Pregledni članak | *Review paper* | UDK 628.193:546.34
Primljeno (Received): 28.12.2025.; Prihvaćeno (Accepted): 15.07.2026.

LITIJ U GLOBALNOM LANCU BATERIJA: VODNI STRES, ONEČIŠĆENJE VODA TOKSIKOLOŠKI RIZICI „ZELENE" TRANZICIJE

prof. dr. sc. Višnja Oreščanin, znan. savj.
OREŠČANIN j.d.o.o.
A. Jakšića 30, Zagreb, Hrvatska
vorescan@gmail.com

Ubrzana elektrifikacija prometa i energetskih sustava znatno povećava potražnju za litijem, ali istodobno premješta dio okolišnih i zdravstvenih rizika u faze njegove ekstrakcije, kemijske prerade, proizvodnje baterija i recikliranja. Ovaj pregledni rad objedinjuje suvremena znanstvena saznanja o utjecaju litija na vodne resurse i zdravlje ljudi tijekom cijelog životnog ciklusa. Poseban naglasak stavljen je na vodni stres, onečišćenje voda, ograničenja standardne procjene životnog ciklusa (LCA) te toksikološke učinke kronične izloženosti litiju putem vode za ljudsku potrošnju. Analiza pokazuje da litij ima jasno definiran toksikološki profil, prema kojemu je bubreg primarni ciljni organ kronične izloženosti, uz dodatne učinke na endokrini i živčani sustav. Zaključno, održivost litij-ionskih tehnologija ne može se procjenjivati isključivo prema njihovim klimatskim koristima, nego mora uključivati zaštitu vodnih resursa i zdravlja ljudi tijekom cijelog životnog ciklusa.

Ključne riječi: litij, litij-ionske baterije, vodni stres, onečišćenje voda, toksični potencijal, izravna ekstrakcija litija, procjena životnog ciklusa, recikliranje baterija

1. UVOD

Potražnja za litijem snažno raste zbog širenja električnih vozila i baterijskog skladištenja energije. Međutim, "čistoća" elektrifikacije nije samo pitanje emisija u fazi uporabe vozila, nego i pitanje okolišnog otiska proizvodnje sirovina i baterija. Među ključnim rizicima ističe se pritisak na vodne resurse. Međunarodna energetska agencija (IEA) upozorava da je proizvodnja bakra i litija osobito izložena vodnom stresu te navodi da je više od polovice današnjih ekstrakcijskih kapaciteta litija koncentrirano u područjima visokog vodnog stresa (IEA 2021).

Na globalnoj razini, dva glavna proizvodna pravca litija – (1) ekstrakcija iz slanih ležišta (isušena slana jezera i podzemne slane vode) te (2) eksploatacija čvrste rude, ponajprije spodumena – povezani su s različitim, ali potencijalno značajnim rizicima za vodne resurse. U aridnim regijama, poput Andskog Altiplana, proizvodnja litija iz podzemnih slanih voda prerasta u izrazito hidrosocijalno pitanje, jer industrijska potražnja za vodom izravno konkurira potrebama lokalnih zajednica i očuvanju osjetljivih ekosustava (Blair i sur. 2024). Istodobno, kod eksploatacije čvrstih mineralnih ležišta u prvi plan dolaze klasični rudarski izazovi, uključujući upravljanje procesnim vodama, rudarskim otpadom i kemijskom preradom, pri čemu se znatan dio okolišnog opterećenja često premješta u faze rafinacije i proizvodnje baterijskih kemikalija.

Osim pritisaka na dostupnost i kakvoću vodnih resursa, rast proizvodnje litija otvara i pitanje njegovih toksikoloških učinaka na vodne ekosustave i izloženu populaciju, što je u dosadašnjim analizama energetske tranzicije često marginalizirano ili u potpunosti zanemareno. Litij se pritom nerijetko promatra kao relativno benigni element, iako dostupni znanstveni podaci upućuju na njegovu biološku aktivnost i mogućnost štetnih učinaka pri kroničnoj okolišnoj izloženosti, osobito putem vode kao dominantnog medija izloženosti.

Cilj ovog preglednog rada jest objediniti aktualne znanstvene spoznaje o utjecajima lanca vrijednosti litija na vodne resurse, s posebnim naglaskom na vodni

stres i onečišćenje voda, zatim razmotriti metodološke izazove njihove procjene, osobito u okviru procjene životnog ciklusa (engl. Life Cycle Assessment, LCA), te ponuditi praktične relevantne smjernice za stručnjake u sektoru voda.

2. KONCEPTUALNI OKVIR: "PREMJEŠTANJE" OKOLIŠNOG TERETA I ZAŠTO SU VODE KLJUČNE

Elektrifikacija prometa u javnom i stručnom diskursu najčešće se prikazuje kroz smanjenje emisija u fazi uporabe vozila. Međutim, takav pristup može prikriti činjenicu da se okolišni teret često premješta uzvodno (engl. burden shifting) – iz urbanih sredina i prometnica prema rudarskim područjima, kemijskim postrojenjima i pogonima baterijske industrije. U tom kontekstu, vode imaju dvostruku ulogu: s jedne strane kao ograničen prirodni resurs, osobito u uvjetima vodne oskudice, a s druge kao prijemnik onečišćenja, uključujući industrijske otpadne vode, slane tokove i nusprodukte kemijske prerade.

Pristup procjene životnog ciklusa (LCA) nužan je za cjelovito sagledavanje tih premještanja okolišnog opterećenja, no u slučaju proizvodnje litija iz isušenih slanih jezera ima dobro dokumentirane metodološke nedostatke. Posebni izazovi odnose se na klasifikaciju slane vode (rasola) unutar pokazatelja vodne oskudice te na nedostatnu reprezentaciju složenih hidrogeoloških sustava karakterističnih za područja slanih pustinja (Halkes i sur. 2024).

Halkes i suradnici (2024) detaljno pokazuju da se standardni LCA pristupi u kontekstu proizvodnje litija iz rasola teško nose s procjenom vodnih utjecaja te predlažu razvoj metodologija koje uključuju procjene raspoloživosti vode, faktore specifične za podzemne vode i pristupe prilagođene salar -sustavima(šp. salar znači isušeno slano jezero ili slana ravnica). S druge strane, Blair i suradnici (2024) dodatno proširuju analitički okvir uključivanjem hidrosocijalnih posljedica i kumulativnih učinaka duž životnog ciklusa sustava za pohranu energije, naglašavajući da se pitanje vode u kontekstu litija ne svodi isključivo na količine i kemijski sastav, već obuhvaća i upravljanje vodama, prava korištenja te raspodjelu rizika i koristi.

Za sektor voda to znači da procjena održivosti proizvodnje litija mora nadilaziti generičke globalne prosjeke i pojednostavljene pokazatelje. Nužne su lokalno utemeljene vodne bilance, transparentni inventari potrošnje vode i kemikalija te sustavno praćenje učinaka na vodne ekosustave i lokalne zajednice, osobito u aridnim i hidrološki osjetljivim područjima.

Radi lakšeg pregleda, u tablici 1 sažeto se uspoređuju dominantni vodni pritisci, rizici i regulatorni izazovi povezani s glavnim tehnologijama proizvodnje i oporabe litija, koje su detaljno obrađene u nastavku rada.

Iz tablice 1 vidljivo je da različite tehnologije proizvodnje i oporabe litija stvaraju različite obrasce opterećenja vodnih resursa. Dok proizvodnja iz rasola dominantno uzrokuje vodni stres i hidrogeološke promjene, proizvodnja iz čvrste rude, kemijska prerada i recikliranje prvenstveno opterećuju kakvoću voda. Tehnologije DLE mogu smanjiti pojedine pritiske, ali uvode nove hidrogeokemijske i regulatorne izazove koji zahtijevaju lokalno prilagođeno upravljanje vodnim resursima.

3. LITIJ IZ SLANIH LEŽIŠTA (ISUŠENIH SLANIH JEZERA): VODNI STRES, HIDROGEOLOŠKI UTJECAJI I RIZICI ZA EKOSUSTAVE

Ekstrakcija litija iz slanih ležišta, odnosno isušenih slanih jezera, jedan je od dominantnih načina proizvodnje litija u globalnoj opskrbi, osobito u tzv. „litijskom trokutu" Južne Amerike (Čile, Argentina i Bolivija). Ta područja obilježavaju izrazito aridna klima, ograničena dostupnost slatke vode te visoko osjetljivi ekosustavi, zbog čega vodni aspekti proizvodnje litija predstavljaju jedno od središnjih okolišnih pitanja (IEA 2021).

3.1. Hidrogeološki kontekst sustava isušenih slanih jezera

Sustavi isušenih slanih jezera predstavljaju kompleksne hidrogeološke cjeline u kojima su međusobno povezane podzemne slane vode (rasoli), slatke ili blago slane podzemne vode, površinske lagune te okolni slivovi. Za razliku od klasičnih akvifera, dinamika ovih sustava ovisi o ravnoteži između dotoka (oborine, otapanje snijega, podzemni dotoci) i gubitaka (isparavanje i crpljenje), pri čemu i relativno male promjene u vodnoj bilanci mogu imati nerazmjerno velike ekološke posljedice (Halkes i sur. 2024).

U tom kontekstu, crpljenje rasola u svrhu proizvodnje litija ne može se promatrati izolirano od šireg hidrogeološkog sustava. Iako se u industrijskim prikazima često naglašava da se crpi slana voda nepogodna za ljudsku potrošnju, znanstvena literatura upozorava da su slane i slatke vodonosne zone često hidraulički povezane, što može dovesti do promjena razina podzemnih voda, smanjenja dotoka u lagune te posljedičnih učinaka na ekosustave (Vera i sur. 2023).

3.2. Vodni stres i potrošnja vode u proizvodnji litija iz podzemnih slanih voda (rasola)

Proizvodnja litija iz podzemnih slanih voda (rasola) tradicionalno se temelji na crpljenju velikih količina slane podzemne vode i njezinoj koncentraciji u isparivačkim bazenima. Taj proces može trajati mjesecima, pa i godinama, a njegova učinkovitost uvelike ovisi o klimatskim uvjetima i kemijskom sastavu rasola. U aridnim područjima, poput isušenog slanog jezera Atacama, gdje su prirodni dotoci vode

Tablica 1: Usporedba vodnih rizika različitih tehnologija proizvodnje i oporabe litija duž životnog ciklusa

Tehnologija	Dominantni tip vodnog rizika	Glavni vodni pritisak	Ključni rizici za vode	Glavni onečišćivači / procesi	Ključni regulatorni izazovi
Ekstrakcija iz rasola (isušena slana jezera)	Vodni stres	Dugotrajno crpljenje podzemnih slanih voda u područjima izrazite vodne oskudice	Sniženje razine podzemnih voda, promjene hidrogeološke ravnoteže, smanjenje dotoka u lagune, degradacija ekosustava i sukobi oko korištenja vode	Crpljenje rasola, isparivački bazeni	Lokalne vodne bilance, hidrogeološko modeliranje, transparentno izvještavanje o crpljenju, dugoročni monitoring
Eksploatacija čvrste rude (spodumen)	Kakvoća vode	Potrošnja tehnološke vode tijekom rudarenja i obogaćivanja rude	Onečišćenje površinskih i podzemnih voda, procjeđivanje iz jalovišta, promjene hidrološkog režima	Sulfati, kloridi, Al, Fe, Mn, tehnološke kemikalije, jalovište	Upravljanje tehnološkim vodama i jalovištima, obrada otpadnih voda, monitoring nakon zatvaranja rudnika
Izravna ekstrakcija litija (DLE)	Vodni stres + kakvoća vode	Manji neto gubitak vode, ali povećani kemijski i energetski zahtjevi	Promjene kemijskog sastava vraćenog rasola, hidrogeokemijska neravnoteža, mogući utjecaj na povezane vodonosnike	Kiseline i lužine za regeneraciju sorbenata, visokosalinitetne otpadne vode	Kontrola povrata rasola, hidrogeološko modeliranje, praćenje kemijskog sastava i temperature povratnih voda
Kemijska prerada litija i proizvodnja baterija	Kakvoća voda	Intenzivna uporaba tehnološke vode	Industrijske otpadne vode visokog saliniteta i promjenjivog pH	Sulfati, kloridi, litijeve soli, Ni, Co, Mn, NMP, fluoridne vrste	Višestupanjska obrada otpadnih voda, kontrola industrijskih ispusta, kontinuirani monitoring
Recikliranje litij-ionskih baterija	Kakvoća voda (uz smanjenje primarnog vodnog stresa)	Manji ukupni vodni otisak, ali novi lokalni industrijski vodni tokovi	Kemijski složene otpadne vode tijekom hidrometalurških procesa	Litij, Ni, Co, Mn, kiseline, lužine, organski ostaci elektrolita	Razvoj smjernica za obradu otpadnih voda, integracija u vodno gospodarstvo, monitoring industrijskih ispusta

iznimno ograničeni, dodatni gubitci vode povezani s industrijskim procesima mogu znatno povećati lokalni vodni stres (Marinova i sur. 2025).

Procjene vodnog otiska proizvodnje litija iz isušenih slanih jezera pokazuju velik raspon rezultata, ovisno o primijenjenoj metodologiji i definiciji granica sustava. Studije procjene životnog ciklusa (LCA) koje primjenjuju indikatore vodne oskudice, poput pokazatelja AWARE (Available WAter REmaining) za procjene relativnog vodnog stresa na temelju raspoložive preostale vode, često upućuju na visok relativni utjecaj proizvodnje litija u područjima s ekstremnom vodnom oskudicom. Međutim, te studije istodobno naglašavaju da standardni LCA alati nisu u potpunosti prilagođeni specifičnim hidrogeološkim značajkama sustava isušenih slanih jezera (Halkes i sur. 2024)

3.3. Utjecaji na površinske vode, ekosustave i bioraznolikost

Isušena slana jezera i pripadajuće površinske lagune predstavljaju staništa visoke ekološke vrijednosti koje nastanjuju endemske vrste flore i faune te migratorne ptice. Promjene u razinama podzemnih voda i salinitetu mogu dovesti do smanjenja površinskih vodnih tijela, promjena u kemijskom sastavu vode te degradacije staništa.

Empirijski podaci o izravnim uzročno-posljedičnim vezama između proizvodnje litija i uočenih ekoloških promjena često su ograničeni nedostatkom dugoročnih programa praćenja. Ipak, kombinacija hidrogeoloških modela, terenskih opažanja i satelitskih podataka upućuje na to da intenzivno crpljenje podzemnih slanih voda (rasola) može pridonijeti promjenama u vodnom režimu, uključujući sniženje razina podzemnih voda i lokalno slijeganje terena (Reuters 2024).

3.4. Hidrosocijalni aspekti i upravljanje vodnim resursima u područjima isušenih - slanih jezera

Uz hidrogeološke i ekološke aspekte, proizvodnja litija iz isušenih slanih jezera ima izraženu hidrosocijalnu dimenziju. Lokalno stanovništvo, uključujući autohtone zajednice, često ovisi o ograničenim vodnim resursima za opskrbu pitkom vodom, poljoprivredu i stočarstvo. Industrijska potrošnja vode u takvim uvjetima može dodatno pogoršati postojeće pritiske na vodne resurse te potaknuti društvene napetosti i sukobe, osobito u kontekstu nedostatne transparentnosti podataka o crpljenju i upravljanju vodama (Blair i sur. 2024).

Suvremena znanstvena literatura sve češće naglašava potrebu za integriranim upravljanjem vodnim resursima u područjima isušenih slanih jezera. Takvo upravljanje uključuje izradu lokalno utemeljenih vodnih bilanci, aktivno sudjelovanje dionika te dugoročni hidrološki i ekološki monitoring, umjesto oslanjanja isključivo na generičke pokazatelje procjene životnog ciklusa (LCA).

3.5. Posljedice za održivost i regulatorne zahtjeve u sektoru voda

Iz perspektive zaštite voda, proizvodnja litija iz isušenih slanih jezera predstavlja visokorizičnu djelatnost u područjima obilježenima izrazitom vodnom oskudicom. Iako se litij u europskim strateškim dokumentima prepoznaje kao ključna sirovina za energetsku tranziciju, dostupni znanstveni dokazi upućuju na to da njegova proizvodnja može uzrokovati značajne pritiske na vodne resurse i ekosustave ako se ne provodi u skladu s načelima održivoga upravljanja vodama.

U skladu s načelima Okvirne direktive o vodama (2000/60/EZ), procjena utjecaja takvih zahvata mora se temeljiti na lokalnim hidrogeološkim obilježjima i vodnim bilancama, uz očuvanje dobrog stanja vodnih tijela te sprječavanje njihova pogoršanja.

To podrazumijeva:

- izradu detaljnih hidrogeoloških modela koji obuhvaćaju povezanost slanih i slatkih vodonosnika
- transparentno i provjerljivo izvještavanje o zahvaćanju podzemnih slanih voda (rasola) i slatke vode
- sustavno praćenje stanja površinskih i podzemnih voda, ekosustava i bioraznolikosti
- uključivanje hidrosocijalnih aspekata i sudjelovanje dionika u planiranju i donošenju odluka.

Takav pristup temeljni je preduvjet za usklađivanje ciljeva energetske tranzicije s dugoročnom zaštitom vodnih resursa i očuvanjem vodnih ekosustava.

4. LITIJ IZ ČVRSTE RUDE (SPODUMEN): RUDARSKE AKTIVNOSTI, PROCESNE VODE I RIZICI ZA POVRŠINSKE I PODZEMNE VODE

Eksploatacija litija iz čvrste rude, ponajprije iz minerala spodumena ($LiAlSi_2O_6$), predstavlja drugi dominantan način proizvodnje litija u globalnoj opskrbi. Za razliku od sustava isušenih slanih jezera, koji su prostorno ograničeni na specifične aridne regije, ležišta čvrste rude rasprostranjena su na više kontinenata, uključujući Australiju, Kanadu, Kinu i dijelove Afrike. Iako se ovaj oblik proizvodnje često smatra manje zahtjevnim s aspekta upravljanja vodama u usporedbi s ekstrakcijom litija iz podzemnih slanih voda, znanstvena literatura upozorava da su vodni i kemijski rizici i dalje značajni. To posebno dolazi do izražaja u fazama rudarske eksploatacije, obogaćivanja rude te kemijske prerade koncentrata (IEA 2021).

4.1. Rudarska eksploatacija čvrste rude i uporaba vode

Eksploatacija spodumenskih rudnih ležišta u pravilu se provodi površinskim kopovima, uz intenzivnu uporabu vode u procesima drobljenja, mljevenja i flotacije. Procesne vode služe za odvajanje litijevih minerala od prateće stijenske mase, pri čemu nastaju znatne količine jalovine i tehnoloških muljeva koji zahtijevaju odgovarajuće zbrinjavanje i nadzor.

Iako ukupna potrošnja vode po toni proizvedenog litija u nekim slučajevima može biti niža nego kod pojedinih operacija u sustavima isušenih slanih jezera, ključni izazovi povezani su s lokalnom dostupnošću vode, kvalitetom procesnih voda i načinom njihova upravljanja. U područjima s ograničenim vodnim resursima ili osjetljivim hidrološkim sustavima, rudarske aktivnosti mogu dodatno povećati pritiske na površinske i podzemne vode, osobito ako sustavi recirkulacije vode i zaštitne mjere nisu odgovarajuće projektirani i nadzirani (Halkes i sur. 2024).

4.2. Jalovišta i rudarski otpad: rizici za površinske i podzemne vode

Jedan od ključnih okolišnih izazova povezanih s eksploatacijom čvrste rude odnosi se na upravljanje jalovištima i rudarskim otpadom. Jalovišta sadrže fine čestice stijenskog materijala i ostatke procesnih kemikalija te, ako nisu odgovarajuće projektirana, izgrađena i nadzirana, mogu predstavljati dugoročan izvor onečišćenja površinskih i podzemnih voda.

U određenim geokemijskim uvjetima, osobito u prisutnosti sulfidnih minerala, postoji rizik od nastanka kiselih rudničkih drenaža (engl. acid mine drainage, AMD), koje mogu mobilizirati metale te povećati salinitet i toksičnost recipijentnih vodnih tijela. Iako spodumenska rudna ležišta u pravilu nisu povezana s izraženim stvaranjem kiselih drenaža, znanstvena literatura upozorava da razina rizika uvelike ovisi o mineralogiji prateće stijene, načinu gospodarenja jalovištem i lokalnim hidrološkim uvjetima, zbog čega se taj aspekt ne smije zanemariti u procjenama utjecaja na vodne resurse (IEA 2021).

4.3. Utjecaj kemijske prerade koncentrata na vode i okoliš

Značajan dio ukupnog okolišnog opterećenja proizvodnje litija iz čvrste rude nastaje izvan samog rudnika, u fazi kemijske prerade koncentrata spodumena u baterijski prihvatljive spojeve, ponajprije litijev hidroksid (LiOH) i litijev karbonat (Li_2CO_3). Ta faza uključuje energetski intenzivne procese, poput kalcinacije spodumena na povišenim temperaturama, nakon čega slijede postupci luženja, neutralizacije, taloženja i pročišćavanja, uz primjenu niza kemijskih reagensa.

Prema analizi Vere i suradnika (2023), u kemijskoj preradi spodumenskog koncentrata najčešće se koriste jake anorganske kiseline i lužine, među kojima dominiraju sumporna kiselina (H_2SO_4), natrijev hidroksid (NaOH) i kalcijev hidroksid ($Ca(OH)_2$), dok se u pojedinim procesnim varijantama primjenjuju i natrijev karbonat (Na_2CO_3) te vapno za regulaciju pH-vrijednosti i taloženje nečistoća. Ovi postupci rezultiraju stvaranjem znatnih količina procesnih i otpadnih voda, kao i čvrstih nusprodukata bogatih solima i metalima.

Otpadne vode nastale u fazama rafinacije karakterizira složen kemijski sastav. One mogu sadržavati:

- visoke koncentracije sulfata i drugih aniona (npr. SO_4^{2-}, Cl^-),
- alkalne ili kisele pH-vrijednosti, ovisno o fazi procesa,
- otopljene alkalne i zemnoalkalne metale (Na^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}),
- tragove metala i metaloida prisutnih u ulaznom koncentratu (npr. aluminij, željezo, mangan),
- ostatke procesnih kemikalija korištenih u luženju i neutralizaciji.

Vera et al. (2023) naglašavaju da upravo visoki salinitet, promijenjena pH-vrijednost i prisutnost sulfata predstavljaju ključne vodno-okolišne izazove kemijske prerade litija iz čvrste rude. Ako se takve otpadne vode neadekvatno obrade, mogu predstavljati ozbiljan rizik za površinske i podzemne vode, osobito u područjima s ograničenim kapacitetima za obradu industrijskih otpadnih voda ili s osjetljivim hidrološkim sustavima.

Zbog navedenih rizika, suvremena postrojenja za preradu litija zahtijevaju višestupanjske sustave obrade otpadnih voda, koji u pravilu uključuju kemijsku neutralizaciju, taloženje metala, uklanjanje sulfata, membranske procese i djelomičnu ili potpunu recirkulaciju procesne vode. Međutim, čak i uz primjenu takvih tehnologija, kemijska prerada koncentrata ostaje jedan od dominantnih izvora vodnog i kemijskog opterećenja u cjelokupnom lancu proizvodnje litija.

Rezultati procjena životnog ciklusa (LCA) potvrđuju da je faza kemijske prerade koncentrata često ključna komponenta ukupnog okolišnog otiska proizvodnje litija iz čvrste rude, ne samo u pogledu potrošnje energije i emisija stakleničkih plinova, već i u pogledu vodnog otiska i kemijskog opterećenja voda (Vera i sur. 2023). To jasno upućuje na potrebu da se procjene održivosti litija ne ograničavaju na rudarsku fazu, već da obuhvate cjelokupni proizvodni lanac, s posebnim naglaskom na preradu i rafinaciju.

4.4. Utjecaji eksploatacije čvrste rude na površinske i podzemne vode

Eksploatacija litija iz čvrste rude može utjecati na površinske i podzemne vode putem više međusobno povezanih mehanizama, koji uključuju ispuštanje industrijskih otpadnih voda, procjeđivanje onečišćujućih tvari iz jalovišta i tehnoloških muljeva, kao i promjene hidrološkog režima povezane s crpljenjem vode za rudarske i procesne potrebe. Iako se pojedini utjecaji razlikuju ovisno o lokalnim uvjetima i tehnologiji eksploatacije, znanstvena literatura upozorava na niz tipičnih vodno-okolišnih rizika povezanih s ovim oblikom rudarstva.

U fazama aktivne eksploatacije, površinske vode mogu biti izložene povećanim dotocima suspendiranih tvari, osobito tijekom oborinskih događaja i odvodnje rudarskih površina. Uz mehaničko zamućenje,

industrijske otpadne vode i oborinska ispiranja mogu sadržavati povišene koncentracije otopljenih soli (npr. sulfata i klorida), kao i alkalne ili kisele pH-vrijednosti, ovisno o korištenim procesnim kemikalijama. U recipijentima se mogu pojaviti i otopljeni metali, poput aluminija, željeza, mangana i natrija, koji potječu iz same rude, jalovine ili iz kemijskih postupaka obogaćivanja i prerade.

Osobitu pozornost zahtijeva utjecaj jalovišta i odlagališta tehnoloških muljeva, koja predstavljaju dugoročni potencijalni izvor onečišćenja. Procjeđivanje vode kroz jalovinu može rezultirati povećanim koncentracijama otopljenih soli, metala i sulfata, a u nepovoljnim geokemijskim uvjetima i stvaranjem kiselih ili alkalnih drenažnih voda. Iako spodumenska ležišta nisu tipično povezana s intenzivnim nastankom kiselih rudničkih voda, literatura naglašava da taj rizik ovisi o mineralogiji prateće stijene, prisutnosti sulfida te lokalnim hidrološkim uvjetima, zbog čega ga se ne smije unaprijed isključiti.

Podzemne vode mogu biti ugrožene infiltracijom onečišćujućih tvari iz jalovišta, osobito u slučaju neodgovarajuće hidroizolacije dna, promjena razina podzemne vode ili ekstremnih hidroloških događaja. Potencijalni onečišćivači u tom kontekstu uključuju alkalne i zemnoalkalne metale (Na^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}), sulfate, te tragove metala prisutnih u rudi i procesnim tokovima. Dugoročno, takva infiltracija može dovesti do postupnog pogoršanja kakvoće podzemnih voda, koje se često očituje tek s vremenskim odmakom.

Iako su empirijski podaci o dugoročnim učincima litijevih rudnika na vodne resurse još uvijek ograničeni, iskustva iz eksploatacije drugih metalnih ruda pokazuju da se negativni utjecaji na kakvoću voda mogu manifestirati desetljećima nakon prestanka eksploatacije. Znanstvena literatura stoga naglašava da jedan od ključnih izazova nije samo učinkovito upravljanje vodama tijekom operativne faze rudnika, već i osiguravanje dugoročne stabilnosti sustava upravljanja vodama nakon zatvaranja rudnika, kada institucionalni nadzor i financijska odgovornost operatera često slabe (Halkes i sur. 2024).

U tom kontekstu, dugoročni hidrološki i hidrogeokemijski monitoring, zajedno s jasno definiranim planovima zatvaranja rudnika i sanacije, predstavljaju ključni preduvjet za smanjenje rizika za površinske i podzemne vode. Bez takvog pristupa postoji realna opasnost da se nepovoljni utjecaji eksploatacije čvrste rude na kakvoću voda i vodne ekosustave prenesu na buduće generacije i to u razdoblju kada su mogućnosti intervencije znatno ograničene.

4.5. Usporedba vodnih rizika proizvodnje litija iz rasola i čvrste rude te posljedice za upravljanje vodama

Usporedba proizvodnje litija iz podzemnih slanih voda (rasola) i iz čvrste rude pokazuje da se ne radi o alternativama s većim ili manjim ukupnim vodnim opterećenjem, nego o različitim obrascima rizika za vodne resurse. U sustavima isušenih slanih jezera dominantni su problemi vodne oskudice, dugoročnih hidrogeoloških promjena i narušavanja ravnoteže između slanih i slatkih vodonosnika, dok su kod eksploatacije čvrste rude glavni izazovi očuvanje kakvoće voda, sprječavanje kemijskog onečišćenja te upravljanje procesnim vodama i rudarskim otpadom.

Kod proizvodnje litija iz rasola ključni vodni pritisci proizlaze iz dugotrajnog crpljenja podzemnih slanih voda i intenzivnog isparavanja u područjima s vrlo ograničenim prirodnim dotocima. Posljedice se očituju u sniženju razina podzemnih voda, smanjenju dotoka u površinske lagune te posljedičnim promjenama ekosustava i uvjeta života lokalnih zajednica. Iako se često ističe da se koristi voda neprikladna za ljudsku potrošnju, brojna istraživanja potvrđuju postojanje hidrauličke povezanosti između slanih i slatkih vodnih tijela, što povećava rizik za cjelokupni vodni sustav.

Nasuprot tome, proizvodnju litija iz čvrste rude obilježavaju kraći, ali intenzivniji zahvati vode, ponajprije tijekom obogaćivanja rude i kemijske prerade koncentrata. Iako ukupna količina zahvaćene vode po toni proizvoda može biti usporediva ili manja nego kod proizvodnje iz rasola, sastav otpadnih voda, prisutnost procesnih kemikalija, otopljenih soli i metala te dugoročni rizici povezani s jalovištima i tehnološkim muljevima predstavljaju značajan izazov za zaštitu površinskih i podzemnih voda. Iskustva iz drugih grana metalnog rudarstva pokazuju da se negativni učinci na kakvoću voda mogu pojaviti ili ponovno aktivirati i desetljećima nakon zatvaranja rudnika, ako se sustavi za upravljanje vodama ne održavaju na odgovarajući način.

Navedene razlike potvrđuju da procjena utjecaja proizvodnje litija na vodne resurse mora biti prilagođena specifičnim hidrološkim, hidrogeološkim i tehnološkim obilježjima svakog pojedinog nalazišta i proizvodnog procesa.

5. IZRAVNA EKSTRAKCIJA LITIJA (DLE): TEHNOLOŠKI PRISTUP, VODNI I KEMIJSKI RIZICI TE UVJETI STVARNE ODRŽIVOSTI

Izravna ekstrakcija litija (engl. Direct Lithium Extraction, DLE) obuhvaća skup tehnoloških postupaka kojima se litij selektivno izdvaja iz podzemnih slanih voda (rasola) bez primjene dugotrajnih isparivačkih bazena, karakterističnih za konvencionalnu proizvodnju litija u sustavima isušenih slanih jezera. U praksi se primjenjuju različiti tehnološki pristupi, pri čemu danas prevladavaju adsorpcijski i ionsko-izmjenjivački sustavi, dok su membranski i postupci ekstrakcije otapalima uglavnom ograničeni na pilot-razinu ili specifične primjene.

Prema preglednom radu Vera et al. (2023), u DLE sustavima najčešće se koriste litij-selektivni anorganski sorbensi, osobito materijali na bazi manganovih oksida

(Li–Mn–O) i aluminatnih struktura (Li–Al–O), dok se rjeđe primjenjuju titanatni sorbensi. Ovi materijali omogućuju selektivno vezanje litijevih iona iz rasola, nakon čega slijedi faza regeneracije sorbensa, u kojoj se litij oslobađa primjenom kemijskih reagensa.

U postupcima regeneracije najčešće se koriste klorovodična kiselina (HCl) i sumporna kiselina (H_2SO_4), dok se u pojedinim tehnološkim varijantama primjenjuju i lužine, poput natrijeva hidroksida (NaOH) ili amonijeve otopine. Kao posljedica tih postupaka nastaju koncentrirani procesni tokovi bogati litijevim solima, ali i otpadne vode povišenog saliniteta, čiji kemijski sastav ovisi o vrsti sorbensa, broju ciklusa regeneracije i radnim parametrima sustava.

Iako DLE tehnologije omogućuju kraće proizvodne cikluse i manji prostorni zahvat u odnosu na isparivačke sustave, one često zahtijevaju značajnu potrošnju energije, osobito za pumpanje rasola, regeneraciju sorbenata i održavanje stabilnih procesnih uvjeta. Istodobno, primjena kiselina i lužina dovodi do nastanka otpadnih voda s promijenjenim pH-vrijednostima, povišenim koncentracijama klorida i sulfata, kao i povećanim udjelima natrija, kalcija i magnezija. U određenim slučajevima zabilježena je i pojava tragova metala, povezana s postupnom degradacijom sorbenata tijekom višekratne uporabe (Vera i sur. 2023).

Posebno važan element procjene održivosti DLE tehnologija odnosi se na povrat rasola u vodonosni sustav nakon izdvajanja litija. Iako se povrat rasola često ističe kao prednost u odnosu na konvencionalne metode, znanstvena literatura upozorava da se vraćeni rasol ne vraća u izvornom kemijskom stanju. Najčešće se bilježe promjene u koncentraciji litija, omjerima glavnih iona (Na^+ Mg^{2+}, Ca^{2+}), pH-vrijednosti i temperaturi, a u pojedinim slučajevima i povećane koncentracije klorida ili sulfata.

Takve promjene mogu utjecati na hidrauličku i hidrogeokemijsku ravnotežu vodonosnih sustava, osobito u složenim salar okruženjima u kojima su slani i slatki vodonosnici međusobno povezani. Zbog toga se u literaturi naglašava potreba za detaljnim hidrogeološkim i hidrogeokemijskim modeliranjem, provođenjem pilot-projekata te uspostavom dugoročnog monitoringa prije šire industrijske primjene DLE tehnologija (Vera i sur. 2023).

U tom smislu, izravna ekstrakcija litija ne može se promatrati kao univerzalno rješenje za smanjenje vodnih i okolišnih pritisaka povezanih s proizvodnjom litija. Riječ je o tehnološkom pristupu čija prihvatljivost i stvarna održivost ovise o lokalnim hidrogeološkim uvjetima, izboru adsorbensa i procesnih kemikalija te načinu upravljanja procesnim i povratnim vodnim tokovima. Bez jasno definiranih regulatornih zahtjeva, transparentnog praćenja i integracije u postojeće sustave upravljanja vodama, postoji opravdana bojazan da se okolišni pritisci neće ukloniti, već preoblikovati i premjestiti na druge dijelove proizvodnog lanca.

5.1. Temeljna načela i glavne varijante izravne ekstrakcije litija (DLE)

Izravna ekstrakcija litija (DLE) obuhvaća tehnološke postupke kojima se litij selektivno izdvaja iz podzemnih slanih voda (rasola) bez dugotrajnog isparavanja. Za razliku od konvencionalnih metoda, DLE tehnologije omogućuju kontinuirane ili polukontinuirane procese, kraće vrijeme obrade i manji prostorni zahvat.

U praksi se razvijaju četiri osnovne skupine DLE tehnologija:

- adsorpcijski i ionsko-izmjenjivački sustavi, koji koriste litij-selektivne sorbense (najčešće aluminatne i manganatne materijale, rjeđe titanate),
- membranski procesi (nanofiltracija, elektrodijaliza),
- ekstrakcija otapalima, temeljena na organskim ekstraktantima,
- elektrokemijski postupci, zasad uglavnom na pilot-razini.

Najširu primjenu imaju adsorpcijski sustavi, no njihov ključni tehnički izazov ostaje postizanje visoke selektivnosti za litij u prisutnosti višestruko većih koncentracija natrija, kalija, magnezija i kalcija. Posebno nepovoljan čimbenik predstavlja visok omjer Mg/Li u rasolu, koji znatno utječe na učinkovitost i okolišni profil DLE procesa (Vera i sur. 2023). Zbog toga se DLE tehnologije ne mogu smatrati univerzalno primjenjivima, već zahtijevaju lokalno prilagođenu tehničku i okolišnu procjenu.

5.2. Upravljanje vodama u DLE sustavima: povrat rasola i hidrogeokemijski rizici

Za razliku od isparivačkih bazena, DLE sustavi u pravilu vraćaju rasol u vodonosni sustav nakon izdvajanja litija. Iako se to često navodi kao prednost u pogledu smanjenja neto gubitka vode, količina vraćenog rasola nije jedini relevantan pokazatelj održivosti.

Tijekom DLE procesa dolazi do promjena u kemijskom sastavu rasola, uključujući smanjenje koncentracije litija, promjene omjera Na^+, Mg^{2+} i Ca^{2+}, pomak pH-vrijednosti te često povišenu temperaturu povratne vode. Takve promjene mogu utjecati na gustoću fluida, miješanje vodnih masa i smjerove podzemnog strujanja, osobito u složenim salar-sustavima gdje su slani i slatki vodonosnici međusobno povezani.

Znanstveni pregledi naglašavaju da se ti učinci ne mogu pouzdano procijeniti bez detaljnog hidrogeološkog i hidrogeokemijskog modeliranja, kao ni bez dugotrajnog praćenja u stvarnim uvjetima rada postrojenja (Halkes i sur. 2024). Upravljanje vodama u DLE sustavima stoga mora uključivati jasno definirane uvjete povrata rasola, granične vrijednosti kemijskog sastava i temperature te kontinuirani monitoring podzemnih i površinskih voda.

5.3. Kemijski i energetski zahtjevi te otpadni tokovi DLE tehnologija

Iako DLE smanjuje prostorni zahvat, ona često uvodi povećane kemijske i energetske zahtjeve. U adsorpcijskim sustavima regeneracija sorbenata najčešće uključuje klorovodičnu i sumpornu kiselinu, a rjeđe lužine poput natrijeva hidroksida, što dovodi do nastanka visokosalinitetnih regeneracijskih otopina.

Ti tekući otpadni tokovi mogu sadržavati povišene koncentracije klorida, sulfata, alkalnih i zemnoalkalnih metala, kao i tragove metala otpuštenih iz sorbenata tijekom njihove degradacije. Uz to nastaje i čvrsti otpad (istrošeni sorbensi, membrane, elektrode), čiji je vijek trajanja u praksi često kraći od očekivanog.

Energetski, DLE sustavi zahtijevaju kontinuirani dovod električne i toplinske energije za pumpanje rasola, regeneraciju materijala i održavanje procesnih uvjeta. Procjene životnog ciklusa pokazuju da se kod DLE tehnologija dio okolišnog opterećenja može premjestiti s vode i prostora na energiju i kemikalije, osobito u regijama s fosilno intenzivnim energetskim miksom (Vera i sur. 2023).

5.4. DLE u uvjetima vodnog stresa: hidrosocijalni izazovi

Izravna ekstrakcija litija ne uklanja hidrosocijalne rizike povezane s eksploatacijom rasola. Industrijsko crpljenje podzemnih slanih voda i dalje konkurira lokalnim vodnim potrebama, osobito u aridnim područjima s ograničenim resursima. Povrat rasola ne jamči očuvanje vodnog sustava ako se zanemare promjene u kemijskom sastavu, temperaturi i prostornoj raspodjeli povrata.

Značajan problem predstavlja nedostatak transparentnih podataka o količinama zahvaćenog i vraćenog rasola te o njegovu kemijskom sastavu, što otežava javni nadzor i sudjelovanje lokalnih zajednica u odlučivanju (Blair i sur. 2024). U područjima već pogođenima vodnim stresom, čak i tehnološki učinkovitiji sustavi mogu dodatno pojačati društvene napetosti ako se uvode bez jasnih pravila upravljanja vodama.

5.5. Značenje DLE tehnologija za procjenu održivosti i regulatorno odlučivanje

Dostupna znanstvena literatura pokazuje da DLE tehnologije mogu smanjiti pojedine okolišne pritiske, ali samo pod jasno definiranim uvjetima (Vera i sur. 2023; Halkes i sur. 2024). Njihova održivost ponajprije ovisi o lokalnim hidrogeološkim obilježjima, kontroli kemijskih i energetskih tokova te učinkovitom upravljanju otpadnim vodama i čvrstim otpadom.

Procjena njihove održivosti stoga zahtijeva lokalno utemeljene analize koje obuhvaćaju količinu i kakvoću zahvaćenog i vraćenog rasola, promjene hidrogeokemijskih uvjeta te moguće kumulativne učinke na razini sliva. Standardne metode procjene životnog ciklusa mogu biti koristan alat, ali same po sebi nisu dovoljne za procjenu dugoročnih vodnih i hidrosocijalnih rizika.

Iz regulatorne perspektive, DLE tehnologije ne mogu se unaprijed smatrati tehnologijama niskog okolišnog rizika. Njihova primjena zahtijeva:

- lokalno utemeljene vodopravne uvjete,
- praćenje kemijskog sastava i temperature vraćenog rasola,
- uključivanje DLE projekata u planove upravljanja vodama.

Prihvatljivost njihove primjene stoga treba ocjenjivati od slučaja do slučaja, uzimajući u obzir lokalna hidrološka, hidrogeološka i okolišna obilježja.

6. KEMIJSKA PRERADA LITIJA I PROIZVODNJA BATERIJA: VODNI I OKOLIŠNI ASPEKTI INDUSTRIJSKOG LANCA

U industrijskom dijelu lanca vrijednosti litija dominantni vodni pritisci proizlaze iz kombinacije (i) potrošnje tehnološke vode i (ii) nastanka otpadnih voda izrazito visokog ionskog opterećenja, ekstremnih pH-vrijednosti te specifičnih anorganskih i organskih onečišćujućih tvari. U usporedbi s rudarskom fazom, ovdje su rizici za vode češće povezani s kemijskim procesima i tehnološkim tokovima koji zahtijevaju ciljanu obradu i strogo upravljanje ispuštanjima (IEA 2021).

6.1. Kemijska prerada litija u Li_2CO_3 i LiOH: procesni reagensi i sastav otpadnih voda

Neovisno o izvoru sirovine, litij se industrijski prerađuje u baterijski prihvatljive spojeve, ponajprije litijev karbonat (Li_2CO_3) i litijev hidroksid (LiOH). Tehnološki slijed tipično uključuje luženje, neutralizaciju, taloženje, filtraciju i višestupanjsko pročišćavanje. U tim se postupcima u pravilu primjenjuju jake kiseline i lužine, pri čemu su u industrijskoj praksi i preglednoj literaturi najčešće navedeni sumporna kiselina (H_2SO_4) i klorovodična kiselina (HCl) te natrijev hidroksid (NaOH) i kalcijev hidroksid ($Ca(OH)_2$), uz upotrebu natrijeva karbonata (Na_2CO_3) u fazama dobivanja karbonata (Vera i sur. 2023).

Otpadne vode nastale u rafinaciji litija karakterizira vrlo visoka vodljivost i salinitet, uz dominantnu prisutnost klorida i/ili sulfata (Cl^-, SO_4^{2-}) te makroiona poput Na^+, Ca^{2+} i Mg^{2+}. Česte su i izražene promjene pH-vrijednosti (kiseli tokovi nakon luženja i alkalni nakon neutralizacije), dok se ovisno o ulaznoj sirovini i tehnološkoj shemi mogu pojaviti i povišene koncentracije određenih metala (npr. Al, Fe, Mn) te ostaci procesnih reagensa (Vera i sur. 2023). Takav kemijski profil predstavlja ograničenje za konvencionalnu obradu te u pravilu zahtijeva kombinaciju neutralizacije, taloženja/koagulacije, ciljane obrade ionskog opterećenja te recirkulacije procesne vode, osobito kada je recipijent hidrološki osjetljiv ili ograničenog razrjeđivačkog kapaciteta.

6.2. Proizvodnja katodnih materijala i baterijskih ćelija: specifična onečišćivala relevantna za vode

U fazama proizvodnje katodnih materijala i baterijskih ćelija u tehnološke tokove ulaze metalne soli i litijevi spojevi, organski sustavi te komponente elektrolita. Pri pranju opreme, pripremi suspenzija i kontroli čistoće nastaju otpadne vode u kojima se mogu pojaviti otopljene ili suspendirane frakcije metala osobito nikla, kobalta i mangana (katodni materijali na bazi nikla, mangana i kobalta, NMC) te fosfatni spojevi povezani sa sustavom litij-željezov fosfat (LFP), uz prisutnost litijevih soli i finih čestica aktivnih materijala.

Za vodni sektor osobito je važno istaknuti da se u proizvodnim tokovima mogu pojaviti organska otapala, pri čemu se u industrijskoj praksi često navodi N-metil-2-pirolidon (NMP) kao relevantno otapalo u polivinilidenfluoridnim (PVDF) sustavima, gdje se ono primjenjuje. Nadalje, kod elektrolita u litij-ionskim baterijama tipične su fluorirane komponente, pri čemu se u literaturi često spominje litijev heksafluorofosfat ($LiPF_6$) kao sol elektrolita. U nepovoljnim uvjetima razgradnje tog spoja mogu nastati fluoridni spojevi, što predstavlja tehnološki i okolišno osjetljiv aspekt obrade (IEA 2021). U takvim otpadnim vodama problem je najčešće kombinacija ionskog opterećenja, metala, organske frakcije i fine suspendirane tvari, što zahtijeva višestupanjski tretman s naglaskom na fizikalno-kemijske postupke, separaciju organskih komponenti i, po potrebi, membranske i napredne oksidacijske procese.

6.3. Prostorna raspodjela proizvodnje baterija i pritisci na vodne resurse

Procjene životnog ciklusa ukazuju da se učinci proizvodnje baterija na vode ne mogu vjerodostojno interpretirati isključivo kroz globalne prosjeke, jer su postrojenja za rafinaciju litija, proizvodnju katodnih materijala i proizvodnju ćelija često prostorno koncentrirana u industrijskim klasterima. U takvim područjima postaje ključan kumulativni pritisak na vodne resurse i kapacitete za obradu industrijskih otpadnih voda, pri čemu lokalna raspoloživost vode i osjetljivost recipijenata mogu biti presudni za ukupni rizik, neovisno o tehnološkoj sofisticiranosti pojedinog postrojenja (IEA 2021).

6.4. Otpadne vode i regulatorni okvir u EU-u: zahtjev prilagodljivosti nadzora i obrade

U europskom kontekstu, upravljanje industrijskim ispuštanjima mora biti usklađeno s ciljevima Okvirne direktive o vodama (2000/60/EZ), osobito s načelima sprječavanja pogoršanja stanja voda i postizanja dobrog kemijskog i ekološkog stanja. Za otpadne vode iz prerade litija i proizvodnje baterija to implicira nadzor parametara koji nose najveći rizik: vodljivost/salinitet, pH-vrijednost, metali, specifične organske tvari i, gdje je relevantno, fluoridni spojevi. Dodatni je izazov činjenica da se sastav otpadnih voda može mijenjati s razvojem kemijskog sastava baterija i tehnoloških procesa, zbog čega su potrebni adaptivni sustavi obrade i kontinuirano praćenje, a ne oslanjanje na statične pretpostavke o sastavu ispusta (Vera i sur. 2023).

6.5. Zaključna razmatranja: prerada litija, proizvodnja baterija i zahtjevi održivog upravljanja vodama

Za sektor voda najkritičnije su tri faze industrijskog lanca: (1) kemijska prerada litija, u kojoj nastaju kloridno i/ili sulfatno opterećeni vodni tokovi s izraženim odstupanjima pH-vrijednosti i mogućom prisutnošću metala; (2) proizvodnja katodnih materijala i baterijskih ćelija, pri kojoj se u otpadnim vodama mogu pojaviti nikal, kobalt, mangan, fosfatni spojevi, litijeve soli, organska otapala poput N-metil-2-pirolidona (NMP), gdje se primjenjuje, te fluoridni spojevi povezani s elektrolitima; i (3) prostorna koncentracija industrijskih postrojenja, koja može uzrokovati kumulativno opterećenje lokalnih vodnih tijela i sustava za obradu otpadnih voda (IEA 2021; Vera i sur. 2023).

Navedeni rizici potvrđuju da se procjena utjecaja kemijske prerade litija i proizvodnje baterija mora temeljiti na poznavanju lokalnih hidroloških obilježja, sastava tehnoloških i otpadnih voda te učinkovitosti sustava za njihovo pročišćavanje.

7. KRAJ ŽIVOTNOG VIJEKA I RECIKLIRANJE LITIJ-IONSKIH BATERIJA: MOGUĆNOSTI SMANJENJA PRITISKA NA VODNE RESURSE I NOVI OKOLIŠNI IZAZOVI

Recikliranje litij-ionskih baterija ima potencijal za smanjenje pritiska na primarne izvore litija i povezane vodne resurse, osobito u hidrološki osjetljivim područjima gdje se litij dobiva iz podzemnih slanih voda. Istodobno, procesi recikliranja uvode nove vodne i kemijske tokove koji zahtijevaju jednako pažljivo upravljanje kao i primarna proizvodnja. Za sektor voda stoga je ključno razmotriti recikliranje ne samo kao mjeru kružnog gospodarstva, već kao novi industrijski izvor specifičnih pritisaka na kakvoću i količinu vode.

7.1. Recikliranje i voda: smanjenje primarnih zahvata uz nove lokalne pritiske

Primarna proizvodnja litija, osobito iz sustava isušenih slanih jezera, povezana je s izraženim vodnim stresom i dugoročnim promjenama hidrogeološke ravnoteže. Povećanje udjela sekundarnog litija dobivenog recikliranjem može smanjiti potrebu za novim zahvatima vode u takvim područjima. Procjene životnog ciklusa pokazuju da recikliranje litij-ionskih baterija u prosjeku ima niži vodni otisak od primarne proizvodnje, iako raspon rezultata snažno ovisi o tehnologiji recikliranja, energetskom miksu i lokaciji postrojenja (Harper i sur. 2019).

Međutim, iz perspektive upravljanja vodama, ključno je uočiti da se time opterećenja prostorno premještaju, s

aridnih i hidroloških osjetljivih regija prema industrijskim zonama u kojima se nalaze postrojenja za recikliranje. Stvarna korist recikliranja za vodne resurse stoga ovisi o kapacitetu lokalnih sustava za obradu otpadnih voda i regulatornom nadzoru nad novim industrijskim tokovima.

7.2. Tehnološki pristupi recikliranju i vodni aspekti

U industrijskoj praksi primjenjuju se tri osnovne skupine tehnologija recikliranja litij-ionskih baterija: pirometalurški postupci, hidrometalurški postupci te postupci izravnog recikliranja.

Pirometalurški postupci temelje se na visokotemperaturnoj obradi, pri čemu se nikal, kobalt i bakar oporabljuju iz taline, dok litij u značajnoj mjeri završava u troski ili zahtijeva dodatne faze oporabe. Izravna potrošnja vode u tim operacijama relativno je ograničena, no izrazita energetska intenzivnost posredno povećava vodni otisak kroz proizvodnju energije.

Hidrometalurški postupci danas se smatraju tehnološki najzastupljenijima za oporabu litija. Oni uključuju luženje (najčešće uz primjenu sumporne ili klorovodične kiseline), taloženje i pročišćavanje metala u vodenoj fazi. Takve tehnologije generiraju znatne količine otpadnih voda visokog saliniteta, s promijenjenim pH-vrijednostima i prisutnošću metala i organskih ostataka, zbog čega su vodni i kemijski rizici izraženiji nego kod pirometalurških postupaka (Harper i sur. 2019).

Izravno recikliranje nastoji očuvati strukturu katodnih materijala i izbjeći njihovu potpunu kemijsku razgradnju. Time se potencijalno smanjuju potrošnja vode i primjena kemikalija, no te su tehnologije još uvijek ograničene na pilot i rane faze industrijske primjene, a njihova dugoročna pouzdanost i skalabilnost tek se procjenjuju.

7.3. Otpadne vode iz recikliranja: kemijski sastav i zahtjevi obrade

Otpadne vode iz recikliranja litij-ionskih baterija karakterizira visoka kemijska složenost. U hidrometalurškim postupcima te vode tipično sadrže povišene koncentracije litija, nikla, kobalta i mangana, ostatke kiselina ili lužina korištenih u luženju, organsku frakciju povezanu s elektrolitima i vezivima te fine čestice aktivnih baterijskih materijala.

Takav sastav u pravilu nadilazi učinkovitost konvencionalnih sustava za pročišćavanje. U praksi je nužna primjena kombiniranih postupaka koji uključuju neutralizaciju, taloženje metala, separaciju krutih čestica, membranske tehnologije te, prema potrebi, napredne oksidacijske procese. Bez odgovarajuće obrade postoji realan rizik da se dio okolišnog tereta recikliranja prenese u vodni okoliš, čime se umanjuju ili poništavaju njegove očekivane koristi (Harper i sur. 2019).

7.4. Regulatorni okvir i utjecaj na sektor voda

Uredba (EU) 2023/1542 o baterijama uvodi obvezujuće ciljeve za sakupljanje i recikliranje baterija te minimalne udjele recikliranih materijala u novim proizvodima. Iako je naglasak regulative primarno na materijalnoj učinkovitosti i sigurnosti opskrbe, njezina provedba ima izravne posljedice za sektor voda zbog očekivanog rasta broja reciklažnih postrojenja i volumena industrijskih otpadnih voda.

U tom kontekstu nužno je rano uključivanje vodopravnih uvjeta u planiranje reciklažnih kapaciteta, razvoj tehničkih smjernica za obradu otpadnih voda iz recikliranja baterija te uspostava sustavnog praćenja koje obuhvaća ne samo količine, nego i detaljan kemijski sastav ispusta. Takav pristup u skladu je s ciljevima Okvirne direktive o vodama i načelom sprječavanja pogoršanja stanja vodnih tijela.

7.5. Recikliranje u kontekstu cjelovitog upravljanja vodama

Recikliranje litij-ionskih baterija može znatno smanjiti pritisak na primarne izvore litija i povezane vodne resurse, ali samo ako je praćeno učinkovitim pročišćavanjem tehnoloških i otpadnih voda te odgovarajućom kontrolom kemijskih tokova. U suprotnom postoji opasnost od nastanka novih izvora onečišćenja u postrojenjima za recikliranje.

Stoga procjena okolišnih učinaka recikliranja mora obuhvatiti ne samo učinkovitost oporabe vrijednih sirovina nego i upravljanje vodama, otpadnim tokovima i nusproizvodima tijekom cijelog procesa.

8. TOKSIKOLOŠKI UČINCI LITIJA: ZAGAĐENJE OKOLIŠA, EKOTOKSIKOLOGIJA I IZLOŽENOST LJUDI

Litij (Li) se tradicionalno percipira kao relativno bezopasan element u okolišu, djelomično zbog njegove prirodne pojavnosti i dugotrajne primjene u medicini. Međutim, nedavni porast eksploatacije litija, prvenstveno potaknut razvojem baterijskih tehnologija i energetskom tranzicijom, doveo je do znatnog povećanja emisija ovog elementa u vodnom okolišu. Istodobno, znanstveni dokazi upućuju na to da litij posjeduje mjerljive ekotoksikološke učinke te da može predstavljati relevantan put kronične izloženosti ljudi putem pitke vode, što ga svrstava među nove, nedovoljno regulirane anorganske kontaminante (Adeel i sur. 2023).

8.1. Ponašanje litija u vodenom okolišu i koncentracije u različitim tipovima voda

U vodnom okolišu litij se gotovo isključivo pojavljuje u obliku monovalentnog kationa Li^+, bez značajne sklonosti taloženju ili sorpciji na čestice. Zbog toga pokazuje visoku mobilnost i postojanost u površinskim i podzemnim vodama. Globalni pregledni radovi

ukazuju da se koncentracije litija u prirodnim slatkim vodama tipično kreću ispod 10 µg/L, no u hidrogeološki specifičnim područjima te u regijama s intenzivnim antropogenim utjecajem mogu dosezati znatno više vrijednosti (Adeel i sur. 2023).

Prema podacima Adeel et al. (2023), koncentracije litija u pitkoj vodi globalno se kreću u rasponu od < 60 µg/L do vrijednosti koje premašuju 20 000 µg/L, pri čemu su najviše koncentracije zabilježene u područjima bogatim litijevim mineralima i u zonama intenzivne eksploatacije. Posebno je ilustrativna analiza 132 uzorka komercijalno dostupnih flaširanih voda iz 28 zemalja, u kojoj su izmjerene koncentracije u rasponu od 0,057 do 5460 µg/L. Najviša pojedinačna vrijednost zabilježena je u flaširanoj vodi iz Francuske, dok su u Njemačkoj zabilježene koncentracije između 1300 i 1400 µg/L (Adeel i sur. 2023).

U vodama za ljudsku potrošnju koje nisu izravno povezane s rudarskim aktivnostima također su zabilježene značajne varijacije. U saveznoj državi Texas koncentracije su se kretale od 2,8 do 219 µg/L, dok su na grčkom otoku Samos izmjerene vrijednosti od 0,1 do 121 µg/L. U pojedinim regijama Južne Amerike (Čile, Argentina) te Europe (Austrija) zabilježene su koncentracije veće od 1000 µg/L u javnim vodoopskrbnim sustavima, što jasno prelazi razine koje se u novijim regulatornim okvirima smatraju relevantnima za procjenu rizika (Adeel i sur. 2023).

Ovi podaci dobivaju dodatnu težinu u kontekstu povijesnih podataka o porastu globalne proizvodnje litija za više od 250 % u posljednjim desetljećima, uz očekivani daljnji rast potražnje. na koje ukazuju trenutačne projekcije. Takav trend neminovno povećava pritisak na vodne resurse i vjerojatnost pojave lokalnih žarišta s povišenim koncentracijama litija u vodi.

8.2. Ekotoksikološki učinci litija u slatkovodnim ekosustavima

Iako je litij dugo smatran elementom niskog ekotoksikološkog značaja, sustavne analize toksičnosti na slatkovodnim organizmima pokazuju suprotno. Oliver i Hewett (2024) razvili su jednu od najdetaljnijih baza podataka o ekotoksičnosti litija u slatkovodnim organizmima, obuhvaćajući 194 toksikološka pokazatelja za 28 vrsta iz 10 taksonomskih skupina.

Na temelju tih podataka autori su izveli predložene vrijednosti predviđene koncentracije bez učinka (Predicted No Effect Concentration, PNEC), koje iznose 622 µg/L za kratkotrajnu izloženost (akutna toksičnost) te 15,2 µg/L za dugotrajne, standardne uvjete izloženosti u prirodnim slatkim vodama. Posebno je važno naglasiti da je potonja vrijednost usporediva s koncentracijama koje su već danas zabilježene u pojedinim vodama za ljudsku potrošnju i površinskim vodama, što implicira potencijalni rizik čak i u odsutnosti ekstremnog onečišćenja (Oliver & Hewett 2024).

Autori nadalje ističu da toksičnost litija značajno ovisi o kemijskim karakteristikama vode, uključujući tvrdoću, pH-vrijednost i sadržaj otopljenog organskog ugljika, što upućuje na potrebu za lokalno specifičnim procjenama rizika umjesto univerzalnih graničnih vrijednosti.

8.3. Ekotoksikologija litija u morskom okolišu

Za razliku od slatkovodnih sustava, morski okoliš karakterizira relativno visoka prirodna pozadinska koncentracija litija, koja iznosi približno 180 µg/L. Unatoč tome, eksperimentalni podaci pokazuju da i relativno mala povećanja iznad te razine mogu izazvati mjerljive biološke učinke.

Markich et al. 2025 proveli su opsežnu procjenu kronične toksičnosti litija na 30 morskih vrsta koje obuhvaćaju 22 koljena i pet trofičkih razina. Raspon osjetljivosti među vrstama iznosio je približno 140 puta, bez statistički značajnih razlika između tropskih i umjerenih vrsta. Najosjetljiviji organizam, bodljikaš Macrophiothrix caenosa, pokazao je vrijednosti N(S) EC (engl. No (Significant) Effect Concentration) od 660 µg/L, EC10 od 990 µg/L i EC50 od 3290 µg/L. Ove vrijednosti su tek nekoliko puta više od prirodne pozadinske koncentracije litija u morskoj vodi, što jasno ukazuje na ograničen sigurnosni razmak.

Na temelju distribucije osjetljivosti vrsta (Species Sensitivity Distribution, SSD), autori su izveli smjernicu za kvalitetu morske vode (Water Quality Guideline Value , WQGV) od 1210 µg/L, koja bi trebala osigurati zaštitu 95 % morskih vrsta. Analiza specijacije pokazala je da oko 83 % ukupnog otopljenog litija ostaje u obliku slobodnog Li^+ iona, što podupire pretpostavku da je upravo taj oblik odgovoran za opažene toksične učinke (Markich i sur. 2025).

8.4. Izloženost ljudi putem pitke vode i implikacije za zdravlje

Izloženost ljudi litiju putem pitke vode donedavno nije bila sustavno razmatrana u regulatornim okvirima. Međutim, američka Agencija za zaštitu okoliša (EPA) 2023. godine objavila je tehnički dokument u kojem je predložena privremena oralna referentna doza (Provisional Reference Dose, p-RfD) od 2 µg/kg tjelesne mase dnevno, temeljena na podacima iz kliničke primjene litijevih soli i zabilježenim štetnim učincima pri kroničnoj izloženosti (EPA 2023).

Iz ove referentne doze izvedena je zdravstveno relevantna razina u pitkoj vodi (Health Reference Level, HRL) od 10 µg/L, uz pretpostavku da pitka voda doprinosi s oko 20 % ukupnog dnevnog unosa litija. Ova vrijednost koristi se i kao „orijentacijski" prag u okviru američkog programa UCMR 5 (engl. Fifth Unregulated Contaminant Monitoring Rule), u kojem je minimalna razina izvještavanja za litij postavljena na 9 µg/L (EPA 2023).

Empirijski podaci potvrđuju da se ovaj prag često prekoračuje. Nacionalno istraživanje provedeno u Rumunjskoj pokazalo je da su koncentracije litija u

odobrenim flaširanim vodama varirale od 0,06 do 1557 µg/L, s prosječnom vrijednošću od 164 µg/L. U izvorskim vodama raspon je iznosio 0,09 – 984 µg/L. U čak 41,37 % analiziranih flaširanih voda i 19 % izvorskih voda koncentracije su prelazile vrijednost od 10 µg/L, dok su izračunati ciljni kvocijenti opasnosti (THQ) premašivali vrijednost 1 u 27,58 % uzoraka flaširanih voda (Iordache i sur. 2024).

Ovi rezultati ukazuju da litij, iako često zanemaren, može predstavljati relevantan čimbenik kronične izloženosti ljudi, osobito u populacijama koje dugotrajno konzumiraju vodu s povišenim koncentracijama ili proizvode na bazi takve vode.

8.5. Toksični učinci na pojedine organe i štetni zdravstveni ishodi povezani s izloženošću litiju

Iako se litij tradicionalno smatrao elementom relativno niske okolišne važnosti, sve veći broj dokaza upućuje na to da posjeduje jasno definiran i klinički relevantan profil toksičnosti za ciljne organe, osobito u uvjetima kronične izloženosti. Nedavne okolišne, regulatorne i epidemiološke procjene sve češće prepoznaju litij kao novonastali onečišćujući čimbenik od značaja, s potencijalnim implikacijama za ljudsko zdravlje, posebno u kontekstu izloženosti putem pitke vode (Adeel i sur. 2023; EPA 2023; Oliver & Hewett 2024). Sažeti pregled ključnih ciljnih organa, kritičnih učinaka i referentnih vrijednosti relevantnih za procjenu rizika prikazan je u Tablici 3.

8.5.1. Bubreg kao primarni ciljni organ

Bubreg je najdosljednije i najpouzdanije identificiran kao primarni ciljni organ toksičnosti litija. Nakon oralne izloženosti litij se gotovo u potpunosti slobodno filtrira u glomerulima te se u znatnoj mjeri reapsorbira u proksimalnim i distalnim bubrežnim tubulima putem transportnih sustava koji inače sudjeluju u regulaciji razine natrija i vode. Takva farmakokinetika dovodi do selektivnog nakupljanja litija u bubrežnom parenhimu i poremećaja tubularne funkcije.

Najčešća i najranija klinička manifestacija kronične izloženosti litiju jest nefrogeni dijabetes insipidus, koji se očituje poliurijom, polidipsijom i trajno smanjenom sposobnošću koncentriranja urina. Ovaj poremećaj posljedica je inhibicije signalnih putova ovisnih o vazopresinu i smanjene ekspresije akvaporina u sabirnim kanalićima. Epidemiološke i kliničke studije pokazuju da se takvi učinci mogu razviti i pri relativno niskim, dugotrajnim razinama izloženosti, osobito u osjetljivih skupina (EPA 2023; Adeel i sur. 2023).

Dugotrajna izloženost litiju dodatno se povezuje s razvojem kronične tubulointersticijske nefropatije, koja može postupno progredirati u kroničnu bubrežnu bolest. Regulatorne i toksikološke procjene dosljedno navode bubrežne ishode kao najrelevantniji, najreproducibilniji i klinički najznačajniji pokazatelj toksičnosti litija. Upravo se na temelju bubrežnih učinaka deriviraju smjernične vrijednosti i zdravstveno utemeljeni pragovi litija u pitkoj vodi (EPA 2023; Oliver & Hewett 2024).

8.5.2. Endokrini učinci: poremećaji funkcije štitnjače i paratireoidnih žlijezda

Uz nefrotoksični učinak, litij pokazuje klinički relevantne toksične učinke na endokrini sustav, pri čemu je štitnjača najosjetljiviji ciljni organ. Brojni pregledni radovi upućuju na povezanost izloženosti litiju s pojavom hipotireoze i gušavosti, što odražava njegovu sposobnost da ometa sintezu, pohranu i izlučivanje hormona štitnjače, kao i regulaciju osi hipotalamus–hipofiza–štitnjača (EPA 2023; Adeel i sur. 2023).

Mehanizam djelovanja se temelji na litijem uzrokovanoj inhibiciji otpuštanja tiroksina (T_4) i trijodtironina (T_3) iz folikularnih stanica štitnjače te može smanjiti perifernu konverziju T_4 u biološki aktivni T_3. Iako su ti učinci najdetaljnije opisani u terapijskim dozama, sve je više dokaza da dugotrajna izloženost litiju iz okoliša, osobito putem pitke vode, može pridonijeti subkliničkim i klinički relevantnim poremećajima funkcije štitnjače u osjetljivoj populaciji.

Osim štitnjače, litij utječe i na regulaciju paratireoidnog hormona (PTH). Kronična izloženost povezuje se s razvojem hiperparatireoidizma i posljedične hiperkalcemije, što upućuje na poremećaj osjetljivosti paratireoidnih žlijezda na razine kalcija u serumu. Iako su ti učinci rjeđe obuhvaćeni okolišnim epidemiološkim studijama, regulatorne procjene ih prepoznaju kao biološki utemeljene i klinički značajne, te relevantne za sveobuhvatnu procjenu zdravstvenog rizika povezanog s izloženošću litiju (EPA 2023).

8.5.3. Neurotoksični učinci i akutna izloženost litiju

Središnji živčani sustav (SŽS) predstavlja primarni cilj toksičnosti u uvjetima akutne ili povišene izloženosti litiju. Neurološki simptomi, uključujući tremor, ataksiju, poremećaje koordinacije, konfuziju i smetnje svijesti, dosljedno se navode kao najraniji i najpouzdaniji klinički pokazatelji intoksikacije litijem. U težim slučajevima mogu se razviti epileptički napadaji, encefalopatija i koma, što potvrđuje izražen neurotoksični potencijal ovog elementa (EPA 2023).

Litij utječe na neuronsku podražljivost, sinaptički prijenos i signalne putove povezane s regulacijom neurotransmitera, uključujući glutamat i GABA. Posebno je važno naglasiti da je terapijski raspon litija uzak, a razlika između terapijskih, subtoksičnih i toksičnih koncentracija mala, što povećava rizik od neuroloških nuspojava pri relativno malim promjenama unosa ili eliminacije.

Iako se akutni neurotoksični učinci najčešće opisuju u kontekstu terapijske primjene ili nenamjernih visokih doza, regulatorne procjene ističu njihovu važnost za opisivanje opasnosti litija jer jasno demonstriraju njegovu biološku aktivnost i potencijal za ozbiljne štetne ishode. Ti podaci imaju posebnu težinu u procjeni rizika, jer potvrđuju da litij nije inertan element te da povećana

Tablica 2: Sinteza ključnih spoznaja i preporuke za održivo upravljanje vodnim resursima u lancu vrijednosti litija

Ključna spoznaja	Značenje za sektor voda
Proizvodnja litija uzrokuje različite oblike opterećenja vode tijekom cijelog životnog ciklusa.	Procjene utjecaja moraju obuhvatiti rudarenje, preradu, proizvodnju baterija i recikliranje.
Vodni rizici ovise o tehnologiji proizvodnje.	Ekstrakcija iz rasola dominantno uzrokuje vodni stres, dok prerada i recikliranje prvenstveno utječu na kakvoću vode.
Standardne LCA metode nisu dovoljne za procjenu lokalnih vodnih utjecaja.	Potrebne su lokalne vodne bilance, hidrogeološki modeli i dugoročni monitoring.
Litij više nije moguće promatrati kao okolišno bezopasan element.	Sustavno praćenje litija u površinskim i podzemnim te vodama za ljudsku potrošnju, postaje sve važnije.
Razvoj novih tehnologija (DLE i recikliranje) može smanjiti pojedine okolišne pritiske, ali uvodi nove kemijske i hidrogeokemijske izazove.	Regulatorni okvir mora pratiti tehnološki razvoj i uključivati prilagodljive zahtjeve za upravljanje vodama.
Održivost zelene tranzicije ovisi o zaštiti vodnih resursa.	Upravljanje vodama mora biti sastavni dio planiranja cijelog industrijskog lanca litija.

izloženost – uključujući onu povezanu s pitkom vodom – može imati izravne neurološke posljedice u osjetljivim skupinama stanovništva (EPA 2023).

8.5.4. Sažetak toksikoloških učinaka i posljedice za procjenu rizika

Najnovija istraživanja upućuju na globalni porast koncentracije litija u površinskim i podzemnim vodama te sustavima opskrbe pitkom vodom, što se dovodi u izravnu vezu s intenziviranjem rudarske proizvodnje, širenjem industrijske primjene te ubrzanim razvojem sektora litij-ionskih baterija (Adeel i sur. 2023; Oliver & Hewett 2024). Nacionalne i regionalne analize kakvoće pitke vode potvrđuju da je izloženost litiju putem vode široko rasprostranjena, često na razinama koje do sada nisu sustavno razmatrane u kontekstu zdravstvenog rizika.

Dodatni izazov u procjeni rizika predstavlja činjenica da se litij u vodenim sustavima pojavljuje u interakciji s dominantnim anorganskim ionima, osobito natrijem, kalcijem i magnezijem, što može utjecati na njegovu bioraspoloživost, distribuciju u organizmu i toksični potencijal. Takve interakcije dodatno kompliciraju ekstrapolaciju podataka iz eksperimentalnih i kliničkih studija na stvarne okolišne scenarije izloženosti (Iordache i sur. 2024).

Sinteza dostupnih toksikoloških i epidemioloških podataka jasno pokazuje da litij ima konzistentan i biološki vjerodostojan obrazac toksičnosti za ciljne organe, pri čemu je bubreg identificiran kao primarni organ rizika, zatim slijede štitnjača i paratireoidne žlijezde, dok neurološki učinci dominiraju u uvjetima akutne ili povišene izloženosti. Takav profil toksičnosti usporediv je s drugim poznatim okolišnim onečišćujućim tvarima koje pokazuju izraženu specifičnost djelovanja na ciljne organe.

U tom kontekstu, sve je jasnije da se litij ne može više promatrati kao kemijski benigni element, već kao okolišno relevantna tvar s potencijalno značajnim javnozdravstvenim implikacijama. Navedeni rezultati snažno podupiru potrebu za sustavnim uključivanjem litija u programe praćenja kakvoće voda, za razvoj zdravstveno utemeljenih graničnih vrijednosti u vodi za ljudsku potrošnju te za njegovu integraciju u standardne okvire procjene okolišnog i javnozdravstvenog rizika.

9. SINTEZA KLJUČNIH SPOZNAJA I IMPLIKACIJE ZA UPRAVLJANJE VODNIM RESURSIMA

Pregled dostupne znanstvene literature pokazuje da se okolišni utjecaji proizvodnje litija ne mogu promatrati kroz pojedinačne faze proizvodnog lanca, već isključivo kao međusobno povezan sustav u kojem se dominantni okolišni pritisci premještaju između eksploatacije, prerade, proizvodnje baterija i recikliranja. Analizirana istraživanja pritom dosljedno potvrđuju da se različite tehnologije proizvodnje litija razlikuju ponajprije prema tipu vodnog rizika, a ne samo prema količini zahvaćene vode ili ukupnom vodnom otisku. Takva spoznaja upućuje na potrebu napuštanja pojednostavljenih procjena održivosti u korist integriranih pristupa koji istodobno obuhvaćaju hidrogeološke, kemijske, ekotoksikološke i javnozdravstvene aspekte upravljanja vodnim resursima.

Podaci prikazani u tablici 2 jasno pokazuju da održivost proizvodnje litija ne ovisi o izboru jedne "najbolje" tehnologije, već o sposobnosti upravljanja vodnim resursima tijekom cijelog životnog ciklusa proizvoda. Zbog toga procjena održivosti mora nadilaziti standardne pokazatelje procjene životnog ciklusa i uključiti lokalne hidrogeološke uvjete, kakvoću

voda, toksikološke pokazatelje i dugoročne učinke na ekosustave i javno zdravlje.

10. ZAKLJUČAK

Ovaj pregledni rad pokazuje da se održivost litij-ionskih tehnologija ne može procjenjivati isključivo kroz njihov doprinos smanjenju emisija stakleničkih plinova ili energetskoj učinkovitosti. Dostupni znanstveni dokazi jasno potvrđuju da se okolišni teret tijekom životnog ciklusa litija sustavno premješta iz faze uporabe prema fazama eksploatacije, kemijske prerade, proizvodnje baterija i recikliranja, pri čemu vodni resursi predstavljaju jednu od najosjetljivijih sastavnica okoliša.

Analiza dostupne literature pokazuje da različite tehnologije proizvodnje litija ne stvaraju iste obrasce okolišnog opterećenja. Dok proizvodnja iz podzemnih slanih voda dominantno povećava vodni stres i mijenja hidrogeološku ravnotežu, eksploatacija čvrste rude, kemijska prerada i recikliranje prvenstveno opterećuju kakvoću površinskih i podzemnih voda. Tehnologije izravne ekstrakcije litija (DLE) mogu smanjiti pojedine pritiske, ali ne uklanjaju temeljne vodne i okolišne izazove, već ih preoblikuju u nove hidrogeokemijske, kemijske i regulatorne zahtjeve.

Posebno važan doprinos ovog rada predstavlja integracija spoznaja iz područja upravljanja vodama, hidrogeologije, procjene životnog ciklusa i toksikologije. Takav pristup pokazuje da standardne metode analize životnog ciklusa nisu dovoljne za procjenu stvarnih lokalnih učinaka proizvodnje litija na vodne resurse te da ih je potrebno nadopuniti lokalnim hidrogeološkim analizama, vodnim bilancama, kontinuiranim praćenjem te procjenom zdravstvenih rizika.

Sve veći broj podataka o prisutnosti litija u površinskim, podzemnim i vodama za ljudsku potrošnju, zajedno s jasno definiranim toksikološkim profilom litija, dodatno potvrđuje da se ovaj element više ne može promatrati kao okolišno benigna tvar. Sustavno praćenje litija u vodama i razvoj zdravstveno utemeljenih kriterija procjene rizika predstavljaju važan preduvjet budućeg održivog upravljanja vodnim resursima.

U konačnici, dugoročna održivost zelene tranzicije neće ovisiti samo o razvoju učinkovitijih baterijskih tehnologija, nego i o sposobnosti da se cijeli industrijski lanac litija uskladi s načelima održivog upravljanja vodnim resursima. Bez lokalno utemeljenih procjena, transparentnog monitoringa i regulatornih okvira koji jednako vrednuju dostupnost i kakvoću voda kao i klimatske koristi, postoji opasnost da se dio okolišnog i javnozdravstvenog tereta energetske tranzicije premjesti upravo na vodne resurse koje nastojimo zaštititi.

Zelena tranzicija može se smatrati doista održivom tek kada klimatske koristi budu ostvarene bez narušavanja izvora vode i bez stvaranja novih okolišnih i javnozdravstvenih rizika duž cijelog životnog ciklusa litija. U protivnom, umjesto smanjenja ukupnog okolišnog opterećenja dolazi do premještanja tereta iz atmosfere u vodne resurse, rudarske regije i na buduće generacije.■

LITERATURA

Adeel, M.; Zain, M.; Shakoor, N.; Ahmad, M.A.; Azeem, I.; Aziz, M.A.; Tulcan, R.X.S.; Rathore, A.; Tahir, M.; Horton, R.; Xu, M.; Yang, Y. (2023). Global navigation of lithium in water bodies and emerging human health crisis. npj Clean Water, 6, 33.

Blair, J.J.A.; Vineyard, N.; Mulvaney, D.; Cantor, A.; Sharbat, A.; Berry, K.; Bartholomew, E.; Ornelas, A.F. (2024). Lithium and water: Hydrosocial impacts across the life cycle of energy storage. WIREs Water, 11(6), e1748.

Halkes, R.T.; Hughes, A.; Wall, F.; Petavratzi, E.; Pell, R.; Lindsay, J.J. (2024). Life cycle assessment and water use impacts of lithium production from salar deposits: Challenges and opportunities. Resources, Conservation and Recycling, 207, 107554.

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.; Anderson, P. (2019). Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. Nature, 575, 75–86.

International Energy Agency. (2021). The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. Paris: International Energy Agency.

Iordache, A.M.; Voica, C.; Roba, C.; Nechita, C. (2024). Evaluation of potential human health risks associated with Li and their relationship with Na, K, Mg, and Ca in Romania's nationwide drinking water. Frontiers in Public Health, 12, 1456640.

Kszos, L.A.; Beauchamp, J.J.; Stewart, A.J. (2003). Toxicity of lithium to three freshwater organisms and the antagonistic effect of sodium. Ecotoxicology, 12(5), 427–437.

Kszos, L.A.; Stewart, A.J. (2003). Review of lithium in the aquatic environment: Distribution in the United States, toxicity and case example of groundwater contamination. Ecotoxicology, 12(5), 439–447.

Marinova, S.; Roche, L.; Link, A.; Finkbeiner, M. (2025). Water footprint of battery-grade lithium production in the Salar de Atacama, Chile. Journal of Cleaner Production, 487, 144635.

Markich, S.J.; Hall, J.P.; Dorsman, J.M.; Brown, P.L. (2025). Lithium toxicity to marine organisms: Establishing water quality guideline values to protect temperate and tropical marine life. Chemosphere, 383, 144487.

Oliver, I.W.; Hewett, E.F. (2024). Towards an environmental quality standard (EQS) for lithium in fresh water. Environmental Research, 263, 120103.

European Parliament and Council of the European Union. (2023). Regulation (EU) 2023/1542 of the European Parliament and of the Council of 12 July 2023 concerning batteries and waste batteries, amending Directive 2008/98/EC and Regulation (EU) 2019/1020 and repealing Directive 2006/66/EC. Official Journal of the European Union, L 191, 1–117.

Reuters. (2024). Lithium mining is slowly sinking Chile's Atacama salt flat, study shows. Reuters, 22 August 2024.
U.S. Environmental Protection Agency. (2023). Technical Fact Sheet: Lithium in Drinking Water. EPA 815-F-23-007. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency.
Vera, M.L.; Torres, W.R.; Galli, C.I.; Chagnes, A.; Flexer, V. (2023). Environmental impact of direct lithium extraction from brines. Nature Reviews Earth & Environment, 4, 149–165.

LITHIUM IN THE GLOBAL BATTERY SUPPLY CHAIN: WATER STRESS, WATER POLLUTION AND TOXICOLOGICAL RISKS OF THE GREEN TRANSITION

Abstract. Accelerated electrification of transport and power systems significantly increases lithium demand, while simultaneously shifting a part of environmental and health risks into the phases of its extraction, chemical processing and battery production and recycling. This paper provides an overview of modern scientific insights in lithium impacts on water resources and human health during its entire life cycle, with a special emphasis on water stress, water pollution, limitations of standard life cycle assessment (LCA), as well as toxicological impacts of chronic exposure to lithium through water intended for human consumption. The analysis reveals that lithium has a clearly defined toxicological profile, whereby chronic exposure primarily targets kidneys and additionally impacts the endocrine and nervous systems. In conclusion, the sustainability of lithium-ion technologies cannot be assessed exclusively according to their climate benefits, but must also include the protection of environmental resources and human health during its entire life cycle.

Key words: lithium; lithium-ion batteries; water stress; water pollution; toxic potential; direct lithium extraction; life cycle assessment; battery recycling.

LITHIUM IN DER GLOBALEN BATTERIEKETTE: WASSERKNAPPHEIT, WASSERVERSCHMUTZUNG, TOXIKOLOGISCHE RISIKEN DER GRÜNEN TRANSFORMATION

Zusammenfassung. Die beschleunigte Elektrifizierung des Transport- und Energiesektors führt zu einer deutlichen Steigerung der Nachfrage nach Lithium; gleichzeitig verlagert sie jedoch einige der Umwelt- und Gesundheitsrisiken in die Phasen der Gewinnung und der chemischen Verarbeitung von Lithium sowie der Batterieproduktion und des Recyclings. Dieser Übersichtsartikel fasst den aktuellen wissenschaftlichen Kenntnisstand über die Auswirkungen von Lithium auf die Wasserressourcen und die menschliche Gesundheit während des gesamten Lebenszyklus zusammen. Besonderes Augenmerk wird auf Wasserknappheit, Wasserverschmutzung, die Grenzen der standardmäßigen Lebenszyklusanalyse (LCA) und die toxikologischen Auswirkungen einer chronischen Lithiumexposition über Trinkwasser gelegt. Die Analyse zeigt, dass Lithium ein klar definiertes toxikologisches Profil aufweist, wobei die Niere das primäre Zielorgan bei chronischer Exposition ist, mit zusätzlichen Auswirkungen auf das endokrine System und das Nervensystem. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Nachhaltigkeit von Lithium-Ionen-Technologien nicht allein anhand ihrer Klimavorteile bewertet werden kann, sondern den Schutz der Wasserressourcen und der menschlichen Gesundheit während des gesamten Lebenszyklus miteinbeziehen muss.

Schlüsselwörter: Lithium; Lithium-Ionen-Batterien; Wasserknappheit; Wasserverschmutzung; toxisches Potenzial; direkte Lithiumgewinnung; Lebenszyklusanalyse; Batterierecycling