

**ISTRAŽIVANJE IZ PODRUČJA ODGOJA I OBRAZOVANJA NA ŽUPANIJSKOJ
RAZINI**

OBRAZOVANJE ZA ODRŽIVI RAZVOJ:

**ISTRAŽIVANJE ZNANJA, STAVOVA I NAVIKA UČENIKA O ELEKTRONIČKOM
I BATERIJSKOM OTPADU U SPLITSKO-DALMATINSKOJ ŽUPANIJI**

III. gimnazija, Split

Učenice: Hana Perić, Rita Matulić

Mentorica: Dragana Mamić, prof.

Gimnazija dr. Mate Ujevića, Imotski

Učenice: Mariana Miškulin, Ljubica Vlašić

Mentorica: Marijana Vuković, prof.

travanj, 2026.

SAŽETAK

Predmetno obrazovno istraživanje, provedeno u razdoblju od listopada 2025. do travnja 2026. godine, imalo je za cilj ispitati razinu ekološke osviještenosti srednjoškolske populacije o pravilnom zbrinjavanju električnoga i elektroničkoga te baterijskoga otpada. Komparativna analiza obuhvaća empirijske podatke prikupljene među učenicima Gimnazije dr. Mate Ujevića u Imotskom, građanima grada Imotskoga te učenicima III. gimnazije u Splitu. U metodološkom pristupu primijenjene su kvantitativne i kvalitativne metode: anketiranje ispitanika, analiza relevantne stručne literature te intervjui s djelatnicima nadležnih službi za gospodarenje otpadom.

Rezultati istraživanja ukazuju na to da učenici svakodnevno koriste velik broj elektroničkih uređaja, ali istodobno pokazuju deficit znanja o zakonski i ekološki prihvatljivom odlaganju popratnog otpada. Evidentirano je da dio učenika i dalje odlaže otpad na neodgovarajući način ili ne posjeduje informacije o lokacijama namjenskih reciklažnih dvorišta. Unatoč tome što većina ispitanika prepoznaje inherentne ekološke rizike nepravilnog zbrinjavanja, uočena je izražena potreba za implementacijom dodatnih obrazovnih sadržaja i aktivnijim uključivanjem mladih u programe održivog razvoja.

Dobiveni rezultati jednoznačno upućuju na ključnu ulogu odgojno-obrazovnih ustanova u razvoju ekološke pismenosti, odgovornog ponašanja i građanske svijesti učenika. Rad u konačnici potvrđuje da škole, kroz sustavnu i kurikularno utemeljenu edukaciju o gospodarenju otpadom, predstavljaju primarni čimbenik u ostvarivanju ciljeva održivog razvoja.

Ključne riječi: održivi razvoj, ekološka osviještenost, elektronički otpad, baterijski otpad, srednjoškolci, odgoj i obrazovanje.

SADRŽAJ

1. Uvod i društveno-ekološki kontekst istraživanja
2. Metodologija i rezultati obrazovnog istraživanja
 - 2.1. Cilj istraživanja
 - 2.2. Istraživačka pitanja i hipoteze
 - 2.3. Uzorak ispitanika i postupak istraživanja
 - 2.4. Rezultati istraživanja učenika III. gimnazije Split
 - 2.5. Rezultati istraživanja učenika Gimnazije dr. Mate Ujevića Imotski
 - 2.6. Usporedba rezultata i rasprava
3. Kemijski sastav i elektrokemijska reaktivnost baterijskih sustava
4. Dinamika degradacije kućišta i mehanizmi ispiranja na odlagalištima
5. Geokemijski utjecaj baterijskog i elektroničkog otpada na pedosferu i destrukciju tla
 - 5.1. Adsorpcija, mobilnost i indeks geoakumulacije teških metala
 - 5.2. Ionska izmjena i razaranje mikrostrukture minerala gline
 - 5.3. Degradacija organske tvari (humusa) i inhibicija edafona
 - 5.4. Kontaminacija fitocenoza i ulazak u trofičke lance
6. Zakonodavni okvir i kružno gospodarstvo kao rješenje
7. Pedagoške implikacije i preporuke za odgojno-obrazovnu praksu
8. Zaključak
9. Literatura

1. UVOD I DRUŠTVENO-EKOLOŠKI KONTEKST ISTRAŽIVANJA

Suvremena energetska tranzicija, četvrta industrijska revolucija i opća digitalizacija društva u potpunosti ovise o razvoju i stabilnosti prijenosnih izvora energije. Baterije, od malih primarnih alkalnih članaka do kompleksnih sekundarnih litij-ionskih sustava, postale su nezamjenjiv elektroenergetski pogon modernog života. One napajaju svakodnevicu milijuna ljudi kroz korištenje pametnih telefona, prijenosnih računala, medicinske opreme, električnih romobila i vozila, ali i brojnih drugih uređaja bez kojih je suvremeni život gotovo nezamisliv. Istodobno, ubrzani tehnološki razvoj i sve kraći životni vijek elektroničkih uređaja rezultiraju kontinuiranim rastom količine elektroničkog i baterijskog otpada, koji predstavlja jedan od najvećih ekoloških izazova današnjice.

Povodom obilježavanja Dana planeta Zemlje potrebno je usmjeriti pozornost ne samo na prednosti suvremenih tehnologija i obnovljivih izvora energije, već i na njihove dugoročne posljedice za okoliš. Javnost je često usmjerena na pozitivne aspekte digitalizacije i zelene tranzicije, dok se problem zbrinjavanja elektroničkog i baterijskog otpada nedovoljno ističe. Kada baterije i elektronički uređaji dospiju izvan sustava organiziranog prikupljanja i recikliranja te završe na odlagalištima otpada ili u prirodi, postaju potencijalni izvor onečišćenja tla, vode i zraka. Njihov kemijski sastav uključuje niz metala i spojeva koji mogu izazvati dugoročne negativne posljedice za ekosustave i ljudsko zdravlje.

Posebna pozornost u ovom radu usmjerena je na mlade kao buduće nositelje održivog razvoja. Škola ima važnu ulogu u oblikovanju ekoloških stavova, vrijednosti i obrazaca ponašanja učenika te predstavlja jedno od ključnih mjesta za razvoj ekološke pismenosti. Razvijanje odgovornog odnosa prema okolišu, pravilnom gospodarenju otpadom i održivom načinu života sastavni je dio suvremenog odgojno-obrazovnog procesa.

Kako bi se utvrdila razina informiranosti, ekološke osviještenosti i navika učenika vezanih uz zbrinjavanje elektroničkog i baterijskog otpada, provedeno je istraživanje među učenicima III. gimnazije Split i Gimnazije dr. Mate Ujevića Imotski. U istraživanju je sudjelovalo ukupno 200 ispitanika (učenika i građana), a cilj je bio ispitati njihovo znanje o vrstama otpada koje svakodnevno koriste, načinima njegova odlaganja te mogućim posljedicama nepravilnog zbrinjavanja. Usporedbom rezultata dviju škola nastojalo se dobiti cjelovitiji uvid u ekološku osviještenost srednjoškolaca i građana na području Splitsko-dalmatinske županije.

Cilj ovog rada je dvojak. S jedne strane, nastoji se ispitati razina ekološke osviještenosti, znanja i ponašanja učenika i građana vezanih uz pravilno zbrinjavanje elektroničkog i baterijskog otpada. S druge strane, rad istražuje kemijski sastav baterija te na molekularnoj i geokemijskoj razini analizira fizikalno-kemijske procese koji nastaju njihovim nepropisnim odlaganjem. Razumijevanje ovih procesa ključno je za prepoznavanje opasnosti koje elektronički i baterijski otpad predstavljaju za pedosferu, biosferu, vodne resurse i ljudsko zdravlje. Dobiveni rezultati mogu pridonijeti razvoju učinkovitijih odgojno-obrazovnih aktivnosti usmjerenih na jačanje ekološke pismenosti i odgovornog ponašanja mladih prema okolišu.

2. METODOLOGIJA I REZULTATI ANKETNOG ISTRAŽIVANJA MEĐU UČENICIMA SREDNJIH ŠKOLA

Kako bi se utvrdila razina znanja, stavova i navika učenika vezanih uz pravilno zbrinjavanje elektroničkog i baterijskog otpada, u sklopu ovog rada provedeno je kvantitativno anketno istraživanje među učenicima III. gimnazije Split i Gimnazije dr. Mate Ujevića Imotski. Istraživanje je obuhvatilo ukupno 160 učenika srednjoškolskog uzrasta, od čega 60 učenika trećih razreda III. gimnazije Split te 100 učenika Gimnazije dr. Mate Ujevića Imotski i 40 građanina grada Imotskoga .

Anketiranje je provedeno anonimno tijekom školske godine 2025./2026. (u listopadu 2025. - ožujak 2026.), a pitanja su bila usmjerena na svakodnevno korištenje elektroničkih uređaja, poznavanje sastava baterija, načine odlaganja elektroničkog i baterijskog otpada te svijest o mogućim ekološkim posljedicama njegova nepravilnog zbrinjavanja.

2.1. Rezultati istraživanja učenika III. gimnazije Split

Pitanje 1: Koliko prijenosnih uređaja koji koriste neki oblik baterije (mobitel, sat, bežične slušalice, vape uređaji, trimeri) koristite u svakodnevnom životu?

Rezultati pokazuju da 85 % učenika svakodnevno koristi više od četiri uređaja na baterijski pogon, 12 % koristi dva do tri uređaja, dok samo 3 % koristi jedan ili nijedan uređaj. Dobiveni podaci potvrđuju izrazitu ovisnost suvremene generacije o prijenosnim izvorima energije te ukazuju na značajan potencijal stvaranja baterijskog otpada među mladima.

Pitanje 2: Jeste li upoznati s kemijskim sastavom baterija koje koristite?

Samo 18 % učenika odgovorilo je potvrdno, najčešće navodeći litij kao sastavni element baterija. Čak 62 % učenika izjavilo je da je upoznato s pojmom litij-ionskih baterija, ali ne poznaje ostale sastojke poput kobalta ili nikla, dok 20 % ispitanika nikada nije razmišljalo o kemijskom sastavu uređaja koje svakodnevno koriste. Rezultati upućuju na nedostatak dubljeg kemijskog i ekološkog razumijevanja ove problematike.

Pitanje 3: Gdje odlažete istrošene baterije iz kućanstva ili stare elektroničke uređaje?

Zabrinjavajući podatak jest da 42 % učenika istrošene baterije povremeno ili redovito odlaže u miješani komunalni otpad. Dodatnih 35 % ispitanika čuva ih u kućanstvu jer nisu sigurni gdje ih odložiti, dok svega 23 % učenika koristi namjenske spremnike ili reciklažna dvorišta.

Pitanje 4: Jeste li svjesni što se događa s baterijom nakon odlaganja na odlagalište otpada?

Čak 70 % učenika svjesno je da baterije mogu biti štetne za okoliš, ali ne poznaje konkretne procese onečišćenja. Njih 25 % smatra da baterije ne mogu značajnije ugroziti okoliš nakon odlaganja, dok je samo 5 % ispitanika pokazalo napredno razumijevanje procesa curenja teških metala i kontaminacije tla i podzemnih voda.

2.2. Rezultati istraživanja učenika Gimnazije dr. Mate Ujevića Imotski

Rezultati istraživanja provedenog među 140 učenika Gimnazije dr. Mate Ujevića Imotski pokazali su da su najčešće vrste elektroničkog otpada koje učenici posjeduju ili odbacuju mobilni telefoni, punjači, baterije i dijelovi računalne opreme.

Istraživanje je pokazalo da velik broj učenika elektronički otpad zadržava u vlastitom kućanstvu, pri čemu 70 učenika navodi da stare uređaje i baterije čuva kod kuće. Nadalje, 27 učenika izjavilo je da ne zna kako pravilno zbrinuti elektronički otpad, dok samo 22 učenika redovito koristi reciklažno dvorište. Posebno zabrinjava podatak da 99 učenika nije upoznato s lokacijama na kojima mogu odložiti elektronički otpad.

S druge strane, 84 učenika pokazala su svijest o mogućim ekološkim posljedicama nepravilnog odlaganja elektroničkog otpada, a 103 učenika navela su da su tijekom školovanja sudjelovala u ekološkim akcijama ili aktivnostima vezanim uz zaštitu okoliša.

2.3. Usporedba rezultata i rasprava

Rezultati istraživanja provedenih u obje škole pokazuju da učenici svakodnevno koriste velik broj elektroničkih uređaja te prepoznaju važnost zaštite okoliša. Međutim, uočeni su značajni nedostaci u znanju o pravilnom zbrinjavanju elektroničkog i baterijskog otpada.

Učenici III. gimnazije Split pokazuju nedovoljno poznavanje kemijskog sastava baterija i posljedica njihova nepravilnog odlaganja, dok učenici Gimnazije dr. Mate Ujevića Imotski u velikoj mjeri ne poznaju dostupne mogućnosti zbrinjavanja elektroničkog otpada. U obje škole prisutna je pojava zadržavanja otpada u kućanstvu ili njegova neodgovarajućeg odlaganja.

Analiza rezultata ukazuje na potrebu sustavnijeg uključivanja sadržaja o održivom gospodarenju otpadom u odgojno-obrazovni proces. Dobiveni podaci potvrđuju važnost škole kao ključnog čimbenika u razvoju ekološke pismenosti, odgovornog ponašanja i održivih životnih navika učenika.

3. KEMIJSKI SASTAV I ELEKTROKEMIJSKA REAKTIVNOST BATERIJSKIH SUSTAVA

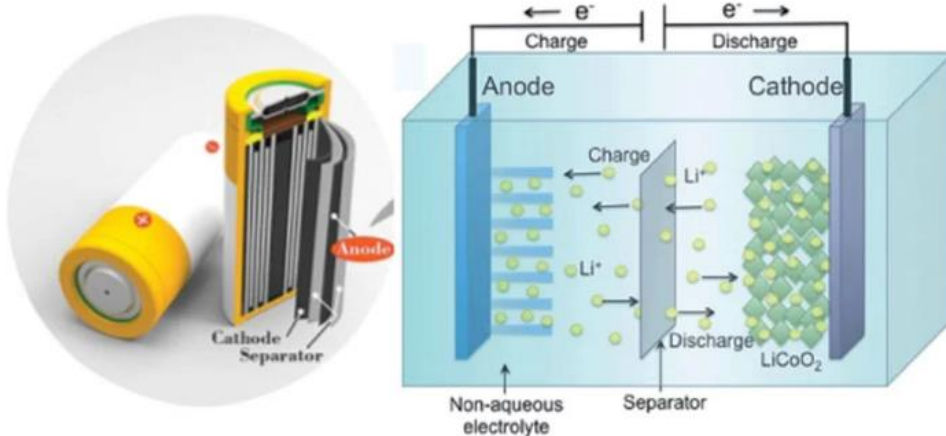
Da bi se razumio destruktivni potencijal baterijskog otpada u tlu, potrebno je detaljno analizirati unutrašnju kemijsku arhitekturu ovih sustava. Baterija je u svojoj biti galvanski članak u kojem se pohranjena kemijska energija pretvara u električnu putem spontanih i kontroliranih redoks reakcija. Svaki se elektrokemijski sustav sastoji od tri temeljne, visokoreaktivne komponente: anode (negativna elektroda na kojoj se odvija oksidacija), katode (pozitivna elektroda na kojoj se odvija redukcija) i elektrolita (medija koji služi kao ionski vodič i zatvara unutrašnji strujni krug).

U širokoj komercijalnoj uporabi dominiraju tri tehnološke skupine, od kojih svaka nosi specifične ekološke rizike:

1. **Alkalne baterije (primarni, nepunjivi sustavi):** To su standardne baterije koje učenici najčešće koriste u daljinskim upravljačima, satovima i starijim igračkama. Kao anoda koristi se cink (Zn) u prahu, koji pruža maksimalnu površinu za odvijanje reakcije oksidacije. Katoda je izrađena od manganovog dioksida (MnO_2) pomiješanog s grafitom radi povećanja električne vodljivosti. Elektrolit je visoko koncentrirana

otopina kalijeveg hidroksida (KOH) – to je kemijski izrazito jaka, kaustična i korozivna baza koja u dodiru s tkivom ili vlagom izaziva kemijske opekline i drastične promjene pH vrijednosti.

- Litij-ionske baterije (sekundarni, punjivi sustavi):** Ove baterije predstavljaju temelj moderne prenosive tehnologije (mobiteli, laptopi, električni romobili). Karakterizira ih iznimno visoka gustoća energije. Anoda se sastoji od porozne grafitne matrice u koju su interkalirani (ugrađeni) atomi metalnog litija (LiC_6). Katoda je elektrokemijski najopasniji dio jer se sastoji od miješanih oksida prijelaznih teških metala, najčešće litij-kobaltovog oksida (LiCoO_2) ili nikal-mangan-kobaltovog oksida (NMC). Kobalt (Co) i nikal (Ni) su klasificirani kao teški metali s visokim stupnjem toksičnosti i kancerogenosti. Elektrolit čine komplicirane litijeve soli, primarno litijev heksafluorofosfat (LiPF_6), otopljen u hlapivim i zapaljivim organskim karbonatima (poput dimetil-karbonata).
- Olovni akumulatori i Nikal-Kadmij (Ni-Cd) sustavi:** Iako se radi o starijim tehnologijama, one su i dalje masovno prisutne. Olovni sustavi (automobilske baterije) sastoje se od anode od čistog spužvastog olova (Pb), katode od olovnog dioksida (PbO_2) i elektrolita od jake sumporne kiseline (H_2SO_4). Kod Ni-Cd sustava, anoda je izrađena od metalnog kadmija (Cd), koji je jedan od najopasnijih i najtrajnijih ekoloških ksenobiotika, dok je katoda nikal-oksid-hidroksid (NiOOH).



Slika 1 Shematski dijagram litij-ionske baterije. Reproducirano uz dopuštenje iz Ref. 5. Autorsko pravo 2017., Kraljevsko kemijsko društvo.

Izvor: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-Li-ion-battery-Reproduced-with-permission-from-Ref-5-Copyright_fig1_356158389

4. DINAMIKA DEGRADACIJE KUĆIŠTA I MEHANIZMI ISPIRANJA NA ODLAGALIŠTIMA

Jednom kada baterija, zbog nemara utvrđenog u našem anketnom istraživanju, dospije na miješano komunalno odlagalište otpada, njezino hermetički zatvoreno zaštitno kućište biva izloženo ekstremno agresivnim fizikalno-kemijskim čimbenicima okoliša. Tijelo odlagališta otpada funkcionira kao divovski, nekontrolirani kemijski reaktor. Uslijed intenzivne anaerobne razgradnje organske tvari (ostataka hrane, papira, biomase), mikroorganizmi produciraju velike količine hlapivih masnih kiselina. Te kiseline, u kombinaciji s atmosferskim oborinama, spuštaju pH vrijednost unutar odlagališta na razine ispod 5,5, stvarajući izrazito korozivan medij.

Kombinacija kiselog medija, stalne vlage i golemog mehaničkog pritiska gornjih naslaga smeća uzrokuje ubranu galvansku i jamičastu koroziju čeličnog ili plastičnog zaštitnog plašta baterije. Čelik podliježe oksidaciji, gubi strukturni integritet te na kućištu nastaju mikroskopske i makroskopske perforacije (rupe).

U tom trenutku unutrašnji, visokoreaktivni sadržaj baterije dolazi u izravan dodir s vanjskim okolišem. Kod litij-ionskih baterija, kemijska reaktivnost se dramatično i opasno pojačava. Unutrašnja sol elektrolita, litijev heksafluorofosfat (LiPF_6), u dodiru s atmosferskom vlagom i infiltriranom kišnicom podliježe trenutnoj i nasilnoj hidrolizi. Ovaj proces generira plinoviti fosforni oksifluorid i iznimno agresivnu, toksičnu **fluorovodičnu kiselinu (HF)**:



Nastala fluorovodična kiselina djeluje kao ekstremni otapajući agens. Ona trenutno otapa preostale metalne komponente unutar same baterije (katodne okside kobalta i nikla), prevodeći ih iz krutih, stabilnih spojeva u visoko topljive i mobilne jonske oblike. Kada oborinske vode nastave prodirati kroz tako destruiranu unutrašnjost ćelije, one ispiru te slobodne teške metale (Pb^{2+} , Cd^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , Li^+) izvan granica baterije. Ova visokotoksična mješavina postaje sastavni dio procjednih voda odlagališta (*leachate*). Ako odlagalište nema adekvatno izveden sustav sintetičkih nepropusnih membrana i drenažnih slojeva, ova se crna tekućina pod utjecajem gravitacije kreće prema dolje, infiltrirajući se izravno u tlo.

5. GEOKEMIJSKI UTJECAJ BATERIJSKOG I ELEKTRONIČKOG OTPADA NA PEDOSFERU I DESTRUKCIJU TLA

Kada procjedne vode zasićene elementima iz baterija natope zemlju, započinje kompleksna, dubinska i trajna fizikalno-kemijska degradacija pedosfere. Za razliku od organskih zagađivača koje bakterije u tlu s vremenom mogu razgraditi, teški metali iz baterija su neuništivi; oni se trajno akumuliraju u tlu i dramatično mijenjaju njegove geokemijske, biološke i mehaničke parametre.

5.1. Adsorpcija, mobilnost i indeks geoakumulacije (I_{geo}) teških metala

Teški metali koji uđu u tlo raspoređuju se između tekuće faze (otopina tla) i čvrste faze (minerali gline i organska tvar). Znanstvena istraživanja koja su mjerila stupanj kontaminacije pedosfere u blizini odlagališta baterija donose alarmantne podatke. U studiji koju je proveo znanstvenik Gottesfeld sa suradnicima, koncentracije olova (Pb) u površinskom sloju tla u zonama kontaminacije dosezale su srednje vrijednosti od čak **3262 mg/kg**, što stotinama puta premašuje prirodne ekološke i zakonski dopuštene standarde čistog tla.

Međutim, ključni parametar ekološke opasnosti nije samo ukupna količina metala, već njegova mobilnost. Munkhtur i suradnici proveli su detaljnu sekvencijalnu ekstrakciju tala kontaminiranih baterijskim otpadom te otkrili da je čak **79,7%** detektiranog olova prisutno u tzv. *izmjenljivoj i vodorastvornoj frakciji*. To je najopasnija moguća geokemijska opcija. To znači da metal nije fiksiran i zarobljen unutar stabilnih silikatnih minerala stijena, već je slobodan u otopini tla. Ta visoka mobilnost omogućuje mu brzu migraciju kroz profile tla i ekstremno visoku bioraspoloživost za žive organizme.

Za preciznu znanstvenu evaluaciju intenziteta zagađenja tla koristi se **indeks geoakumulacije (I_{geo})**:

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_n}{1.5 \times B_n} \right)$$

Pri čemu je C_n izmjerena koncentracija teškog metala u zagađenom uzorku, a B_n njegova prirodna koncentracija (geokemijska pozadina) u čistom, referentnom tlu. Kod nepropisnog odlaganja baterija, vrijednosti I_{geo} za olovo, kadmij i nikal redovito prelaze vrijednost 4.

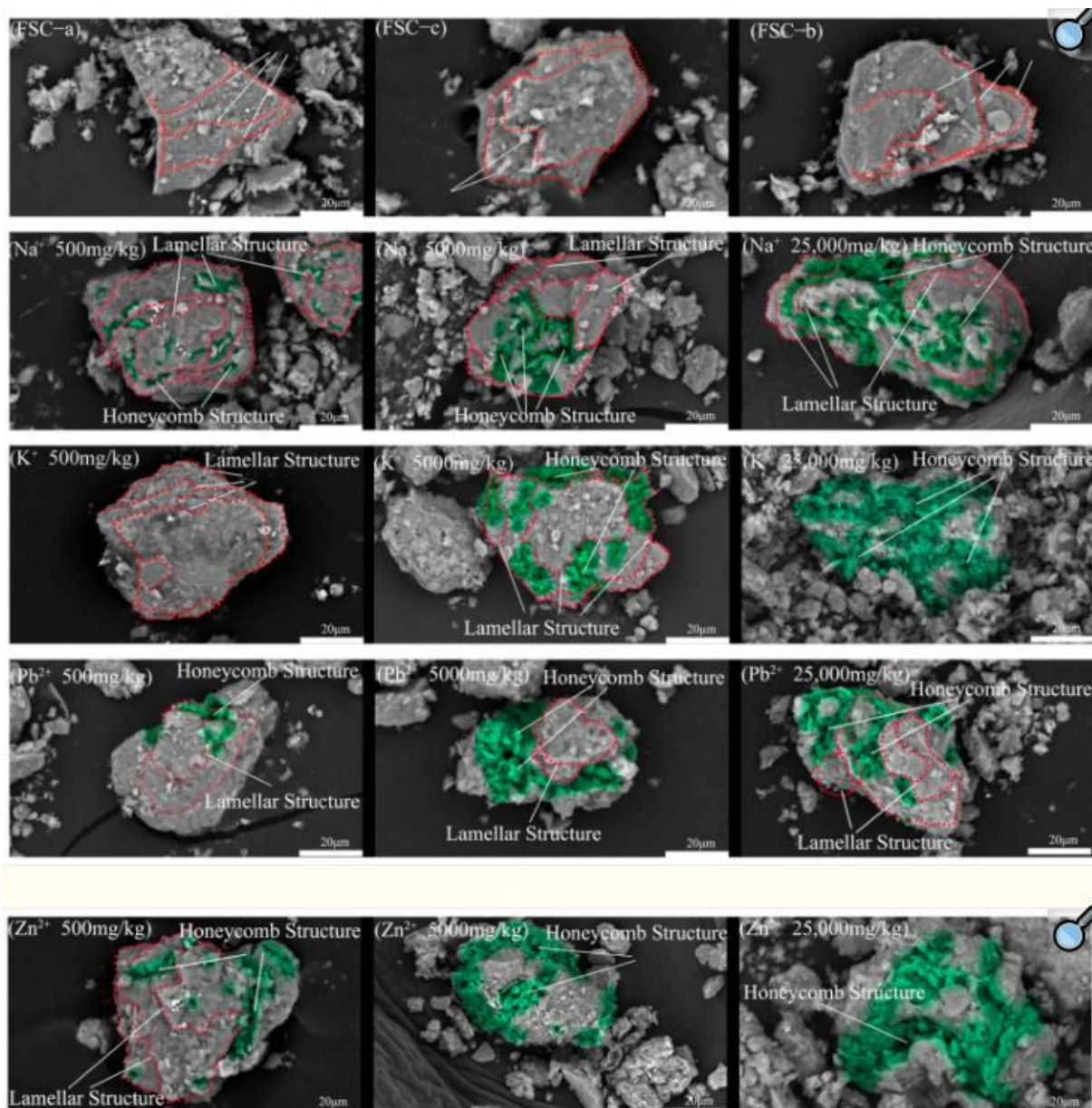
Prema službenoj klasifikaciji, to tlo svrstava u najvišu klasu – klasu **ekstremno zagađenih ekosustava**.

5.2. Ionska izmjena i razaranje mikrostrukture minerala gline

Jedan od najvažnijih i najsuptilnijih procesa koji se događaju pod utjecajem baterijskog otpada jest izravno strukturno razaranje glinenih minerala, što dovodi do gubitka mehaničkih svojstava tla. Najnovija istraživanja iz 2026. godine, koja su proveli Mishra i Mukherjee, detaljno su analizirala kako unošenje bakra (Cu), kobalta (Co) i nikla (Ni) iz otpadnih litij-ionskih baterija u koncentracijama od 3%, 6% i 9% masenog udjela utječe na mikrostrukturu glinenih tala (pedosfere) tijekom vremena.

Znanstvenici su dokumentirali sljedeće destruktivne procese:

- **Nasilna ionska izmjena na koloidima:** Čestice gline imaju negativno nabijenu površinu (glineni koloidi) na kojoj su u prirodnom, zdravom stanju adsorbirani esencijalni kationi koji tlu daju strukturu i plodnost, poput kalcija (Ca^{2+}), magnezija (Mg^{2+}) i natrija (Na^+). Visoko koncentrirani ioni teških metala iz procjednih voda baterija (prvenstveno Co^{2+} i Ni^{2+}), zbog svog većeg ionskog potencijala, afiniteta i naboja, **nasilno istiskuju** prirodne katione s koloida gline.
- **Kolaps i destabilizacija kristalne rešetke:** Istiskivanjem kalcija i ugradnjom teških metala u unutrašnje slojeve dolazi do kontrakcije, deformacije i destabilizacije kristalne rešetke minerala gline (poput montmorilonita i ilita). Gubi se unutrašnja kohezijska sila koja drži čestice tla na okupu.
- **Potpuni gubitak geotehničkih svojstava:** Rezultati istraživanja iz 2026. potvrdili su da tlo pod utjecajem ovih baterijskih elemenata dramatično gubi svoju plastičnost. Dolazi do izmjene Atterbergovih granica plastičnosti, drastično se smanjuje indeks stišljivosti te dolazi do potpunog razaranja mikrostrukture tla. Zemlja gubi sposobnost zadržavanja vlage, postaje strukturno razmrvljena, sklona prekomjernom zbijanju ili pak ubrzanom eroziji pod utjecajem vjetra i vode. Tlo postaje trajno nesposobno za obavljanje svoje ekološke i mehaničke funkcije.



Slika 2 SEM mikrofotografiju - usporedba zbijene, zdrave strukture gline i razorene mikrostrukture nakon kontaminacije metalima iz baterija

Izvor: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11547858/>

5.3. Degradacija organske tvari (humusa) i inhibicija edafona

Osim na mineralni, anorganski dio tla, baterijski otpad djeluje razorno i na njegovu najvrjedniju komponentu – organsku tvar (humus) te na edafon (cjelokupni živi svijet u tlu).

- **Inaktivacija i sterilizacija humusa:** Teški metali stupaju u jake kemijske reakcije s funkcionalnim skupinama (karboksilnim i hidroksilnim) huminskih i fulvokiselina. Formiraju se stabilni, netopljive kromatografski kelatni kompleksi. Time se trajno

blokira kapacitet kationske izmjene humusa. Tlo gubi sposobnost prirodnog vezanja i otpuštanja hranjivih tvari, što znači da gnojidba ili prirodni procesi na takvom tlu više nemaju nikakav učinak.

- **Toksičnost za edafon:** Visoke koncentracije litija, kadmija i olova djeluju kao izravni stanični otrovi za pedosferske mikroorganizme. Metali prodiru kroz stanične stijenke bakterija i gljivica, denaturiraju unutrašnje proteine i blokiraju rad ključnih enzima, primarno dehidrogenaze i ureaze. Ti su enzimi ključni pokretači kruženja dušika, ugljika i fosfora u prirodi. Korisni makroorganizmi, poput gujavica (*Lumbricidae*), koje su glavni aeratori tla, bježe iz kontaminiranih zona ili masovno ugibaju uslijed apsorpcije toksičnog elektrolita kroz kožu. Tlo u potpunosti umire i postaje biološki sterilno.

5.4. Kontaminacija fitocenoza i ulazak u trofičke lance

Kao izravna posljedica visoke mobilnosti i bioraspoloživosti metala u tlu, dolazi do kontaminacije biljnog svijeta (fitocenoza). U istraživanju koje su proveli Oluwasola i suradnici, analizirana je akumulacija teških metala u poljoprivrednim kulturama uzgajanim na tlu koje je namjerno kontaminirano otpadom od baterija.

Rezultati su dokumentirali izražen i opasan proces bioakumulacije:

- Korijski sustav biljaka (u pokusu je korišten kukuruz, *Zea mays*) putem pasivnog i aktivnog transporta upija otopljene ione olova i kadmija iz otopine tla, zamjenjujući ih greškom za esencijalne katione poput kalcija (Ca^{2+}) ili željeza (Fe^{2+}).
- Studija je dokazala prisutnost toksičnih razina metala u svim organima biljke, uključujući stabljiku, lišće i sama zrna kukuruza (olovo je zabilježeno u koncentraciji od 40,95 mg/L u ekstraktima biljnog tkiva). Biljka izvana može izgledati normalno, ali njezini plodovi postaju toksični.
- Kroz proces biomagnifikacije, koncentracija ovih otrova progresivno raste sa svakom sljedećom trofičkom (hranidbenom) razinom. Kada se tim kontaminiranim kukuruzom hrani stoka (goveda, svinje), teški metali se trajno deponiraju u njihovim unutrašnjim organima (bubrezi, jetra) i mišićnom tkivu. Na kraju tog lanca nalazi se čovjek. Konzumacijom takvog mesa, mlijeka ili zagađene podzemne vode, čovjek unosi akumulirane toksine u svoj organizam. Olovo izaziva nepovratna oštećenja središnjeg

živčanog sustava (saturnizam) i pad kognitivnih sposobnosti, dok kadmij uzrokuje zatajenje bubrega i tešku demineralizaciju kostiju (bolest *Itai-itai*).

6. ZAKONODAVNI OKVIR I KRUŽNO GOSPODARSTVO KAO RJEŠENJE

Osim baterijskog otpada, zakonski okvir obuhvaća i elektronički otpad koji se mora odvojeno prikupljati i obrađivati kako bi se spriječilo onečišćenje okoliša i omogućila ponovna uporaba vrijednih sirovina.

Kako bi se spriječila trajna i nepovratna destrukcija pedosfere na globalnoj i nacionalnoj razini, nužno je striktno i beskompromisno provođenje zakonskih regulativa. U Republici Hrvatskoj ovaj je segment pravno uređen kroz *Pravilnik o baterijama i akumulatorima i otpadnim baterijama i akumulatorima (NN 111/15)*. Ovaj podzakonski akt strogo zabranjuje miješanje baterijskog otpada s komunalnim smećem i nameće obvezu odvojenog prikupljanja. Sustav funkcionira na principu proširene odgovornosti proizvođača (EPR), što znači da uvoznici i proizvođači baterija plaćaju naknadu Fondu za zaštitu okoliša (FZOEU) iz koje se financira mreža sakupljanja.

Na razini Europske unije, nova Uredba (EU) 2023/1542 o baterijama donosi revolucionarne ekološke i tehnološke imperATIVE koji stubokom mijenjaju industriju:

- Strogi ciljevi sakupljanja: Do kraja 2027. godine države članice moraju osigurati odvojeno sakupljanje od minimalno 63% prijenosnih otpadnih baterija, a do 2030. taj cilj raste na 73% .
- Obvezne stope oporabe materijala: Tehnološki procesi recikliranja moraju postati toliko napredni da jamče povrat od čak 90% za kritične elemente poput kobalta, nikla i bakra, te 50% za iznimno zahtjevan litij do kraja 2027. godine.

U modernim se postrojenjima stoga napuštaju stari procesi spaljivanja (pirometalurgija) i uvodi se hidrometalurgija. To je napredni tehnološki postupak u kojem se usitnjena masa baterija (tzv. *black mass*) podvrgava selektivnom otapanju u kiselinskim kupkama (sumporna kiselina uz dodatak vodikovog peroksida). Nakon toga, preciznim podešavanjem pH vrijednosti i dodatkom specifičnih reagensa, metali se talože u obliku čistih soli spremnih za ponovnu proizvodnju katoda. To predstavlja potpuni prijelaz s linearnog ekonomskog modela na model kružnog gospodarstva (Circular Economy). Stari, visokotoksični otpad postaje

vrijedna sekundarna sirovina, eliminira se potreba za novim rudarenjem, a tlo pod našim nogama ostaje u potpunosti zaštićeno od curenja teških metala.

7. PEDAGOŠKE IMPLIKACIJE I PREPORUKE ZA ODGOJNO-OBRAZOVNU PRAKSU

Rezultati istraživanja provedenog među učenicima III. gimnazije Split i Gimnazije dr. Mate Ujevića Imotski ukazuju na potrebu sustavnijeg razvoja ekološke pismenosti učenika kroz odgojno-obrazovni proces. Iako većina ispitanika prepoznaje važnost zaštite okoliša i negativne posljedice nepravilnog odlaganja otpada, rezultati pokazuju da velik broj učenika ne poznaje dovoljno načine pravilnog zbrinjavanja elektroničkog i baterijskog otpada niti razumije složene procese onečišćenja koji nastaju njegovim neodgovornim odlaganjem.

Dobiveni rezultati potvrđuju važnost škole kao mjesta razvoja znanja, vrijednosti i odgovornog ponašanja prema okolišu. Odgojno-obrazovne ustanove imaju značajnu ulogu u oblikovanju ekološki odgovornih građana koji će biti sposobni donositi održive odluke u svakodnevnom životu.

Posebna vrijednost ovog istraživanja ogleda se u suradnji dviju srednjih škola iz različitih dijelova Splitsko-dalmatinske županije. Usporedba rezultata učenika iz Splita i Imotskog omogućila je širi uvid u razinu ekološke osviještenosti mladih te pokazala kako određeni izazovi vezani uz gospodarenje elektroničkim i baterijskim otpadom postoje neovisno o veličini sredine u kojoj učenici žive.

Na temelju rezultata istraživanja predlažu se sljedeće aktivnosti:

- jačanje sadržaja o održivom razvoju, kružnom gospodarstvu i gospodarenju otpadom u nastavnim predmetima;
- provođenje projektne i istraživačke nastave usmjerene na stvarne ekološke probleme lokalne zajednice;
- organiziranje školskih akcija prikupljanja elektroničkog i baterijskog otpada;
- suradnja škola s komunalnim poduzećima, reciklažnim dvorištima i ustanovama za zaštitu okoliša;
- razmjena iskustava i zajednički projekti škola na lokalnoj i županijskoj razini;

- poticanje učenika na aktivno sudjelovanje u ekološkim inicijativama i volonterskim aktivnostima.

Kontinuiranim provođenjem navedenih aktivnosti moguće je povećati razinu ekološke osviještenosti učenika te doprinijeti razvoju održivog i odgovornog odnosa prema okolišu.

8. ZAKLJUČAK

Istraživanje provedeno među učenicima III. gimnazije Split i Gimnazije dr. Mate Ujevića Imotski te građanima grada Imotskog pokazalo je da mladi svakodnevno koriste velik broj elektroničkih uređaja te su time izravno povezani s nastankom elektroničkog i baterijskog otpada. Analiza rezultata anketa pokazala je da uglavnom prepoznaju važnost zaštite okoliša, ali istodobno ne raspolažu uvijek dovoljnim znanjem o pravilnim načinima zbrinjavanja otpada niti o posljedicama njegova nepravilnog odlaganja.

Teorijska analiza kemijskog sastava baterija i procesa koji nastaju nakon njihova odlaganja potvrđuje da baterijski i elektronički otpad mogu predstavljati ozbiljnu prijetnju tlu, podzemnim vodama, biljnim i životinjskim zajednicama te zdravlju ljudi. Teški metali i drugi štetni spojevi sadržani u baterijama mogu se dugotrajno zadržavati u okolišu te ulaziti u hranidbene lance, uzrokujući trajne posljedice za ekosustave.

Rezultati istraživanja istaknuli su važnost odgojno-obrazovnog sustava u razvoju ekološke pismenosti učenika. Suradnja III. gimnazije Split i Gimnazije dr. Mate Ujevića Imotski pokazala je kako zajednički projekti škola mogu pridonijeti boljem razumijevanju ekoloških problema i razmjeni primjera dobre prakse među učenicima i nastavnicima.

Dobiveni rezultati potvrđuju potrebu za daljnjim razvojem obrazovanja za održivi razvoj, većim uključivanjem učenika u istraživačke i projektne aktivnosti te jačanjem suradnje škola i lokalne zajednice. Samo povezivanjem znanstvenih spoznaja, odgovornog ponašanja i kvalitetnog obrazovanja moguće je razvijati generacije koje će aktivno doprinostiti očuvanju okoliša i održivoj budućnosti.

Ovo istraživanje predstavlja doprinos razumijevanju ekološke osviještenosti srednjoškolaca i građana u Splitsko-dalmatinskoj županiji te potvrđuje kako obrazovanje ima ključnu ulogu u izgradnji društva koje odgovorno upravlja prirodnim resursima i otpadom.

8. LITERATURA

1. Ministarstvo zaštite okoliša i energetike. *Pravilnik o baterijama i akumulatorima i otpadnim baterijama i akumulatorima* (Narodne novine br. 111/15).
2. Mishra, P., Mukherjee, A. (2026). *Sustainable lithium-ion battery waste management: assessing impacts of heavy metal fraction on soil properties and pathways to mitigation*. Department of Civil Engineering, Symbiosis International University, Pune.
3. Europski parlament i Vijeće. *Uredba (EU) 2023/1542 o baterijama i otpadnim baterijama*. Službeni list Europske unije.
4. Munkhtur, A. et al. (2025). Heavy metal contamination in soil surrounding a waste battery recycling plant. *Mongolian Journal of Geosciences*, 14, 22-29.
5. Oluwasola, O. et al. (2018). Accumulation of Heavy Metals from Battery Waste in Topsoil and Maize Parts. *Global Challenges*, 2(11), 170-178.
6. Eshun, E. et al. (2025). Assessing the environmental impact and risks associated with waste lithium-ion batteries (LiBs) management pathways. *PubMed Central*, PMC12446648.
7. Gottesfeld, P. et al. (2018). Soil contamination from lead battery manufacturing and recycling in Africa. *Environmental Research*, 161, 542-548.