

VPLIV PRIDOBIVANJA SUROVIN ZA ZELENI PREHOD NA OKOLJE

IRENA SUBOTIKJ¹, MARJANA ŠIJANEC ZAVRL² IN HENRIK
GJERKEŠ³

Sprejeto
11. 1. 2026

Izdano
31. 3. 2026

¹ Univerza v Novi Gorici, Nova Gorica, Slovenija; e-pošta: irena.subotikj@ung.si

² Nova univerza, Evropska pravna fakulteta, Nova Gorica; Gradbeni inštitut ZRMK, Ljubljana, Slovenija; e-mail: marjana.sijanec@gi-zrmk.si

³ Univerza v Novi Gorici; Gradbeni inštitut ZRMK, Ljubljana, Slovenija; e-mail: henrik.gjerkes@ung.si

DOPISNI AVTOR
irena.subotikj@ung.si

Ključne besede:

analiza
masnega
toka,
redke
kovine,
breme
na
naravo,
razpršeni
viri,
obnovljivi
viri
energije.

Povzetek Analizirali smo globalne trende v proizvodnji deklariranih kritičnih surovin, potrebnih za zeleni prehod. Analiza podatkov iz več virov za osem ključnih surovin kaže zmerno rast njihovega pridobivanja v preteklosti in strmo povečanje v zadnjih 10 letih, ki je povezano s hitro rastjo tehnologij za izkoriščanje obnovljivih virov energije in shranjevanje električne energije. Pri stremljenju k učinkovitejšim energetske sistemom človeštvo uporablja vedno več redkih surovin, ki so razpršene v zemeljski skorji. Njihovo pridobivanje lahko obremenjuje naravo nesorazmerno bolj, kot njihova uporaba prinese koristi. Primerjava povečanja obsega rudarjenja kritičnih surovin z rastjo obsega tehnologij za izkoriščanje obnovljivih virov in shranjevanje električne energije nakazuje, da človeštvo rešuje en problem (razogljičenje) s potencialnim ustvarjanjem drugih (izčrpavanje abiotskih virov, onesnaževanje biosfere). V tem kontekstu smo zaznali potrebo po novi metodologiji, ki bo omogočila celovito kvantitativno oceno bremena proizvodnje kritičnih surovin (in dobrin nasploh) na naravo med celotnim življenjskim ciklom.



<https://doi.org/10.18690/po.13.25.65-70.2026>
Besedilo © Subotikj, Šijanec Zavrl in Gjerkeš, 2026



1. Uvod

Zeleni prehod v vseh sektorjih, zlasti pa v energetske, se zdi ključnega pomena za globalno trajnostno prihodnost. Njegov uspeh je odvisen od stabilne oskrbe s surovinami, ki so pogosto redke in težko dostopne, a bistvene za proizvodnjo tehnologij za izkoriščanje obnovljivih virov energije, sistemov za shranjevanje energije in električnih vozil (Gielen, 2021). Mednarodna agencija za energijo je ocenila, da so aluminij (Al), baker (Cu), kobalt (Co), grafit, litij (Li), nikelj (Ni) in skupina redkih zemeljskih elementov (REE – 15 elementov, znanih kot lantanidi + itrij) ključne surovine za zeleni prehod med letoma 2020 in 2050, ki so potrebne za razogljičenje energetskih sistemov (IEA, 2024). Njihove zaloge in dobavne verige se lahko spremenijo ali celo porušijo, če se spremenijo vzorci proizvodnje ali porabe (Andersen idr., 2024). Železo (Fe), ki sicer ni deklarirano kot kritična surovina, je pomembno za razvoj infrastrukture, hkrati pa je mogoče zaznati, da je rast povpraševanja po železu tudi v korelaciji z razmahom sodobnih tehnologij in rastjo pridobivanja kritičnih surovin. Intenzivno rudarjenje je pripeljalo do izčrpanja visokokakovostnih nahajališč, kakovost rude upada, s tem pa se povečujejo potrebe po energiji in vpliv na okolje pri pridobivanju kritičnih surovin. Te medsebojne povezave poudarjajo potrebo po razumevanju razvoja pridobivanja surovin v povezavi z gospodarskimi in tehnološkimi spremembami. Proučevanje dolgoročnih vzorcev omogoča prepoznavanje potencialnih tveganj za nestabilnost oskrbe, kvantitativno opredeljevanje vplivov pridobivanja surovin na okolje in ocenjevanje trajnostnih implikacij. Medtem ko so se prejšnje študije večinoma osredotočale na posamezne surovine ali določene sektorje, ta raziskava zapolnjuje obstoječo vrzel s hkratno analizo osmih ključnih surovin v obdobju štirih desetletij, pri čemer smo izpostavili dinamiko njihovega pridobivanja in tehnološko soodvisnost v kontekstu globalnega zelenega prehoda v nizkoogljično družbo.

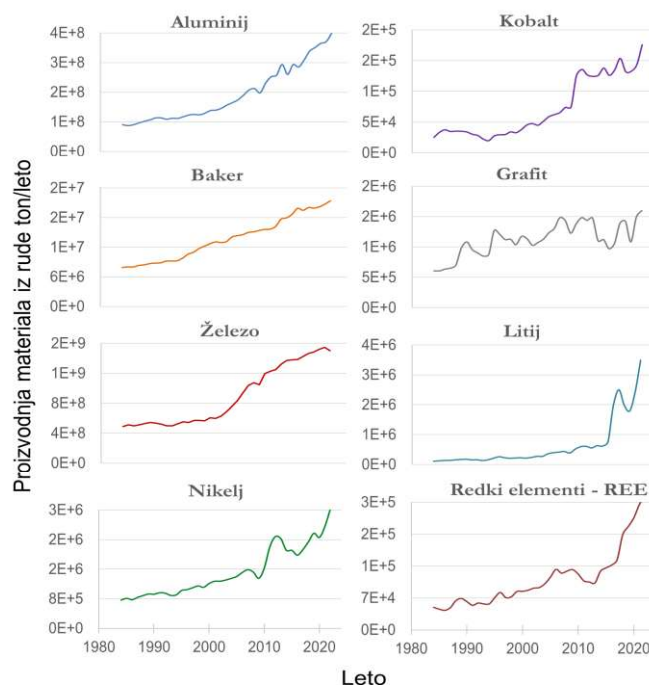
2. Materiali in metode

Glavni viri podatkov pričujoče študije so članki, knjige in industrijska poročila, ki obravnavajo trende v proizvodnji kritičnih surovin in tehnologij, ter mednarodne zbirke podatkov: United States Geological Survey (USGS, 2025), British Geological Survey (BGS, 2025) in World Mining Data (WMD, 2025). Analiza globalnih masnih tokov surovin za zeleni prehod zajema časovno obdobje od 1984 do 2022 in je podana v obliki masnega toka posamezne kritične surovine (kovine, grafit). Podatke

iz mednarodnih zbirk podatkov smo izrazili kot srednjo vrednost mase proizvedene posamezne primarne surovine v določenem letu kot funkcijo mase iz zemeljske skorje izkopane rude in vsebnosti primarne surovine v rudi. Te vrednosti smo primerjali s podatki o rasti najbolj uporabljanih tehnologij za izkoriščanje obnovljivih virov energije in shranjevanje električne energije (IRENA, 2025; Global, 2025).

3. Rezultati in razprava

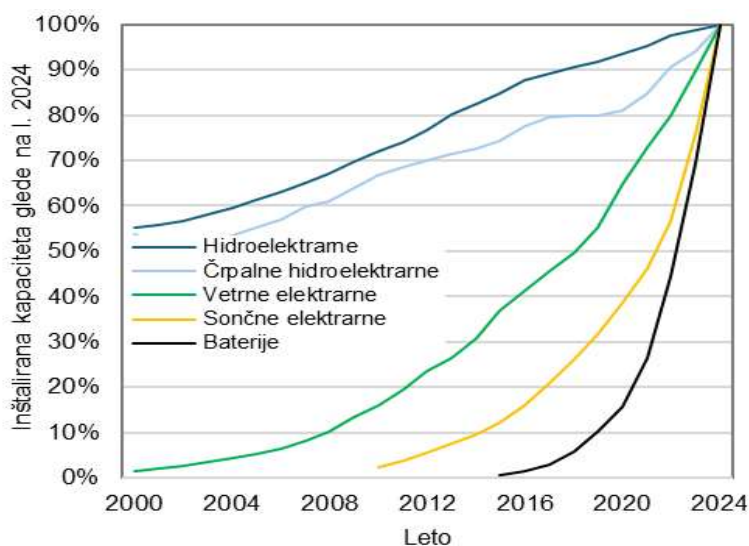
Analiza podatkov (USGS, 2025; BGS, 2025; WMD, 2025) kaže, da obstaja visoka stopnja skladnosti med uporabljenimi podatkovnimi bazami za večino surovin, razen za grafit. Podrobnejši pregled pokaže, da je vzrok za razhajanje pri podatkih o proizvodnji grafita v tem, da je BGS poročal o velikih količinah iz rudnikov na Kitajskem, medtem ko je USGS ocenjeval, da so izkopane količine tam manjše.



Slika 1: Proizvodnja kritičnih surovin v zadnjih štirih desetletjih, izražena v masi primarne surovine v izkopani rudi.

Letna proizvodnja kritičnih primarnih surovin v obdobju od 1984 do 2022 je prikazana na sliki 1. V začetnem obdobju je opazna zmerna rast, medtem ko je v

obdobju po letu 2000 opazna pospešena proizvodnja kritičnih primarnih surovin zaradi globalizacije, industrijske rasti in naraščajočega povpraševanja predvsem iz razvijajočih se gospodarstev. Vse opazovane surovine sledijo globalnim recesijskim trendom v metalurškem sektorju s padcem proizvodnje v letu 2008. V letu 2010 se je povpraševanje zaradi izboljšanja gospodarskih razmer povečalo in povzročilo ponovno rast obsega rudarjenja. Na splošno se sodobni trendi proizvodnje ujemajo z rastjo prebivalstva na Zemlji, tehnološkim napredkom in širitvijo kapacitet sistemov za izkoriščanje obnovljivih virov energije, električne mobilnosti in tehnologij za shranjevanje električne energije, kar nakazuje na vse večjo globalno odvisnost človeštva od kritičnih surovin na zastavljeni poti v nizkoogljično družbo.



Slika 2: Povečanje obsega najpogosteje uporabljenih tehnologij za izkoriščanje obnovljivih virov energije in shranjevanje električne energije v zadnjih 25 letih, v odstotkih v primerjavi z letom 2024. Upoštevana je skupna nameščena moč, za baterije skupna zmogljivost shranjevanja.

V analiziranem obdobju proizvodnja tradicionalnih kovin – Al, Fe in Cu – kaže relativno stabilno rast s povečanjem za 343, 203 oziroma 171 %. Te kovine so tradicionalne surovine za zrele tehnologije, izgradnjo infrastrukture, stavb, ožičenja in prevoznih sredstev, je pa obseg njihove proizvodnje povezan tudi s tehnologijami za zeleni prehod energetskega sistema.

Na sliki 1 lahko vidimo, da se je proizvodnja Co (+597 %), Li (+3156 %), Ni (+324 %) in REE (+491 %) po letu 2010 močno povečala. Povečanje proizvodnje redkih kovin je tesno povezano z razvojem tehnologij za izkoriščanje obnovljivih virov energije in shranjevanje električne energije, katerih trendi so prikazani na sliki 2. Pri gradnji hidroelektrarn in črpalnih hidroelektrarn se izmed analiziranih surovin najpogosteje uporablja jeklo (Fe) in v manjši meri tudi Cu in Al. Postopno večanje kapacitet hidroelektrarn, poleg povečanja rabe v drugih rastočih industrijah, tudi vpliva na rast proizvodnje teh kovin.

Je pa iz primerjave slik 1 in 2 izrazito razvidna korelacija med rapidnim večanjem obsega kapacitet sončnih in vetrnih elektrarn ter baterij ter hitro rastjo rudarjenja in proizvodnjo drugih kritičnih surovin. Li, Ni, Co in grafit imajo ključno vlogo pri proizvodnji baterij. REE so bistvena surovina za permanentne magnete, ki se uporabljajo v vetrnih turbinah in električnih vozilih. Al in Cu sta temeljni surovini za izgradnjo vseh tehnologij, povezanih z električno energijo, vključno z nastajajočimi in razvijajočimi se tehnologijami za izkoriščanje obnovljivih virov energije.

To nas pripelje do zaključka, da rešujemo en problem (razogljičenje) s potencialnim ustvarjanjem drugih (izčrpavanje abiotskih virov, onesnaževanje biosfere). Sodobne tehnologije uporabljajo razpršene surovine iz zemeljske skorje, ki jih je potrebno koncentrirati, da lahko z njimi izkoriščamo obnovljive vire energije. Pridobivanje različnih industrijskih surovin predstavlja različen obseg poseganja v naravo. Za proizvodnjo 1.000 kg Fe je potrebno izkopati 1.600 kg rude – razmerje surovina/ruda je 1:1,6. Za enako količino Cu je potrebno izkopati približno 125.000 kg rude (1:125), za Co 1.500.000 kg rude (1:1.500), medtem ko je za pridobivanje 1.000 kg Li potrebno onesnažiti 1.900.000 litrov vode (1:1.900) in uničiti okoliški ekosistem.

Pri razvoju novih tehnologij za izboljšanje učinkovitosti izkoriščanja obnovljivih virov energije in shranjevanja električne energije se človeštvo opira na vedno več vse bolj v naravi razpršenih surovin. Z obstoječimi fragmentiranimi metodologijami je težko enoznačno oceniti, ali izboljšanje tehnologije za razogljičenje v njenem življenjskem ciklu odtehta obseg nepopravljive škode naravi, ki jo povzročimo med njeno proizvodnjo in ob koncu življenjske dobe. Do neke mere je mogoče izčrpavanje zemeljske skorje zmanjšati z recikliranjem, ki pa v praksi nikoli ni 100-

odstotno, zato bodo odpadki nastajali v obliki koncentriranih kovin, ki jih v naravi ni. Za iskanje kompromisa bo potrebna metodologija, s katero bomo lahko objektivno ocenili vseživljenjski vpliv na okolje predvsem tistih tehnologij, ki so namenjene zmanjšanju človeškega vpliva.

4. Zaključki

Primerjava proizvodnje kritičnih surovin v zadnjih 40 letih z najpogosteje uporabljenimi tehnologijami za izkoriščanje obnovljive energije in shranjevanje električne energije je pokazala, da je hitra rast zmogljivosti in učinkovitosti sončnih in vetrnih elektrarn ter baterij povzročila podobno hitro rast rudarjenja predvsem kritičnih surovin. V prizadevanjih za učinkovitejše energetske sisteme narašča uporaba redkih kovin, ki so razpršene v zemeljski skorji, kar je razlog za koristim nesorazmeren poseg v naravo med njihovo proizvodnjo. V nadaljevanju dela se bomo osredotočili na razvoj metodologije za objektivno oceno ne le posameznega kazalnika izboljšane ali nove tehnologije, temveč tudi celovitega vpliva na naravo skozi celoten življenjski cikel.

Literatura in viri

- Andersen, E. V. (2024). *The vulnerability of shifting towards a greener world: The impact of the EU's green transition on material demand*. Sustainable Horizon, 10.
- British Geological Survey. (2025). *World mineral statistics archive*.
<https://www.bgs.ac.uk/mineralsuk/statistics/world-mineral-statistics/world-mineral-statistics-archive>
- Gielen, D. (2021). *Critical minerals for the energy transition*. International Renewable Energy Agency.
<https://www.irena.org/Technical-Papers/Critical-Materials-For-The-Energy-Transition>
- International Energy Agency. (2025). *Global EV outlook 2025*.
<https://iea.blob.core.windows.net/assets/7ea38b60-3033-42a6-9589-71134f4229f4/GlobalEVOutlook2025.pdf>
- International Energy Agency. (2025). *Global critical minerals outlook 2024*.
<https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2024>
- International Renewable Energy Agency. (2025). *Electricity capacity trends*.
<https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/>
- U.S. Geological Survey. (2025). *Minerals yearbook: Metals and minerals*.
<https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/minerals-yearbook-metals-and-minerals>
- World Mining Data. (2025). *World mining data*.
<http://www.world-mining-data.info>