklus se ponavlja.

Ottovi motori su najčešće korišteni u osobnim automobilima, motociklima i manjim uređajima. Zbog svoje relativno jednostavne konstrukcije i pristupačne cijene, ovi motori su ključni za široku primjenu.

Ottov motor, sa svojim inovativnim četverotaktnim ciklusom, postavio je temelje za razvoj modernih benzinskih motora, koji su i danas popularni zbog ravnoteže između performansi i pristupačnosti.

4. Izračun emisija CO₂ za tri vrste vozila

Da bi izračunali emisije CO₂ za pojedine regije poput Europske unije, SAD-a i Kine prema LCA metodi, razmotrit ćemo nekoliko bitnih faktora: tip vozila (električna, hibridna, konvencionalna), prosječni domet vozila, potrošnja energije i goriva, te specifične emisije CO₂ po kilometru ovisno o vrsti vozila i regiji.

Prema LCA metodi razmotrit ćemo proizvodnju vozila odnosno emisije CO₂ pri proizvodnji vozila, uključujući proizvodnju baterija za električna vozila, korištenje vozila odnosno emisije CO₂ povezane s vožnjom te reciklažu odnosno emisije povezane s recikliranjem vozila na kraju njegovog životnog ciklusa.

Svako ćemo vozilo promatrati za razdoblje od 5 i 10 godina, uz prosječnu godišnju vožnju od 20 000 km za pojedine regije: Europsku uniju, SAD i Kinu.

4.1 Proračun

Emisije CO₂ za godišnji prosjek vožnje od 20 000 km za regije Europske unije, SAD-a i Kine prema LCA metodi.

4.4.1.1 Električna vozila (EV):



Slika 17. Tesla Model 3

Tablica 2. Tehnički podaci električnog vozila Tesla model 3, slika 17. [5]

Marka	Tesla
Model	Model 3
Motor	Standard Range 68.3 kWh
Vrsta motora	BEV (Vozilo s električnim pogonom)
Početak proizvodnje	2019. g.
Maksimalna brzina	225 km/h
Ubrzanje 0 – 100 km/h	5.6 s
Bruto kapacitet baterije	68.3 kWh
Dometa u električnom načinu	409 km

Potrošnja električne energije	14,1 kWh/100 km
Vlastita masa	1609 kg
Dopuštena masa	2060 kg

Potrošnja električne energije baterije iz kataloga proizvođača Tesla modela automobila iznosi 14,1 kWh/100 km.[5] Za električno vozilo s dometom od 400 km veličina baterije je:

$$E_{baterije} = 14,1 \frac{\text{kWh}}{100 \text{ km}} \cdot x$$

$$E_{baterije} = 14,1 \frac{\text{kWh}}{100 \text{ km}} \cdot 400 = 56,4 \text{ kWh}$$

x- domet električnog vozila u kilometrima

Električno vozilo s dometom od 400 km ima prosječni kapacitet baterije od 60 kWh.

Proizvodnja:

Proizvodnja električnog automobila uključuje proizvodnju baterije + proizvodnja svih ostalih dijelova.

Litij, kobalt i nikal su bitni dijelovi litij-ionskih baterija, vade se kroz rudarenje, proces koji je vrlo važan u pogledu emisije CO₂. Za svaku tonu izvađenog litija iz tvrdih stijena, emitira se 15 tona CO₂. [6] Sam proces rudarenja troši veliku količinu vode i kemikalija, što stvara ekološke probleme, posebno u područjima gdje je voda oskudna.

Proizvodnja litij-ionskih baterija traži vrlo visoke temperature (800-1000°C), koje se postižu izgaranjem fosilnih goriva, a to dodatno doprinosi emisiji CO₂. Najveći proizvođač baterija za električna vozila je kompanija CATL u Kini. Kina koristi ugljen kako bi proizvela energiju, a izgaranje ugljena oslobađa velike količine CO₂.

Najveći broj baterija za električna vozila proizvodi se u Aziji. Kina dominira tržištem s udjelom većim od 70 posto i ima najveće emisije u proizvodnim procesima. Švedska je zadržala relativno nizak nivo emisija u proizvodnji baterija, s prosjekom manjim od polovice kineskog prosjeka.

Sve više proizvođača baterija uspostavlja kapacitet u Europi, što pomaže smanjenju emisija po kWh jer električna energija u Europi ima manje emisijsko djelovanje nego u većini azijskih država, zbog većeg korištenja obnovljivih izvora energije. [7]

			Vehicle segment			
			A mini	C medium	JC compact SUV	JE mid-size SUV
BEV	Battery size	kWh	36.8	62	82	95
	Battery production emissions, excluding electricity	t CO ₂	2.8	4.7	6.2	7.1
	Electricity requirements, battery production	kWh	1582	2666	3526	4085
	Vehicle production emissions, excluding battery	t CO ₂	4.8	6.5	8.5	9.8
	Use-phase energy demand	Wh km ⁻¹	145	180	184	261
ICEV	End-of-life treatment	t CO ₂	0.5	0.7	0.9	1.1
	Production emissions	t CO ₂	3.6	5.3	9.3	11.3
	Use-phase energy demand	kJ km ⁻¹	1672	1893	2714	2935
		(Wh km ⁻¹)	(464)	(526)	(754)	(815)
	Use-phase emissions (lifetime, including fuel chain)	t CO ₂	26.7	30.2	43.2	47.1
	End-of-life treatment	t CO ₂	0.3	0.5	0.6	0.7

Slika 18. Kapacitet baterije i emisije CO₂ za BEV i ICEV vozilo [8]

S obzirom na podatke sa slike 18., možemo izračunati koliko se kg CO₂ oslobodi u okoliš u tijeku proizvodnje:

Za srednju veličinu baterije od 62 kWh emitira se 4 700 kg CO₂.

Za 1 kWh baterije emitira se: $E_{kWh} = \frac{\text{emisija CO}_2 \text{ [kg]}}{\text{kapacitet baterije [kWh]}}$

Za 1 kWh baterije emitira se: $E_{kWh} = \frac{4\,700 \text{ kg CO}_2}{62 \text{ kWh}} = 75,806 \text{ kg CO}_2/\text{kWh}$

Za promatrano električno vozilo s dometom od 400 km koje ima prosječni kapacitet baterije od 60 kWh vrijednost emisije CO₂ iznosi:

$$E_{\text{proizvodnja baterije}} = \text{kapacitet baterije [kWh]} \cdot \text{emisija CO}_2/\text{kWh}$$

$$E_{\text{proizvodnja baterije}} = 60 \text{ kWh} \cdot 75,806 \text{ kg CO}_2 = 4548,36 \text{ kg CO}_2$$

Ostali dijelovi proizvodnje: šasija približno 4200 kg CO₂ te pogonsko sklopovlje iznosi približno 1700 kg CO₂, što je ukupno 5900 kg CO₂. [9]

$$E_{\text{produkcija ostalih dijelova}} = 5900 \text{ kg CO}_2$$

Ukupno: baterija + ostali dijelovi proizvodnje:

$$E_{\text{produkcija}} = X + 5900 \text{ kg CO}_2$$

$$E_{\text{produkcija, EV}} = 4548,36 \text{ kg CO}_2 + 5900 \text{ kg CO}_2 = 10448,36 \text{ kg CO}_2$$

X-emisija CO₂ koja se oslobodi u okoliš u tijeku proizvodnje baterije određenog kapaciteta [kg CO₂].

Upotreba:

- Emisije CO₂ tijekom vožnje
- Potrošnja energije $P_{\text{električna}} = 15 \text{ kWh}/100 \text{ km}$
- Prosječna emisija CO₂ po kWh električne energije za različite regije [10]:
 - Europska unija: $E_{\text{kWh}} = 225 \text{ g CO}_2/\text{kWh}$
 - SAD: $E_{\text{kWh}} = 350 \text{ g CO}_2/\text{kWh}$
 - Kina: $E_{\text{kWh}} = 623 \text{ g CO}_2/\text{kWh}$
- Prosječna godišnja vožnja iznosi $D = 20\,000 \text{ km}$

Emisija CO₂ koje se oslobode u okoliš zbog vožnje godišnje iznosi ukupno:

$$E_{\text{uporaba, općenito}} = \frac{D}{100} \cdot P_{\text{električna}} \cdot E_{\text{kWh}}$$

D- prosječna godišnja vožnja u kilometrima

$P_{\text{električna}}$ - potrošnja električne energije na 100 km

E_{kWh} - prosječna emisija CO₂ po kWh električne energije

$$E_{\text{uporaba, EV, EU}} = \frac{D}{100} \cdot P_{\text{električna}} \cdot E_{\text{kWh}} = \frac{20\,000 \text{ km}}{100} \cdot 15 \text{ kWh} \cdot 0,225 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{kWh}}$$

$$= 675 \text{ kg CO}_2$$

$$E_{\text{uporaba, EV, SAD}} = \frac{D}{100} \cdot P_{\text{električna}} \cdot E_{\text{kWh}} = \frac{20\,000 \text{ km}}{100} \cdot 15 \text{ kWh} \cdot 0,350 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{kWh}}$$

$$= 1050 \text{ kg CO}_2$$

$$E_{\text{uporaba, EV, Kina}} = \frac{D}{100} \cdot P_{\text{električna}} \cdot E_{\text{kWh}} = \frac{20\,000 \text{ km}}{100} \cdot 15 \text{ kWh} \cdot 0,623 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{kWh}}$$

$$= 1869 \text{ kg CO}_2$$

Reciklaža:

Zbog ekološke održivosti recikliranje električnih vozila vrlo je važno. Recikliranjem se smanjuju emisije CO₂ što omogućava ponovnu upotrebu materijala s puno manjom potrošnjom energije, za razliku od proizvodnje novih materijala koja zahtijeva puno više energije i stvara veće emisije CO₂.

Tesla sve više teži korištenju hidrometalurških procesa recikliranja. Hidrometalurški proces proizvede 60,77 kg CO₂/kWh, a direktna reciklaža 43,92 kg CO₂/kWh. [11]

Emisija reciklaže vozila:

$$E_{\text{reciklaža, vozila}} = (m_{\text{vozila}} - m_{\text{baterije}}) \cdot 2,93 \text{ kg CO}_2/\text{kg}_{\text{masa,vozila}}$$

m_{vozila} -masa vozila [kg]

m_{baterije} -masa baterije [kg]

$$E_{\text{reciklaža, vozila}} = (1610 \text{ kg} - 400 \text{ kg}) \cdot 2,93 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{kg}_{\text{masa,vozila}}} = 3545,3 \text{ kg CO}_2$$

Emisija reciklaže baterije:

$$E_{\text{reciklaža, baterije}} = \text{kapacitet baterije} \cdot 43,92 \text{ kg CO}_2/\text{kWh}$$

Emisija reciklaže baterije:

$$E_{\text{reciklaža, baterije}} = 60 \text{ kWh} \cdot 43,92 \text{ kg} \frac{\text{CO}_2}{\text{kWh}} = 2635,2 \text{ kg CO}_2$$

Emisija reciklaže vozila [12, 13]:

Ukupna emisija reciklaže iznosi:

$$E_{\text{reciklaža, EV}} = E_{\text{reciklaža, baterije}} + E_{\text{reciklaža, vozila}}$$

$$E_{\text{reciklaža, EV}} = 3545,3 \text{ kg CO}_2 + 2635,2 \text{ kg CO}_2 = 6180,5 \text{ kg CO}_2$$

Izračun ukupnih emisija CO₂ za električno vozilo:

$$E_{\text{ukupno}} = E_{\text{proizvodnja}} + E_{\text{uporaba}} + E_{\text{reciklaža}}$$

Ukupna emisija CO₂ za električno vozilo za **1 godinu** iznosi:

$$E_{\text{ukupno, EU}} = E_{\text{proizvodnja}} + E_{\text{uporaba}} + E_{\text{reciklaža}}$$

$$E_{\text{ukupno, EU}} = 10448,36 \text{ kg CO}_2 + 675 \text{ kg CO}_2 + 6180,5 \text{ kg CO}_2 = 17303,86 \text{ kg CO}_2$$

$$E_{\text{ukupno, SAD}} = E_{\text{proizvodnja}} + E_{\text{uporaba}} + E_{\text{reciklaža}}$$

$$E_{\text{ukupno, SAD}} = 10448,36 \text{ kg CO}_2 + 1050 \text{ kg CO}_2 + 6180,5 \text{ kg CO}_2 = 17678,86 \text{ kg CO}_2$$

$$E_{\text{ukupno, Kina}} = E_{\text{proizvodnja}} + E_{\text{uporaba}} + E_{\text{reciklaža}}$$

$$E_{\text{ukupno, Kina}} = 10448,36 \text{ kg CO}_2 + 1869 \text{ kg CO}_2 + 6180,5 \text{ kg CO}_2 = 18497,86 \text{ kg CO}_2$$

Ukupna emisija CO₂ za električno vozilo za **5 godina** iznosi:

$$E_{\text{ukupno, EU}} = E_{\text{proizvodnja}} + 5 \cdot E_{\text{uporaba}} + E_{\text{reciklaža}}$$

$$E_{\text{ukupno, EU}} = 10448,36 \text{ kg CO}_2 + 5 \cdot 675 \text{ kg CO}_2 + 6180,5 \text{ kg CO}_2 = 20003,86 \text{ kg CO}_2$$

$$E_{\text{ukupno, SAD}} = E_{\text{proizvodnja}} + 5 \cdot E_{\text{uporaba}} + E_{\text{reciklaža}}$$

$$E_{\text{ukupno, SAD}} = 10448,36 \text{ kg CO}_2 + 5 \cdot 1050 \text{ kg CO}_2 + 6180,5 \text{ kg CO}_2 = 21878,86 \text{ kg CO}_2$$

$$E_{ukupno, Kina} = E_{proizvodnja} + 5 \cdot E_{uporaba} + E_{reciklaža}$$

$$\begin{aligned} E_{ukupno, Kina} &= 10448,36 \text{ kg CO}_2 + 5 \cdot 1869 \text{ kg CO}_2 + 6180,5 \text{ kg CO}_2 \\ &= 25973,86 \text{ kg CO}_2 \end{aligned}$$

Ukupna emisija CO₂ za električno vozilo za **10 godina** iznosi:

$$E_{ukupno, EU} = E_{proizvodnja} + 10 \cdot E_{uporaba} + E_{reciklaža}$$

$$E_{ukupno, EU} = 10448,36 \text{ kg CO}_2 + 10 \cdot 675 \text{ kg CO}_2 + 6180,5 \text{ kg CO}_2 = 23378,86 \text{ kg CO}_2$$

$$E_{ukupno, SAD} = E_{proizvodnja} + 10 \cdot E_{uporaba} + E_{reciklaža}$$

$$\begin{aligned} E_{ukupno, SAD} &= 10448,36 \text{ kg CO}_2 + 10 \cdot 1050 \text{ kg CO}_2 + 6180,5 \text{ kg CO}_2 \\ &= 27128,86 \text{ kg CO}_2 \end{aligned}$$

$$E_{ukupno, Kina} = E_{proizvodnja} + 10 \cdot E_{uporaba} + E_{reciklaža}$$

$$\begin{aligned} E_{ukupno, Kina} &= 10448,36 \text{ kg CO}_2 + 10 \cdot 1869 \text{ kg CO}_2 + 6180,5 \text{ kg CO}_2 \\ &= 35318,86 \text{ kg CO}_2 \end{aligned}$$

4.4.1.2. Plug-in hibridna vozila (PHEV)



Slika 19. Volkswagen Passat GTE

**Tablica 3. Tehnički podaci za plug-in hibridno vozilo
Volkswagen Passat GTE, slika 19. [14]**

Marka	Volkswagen Passat GTE
Električna snaga motora	84,6 kW
Godina proizvodnje	2019.
Maksimalna brzina	222 km/h
Ubrzanje 0-100 km/h	7,4 s
Potrošnja goriva	5,5 L/100 km
Težina bez tereta	1655 kg
Bruto granica težine	2220 kg
Baterija	Lithium-ion
Kapacitet baterije	13 kWh
Domet	100 km
Emisija CO ₂	37 g/km

Proizvodnja:

Potrošnja električne energije baterije iz kataloga proizvođača Volkswagen Passat GTE iznosi 11,5 kWh/100 km.[15] Za plug-in hibridno vozilo s dometom od 100 km veličina baterije je:

$$E_{baterije} = 11,5 \frac{\text{kWh}}{100\text{km}} \cdot x$$

$$E_{baterije} = 11,5 \frac{\text{kWh}}{100\text{km}} \cdot 100 = 11,5 \text{ kWh}$$

x- domet plug-in hibridnog vozila u kilometrima

Plug-in hibridno vozilo s dometom od 100 km ima prosječni kapacitet baterije od 13 kWh. [14]

Za srednju veličinu baterije od 62 kWh emitira se 4 700 kg CO₂.

Za 1 kWh baterije emitira se: $E_{kWh} = \frac{\text{emisija CO}_2 \text{ [kg]}}{\text{kapacitet baterije [kWh]}}$

Za 1 kWh baterije emitira se: $E_{kWh} = \frac{4\,700 \text{ kg CO}_2}{62 \text{ kWh}} = 75,806 \text{ kg CO}_2/\text{kWh}$

Za promatrano plug-in hibridno vozilo s dometom od 100 km koje ima prosječni kapacitet baterije od 13 kWh vrijednost emisije CO₂ iznosi:

$$E_{\text{proizvodnja baterije}} = \text{kapacitet baterije [kWh]} \cdot \text{emisija CO}_2/\text{kWh}$$

$$E_{\text{proizvodnja baterije}} = 13 \text{ kWh} \cdot 75,806 \text{ kg CO}_2 = 985,478 \text{ kg CO}_2$$

Ostali dijelovi proizvodnje: šasija približno 4200 kg CO₂ te pogonsko sklopovlje iznosi približno 1700 kg CO₂, što je ukupno 5900 kg CO₂. [9]

$$E_{\text{proizvodnja ostalih dijelova}} = 5900 \text{ kg CO}_2$$

Emisije CO₂ koje nastaju tijekom proizvodnje plug-in hibridnog vozila i baterije iznosi:

Ukupno: baterija + ostali dijelovi proizvodnje:

$$E_{\text{proizvodnja}} = X + 5900 \text{ kg CO}_2$$

$$E_{\text{proizvodnja, PHEV}} = 985,478 \text{ kg CO}_2 + 5900 \text{ kg CO}_2 = 6885,478 \text{ kg CO}_2$$

X-emisija CO₂ koja se oslobodi u okoliš u tijeku proizvodnje baterije određenog kapaciteta [kg CO₂].

Upotreba:

Emisije CO₂ tijekom vožnje:

- Potrošnja električne energije: $P_{električna} = 11,5 \text{ kWh}/100 \text{ km}$
- Prosječna emisija CO₂ po kWh električne energije za različite regije [10]:
 - Europska unija: $E_{kWh} = 225 \text{ g CO}_2/\text{kWh}$
 - SAD: $E_{kWh} = 350 \text{ g CO}_2/\text{kWh}$
 - Kina: $E_{kWh} = 623 \text{ g CO}_2/\text{kWh}$
- Potrošnja goriva: $P_{gorivo} = 5,5 \text{ l}/100 \text{ km}$
- Domet na električnu energiju: $X_{električna \text{ energija}} = 100 \text{ km}$

Broj kilometara na električnu energiju koje prijeđe plug-in hibridno vozilo unutar prosječne godišnje vožnje od 20 000 km iznosi:

$$D_{električna \text{ energija, godišnje}} = 15\,000 \text{ km}$$

Broj kilometara na gorivo koje prijeđe plug-in hibridno vozilo unutar prosječne godišnje vožnje od 20 000 km iznosi:

$$D_{gorivo} = 20\,000 - 15\,000 = 5\,000 \text{ km}$$

Emisije CO₂ zbog električne energije godišnje:

$$E_{električna \text{ energija, PHEV, EU}} = \frac{D_{električna \text{ energija, godišnje}}}{100} \cdot P_{električna} \cdot 0,225 \text{ kg} \frac{\text{CO}_2}{\text{kWh}}$$

$$E_{električna \text{ energija, PHEV, EU}} = \frac{15\,000}{100} \cdot 11,5 \text{ kWh} \cdot 0,225 \text{ kg} \frac{\text{CO}_2}{\text{kWh}} = 388,125 \text{ kg CO}_2$$

$$E_{\text{električna energija, PHEV, SAD}} = \frac{D_{\text{električna energija, godišnje}}}{100} \cdot P_{\text{električna}} \cdot 0,350 \text{ kg} \frac{\text{CO}_2}{\text{kWh}}$$

$$E_{\text{električna energija, PHEV, SAD}} = \frac{15\,000}{100} \cdot 11,5 \text{ kWh} \cdot 0,350 \text{ kg} \frac{\text{CO}_2}{\text{kWh}} = 603,75 \text{ kg CO}_2$$

$$E_{\text{električna energija, PHEV, Kina}} = \frac{D_{\text{električna energija, godišnje}}}{100} \cdot P_{\text{električna}} \cdot 0,623 \text{ kg} \frac{\text{CO}_2}{\text{kWh}}$$

$$E_{\text{električna energija, PHEV, Kina}} = \frac{15\,000}{100} \cdot 11,5 \text{ kWh} \cdot 0,623 \text{ kg} \frac{\text{CO}_2}{\text{kWh}} = 1074,675 \text{ kg CO}_2$$

Emisije CO₂ zbog upotrebe goriva godišnje:

PHEV tijekom vožnje emitira 115 g CO₂/km. [14]

$$E_{\text{gorivo, PHEV, EU}} = D_{\text{gorivo}} \cdot 0,037 \text{ kg} \frac{\text{CO}_2}{\text{km}}$$

$$E_{\text{gorivo, PHEV, EU}} = 5\,000 \cdot 0,115 \text{ kg} \frac{\text{CO}_2}{\text{km}} = 575 \text{ kg CO}_2$$

$$E_{\text{gorivo, PHEV, SAD}} = D_{\text{gorivo}} \cdot 0,037 \text{ kg} \frac{\text{CO}_2}{\text{km}}$$

$$E_{\text{gorivo, PHEV, SAD}} = 5\,000 \cdot 0,115 \text{ kg} \frac{\text{CO}_2}{\text{km}} = 575 \text{ kg CO}_2$$

$$E_{\text{gorivo, PHEV, Kina}} = D_{\text{gorivo}} \cdot 0,037 \text{ kg} \frac{\text{CO}_2}{\text{km}}$$

$$E_{\text{gorivo, PHEV, Kina}} = 5\,000 \cdot 0,115 \text{ kg} \frac{\text{CO}_2}{\text{km}} = 575 \text{ kg CO}_2$$

Reciklaža:

Emisija reciklaže vozila:

$$E_{reciklaža, vozila} = (m_{vozila} - m_{baterije}) \cdot 2,93 \text{ kg CO}_2/\text{kg}_{\text{masa,vozila}}$$

m-masa vozila [kg]

m-masa baterije [kg]

Emisija reciklaže vozila [12, 13]:

$$E_{reciklaža, vozila} = (1655 \text{ kg} - 135 \text{ kg}) \cdot 2,93 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{kg}_{\text{masa,vozila}}} = 4453,6 \text{ kg CO}_2$$

Emisija reciklaže baterije:

$$E_{reciklaža, baterije} = \text{kapacitet baterije} \cdot 43,92 \text{ kg CO}_2/\text{kWh}$$

Emisija reciklaže baterije:

$$E_{reciklaža, baterije} = 13 \text{ kWh} \cdot 43,92 \text{ kg} \frac{\text{CO}_2}{\text{kWh}} = 570,96 \text{ kg CO}_2$$

Ukupna emisija reciklaže iznosi:

$$E_{reciklaža, PHEV} = E_{reciklaža, vozila} + E_{reciklaža, baterije}$$

$$E_{reciklaža, PHEV} = 4453,6 \text{ kg CO}_2 + 570,96 \text{ kg CO}_2 = 5024,56 \text{ kg CO}_2$$

Izračun ukupnih emisija CO₂ za plug-in hibridno vozilo:

$$E_{ukupno} = E_{proizvodnja} + E_{uporaba} + E_{reciklaža}$$

Ukupne emisije CO₂ za plug-in hibridno vozilo za **1 godinu**:

$$E_{ukupno, EU} = E_{proizvodnja, PHEV} + E_{električna\ energija, upotreba\ PHEV, EU} \\ + E_{gorivo, upotreba\ PHEV, EU} + E_{reciklaža, PHEV}$$

$$E_{ukupno, EU} = 6885,478 \text{ kg CO}_2 + 388,125 \text{ kg CO}_2 + 575 \text{ kg CO}_2 + 5024,56 \text{ kg CO}_2 \\ = 12873,163 \text{ kg CO}_2$$

$$E_{ukupno, SAD} = E_{proizvodnja, PHEV} + E_{električna\ energija, upotreba\ PHEV, SAD} \\ + E_{gorivo, upotreba\ PHEV, SAD} + E_{reciklaža, PHEV}$$

$$E_{ukupno, SAD} = 6885,478 \text{ kg CO}_2 + 603,75 \text{ kg CO}_2 + 575 \text{ kg CO}_2 + 5024,56 \text{ kg CO}_2 \\ = 13088,788 \text{ kg CO}_2$$

$$E_{ukupno, Kina} = E_{proizvodnja, PHEV} + E_{električna\ energija, upotreba\ PHEV, Kina} \\ + E_{gorivo, upotreba\ PHEV, Kina} + E_{reciklaža, PHEV}$$

$$E_{ukupno, Kina} = 6885,478 \text{ kg CO}_2 + 1074,675 \text{ kg CO}_2 + 575 \text{ kg CO}_2 + 5024,56 \text{ kg CO}_2 \\ = 13559,713 \text{ kg CO}_2$$

Ukupne emisije CO₂ za plug-in hibridno vozilo za **5 godina**:

$$E_{ukupno, EU} = E_{proizvodnja, PHEV} + 5 \cdot E_{električna\ energija, upotreba\ PHEV, EU} + 5 \\ \cdot E_{gorivo, upotreba\ PHEV, EU} + E_{reciklaža, PHEV}$$

$$E_{ukupno, EU} = 6885,478 \text{ kg CO}_2 + 5 \cdot 388,125 \text{ kg CO}_2 + 5 \cdot 575 \text{ kg CO}_2 \\ + 5024,56 \text{ kg CO}_2 = 16725,663 \text{ kg CO}_2$$

$$E_{ukupno, SAD} = E_{proizvodnja, PHEV} + 5 \cdot E_{električna\ energija, upotreba\ PHEV, SAD} + 5 \cdot E_{gorivo, upotreba\ PHEV, SAD} + E_{reciklaža, PHEV}$$

$$E_{ukupno, SAD} = 6885,478 \text{ kg CO}_2 + 5 \cdot 603,75 \text{ kg CO}_2 + 5 \cdot 575 \text{ kg CO}_2 + 5024,56 \text{ kg CO}_2 = 17803,788 \text{ kg CO}_2$$

$$E_{ukupno, Kina} = E_{proizvodnja, PHEV} + 5 \cdot E_{električna\ energija, upotreba\ PHEV, Kina} + 5 \cdot E_{gorivo, upotreba\ PHEV, Kina} + E_{reciklaža, PHEV}$$

$$E_{ukupno, Kina} = 6885,478 \text{ kg CO}_2 + 5 \cdot 1074,675 \text{ kg CO}_2 + 5 \cdot 575 \text{ kg CO}_2 + 5024,56 \text{ kg CO}_2 = 20158,413 \text{ kg CO}_2$$

Ukupne emisije CO₂ za plug-in hibridno vozilo za **10 godina**:

$$E_{ukupno, EU} = E_{proizvodnja, PHEV} + 10 \cdot E_{električna\ energija, upotreba\ PHEV, EU} + 10 \cdot E_{gorivo, upotreba\ PHEV, EU} + E_{reciklaža, PHEV}$$

$$E_{ukupno, EU} = 6885,478 \text{ kg CO}_2 + 10 \cdot 388,125 \text{ kg CO}_2 + 10 \cdot 575 \text{ kg CO}_2 + 5024,56 \text{ kg CO}_2 = 21541,288 \text{ kg CO}_2$$

$$E_{ukupno, SAD} = E_{proizvodnja, PHEV} + 10 \cdot E_{električna\ energija, upotreba\ PHEV, SAD} + 10 \cdot E_{gorivo, upotreba\ PHEV, SAD} + E_{reciklaža, PHEV}$$

$$E_{ukupno, SAD} = 6885,478 \text{ kg CO}_2 + 10 \cdot 603,75 \text{ kg CO}_2 + 10 \cdot 575 \text{ kg CO}_2 + 5024,56 \text{ kg CO}_2 = 23697,538 \text{ kg CO}_2$$

$$E_{ukupno, Kina} = E_{proizvodnja, PHEV} + 10 \cdot E_{električna\ energija, upotreba\ PHEV, Kina} + 10 \cdot E_{gorivo, upotreba\ PHEV, Kina} + E_{reciklaža, PHEV}$$

$$E_{ukupno, Kina} = 6885,478 \text{ kg CO}_2 + 10 \cdot 1074,675 \text{ kg CO}_2 + 10 \cdot 575 \text{ kg CO}_2 + 5024,56 \text{ kg CO}_2 = 28406,788 \text{ kg CO}_2$$

4.4.1.3 Konvencionalna vozila (ICEV)



Slika 20. Volkswagen Passat 2.0 TSI

Tablica 4. Tehnički podaci konvencionalnog vozila

Volkswagen Passat 2.0 TSI, slika 20. [16]

Model	Volkswagen Passat 2.0 TSI
Tip motora	Benzin/MHEV
Masa praznog vozila	1530 kg
Dopuštena ukupna masa	2060 kg
Snaga	140 kW
Okretni moment	320 Nm
Prosječna potrošnja	6,3 l/100 km
Emisija CO ₂ -benzin	144 g/km

Emisije CO₂ zbog proizvodnje automobila:

Emisije CO₂ zbog proizvodnje konvencionalnog vozila iznosi 5300 kg CO₂, [8] ovisno o različitim faktorima poput tipa vozila, materijala koji se koriste, proizvodnih procesa i energije koja se primjenjuje u proizvodnji.

$$E_{\text{proizvodnje, ICEV}} = 5300 \text{ kg CO}_2$$

Emisije CO₂ zbog upotrebe goriva godišnje:

D-domet koji konvencionalno vozilo prijeđe unutar jedne godine [km]

P-emisija CO₂ koja se emitira po kilometru prijeđenog puta [kg CO₂/km]

$$E_{\text{gorivo, ICEV, EU}} = D_{\text{gorivo}} \cdot P_{\text{gorivo}}$$

$$E_{\text{gorivo, ICEV, EU}} = 20\,000 \text{ km} \cdot 0,144 \text{ kg} \frac{\text{CO}_2}{\text{km}} = 2880 \text{ kg CO}_2$$

$$E_{\text{gorivo, ICEV, SAD}} = D_{\text{gorivo}} \cdot P_{\text{gorivo}}$$

$$E_{\text{gorivo, ICEV, SAD}} = 20\,000 \text{ km} \cdot 0,144 \text{ kg} \frac{\text{CO}_2}{\text{km}} = 2880 \text{ kg CO}_2$$

$$E_{\text{gorivo, ICEV, Kina}} = D_{\text{gorivo}} \cdot P_{\text{gorivo}}$$

$$E_{\text{gorivo, ICEV, Kina}} = 20\,000 \text{ km} \cdot 0,144 \text{ kg} \frac{\text{CO}_2}{\text{km}} = 2880 \text{ kg CO}_2$$

Emisije CO₂ zbog reciklaže konvencionalnog vozila:

Recikliranje automobila Volkswagen Passat 2.0 TSI izrazito je optimizirano jer postoji duži niz godina od postupaka recikliranja električnih automobila. Vrijednost reciklaže konvencionalnog vozila iznosi 0,5 t CO₂. [8]

$$E_{recikla\dot{z}e, ICEV} = 500 \text{ kg CO}_2$$

Izračun ukupnih emisija CO₂ za konvencionalno vozilo:

$$E_{ukupno} = E_{proizvodnja} + E_{uporaba} + E_{recikla\dot{z}a}$$

Ukupne emisije CO₂ za konvencionalno vozilo za **1 godinu**:

$$E_{ukupno, EU} = E_{proizvodnja, ICEV} + E_{Gorivo, ICEV, EU} + E_{recikla\dot{z}a, ICEV}$$

$$E_{ukupno, EU} = 5300 \text{ kg CO}_2 + 2880 \text{ kg CO}_2 + 500 \text{ kg CO}_2 = 8680 \text{ kg CO}_2$$

$$E_{ukupno, SAD} = E_{proizvodnja, ICEV} + E_{Gorivo, ICEV, EU} + E_{recikla\dot{z}a, ICEV}$$

$$E_{ukupno, SAD} = 5300 \text{ kg CO}_2 + 2880 \text{ kg CO}_2 + 500 \text{ kg CO}_2 = 8680 \text{ kg CO}_2$$

$$E_{ukupno, Kina} = E_{proizvodnja, ICEV} + E_{Gorivo, ICEV, EU} + E_{recikla\dot{z}a, ICEV}$$

$$E_{ukupno, Kina} = 5300 \text{ kg CO}_2 + 2880 \text{ kg CO}_2 + 500 \text{ kg CO}_2 = 8680 \text{ kg CO}_2$$

Ukupne emisije CO₂ za konvencionalno vozilo za **5 godina**:

$$E_{ukupno, EU} = E_{proizvodnja, ICEV} + E_{Gorivo, ICEV, EU} + E_{recikla\dot{z}a, ICEV}$$

$$E_{ukupno, EU} = 5300 \text{ kg CO}_2 + 5 \cdot 2880 \text{ kg CO}_2 + 500 \text{ kg CO}_2 = 20200 \text{ kg CO}_2$$

$$E_{ukupno, SAD} = E_{proizvodnja, ICEV} + E_{Gorivo, ICEV, EU} + E_{recikla\dot{z}a, ICEV}$$

$$E_{ukupno, SAD} = 5300 \text{ kg CO}_2 + 5 \cdot 2880 \text{ kg CO}_2 + 500 \text{ kg CO}_2 = 20200 \text{ kg CO}_2$$

$$E_{ukupno, Kina} = E_{proizvodnja, ICEV} + E_{Gorivo, ICEV, EU} + E_{recikla\dot{z}a, ICEV}$$

$$E_{ukupno, Kina} = 5300 \text{ kg CO}_2 + 5 \cdot 2880 \text{ kg CO}_2 + 500 \text{ kg CO}_2 = 20200 \text{ kg CO}_2$$

Ukupne emisije CO₂ za konvencionalno vozilo za **10 godina**:

$$E_{ukupno, EU} = E_{proizvodnja, ICEV} + E_{Gorivo, ICEV, EU} + E_{reciklaža, ICEV}$$

$$E_{ukupno, EU} = 5300 \text{ kg CO}_2 + 10 \cdot 2880 \text{ kg CO}_2 + 500 \text{ kg CO}_2 = 34600 \text{ kg CO}_2$$

$$E_{ukupno, SAD} = E_{proizvodnja, ICEV} + E_{Gorivo, ICEV, EU} + E_{reciklaža, ICEV}$$

$$E_{ukupno, SAD} = 5300 \text{ kg CO}_2 + 10 \cdot 2880 \text{ kg CO}_2 + 500 \text{ kg CO}_2 = 34600 \text{ kg CO}_2$$

$$E_{ukupno, Kina} = E_{proizvodnja, ICEV} + E_{Gorivo, ICEV, EU} + E_{reciklaža, ICEV}$$

$$E_{ukupno, Kina} = 5300 \text{ kg CO}_2 + 10 \cdot 2880 \text{ kg CO}_2 + 500 \text{ kg CO}_2 = 34600 \text{ kg CO}_2$$

5. Usporedba CO₂ emisija za različite vrste vozila

Tablica 5. Usporedba CO₂ emisija za scenarij korištenja vozila u EU, SAD-u i Kini

Tip vozila	Europska unija (5 godina)	Europska unija (10 godina)	SAD (5 godina)	SAD (10 godina)	Kina (5 godina)	Kina (10 godina)
Električna vozila (EV)	20003,86 kg CO ₂	23378,86 kg CO ₂	21878,86 kg CO ₂	27128,86 kg CO ₂	25973,86 kg CO ₂	35318,86 kg CO ₂
Plug-in hibridna vozila (PHEV)	16725,663 kg CO ₂	21541,288 kg CO ₂	17803,788 kg CO ₂	23697,538 kg CO ₂	20158,413 kg CO ₂	28406,788 kg CO ₂
Konvencionalna vozila (ICEV)	20200 kg CO ₂	34600 kg CO ₂	20200 kg CO ₂	34600 kg CO ₂	20200 kg CO ₂	34600 kg CO ₂

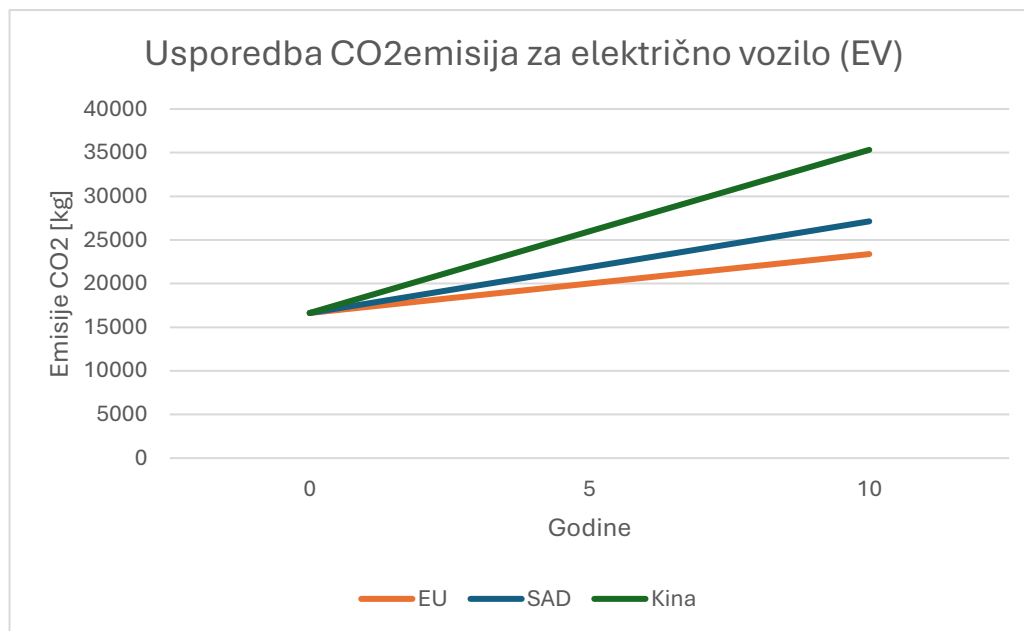
U tablici 5. prikazana je usporedba emisija CO₂ za različite vrste vozila: električno vozilo (EV), plug-in hibridno vozilo (PHEV) i konvencionalno vozilo (ICEV) za scenarij korištenja vozila u Europskoj uniji, SAD-u i Kini, tijekom razdoblja od 5 i 10 godina. Na temelju prikupljenih podataka i dijagrama može se zaključiti da električna vozila imaju najniže emisije CO₂ tijekom faze korištenja, osobito u Europskoj uniji, gdje je udio obnovljivih izvora energije u ukupnoj proizvodnji električne energije značajan. S druge strane, emisije EV-a u Kini su puno veće zbog dominantne upotrebe ugljena kao primarnog izvora električne energije, što smanjuje prednosti električnih vozila u odnosu na druge pogonske sustave.

Plug-in hibridna vozila zauzimaju srednju poziciju kada je riječ o emisijama CO₂. Njihova ekološka učinkovitost ovisi o učestalosti korištenja električnog pogona u odnosu na motor s unutarnjim izgaranjem. Ako se vozilo većinom koristi u električnom načinu rada, emisije su znatno niže, a u slučaju intenzivne upotrebe benzinskog ili dizelskog pogona emisije CO₂ su bliže onima koje proizvode konvencionalna vozila.

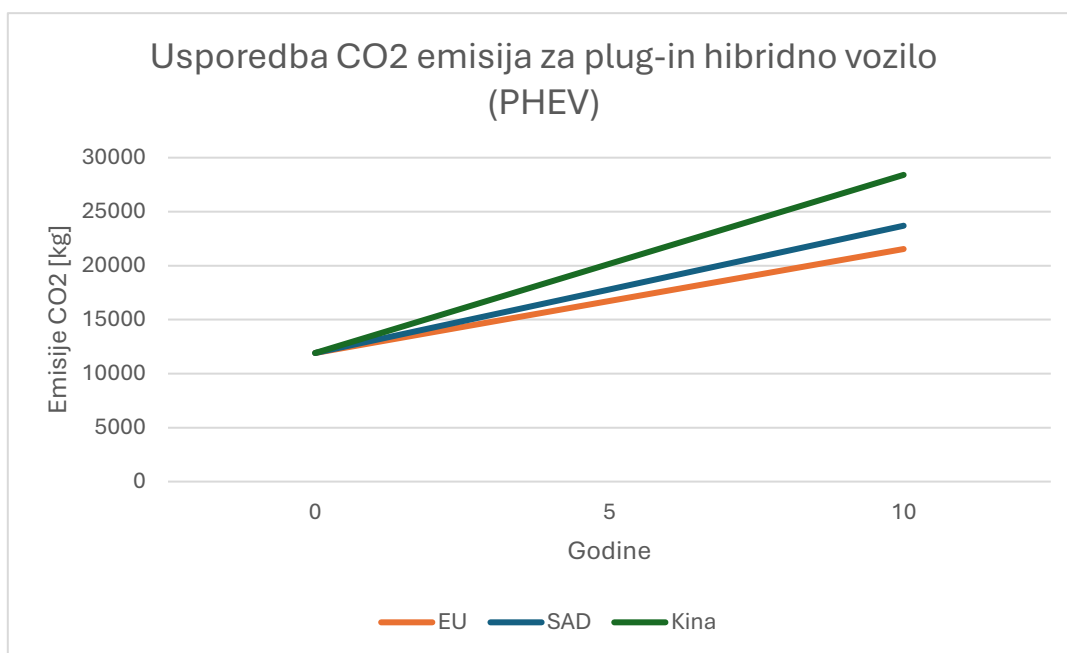
Konvencionalna vozila s motorima na unutarnje izgaranje imaju najveće emisije CO₂ među svim analiziranim vrstama pogona. Njihova emisija ostaje gotovo konstantna bez obzira na regiju jer ne ovise o elektroenergetskom sustavu određene države, već ovise o količini i vrsti korištenog goriva.

Dugoročna analiza pokazuje da se emisije povećavaju proporcionalno duljem razdoblju korištenja vozila. Međutim, relativni odnosi među vrstama pogona ostaju isti. Električna vozila su najpovoljnija opcija u pogledu emisija, dok su konvencionalna vozila najnepovoljnija. Plug-in hibridna vozila smještena su između ove dvije krajnosti, ali njihova učinkovitost snažno ovisi o načinu upotrebe i učestalosti punjenja baterije.

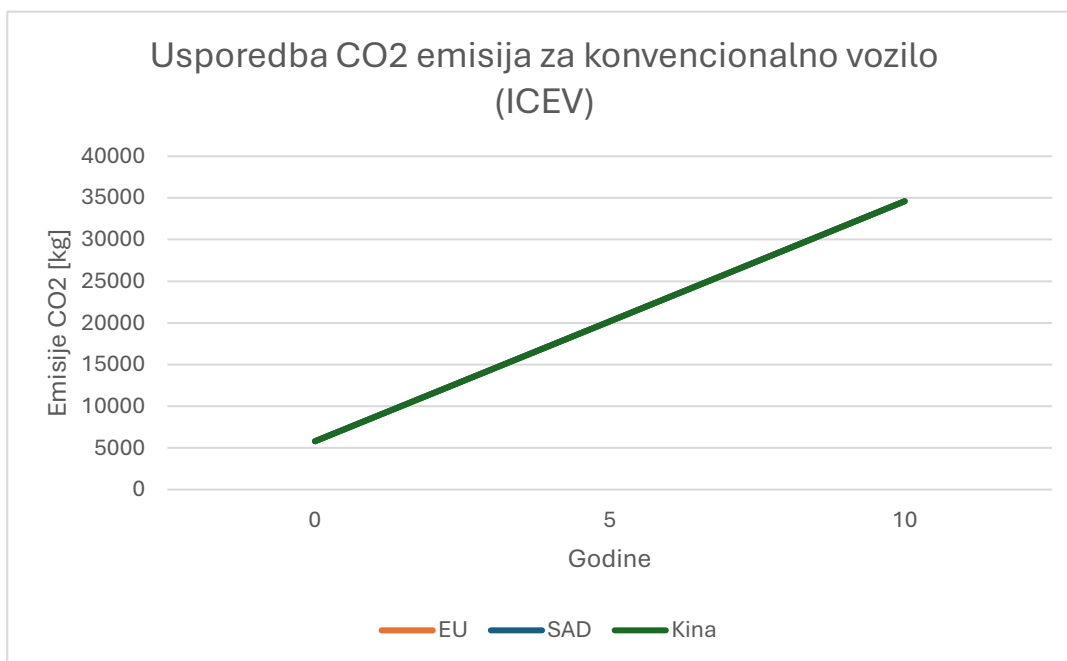
Podaci u tablici i dijagramima ukazuju na bitne razlike između regija u pogledu emisija EV-a i PHEV-a, što jasno pokazuje da okolišna isplativost elektrifikacije prometa nije univerzalna, već dosta ovisi o energetske politikama i strukturi proizvodnje električne energije u pojedinoj zemlji. Maksimalne koristi od elektrifikacije vozila mogu se ostvariti samo ako istovremeno dođe do prelaska na čišće izvore energije.



Slika 21. Usporedba CO2 emisija za električno vozilo (EV)



Slika 22. Usporedba CO2 emisija za plug-in hibridno vozilo (PHEV)



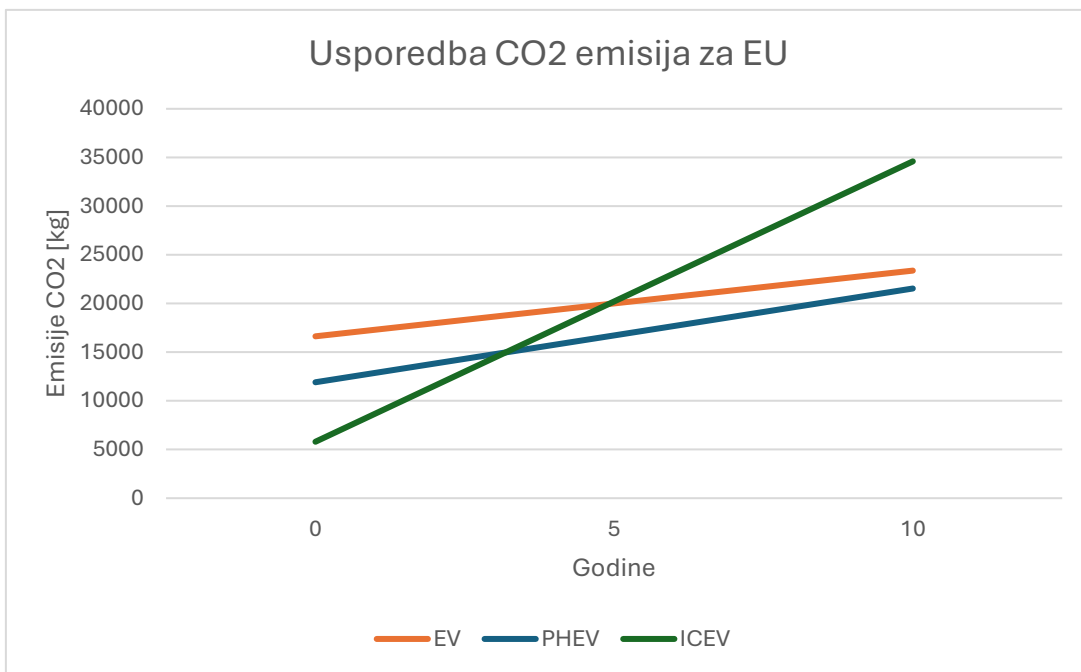
Slika 23. Usporedba CO2 emisija za konvencionalno vozilo (ICEV)

Na slici 24, koja prikazuje emisije CO₂ u Europskoj uniji, vidi se da električna vozila (EV) imaju najmanji nagib porasta emisija tijekom vremena. To se može protumačiti da u EU imamo relativno čistu energetska mješavinu, s većim udjelom obnovljivih izvora energije, što smanjuje emisije povezane s proizvodnjom električne energije. Plug-in hibridna vozila (PHEV) imaju nešto veći nagib rasta emisija, što govori da se značajan dio njihove potrošnje energije oslanja na fosilna goriva. Konvencionalna vozila (ICEV) pokazuju najstrmiji nagib, jer njihove emisije kontinuirano rastu zbog stalne potrošnje goriva.

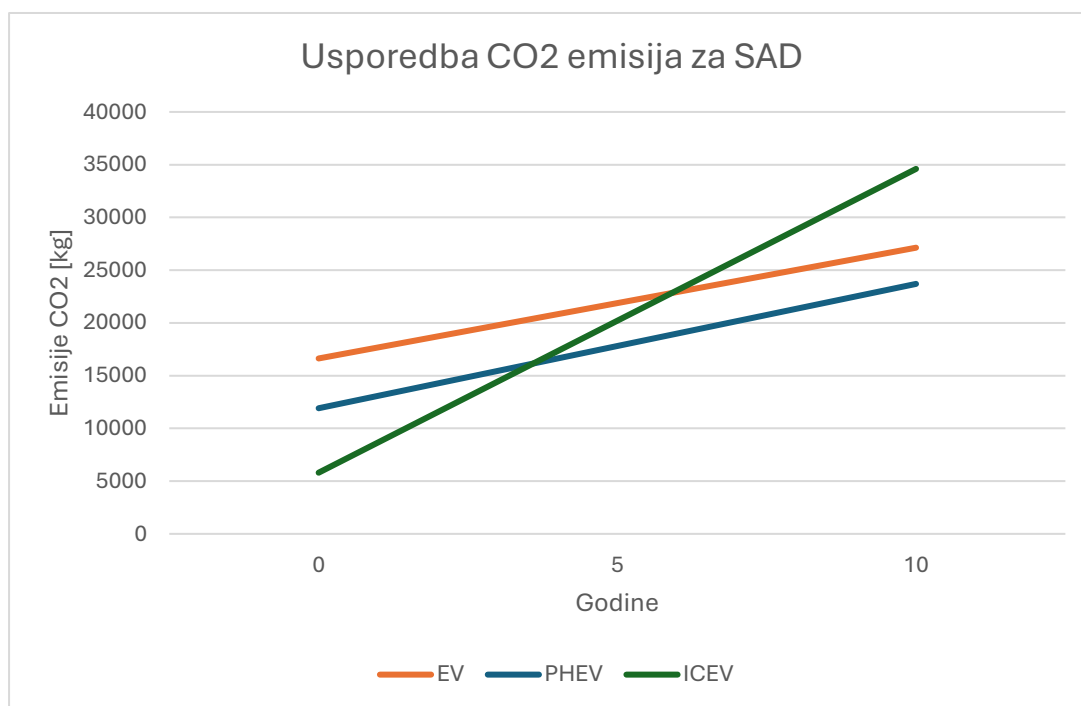
Na slici 25. koja prikazuje emisije u SAD-u, nagib krivulje za električna vozila nešto je strmiji u odnosu na EU. To ukazuje na činjenicu da energetska mješavina u SAD-u sadrži veći udio fosilnih goriva, što rezultira većim emisijama iz električne mreže. PHEV vozila također pokazuju veći rast emisija u odnosu na EU, dok ICEV vozila i dalje imaju linearan i visok rast emisija CO₂.

Na slici 26., koja prikazuje emisije u Kini, vidljivo je da EV vozila imaju daleko strmiji nagib u usporedbi s EU i SAD-om. To je posljedica dominantne upotrebe ugljena u kineskoj elektroenergetskoj mreži, što značajno povećava emisije povezane s punjenjem baterija električnih vozila. PHEV vozila u Kini također pokazuju veći rast emisija u odnosu na ostale regije, dok ICEV vozila zadržavaju sličan trend kao u ostalim dijelovima svijeta.

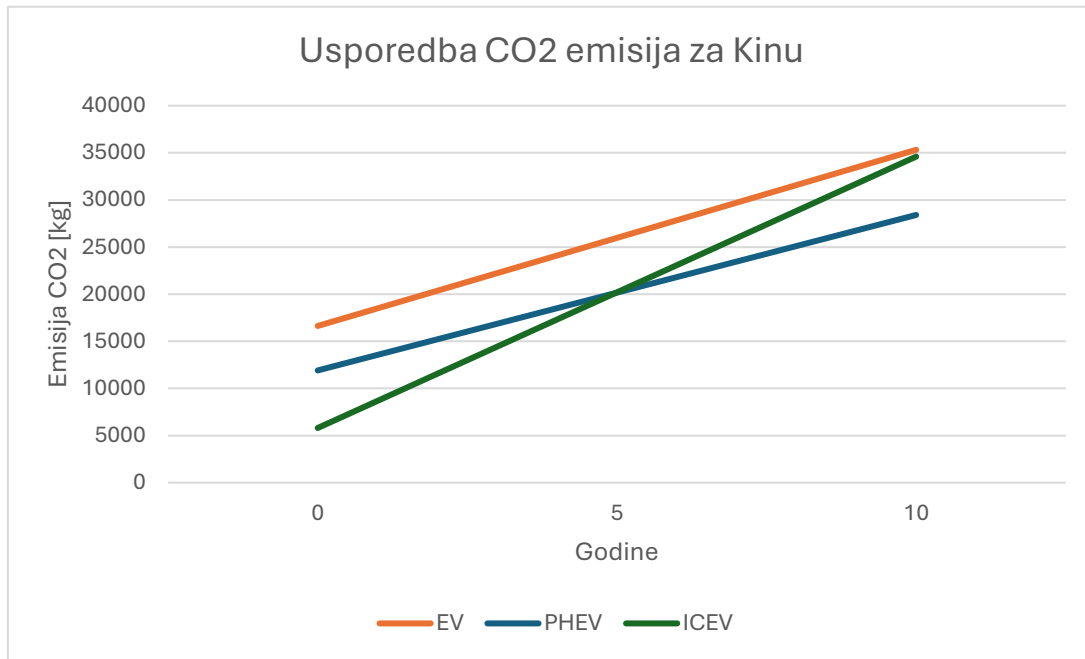
Općenito, analiza nagiba krivulja potvrđuje da okolišna korist električnih vozila uvelike ovisi o izvorima električne energije u pojedinoj regiji. U regijama s visokim udjelom obnovljivih izvora, poput EU, EV vozila imaju značajno niže emisije tijekom životnog ciklusa. S druge strane, u regijama koje se oslanjaju na fosilna goriva, poput Kine, ekološke prednosti EV-a su smanjene, a njihova ukupna emisija može biti veća nego u regijama s čistom električnom energijom.



Slika 24. Usporedba CO2 emisija za EU



Slika 25. Usporedba CO2 emisija za SAD



Slika 26. Usporedba CO2 emisija za Kinu

6. Zaključak

Različiti katalogi automobila namijenjeni za potrošače često prikazuju samo emisije koje nastaju kada se vozilo vozi, zbog čega se stvara pogrešan dojam da vozila s nultom emisijom uopće ne ispuštaju CO₂. Ti katalogi ne uzimaju u obzir emisije iz drugih faza životnog ciklusa vozila. Zbog toga se koristi analiza životnog ciklusa (LCA) kako bi se usporedio njihov utjecaj na klimu.

Električna vozila (EV) proizvode najveće emisije tijekom proizvodnje zbog velikih baterija, ali zato imaju vrlo niske emisije tijekom upotrebe, posebno ako se električna energija uzima iz obnovljivih izvora. Reciklaža baterija još uvijek predstavlja ekološki problem, ali tehnologija se razvija kako bi smanjila emisije na kraju životnog ciklusa takve vrste vozila.

Plug-in hibridna vozila (PHEV) imaju niže emisije od konvencionalnih vozila tijekom korištenja u vožnji jer mogu koristiti električnu energiju na kraće udaljenosti. Međutim, zbog kombinacije elektromotora i motora s unutarnjim izgaranjem, ukupne emisije mogu ovisiti o načinu vožnje i učestalosti punjenja baterije.

Konvencionalna vozila (ICEV) imaju emisije tijekom upotrebe jednake u EU, SAD-u i Kini zbog izgaranja fosilnih goriva, ali proizvode manje emisije u fazi proizvodnje u usporedbi s električnim i plug-in hibridnim vozilima. Iako su emisije na kraju životnog ciklusa manje nego kod električnih vozila, njihov doprinos globalnim emisijama CO₂ je dugoročno značajan zbog stalne potrošnje fosilnih goriva.

EV pružaju najveće smanjenje emisija CO₂ kroz cijeli životni ciklus, pogotovo ako se koriste s obnovljivom električnom energijom, dok PHEV mogu ponuditi bolju ravnotežu između smanjenja emisija i praktičnosti, a konvencionalna vozila ostaju najlošija opcija u pogledu emisija CO₂ tijekom cijelog životnog ciklusa.

Ovaj rad pokazuje da je za ispravno tumačenje stvarnih učinaka pojedinih tehnologija potrebno koristiti LCA metodu za analizu tih utjecaja, a ne samo sirove emisije iz vozila.

Literatura:

- [1] Hung, C. R., Völler, S., Agez, M., Majeau-Bettez, G., & Strømman, A. H. (2021). Regionalized climate footprints of battery electric vehicles in Europe. *Journal of Cleaner Production*, 322, 129052.
- [2] <https://www.eea.europa.eu/publications/transport-and-environment-report-2021>
- [3] https://www.tesla.com/ownersmanual/model3/hr_hr/GUID-8FA15856-1720-440F-838B-ACFBA8D7D608.html
- [4] Ćurković, T., Fabojanić, M., Grošelj, M. i dr.: “ Elektromobilnosti – Učenje o elektromobilnosti u okviru projekta Learning E-Mobility“, Škola za cestovni promet Zagreb, 2017.
- [5] <https://www.automoli.com/hr/vehicles/tesla/model-3/model-3-6100/>
- [6] <https://climate.mit.edu/ask-mit/how-much-co2-emitted-manufacturing-batteries>
- [7] <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/the-race-to-decarbonize-electric-vehicle-batteries>
- [8] https://www.researchgate.net/publication/354656719_Regionalized_climate_footprints_of_battery_electric_vehicles_in_Europe
- [9] Kawamoto, R., Mochizuki, H., Moriguchi, Y., Nakano, T., Motohashi, M., Sakai, Y., & Inaba, A. (2019). Estimation of CO2 emissions of internal combustion engine vehicle and battery electric vehicle using LCA. *Sustainability*, 11(9), 2690.
- [10] <https://www.iea.org/dana-and-statistics/charts/carbon-intensity-of-electricity-generation-in-selected-countries-and-regions-2000-2020>
- [11] <https://floodlightinvest.com/recycling-of-lithium-batteries-and-ghg-emissions/>
- [12] Qiao Qinyu, Zhao Fuquan, Liu Zongwei, Hao Han. Electric vehicle recycling in China: Economic and environmental benefits. *Resour Conserv Recy* 2019;140:45–53.
- [13] Qiao Qinyu, Zhao Fuquan, Liu Zongwei, He Xin, Hao Han. Life cycle greenhouse gas emissions of Electric Vehicles in China: Combining the vehicle cycle and fuel cycle. *Energy* 2019;177:222–33.
- [14] https://www.autoevolution.com/cars/volkswagen-passat-gte-2019.html#aeng_volkswagen-passat-gte-2019-14l-tsi-6at-218-hp
- [15] Renewable and Sustainable Energy Reviews | Journal | ScienceDirect.com by Elsevier
- [16] <https://www.testdrive.hr/automobili/volkswagen/passat/passat-2019/motor/2-0-tsi-dsg-140kw-190ks/>
- [17] Volkswagen Aktiengesellschaft. Klimabilanz von E-Fahrzeugen & life cycle engineering. 2019, (Accessed on 2021-10-15). URL: https://uploads.volkswagen-newsroom.com/system/production/uploaded_files/14448/file/da01b16ac9b580a3c8bc190ea2af27db4e0d4546/Klimabilanz_von_E_Fahrzeugen_Life_Cycle_Engineering.pdf?1556110703.