Električni automobili kao dio zelene tranzicije, stvarno rješenje ili mit ?



Džejlan Hrelja
B.A. Turizma i zaštite životne sredine
dzejlan.hrelja@student.pmf.unsa.ba

Ključne riječi: elektični automobili, ekologija, zagađenje, štetni metali, infrastruktura, recikliranje

Sažetak: Električni automobili danas se često promatraju kao ključni element globalne energetske tranzicije. Doprinose smanjenju emisija stakleničkih plinova, smanjuju ovisnost o fosilnim gorivima i poboljšavaju kvalitetu zraka u urbanim sredinama. Zahvaljujući činjenici da tijekom vožnje ne proizvode izravne emisije, brzo su postali simbol tehnološkog napretka i održive budućnosti. Ipak, da bi električni automobili zaista bili „zeleni", potrebno je sagledati njihov puni životni ciklus, od vađenja sirovina potrebnih za baterije, preko energetski intenzivne proizvodnje, punjenja električnom energijom različitog porijekla, pa sve do procesa recikliranja na kraju njihove upotrebe. Iza sjajne površine, ti tihi i elegantni strojevi nose sa sobom mnogo kompleksniju stvarnost. Promocijska retorika često zanemaruje ozbiljne ekološke izazove povezane s njihovom proizvodnjom i zbrinjavanjem. Znanstvena literatura sve glasnije upozorava da električna vozila nisu bez negativnih posljedica te da njihov stvarni ekološki otisak otvara niz važnih pitanja. Upravo zato ovaj članak donosi pregled ključnih problema vezanih uz električne automobile i kritički osvrt temeljen na vjerodostojnim akademskim izvorima.

1. Uvod

Električni automobili posljednjih godina postali su simbol globalne zelene tranzicije i tehnološkog napretka koji bi trebao doprinijeti smanjenju emisija stakleničkih plinova i ublažavanju klimatskih promjena. Vlade širom svijeta sve intenzivnije subvencioniraju kupovinu električnih vozila, donose planove zabrane motora s unutrašnjim sagorijevanjem i grade narative u kojima je elektromobilnost ključni stub održive budućnosti. Automobilska industrija također promoviše EV kao čistu i odgovornu alternativu, naglašavajući smanjenu potrošnju fosilnih goriva i tiši, energetski efikasniji rad.

Međutim, iza ovakve optimistične slike stoje brojna otvorena pitanja i kontroverze. Sve veći broj studija upozorava da električni automobili nisu nužno „čisti“ koliko se prezentira, posebno kada se posmatra njihov puni životni ciklus: od rudarenja kritičnih minerala poput litija, kobalta i nikla, preko energetski intenzivne proizvodnje baterija, pa sve do problema odlaganja i reciklaže istrošenih akumulatora. Ekološki otisak ovih procesa često je značajan, a u nekim slučajevima i razoran za lokalne ekosisteme i zajednice u zemljama gdje se sirovine eksploatišu.

Uz ekološki aspekt, postoje i ekonomske i društvene dileme. Cijena električnih vozila i dalje je visoka u odnosu na prosječna primanja u mnogim državama, infrastruktura za punjenje je neravnomjerno razvijena, a ovisnost o uvozu sirovina otvara geopolitička pitanja i rizike od tržišnih monopola. Također, energetski miks država igra ključnu ulogu u procjeni stvarne održivosti — električno vozilo napunjeno strujom dobijenom iz uglja ne može se smatrati „zelenim“, bez obzira na tehnologiju koju koristi.

Sve ovo dovodi do ključnog pitanja: predstavljaju li električni automobili zaista dugoročno održivo rješenje ili je riječ o modernom mitu koji se koristi kao privremeni odgovor na krizu fosilnih goriva? Da bismo došli do realnog zaključka, potrebno je sagledati i prednosti i nedostatke elektromobilnosti, analizirati naučne podatke te razmotriti širi ekološki, ekonomski i društveni kontekst.

2. Vrste električnih automobila

Savremena automobilska industrija prolazi kroz duboku transformaciju potaknutu rastućim zahtjevima za smanjenjem emisija i prelaskom na održivije oblike mobilnosti. U tom procesu razvijene su različite vrste alternativnih pogona koje nastoje zamijeniti ili smanjiti upotrebu fosilnih goriva.

2.1. Battery Electric Vehicles (BEV) - potpuno električni

Battery Electric Vehicles (BEV) predstavljaju vozila koja koriste isključivo električni motor i energiju iz punjivih baterija, bez ikakvog oblika unutrašnjeg sagorijevanja. Zbog toga nemaju direktne emisije tokom vožnje i smatraju se jednim od ključnih elemenata energetske tranzicije u transportu (EMIC-BG, 2020). Tehnički pogon BEV-ova obuhvata bateriju, inverter i električni motor, a savremeni sistemi upravljanja baterijom optimiziraju performanse, sigurnost i trajnost (Cummins, 2024).

Napredak u tehnologiji baterija i power-elektronike ubrzava razvoj BEV-ova, pri čemu automobilska industrija sve više usvaja poboljšane litijum-jonske baterije i efikasnije pogonske sklopove (Lee, 2025). Domet BEV-ova zavisi od uslova vožnje, temperature i načina korištenja, ali se kontinuirano povećava zbog poboljšanja u gustoći energije (EMIC-BG, 2020).

Ekološke prednosti uključuju smanjenje lokalnog zagađenja i mogućnost znatnog smanjenja ukupnih emisija CO_2, naročito u sistemima sa visokim udjelom obnovljivih izvora energije (Filipović, 2024). Ipak, ekološki učinak zavisi i od proizvodnje električne energije, kao i od eksploatacije sirovina potrebnih za izradu baterija, poput litijuma i kobalta, što predstavlja značajan izazov (CSS, 2023).

Tržište BEV-ova globalno raste, a tehnologija se usmjerava ka povećanju dometa, skraćivanju vremena punjenja i smanjenju troškova baterija. Zbog regulatornih zahtjeva i pada cijena tehnologije, BEV-ovi se sve više nameću kao primarna alternativa vozilima na fosilna goriva (Lee, 2025). Međutim, širenje infrastrukture za punjenje ostaje ključan faktor za njihovu punu primjenu (Gov. Wales, 2024).

2.2. Plug-in hibridna električna vozila (PHEV)

Plug-in hibridna električna vozila (PHEV) predstavljaju kombinovani pogonski sistem koji spaja elektromotor i motor s unutrašnjim sagorijevanjem, a baterija se može puniti iz vanjskog izvora električne energije. Ova tehnologija omogućava vožnju na čisto električni pogon na

kraćim udaljenostima, dok motor s unutrašnjim sagorijevanjem osigurava produženi domet i fleksibilnost u vožnji (IEA, 2023). PHEV-ovi su tako zamišljeni kao prijelazna tehnologija između konvencionalnih automobila i potpuno električnih BEV-ova.

Baterija u PHEV-ovima je manjeg kapaciteta u odnosu na BEV-ove, ali dovoljna za svakodnevne gradske relacije, pri čemu se najčešće ostvaruje 30–80 km električnog dometa (Transport & Environment, 2022). Kada se baterija isprazni, vozilo prelazi na hibridni način rada i kombinuje oba izvora pogona, čime se smanjuje "range anxiety" kod korisnika (Helmers & Marx, 2021).

Ekološke prednosti PHEV-ova u praksi zavise od učestalosti punjenja. Ako se redovno pune i koriste u električnom modu, mogu značajno smanjiti emisije CO_2 u urbanim područjima (ICCT, 2023). Međutim, istraživanja pokazuju da stvarne emisije PHEV-ova mogu biti veće od deklariranih ako se voze primarno na motor s unutrašnjim sagorijevanjem zbog nedovoljnog punjenja (Transport & Environment, 2022). Zbog toga se naglašava važnost korisničkog ponašanja i dostupnosti infrastrukture za punjenje.

Tržište PHEV-ova i dalje je snažno, posebno u regijama gdje vlade nude poticaje i gdje kupci traže balans između električnog pogona i dugog dometa (IEA, 2023). Iako PHEV-ovi doprinose smanjenju potrošnje goriva i emisija, smatra se da će njihova uloga s vremenom opadati kako potpuno električna vozila postaju pristupačnija i tehnološki naprednija (ICCT, 2023).

2.3. HEV (klasični hibridi)

Hibridna električna vozila (HEV) koriste kombinaciju motora s unutrašnjim sagorijevanjem i jednog ili više elektromotora, pri čemu se baterija puni isključivo putem regenerativnog kočenja i rada motora, a ne priključivanjem na vanjski izvor energije. Zbog toga se HEV-ovi ponekad nazivaju "klasičnim hibridima" i predstavljaju najrasprostranjeniji oblik hibridne tehnologije (Chan, 2007).

HEV sistem upravlja pogonom tako da se pri manjim brzinama i laganim opterećenjima koristi električni motor, dok se pri većim snagama uključuje motor s unutrašnjim sagorijevanjem. Ova kombinacija povećava energetsku efikasnost i smanjuje potrošnju goriva u odnosu na tradicionalna vozila na benzin ili dizel (Ehsani et al., 2020). Regenerativno kočenje omogućava pretvaranje kinetičke energije u električnu, čime se poboljšava ukupna efikasnost pogonskog sistema.

Ekološki učinak HEV-ova ogleda se u smanjenju emisija CO_2 i zagađujućih čestica, posebno u urbanim sredinama gdje vozilo često radi u režimu niskih brzina i koristi električni motor (IEA, 2023). Ipak, smanjenje emisija je skromnije nego kod BEV ili PHEV vozila, s obzirom na to da motor s unutrašnjim sagorijevanjem ostaje glavni izvor energije pri većim brzinama i dugim relacijama.

Prednost HEV-a je što ne zahtijevaju infrastrukturu za punjenje, te nude jednostavnu adaptaciju korisnicima koji prelaze s klasičnih vozila. Zbog njihove pouzdanosti i nižih operativnih troškova, HEV-ovi su dugo bili najpopularnija alternativna tehnologija pogona, posebno u segmentu putničkih automobila (Toyota, 2022). Međutim, njihov tržišni značaj postupno se smanjuje kako rastuća dostupnost BEV-ova i jačanje politika dekarbonizacije potiču prelazak na vozila bez emisija (IEA, 2023).

2.4. Vozila na vodik (FCEV) – vrlo rijetka

Vozila s gorivnim ćelijama na vodik (Fuel Cell Electric Vehicles – FCEV) koriste vodik kao gorivo za proizvodnju električne energije unutar gorivne ćelije, pri čemu se kao nusproizvod stvara samo vodena para. Time FCEV spadaju u vozila bez lokalnih emisija, slična BEV-ovima, ali sa značajno kraćim vremenom punjenja i većim dometom (Ehsani et al., 2020). Iako tehnološki napredna, ova vozila su još uvijek vrlo rijetka na tržištu zbog niza infrastrukturnih i ekonomskih prepreka.

Gorivna ćelija u FCEV-u pretvara hemijsku energiju vodika u električnu putem elektrokemijske reakcije s kisikom iz zraka. Električna energija napaja elektromotor, dok manja baterija služi za skladištenje energije iz regenerativnog kočenja i za podršku pri većim opterećenjima (Ogden & Jaffe, 2021). Prednosti ove tehnologije uključuju domet usporediv s klasičnim automobilima na fosilna goriva i završetak „punjenja“ za svega 3–5 minuta.

Međutim, primjena FCEV-ova ograničena je zbog vrlo skromno razvijene infrastrukture za vodik, visokih troškova proizvodnje gorivnih ćelija i izazova u održivoj proizvodnji vodika. Većina dostupnog vodika danas se proizvodi postupcima koji koriste fosilna goriva, što smanjuje ekološku korist FCEV-a (IEA, 2022). Tek prelazak na tzv. „zeleni vodik“, proizveden elektrolizom uz obnovljivu energiju, omogućio bi njihov pun potencijal u dekarbonizaciji transporta.

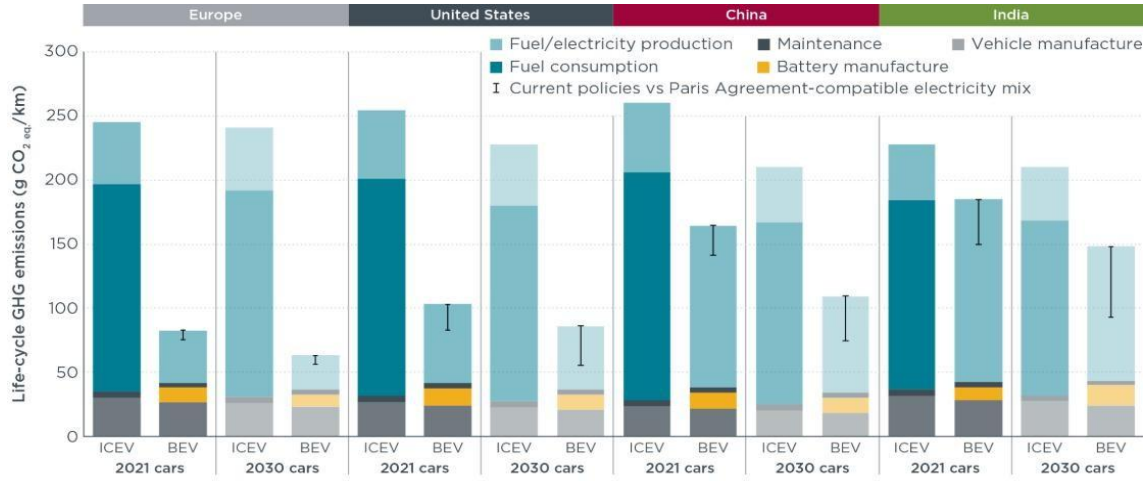
Zbog visoke cijene, potrebe za složenom infrastrukturom i snažnog tržišnog rasta BEV vozila, FCEV-ovi su danas prisutni uglavnom u nišnim segmentima, najčešće u Japanu, Južnoj Koreji

i dijelovima SAD-a (Miyamoto, 2023). Iako nude tehničke prednosti, njihova šira komercijalizacija zasad ostaje ograničena.

Zbog visoke cijene, potrebe za složenom infrastrukturom i snažnog tržišnog rasta BEV vozila, FCEV-ovi su danas prisutni uglavnom u nišnim segmentima, najčešće u Japanu, Južnoj Koreji i dijelovima SAD-a (Miyamoto, 2023). Iako nude tehničke prednosti, njihova šira komercijalizacija zasad ostaje ograničena.

3. Ekološki otisak proizvodnje baterija u životnom ciklusu električnih automobila

Najveća ekološka kritika električnih automobila odnosi se na proizvodnju litij-ionskih baterija. Taj proces iznimno je energetski intenzivan i zahtijeva eksploataciju metala poput litija, kobalta, nikla i grafita. Studije životnog ciklusa (LCA) dosljedno pokazuju da električna vozila imaju znatno veće emisije CO_2 u fazi proizvodnje nego vozila s unutarnjim sagorjevanjem. Prema jednoj od najcitiranijih analiza (IVL Swedish Environmental Research Institute), sama baterija kapaciteta 30–60 kWh može generirati 150–200 kg CO_2 po kWh kapaciteta, što znači da samo proizvodnja baterije može rezultirati emisijama većim od 10 tona CO_2 (Romare & Dahllöf 2017). Osim klimatskog utjecaja, tu su i socijalno-ekološki problemi: vađenje kobalta u Demokratskoj Republici Kongo povezano je s dječjim radom, nesigurnim uvjetima i teškim zagađenjem tla (Amnesty International 2016). Drugim riječima, „čista mobilnost“ često se temelji na vrlo nečistim početnim koracima.



Grafikon 1. Usporedba emisija stakleničkih plinova po životnom ciklusu putničkih vozila s unutarnjim sagorijevanjem i električnih vozila na globalnoj razini

Izvor: The International Council of Clean transportation (2021)

Jasno je prikazano (Grafikon 1.) da emisije CO_2 pri proizvodnji električnog vozila, posebno baterije, mogu biti znatno veće od emisija klasičnih automobila s unutrašnjim sagorijevanjem. Ovo ilustrira tzv. „ekološki dug” EV-a – velika emisija nastaje odmah pri proizvodnji, dok se prednosti (niže emisije tokom uptrebe) ostvaruju tek tokom vožnje. Dakle, iako EV smanjuje lokalne emisije u prometu, grafikon

naglašava da proizvodnja baterije ima značajan negativni utjecaj na okoliš, što se često zanemaruje u popularnim prikazima „zelenih automobila".

- Na vertikalnoj osi prikazane su emisije CO_2 - ekvivalent po kilometru ili po životnom ciklusu vozila.
- Na horizontalnoj osi prikazane su različite vrste vozila: tradicionalna vozila na benzin/dizel i električna vozila s različitim kapacitetima baterija.

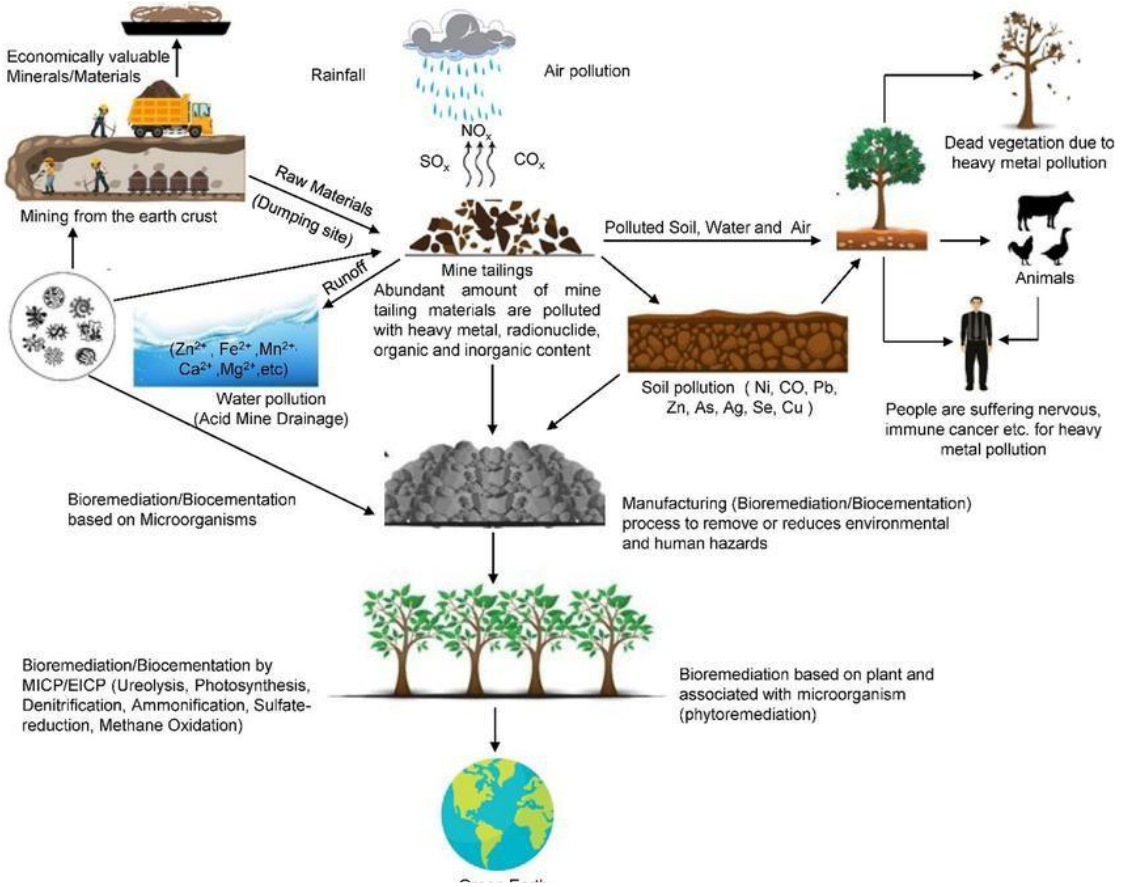
FAZA ŽIVOTNOG CIKLUSA	TRADICIONALNI AUTOMOBILI	ELEKTRIČNI AUTOMOBILI	ZAKLJUČAK
Proizvodnja vozila i baterije	Srednje visoke emisije CO_2 (~6–8 t)	Visoke emisije CO_2 (~10–12 t), veći dio zbog baterije	Proizvodnja EV-a ima veći ekološki otisak, osobito baterije
Upotreba/Vožnja	Emisije CO_2 iz ispušnih plinova (~120–200 g/km)	Emisije ovise o izvoru struje: niska do umjerena (~0–100 g/km ekv.)	EV smanjuje lokalne emisije; stvarna korist ovisi o energiji za punjenje
Kraj životnog ciklusa	Standardno recikliranje metala, emisije relativno niske	Recikliranje baterija još nije u potpunosti učinkovito, emisije dodatne	Otpad i recikliranje baterija predstavlja ekološki izazov

Tabela 1. Usporedba emisija stakleničkih plinova po životnom ciklusu putničkih vozila s unutarnjim sagorijevanjem i električnih vozila na globalnoj razini

Izvor: Autor na osnovu: The International Council of Clean transportation (2021)

4. Eksploatacija sirovina i degradacija životne sredine

Električna vozila često se predstavljaju kao ključna tehnologija za smanjenje globalnih emisija stakleničkih plinova i ublažavanje klimatskih promjena. Međutim, iza slike „čiste" mobilnosti stoji kompleksna mreža ekoloških i društvenih izazova povezanih s eksploatacijom metala potrebnih za proizvodnju litij-ionskih baterija. Baterije za EV zahtijevaju velike količine litija, kobalta, nikla, mangana, grafita i rijetkih zemnih metala, čije rudarstvo i prerada ostavljaju ozbiljne posljedice na ekosisteme, vodne resurse i lokalne zajednice. Naučna literatura dosljedno potvrđuje da je ekološki otisak rudarstva ovih sirovina znatno veći nego što sugerira promotivna retorika o „zelenoj mobilnosti".



Slika 1. Shematski prikaz rudarskih eksploatacije i ekološkog zagađenja povezanog s rizicima i tehnikama ublažavanja.

Izvor: Unlocking the potential of microbes: biocementation technology for mine tailings restoration — a comprehensive review (Mahabub et al., 2023)

4.1. Eksploatacija litija: iscrpljivanje vodnih resursa i degradacija tla

Najveće svjetske rezerve litija nalaze se u tzv. „litijskom trokutu" Južne Amerike — Čile, Argentina i Bolivija. Dobijanje litija iz slanih jezera zahtijeva isparavanje ogromnih količina podzemne slane vode. Za jednu tonu litija može se potrošiti i do 2 milijuna litara vode, što dovodi do značajnog pada razine podzemnih voda i dezertifikacije osjetljivih ekosistema (Flexer, Baspineiro & Galli, 2018). U regiji Atacama zabilježeno je pogoršanje uslova za autohtone zajednice koje ovise o poljoprivredi i stočarstvu — smanjuje se biodiverzitet, vegetacijski pokrivači i dostupnost pitke vode (Liu & Agusdinata, 2020).

4.2. Toksično zagađenje kobaltom i povezani zdravstveni rizici

Kobalt je kritična komponenta NMC baterija, a više od 70% svjetske proizvodnje dolazi iz Demokratske Republike Kongo (USGS, 2022). Intenzivno rudarstvo u regijama Katanga i Kolwezi dovelo je do ekstremnih razina zagađenja teškim metalima. Studije pokazuju koncentracije kobalta, arsena, urana i kadmija u tlu i vodi 10–50 puta iznad sigurnosnih granica (Ngoy et al., 2017; Banza et al., 2009). Ovi kontaminanti ulaze u prehrambeni lanac, uzrokuju respiratorne bolesti, oštećenja organa i povećan rizik od malignih oboljenja.



Slika 2. Salar de Atacama (Čile) kako rudarenje litija i kobalta utječe na vodne resurse.

Izvor: The Environmental Impacts of Lithium and Cobalt Mining

Osim ekološkog razaranja, Amnesty International (2016) dokumentira prisustvo dječjeg rada, opasnih neformalnih rudnika i nesigurnih uvjeta eksploatacije, što prelazak na električnu mobilnost čini etički problematičnim.

4.3. Eksploatacija nikla: deforestacija i kisele otpadne vode

Nikal se intenzivno eksploatira u Indoneziji, Australiji i Filipinima. Proces obogaćivanja rude zahtijeva korištenje visokih temperatura i hemikalija, dok otpad često završava u okeanima u obliku tzv. „tailings" materijala. U Indoneziji je zbog rudarstva nikla izgubljeno na hiljade hektara prašume, što je dodatno ugrozilo endemske vrste (Carvalho et al., 2020). Kiseline i otpadni muljevi kontaminiraju riječne tokove i obalne zone, uzrokujući drastičan pad kvaliteta morske flore i faune.



Slika 3. Rudarstvo nikla u Morowaliju (Sulawesi), koje se nalazi u području važne biološke raznolikosti.

Izvor: Nickel mining on Sulawesi overlaps with globally important biodiversity areas, new research shows | IUCN NL

U okviru IMVO Sporazuma za sektor obnovljive energije, IUCN NL je naručio studiju o utjecaju rudarstva nikla na okoliš, povezanu s Industrijskim parkom Morowali na Sulawesiju, Indonezija. Nikal je važna sirovina za energetsku tranziciju. Koristi se za proizvodnju nehrđajućeg čelika i u procesu prelaska na električna vozila. Kako je ovaj industrijski park jedno od najvećih nalazišta nikla na svijetu, odabran je kao lokacija za istraživanje.

Studija je pokazala da je utjecaj na okoliš velikih razmjera i da se dešava i u područjima globalno važne biološke raznolikosti, takozvanim "Ključnim područjima biodiverziteta' (KBA). To su lokacije od globalnog značaja za ukupno zdravlje planete i opstanak biodiverziteta."

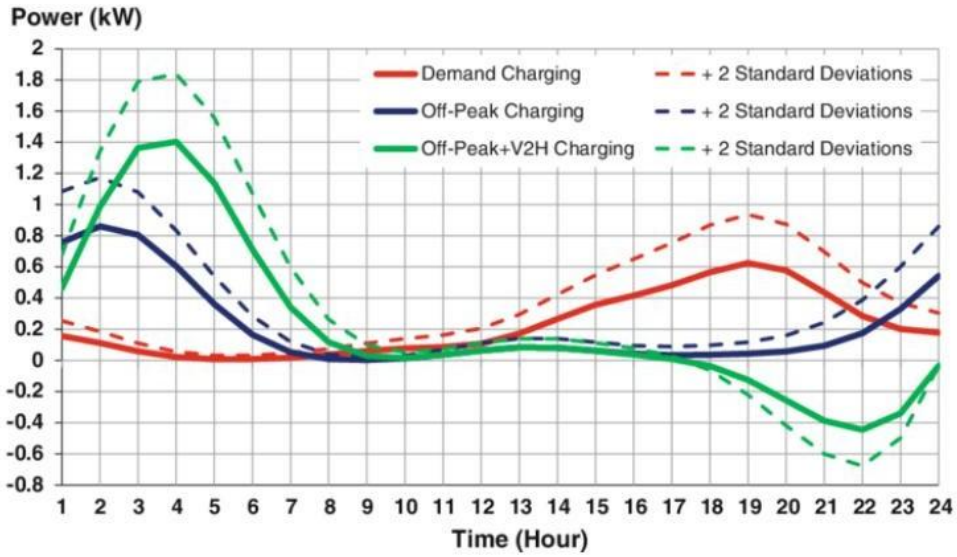


Slika 4. Prikaz preklapanja između rudarskih koncesija u Industrijskom parku Morowali i prisutnih KBA područja.

Izvor: Nickel mining on Sulawesi overlaps with globally important biodiversity areas, new research shows | IUCN NL

5. Elektroenergetska infrastruktura i izvori energije kao faktor održivosti

Brzi prelazak na električna vozila u urbanim sredinama predstavlja značajne izazove za elektroenergetsku infrastrukturu. Iako električna vozila tokom vožnje ne emitiraju CO_2 i štetne plinove, masovna integracija ovih vozila u energetski sistem zahtijeva mreže sposobne podnijeti dodatno opterećenje, osobito kod brzog punjenja (Chen et al., 2020). Brzo punjenje visokokapacitetsnih baterija može privremeno povećati potrošnju električne energije po vozilu za više od 50 kW po satu, što je znatno više od prosječne kućne potrošnje, a lokalne trafostanice često nisu dizajnirane za ovakve skokove opterećenja (Zhang et al., 2021). LCA i GIS studije pokazuju da nekontrolirano punjenje elektičnih vozila može stvoriti tzv. „vršna opterećenja" koja zahtijevaju značajna ulaganja u transformatorima, vodovima i distribucijske sisteme kako bi se održala pouzdanost opskrbe. Ako takva ulaganja izostanu, može doći do smanjenja kvalitete električne energije, učestalih prekida, povećanja cijena i destabilizacije lokalnih elektroenergetskih mreža (Chen et al., 2020; Hooftman et al., 2021). Ova problematika jasno pokazuje da prelazak na elektična vozila nije samo tehnološki izazov u vozilima, već zahtijeva strateško planiranje cijelog energetskog sistema. Iako električna vozila tokom vožnje ne emitiraju CO_2 ni štetne plinove, njihov ekološki učinak uveliko ovisi o tome odakle dolazi električna energija.



Slika 5. Predviđeni profili dnevnog punjenja EV- a po satu

Izvor: Spatio-temporal modelling of electric vehicle charging demand and impacts on peak household electrical load (Paevere et al., 2014)

Ako se vozilo puni energijom iz obnovljivih izvora, prednosti su jasne, ali u zemljama gdje je elektroenergetski miks dominantno fosilan, prednosti se smanjuju, a ponekad i potpuno nestaju. Ellingsen, Singh i Strømman (2016) pokazuju da u mrežama s visokim udjelom ugljena električna vozila mogu imati ukupne emisije usporedive s vrlo štedljivim benzinskim automobilima. Drugim riječima, električno vozilo može biti „nula na kotačima“, ali ne i „nula na utičnici“. Ovaj problem postaje još evidentniji kad se uzme u obzir činjenica da sve više država tek sporo prelazi na obnovljive izvore, dok potražnja za električnom energijom ubrzano raste.

6. „Prebacivanje problema“ - geografski i sektorski paradoks

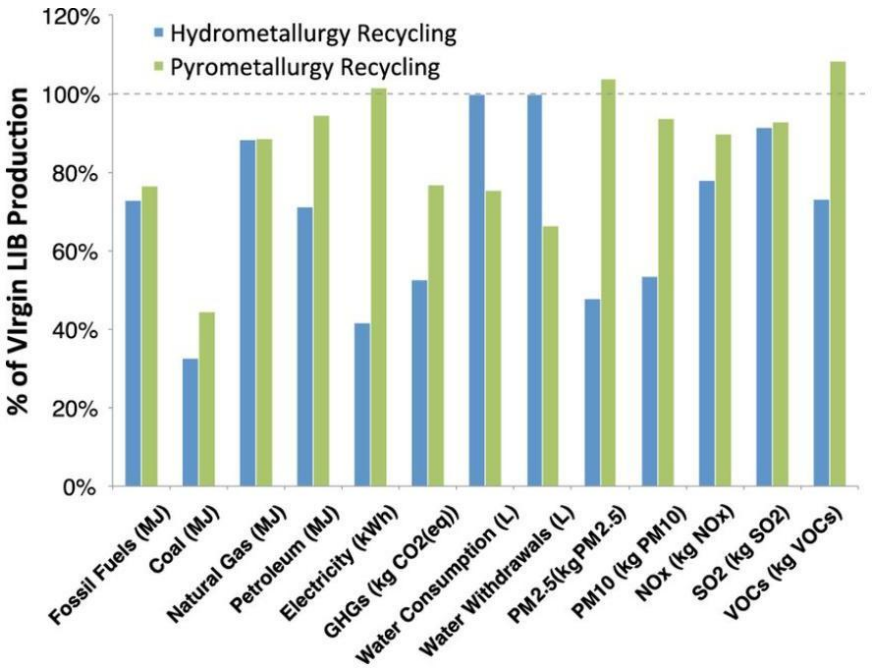
Pored tehničkih izazova, postoji i geografski i sektorski paradoks koji pokazuje da se ekološki problemi premještaju, a ne uklanjaju. Električni automobili smanjuju emisije i poboljšavaju kvalitetu zraka u urbanim sredinama, ali povećavaju potražnju za sirovinama i električnom energijom u regijama udaljenim od krajnjih korisnika. Rudarske regije, energetske elektrane i industrijske zone snose najveći teret, dok bogatije zemlje uživaju koristi u obliku čistog gradskog zraka (Hall & Lutsey, 2018). Studija Hall i Lutsey (2018) pokazuje da prelazak na električna vozila može stvoriti novo globalno nejednako opterećenje okoliša. Siromašnije zemlje često služe kao izvori kritičnih metala poput kobalta, nikla i litija, dok istovremeno primaju negativne posljedice rudarskih aktivnosti i zagađenja. Ovo ukazuje na potrebu za odgovornim lancem opskrbe i međunarodnim regulacijama koje mogu uravnotežiti koristi i teret prelaska na električnu mobilnost.

7. Problemi reciklaže i kraj životnog vijeka litij-ionskih baterija

Baterije električnih vozila često imaju životni vijek od osam do 15 godina, nakon čega njihov kapacitet opada ispod razine pogodnosti za pogon vozila (Harper et al., 2019). Iako industrija recikliranja napreduje, značajan dio baterija još uvijek ne prolazi kroz efikasan, zatvoreni reciklažni ciklus, što stvara okolišni i sigurnosni problem (Gaines, 2014).

LCA analiza Harpera (2019) naglašava da trenutni globalni kapaciteti recikliranja litij-ionskih baterija nisu dovoljni da obrade očekivane količine otpada iz električnih vozila. Raznolikost hemijskih sastava (npr. NMC, LFP) dodatno komplicira recikliranje jer različite baterije zahtijevaju različite procese uključujući hidrometalurgiju, pirometalurgiju i direktno recikliranje (Zeng et al., 2017).

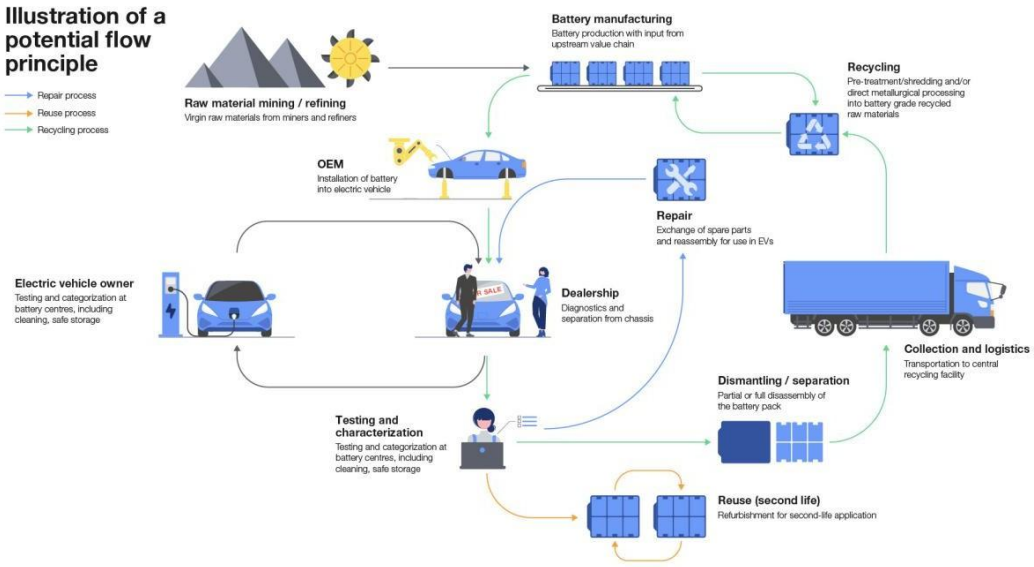
Nereciklirane baterije predstavljaju ozbiljan rizik od zapaljivosti do toksičnog otpada koji sadrži teške metale poput kobalta i nikla (Li et al., 2020). Koncept „second-life" baterija nudi potencijalno rješenje: nakon što baterije više nisu pogodne za vozila, mogu se prenamijeniti za stacionarnu pohranu energije. Studije pokazuju da ponovna upotreba LFP baterija u sistemima pohrane energije može značajno smanjiti utjecaj na okoliš do 50 kg CO_2-ekv po kWh baterije u određenim scenarijima (Li et al., 2020; Gaines, 2014). Međutim, drugi život baterija također nije bez izazova: performanse baterija degradiraju, što smanjuje njihovu učinkovitost i ekološku korist (Zeng et al., 2017). Sortiranje baterija prema stupnju degradacije i hemijskom sastavu još je tehnološki složen, iako su se napredne metode temeljene na mašinskom učenju pokazale obećavajućima (Liu et al., 2024). Infrastruktura reciklažnih tvornica često ne radi punim kapacitetom, a trošak transporta, demontaže i hemijske obrade dodatno ograničava skalabilnost procesa (Harper et al., 2019).



Grafikon 2. Usporedba resursnog korištenja i emisija okolišnog opterećenja kod proizvodnje i recikliranja litij-ionskih baterija

Izvor: Life-cycle implications and supply chain logistics of electric vehicle battery recycling in California (Hendrickson et al., 2015)

Grafikon 2. prikazuje usporedbu resursnog korištenja i emisija okolišnog opterećenja povezanih s proizvodnjom i recikliranjem litij-ionskih baterija, naglašavajući razlike između različitih metoda obrade. Tri glavne metode prikazane na slici su pirometalurgija, hidrometalurgija i direktno recikliranje (re-lithiation). Pirometalurgija je energetski najzahtjevnija metoda i proizvodi najveće emisije CO_2, uz relativno nižu učinkovitost u oporavku ključnih metala poput kobalta i nikla. Hidrometalurgija zahtijeva manje energije i smanjuje emisije, dok istovremeno omogućuje bolji oporavak kobalta, nikla i litija, ali je istovremeno povezano s većom potrošnjom hemikalija i vode. Direktno recikliranje pokazuje najniži ugljični otisak i visoku učinkovitost oporabe materijala, ali još je u razvojnoj fazi i njegova primjena je ograničena. Na slici su također prikazani ključni pokazatelji okolišnog utjecaja, uključujući emisije CO_2-ekvivalent, potrošnju primarne energije, utjecaj na vodne resurse i toksikološki učinak, kao i postotak oporabljenih metala. Iz prikaza se jasno vidi da recikliranje značajno smanjuje potrebu za vađenjem novih sirovina i ukupne emisije, ali učinkovitost i okolišni učinak značajno ovise o odabranoj metodi obrade. Pirometalurgija, iako najrasprostranjenija, nosi najveći ekološki teret, dok hidrometalurgija i direktno recikliranje pružaju bolje rezultate, posebno u oporabi kritičnih metala.



Slika 6. Prikaz kako bi trebala izgledati funkcionalna kružna vrijednosna karika (lanac vrijednosti) za baterije električnih vozila.

Izvor: 3 challenges en route to electric vehicle batteries driving the circular economy | World Economic Forum

8. Zaključak

Da li su električni i hibridni automobili održivo rješenje ili samo „zeleni marketing“?

Rasprava o električnim i hibridnim automobilima često se kreće između dvije krajnosti: jedne koja ih smatra ključem održive budućnosti i druge koja tvrdi da su samo proizvod „zelenog marketinga”. Analiza pokazuje da je istina složenija. Ove tehnologije donose stvarne ekološke i energetske koristi, ali su istovremeno opterećene nizom izazova koji ih sprečavaju da budu potpuno čisto i neupitno rješenje.

S jedne strane, električna vozila značajno smanjuju lokalne emisije CO_2 i poboljšavaju kvalitet zraka u urbanim sredinama, što je posebno važno u gustim i zagađenim gradovima. Osim toga, prelazak s fosilnih goriva na električni pogon doprinosi energetskoj nezavisnosti i smanjenju uvozne zavisnosti od nafte. Zemlje poput Norveške, Njemačke i Kine pokazuju da elektrifikacija transporta može igrati ključnu ulogu u strateškom smanjenju potrošnje naftnih derivata.

Norveška je najuspješniji primjer — široka državna podrška i gotovo potpuno obnovljiv elektroenergetski sistem omogućili su da električni automobili zaista smanje upotrebu fosilnih goriva. U Njemačkoj, gdje je energetski miks raznolik, električna vozila doprinose smanjenju emisija i uvoza nafte, ali u manjoj mjeri nego u Norveškoj. Kina, kao najveće EV tržište na svijetu, koristi elektrifikaciju transporta radi smanjenja zavisnosti od uvoza nafte i jačanja vlastite industrije baterija, iako istovremeno još uvijek u velikoj mjeri ovisi o termoelektranama.

S druge strane, električna i hibridna vozila nisu bez ozbiljnih ograničenja. Najveći problemi nastaju u fazi proizvodnje, posebno pri vađenju litijuma, kobalta i nikla — ključnih materijala za baterije. Rudarenje ovih metala troši ogromne količine energije, narušava ekosisteme i često je povezano sa socijalnim i etičkim problemima. Zbog toga ukupni ekološki otisak EV-ova može biti znatno veći nego što to sugeriše njihova „čista” vožnja.

Također, klimatski učinak električnih vozila zavisi od toga kako se proizvodi električna energija. U državama čiji elektroenergetski sistem počiva na uglju ili plinu, koristi električnih automobila mogu biti znatno umanjene. Infrastruktura za punjenje, kapacitet elektroenergetske mreže i efikasno recikliranje baterija dodatni su faktori koji određuju da li je prelazak na elektromobilnost zaista održiv ili samo marketinški privlačan.

Kada se sve uzme u obzir, električni i hibridni automobili nisu ni savršeno održivo rješenje ni puka marketinška obmana. Oni su koristan alat u procesu energetske i ekološke tranzicije, ali

ne i magični odgovor na klimatsku krizu. Njihova stvarna održivost zavisi od toga kako se upravlja lancem snabdijevanja, kakva je energetika države, te koliko se ulaže u infrastrukturu, etičnu eksploataciju resursa i recikliranje baterija. Bez toga, postoji rizik da se ekološki problemi samo premjeste s jednih regija na druge — umjesto da se zaista smanje.

Elektični automobili su alat s potencijalom, ali samo ako se koristi promišljeno, uz puno razumijevanje i rješavanje problema koji stoje iza njihove „tihe" i prividno „čiste" vožnje.

Literatura

CSS (2023) Electric Vehicles Factsheet. Center for Sustainable Systems, University of Michigan.

Cummins (2024) Essential vehicle software and power electronics in BEVs. Cummins Inc.

EMIC-BG (2020) Battery Electric Vehicles. EMIC.

Filipović, A. (2024) Environmental impact of electric vehicles. Ecologica, 31(114).

Gov. Wales (2024) Common concerns about battery electric vehicles – Technical advice note. Welsh Government.

Lee, J. (2025) Powertrain in Battery Electric Vehicles: Technologies and Trends. World Electric Vehicle Journal.

Helmers, E. & Marx, P. (2021) Electric, hybrid, and plug-in hybrid vehicles: environmental effects and real-world performance. Journal of Cleaner Production.

ICCT (2023) Real-world usage of plug-in hybrid vehicles. International Council on Clean Transportation.

IEA (2023) Global EV Outlook 2023. International Energy Agency.

Transport & Environment (2022) Plug-in hybrids: The gap between lab and road performance. T&E.

Chan, C.C. (2007) ‘The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles’, Proceedings of the IEEE, 95(4), pp. 704–718.

Ehsani, M., Gao, Y., Longo, S. & Ebrahimi, K. (2020) Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles. 3rd edn. CRC Press.

IEA (2023) Global EV Outlook 2023. International Energy Agency.

Toyota (2022) Hybrid Technology Overview. Toyota Motor Corporation.

Ehsani, M., Gao, Y., Longo, S. & Ebrahimi, K. (2020) Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles. 3rd edn. CRC Press.

IEA (2022) Global Hydrogen Review 2022. International Energy Agency.

Miyamoto, K. (2023) ‘Hydrogen mobility and its market development’, International Journal of Hydrogen Energy, 48(5), pp. 1823–1835.

Ogden, J. & Jaffe, A. (2021) The Role of Hydrogen in Long-term Clean Transport Strategies. UC Davis Institute of Transportation Studies.

Chen, T.D., Kockelman, K.M. & Hanna, J.P. (2020) ‘Operations of a shared, autonomous, electric vehicle fleet: Implications of vehicle & charging infrastructure decisions’, Transportation Research Part A, 135, pp. 38–54.

Ellingsen, L.A.-W., Singh, B. & Strømman, A.H. (2016) ‘The size and range effect: lifecycle greenhouse gas emissions of electric vehicles’, Environmental Research Letters, 11(5), pp. 1–12.

Hall, D. & Lutsey, N. (2018) Electric vehicle capitals: Accelerating the global transition to electric drive. ICCT.

Romare, M. & Dahllöf, L. (2017) The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries. IVL Swedish Environmental Research Institute.

Tao,Y., Rahn, D. C., Archer, A. L., (2021), Second life and recycling: Energy and environmental sustainability perspectives for high- performance lithium- ion batteries. Journal of Environmental Science & Pollution Research, PubMed.

Beaudet, A., Larouche, F., Amouzengar, K., Bouchard, P., Zaghib, K. (2020), Key Challenges and Opportunities for Recycling Electric Vehicle Battery Materials. Sustainability, MDPI.

Akram, N. M., Abdul-Kader, W. (2024) Repurposing Second- Life EV Batteries to Advance Sustainable Development: A Comprehensive Review. MDPI.

Gaines, L., 2014. The future of automotive lithium-ion battery recycling: Charting a sustainable course. Sustainable Materials and Technologies, 1–2, pp.2–7.

Harper, G., Sommerville, R., Kendrick, E., Driscoll, L., Slater, P., Stolkin, R., Walton, A., Christensen, P., Heidrich, O., Lambert, S., Abbott, A., Ryder, K., Gaines, L. and Anderson, P., 2019. Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. Nature, 575(7781), pp.75–

86.

Li, L., Tian, Y., Chen, M. and Hao, H., 2020. Environmental impact assessment of second-life and recycling for LiFePO4 batteries in China. Journal of Cleaner Production, 271, p.122550.

Zeng, X., Li, J. and Singh, N., 2017. Recycling of spent lithium-ion battery: A critical review. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 47(10), pp. 499– 535.

Liu, Y., Wang, Y., Zhang, Y. and Chen, S., 2024. Towards accurate and efficient sorting of retired lithium-ion batteries: A data-driven electrode aging assessment approach. arXiv preprint arXiv:2404.12769.

Chen, T., Li, X., & Wang, J. (2020) Impact of electric vehicle fast charging on local distribution networks: A case study. Applied Energy, 277, 115592.

Hall, D. & Lutsey, N. (2018) Emerging best practices for electric vehicle adoption and charging infrastructure. The International Council on Clean Transportation (ICCT).

Hooftman, N., Messagie, M., Van Mierlo, J. & Coosemans, T. (2021) Energy consumption and infrastructure requirements for EV charging: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 135, 110184.

Sierzchula, W., Bakker, S., Maat, K. & van Wee, B. (2014) The influence of financial incentives and other socio-economic factors on electric vehicle adoption. Energy Policy, 68, pp. 183–194.

Zhang, X., Smith, C., & Wang, H. (2021) Smart charging strategies to mitigate EV impact on power grids. Journal of Cleaner Production, 297, 126643.

İnci, M., Çelik, Ö., Lashab, A., Bayındır, K. Ç., Vasquez, J. C. & Guerrero, J. M. (2024) "Power System Integration of Electric Vehicles: A Review on Impacts and Contributions to the Smart Grid", Applied Sciences, 14(6), p. 2246.

Sultan, V., Aryal, A., Chang, H. et al. (2022) "Integration of EVs into the smart grid: a systematic literature review", Energy Informatics, 5, Art. 65.

Wang, G. & Shu, Q. (2024) “The influence of electric vehicles charging and discharging on power grid stability”, Global Journal of Engineering and Technology Advances, 21(03), pp. 064–068.

Engelhardt, J., Zepter, J. M., Gabderakhmanova, T. & Marinelli, M. (2021) “Energy Management of a Multi-Battery System for Renewable-Based High Power EV Charging”, arXiv.

Nagaraju Dharavat, N., Golla, N. K., Sudabattula, S. K. & Velamuri, S. (2022) “Impact of plug-in electric vehicles on grid integration with distributed energy resources: A review”, Frontiers in Energy Research, 10, Art. 1099890.

Sharifi, P., Banerjee, A. & Feizollahi, M. J. (2019) “Leveraging Owners’ Flexibility in Smart Charge/Discharge Scheduling of Electric Vehicles for Renewable Energy Integration”, arXiv.

MDPI (2022) “Electric Vehicle-to-Grid (V2G) Technologies: Impact on the Power Grid and Battery”, Sustainability, 14(21), p. 13856.

Amnesty International (2016) This is what we die for: Human rights abuses in the Democratic Republic of the Congo power the global trade in cobalt. London: Amnesty International.

Banza, C.L.N. et al. (2009) ‘High human exposure to cobalt and other metals in Katanga, DRC’, Science of the Total Environment, 407(2), pp. 599–603.

Gaines, L. (2014) ‘The future of automotive lithium-ion battery recycling: Charting a sustainable course’, Sustainable Materials and Technologies, 1(2), pp. 2–7.

Hall, D. & Lutsey, N. (2018) Effects of battery production on EV sustainability. International Council on Clean Transportation (ICCT).

Harper, G. et al. (2019) ‘Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles’, Nature, 575, pp. 75–86.

Ngoy, S. et al. (2017) ‘Environmental contamination from solid wastes in Kolwezi, DR Congo’, Environmental Monitoring and Assessment, 189(1), pp. 1–15.

Romare, M. & Dahllöf, L. (2017) The life cycle energy consumption and greenhouse gas emissions from lithium-ion batteries. IVL Swedish Environmental Research Institute.

USGS (2022) Mineral Commodity Summary: Cobalt. U.S. Geological Survey.

Banza, C.L.N. et al. (2009) 'High human exposure to cobalt and other metals in Katanga, DRC', Science of the Total Environment, 407(2), pp. 599–603.

Carvalho, F.P. et al. (2020) 'Environmental impacts of nickel mining and processing', Environmental Research, 182, pp. 109–119.

Flexer, V., Baspineiro, C.F. & Galli, C. I. (2018) 'Lithium recovery from brines: A vital raw material for the green energy transition', Desalination, 433, pp. 1–14.