

Povzetek rezultatov ARIS raziskovalno aplikativnega projekta UPTAKE s polnim naslovom »Ponovna uporaba vode in blata iz čistilnih naprav v kmetijstvu: privzem in porazdelitev prioriteten onesnažil v modelni rastlini paradižnika« (2022-2025)

Z namenom zagotavljanja kakovostne vode za namakanje ter iskanja možnosti za varno uporabo produktov čiščenja odpadne vode v kmetijstvu smo izvedli projekt UPTAKE s polnim naslovom »Ponovna uporaba vode in blata iz čistilnih naprav v kmetijstvu: privzem in porazdelitev prioriteten onesnažil v modelni rastlini paradižnika«. Prečiščene odpadne vode in blata namreč predstavljajo potencialno dragocen vir v kmetijstvu, saj vsebujejo nekatera hranila (npr. dušik in fosfor), vendar hkrati lahko vsebujejo tudi neželene snovi, na katere se je projekt posebej osredotočil. Projekt, ki ga je koordinirala prof. dr. Ester Heath z Instituta »Jožef Stefan« (IJS) v obdobju 2022–2025, je financirala Agencija za raziskovalno dejavnost RS (ARIS) in sofinanciralo šest slovenskih javnih komunalnih podjetij (Centralna čistilna naprava Domžale–Kamnik, Komunalno stanovanjska družba Ajdovščina, Komunala Novo mesto, Komunalno podjetje Velenje, Komunala Javno podjetje Murska Sobota in Komunala Kranj) ter Mestna občina Krško. Kot raziskovalni partnerji so sodelovali raziskovalci Univerze v Ljubljani (Biotehniška fakulteta, Zdravstvena fakulteta in Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo) ter Nacionalnega inštituta za javno zdravje (NIJZ).

Osrednji namen projekta je bil zapolniti vrzeli v znanju na področju ponovne uporabe prečiščene odpadne vode in komunalnega blata v kmetijstvu. Raziskave so se osredotočile na prisotnost t. i. onesnažil, ki vzbujajo zaskrbljenost (mikropolutantov), kot so ostanki zdravil, pesticidov, sredstev za osebno nego ter industrijskih kemikalij (npr. bisfenolov) v modelni rastlini (paradižnik). Gre za snovi, ki niso nujno na novo sintetizirane, temveč pogosto poznane snovi, katerih vpliv v okolju prepoznavamo šele v zadnjem času. Čeprav so bile lahko v okolju prisotne že prej, jih danes zaznavamo kot potencialno problematične, pri čemer o njihovih učinkih na zdravje ljudi in okolje še nimamo popolnih podatkov oziroma še niso v celoti regulirane. Te snovi lahko iz prečiščene odpadne vode ali komunalnega blata prehajajo v rastline, vstopajo v prehransko verigo in tako predstavljajo potencialno tveganje za ljudi, živali in okolje.

V okviru projekta smo v okviru t.i. »tarčne« analize proučevali vnos 27 modelnih organskih mikroonesnažil v rastline paradižnika v različnih rastnih pogojih. V sodelovanju z Biotehniško fakulteto, Zdravstveno fakulteto ter Fakulteto za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani smo izvedli terenske poskuse z lizimetri na demonstracijskem poligonu čistilne naprave v Ajdovščini (Slika 1), hidroponske poskuse na Biotehniški fakulteti v Ljubljani (Slika 2) ter lončne poskuse v sistemu tla–voda (prav tako na Biotehniški fakulteti v Ljubljani), kjer smo v šoto vmešali odpadno blato (Slika 3).



Slika 1: Poljski poskus gojenja paradižnikov namakanih s prečiščeno odpadno vodo (lizimetri, CCN Ajdovščina)



Slika 2: Hidroponsko gojenje paradižnika s prečiščeno odpadno vodo



Slika 3: Lončni poskus: gojenje paradižnikov z odpadnim blatom

V rastnih poskusih paradižnika smo uporabili prečiščeno odpadno vodo (gojenje v hidroponiki in namakanje v lizimetrih) in komunalno blato (lončni poskus z odpadnim blatom), z in brez dodatka onesnažil (t.i. najslabši scenarij), medtem ko sta pitna voda in šotni substrat služila kot kontrola.

Rezultati projekta UPTAKE so pokazali, da je prehajanje mikroonesnažil v plodove paradižnika večinoma omejeno, kar je ključno z vidika zagotavljanja varnosti hrane. V realnih poljskih razmerah pri namakanju s prečiščeno odpadno vodo smo v plodovih praviloma zaznali le posamezne snovi v zelo nizkih koncentracijah, večina onesnažil iz vode za namakanje se kopiči predvsem v koreninah in listih. V hidroponskem poskusu smo opazili upočasnjeno rast rastlin, rumenenje listov in slabše razvite korenine, kar je oviralo razvoj plodov. Onesnažila so se kopičila po vzorcu korenine > listi > stebela > plodovi, pri čemer je bil vnos v plodove v tem načinu pridelave višji kot v lizimetrih in lončnem poskusu, tako po številu mikroonesnažil kot po njihovi vsebnosti. Tudi pri uporabi komunalnega blata so bila v plodovih prisotna le posamezna onesnažila in še ta v omejenem obsegu.

Poleg organskih onesnažil smo spremljali tudi vnos izbranih elementov v plodove hidroponsko gojenega paradižnika. Skupna ugotovitev (NIJZ in IJS) je, da je prenos izbranih organskih in anorganskih onesnažil v užiten del rastline, v plod paradižnika, preko vode za namakanje v običajnih kmetijskih pogojih majhen, vendar bi se lahko povečal ob višjih vsebnostih onesnažil ali dolgotrajnejšem namakanju s prečiščeno odpadno vodo. Z ekološkega vidika ocenjujemo, da uporaba prečiščene odpadne vode in komunalnega blata nekoliko poveča tveganje za okolje, predvsem zaradi kopičenja in obstojnosti onesnažil v tleh, kar omogoča njihov prenos v rastline.

Na podlagi eksperimentalnih podatkov so raziskovalci IJS razvili napovedni model, ki z uporabo metod strojnega učenja omogoča oceno vnosa različnih onesnažil v rastline glede na njihove

fizikalno-kemijske lastnosti. Namen modela je napovedati vnos različnih onesnažil v rastline na podlagi njihovih fizikalno-kemijskih lastnosti ter s tem podpreti oceno tveganja in varno rabo trajnostnih virov v kmetijstvu.

Rezultati projekta UPTAKE so jasno pokazali, da je glede zagotavljanja varnosti pridelkov za celovitejšo presojo tveganja za zdravje potrošnika in okolja nujno nadaljevati z raziskavami. Priporočljivo je razširiti nabor spremljanih onesnažil z vključitvijo pristopa t.i. »netarčnih« analiz, ki zajemajo širši spekter ostankov kemikalij, vključno z njihovimi metabolnimi in transformacijskimi produkti, pri čemer je eksperimentalne poskuse delno že mogoče nadomestiti z metodami strojnega učenja. V oceno tveganja bo potrebno vključiti tudi učinke mešanic, oziroma morebitne aditivne in sinergistične učinke onesnažil, ter upoštevati dolgoročno uporabo tako zasnovanih kmetijskih praks. Pomembno bo tudi spremljati, v kolikšni meri bo uvedba kvartarnega čiščenja odpadnih voda, predvidena v prenovljeni Direktivi o čiščenju komunalne odpadne vode (2024/3019), zmanjšala vnos že preučevanih in novih mikroonesnažil v uporabne dele rastlin v primeru namakanja s tovrstno prečiščeno odpadno vodo ter v okolje.

Raziskovalci IJS smo spremljali tudi vpliv prisotnosti mikroonesnažil iz prečiščene odpadne vode in odpadnega blata na kakovost plodov paradižnika. Učinek onesnažil je bil večinoma majhen in je bil najbolj opazen pri hidroponsko gojenem paradižniku, pri čemer rezultati kažejo, da lahko onesnažila povzročijo manjše spremembe v rastlini, vendar bistveno ne poslabšajo kakovosti plodov. Vpliv dolgotrajne uporabe prečiščene odpadne vode in blata na kakovost plodov pa je še potrebno dodatno preučiti.

Poseben poudarek je bil namenjen tudi raziskavam prisotnosti mikro- in nanoplastike. Preučevali smo vpliv prisotnosti mikroplastike v odpadni vodi in blatu na tla (Zdravstvena fakulteta), ter prvič izvedli hidroponski poskus vnosa polistirenske nanoplastike v rastline paradižnika pod izbranimi eksperimentalnimi pogoji. Rezultati so pokazali vnos nanoplastike (IJS) v korenine paradižnika, medtem ko njihov privzem v višje dele rastline nismo mogli potrditi. Pokazali smo tudi na zanimiv vpliv prisotnosti nanoplastike v tleh na porazdelitev elementov v rastlinah paradižnika, t.j. zmanjšan vnos strupenih elementov, kot sta npr. Cr (krom) in Pb (svinec) ob prisotnosti nanodelcev plastike.

V sodelovanju z Zdravstveno fakulteto Univerze v Ljubljani smo spremljali osnovne mikrobiološke parametre pri ponovni uporabi odpadne vode pri klasičnem in hidroponskem gojenju paradižnika ter ugotovili, da prečiščena odpadna voda brez predhodne dezinfekcije ni primerna za gojenje paradižnika oz. za uživanje njegovih plodov. To je v skladu z zahtevami Uredbe 2020/741 o minimalnih zahtevah za ponovno uporabo vode. Slovenske čistilne naprave, z redkimi izjemami, dezinfekcije ne vključujejo v postopek čiščenja odpadnih vod, kar pomeni, da po veljavni zakonodaji odpadna voda ni primerna za ponovno uporabo v kmetijstvu.

Rezultati projekta bodo pomembno prispevali k ocenjevanju tveganj za zdravje ljudi in okolja v povezavi s ponovno uporabo prečiščene odpadne vode ter k oblikovanju prihodnjih smernic za njeno uporabo v kmetijstvu, hkrati pa bodo koristni tudi za čistilne naprave, saj jim bodo pomagali pri prilagajanju na nove zakonodajne okvire ter jim zagotovili, da bodo raziskovalci prisluhnili njihovim izzivom in potrebam. Kljub ogrožujočemu pomanjkanju zadostnih količin vode v kmetijstvu in potrebi po hitrem ukrepanju se področje zakonodajno še ureja – evropska ureditev iz leta 2020 sicer uvaja predhodno presojo tveganja za zdravje ljudi in okolja, a še ne

določa natančnega nabora spremljanih parametrov. Slovenska zakonodaja ponovne uporabe prečiščene odpadne vode še ne uvaja na nacionalni ravni. Hkrati je zakonodaja o uporabi komunalnega blata zastarela, saj izhaja iz leta 1986. Njena posodobitev se pričakuje v bližnji prihodnosti.

Projekt UPTAKE je zaradi kompleksnosti obravnavane problematike zahteval izrazito multidisciplinaren pristop. Poleg domačih raziskovalnih organizacij so sodelovale tudi številne mednarodne raziskovalne organizacije, projekt pa je imel podporo Gospodarske zbornice Slovenije in Skupnosti občin Slovenije. Rezultati projekta so zapolnili pomembne vrzeli v znanju in hkrati odprli nova raziskovalna vprašanja, ki jih bomo obravnavali v nadaljevalnem ARIS projektu WIDER UPTAKE (2026–2029) s polnim naslovom *»Od odpadka do pridelka: kvartarno čiščenje odpadne vode za varno ponovno uporabo v kmetijstvu«*.

V sodelovanju s partnerji projekta je prispevek pripravila prof. dr. Ester Heath (Institut Jožef Stefan, ester.heath@ijs.si).

V Ljubljani, 8.4.2026