



Co-funded by
the European Union

Iš laboratorijos į lauką: kaip mokslininkai išbando mikrobu valymą realiose ekosistemose



BIOS4YOU
AR 2.0

BIO-INSPIRED STEM TOPICS FOR ENGAGING YOUNG GENERATIONS
THANKS TO THE USE OF AUGMENTED REALITY

Project Number: KA220-BW-23-30-126516

"Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them."

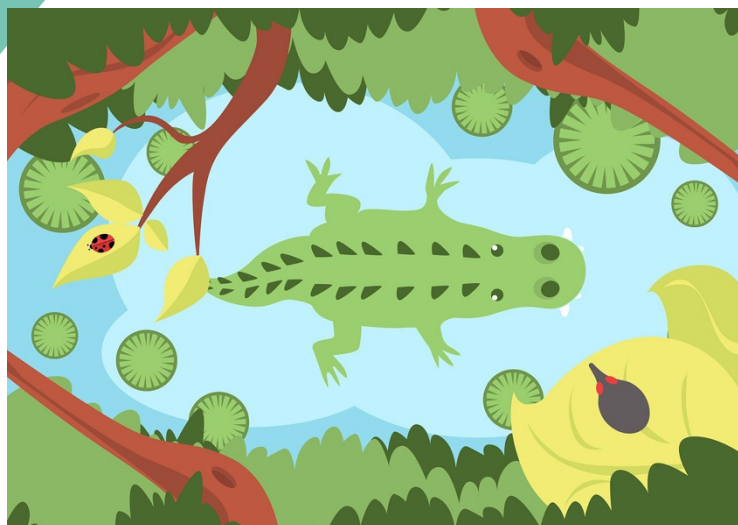




TURINYS

Ivadas	2
2. Kodėl lauko bandymai yra būtini	3
2.1. Laboratorija ir laukas: kontroliuojama ir sudėtinga aplinka	3
2.2. Biologinio prieinamumo supratimas realiame pasaulyje	4
2.3. Saugos ir poveikio aplinkai stebėsena	4
3. Nuo sėkmės laboratorijoje iki strategijos lauke	4
3.1. Lauko masto testavimo žingsniai: apžvalginė lentelė	4
3.2. Išplėstinis paaiškinimas ir potėmės	5
4. Realaus pasaulio atvejų analizės	8
5. AR realaus pasaulio pavyzdžiai aplinkosaugos ar biologijos srityse	11
5.1. AR, skirta vietoje stebimai aplinkai ir duomenų vizualizacijai	12
Apžvalga	12
Mokslinis taikymas mikrobų bioremediacijoje	12
Realaus pasaulio AR sistemų pavyzdžiai	13
ekoNET: AR technologija paremta aplinkos stebėjimo platforma	13
Požeminio vandens vizualizavimas naudojant AR	13
Integracija su daugiaomikros ir modeliavimo modeliais	13
Bioremediacijos praktikos privalumai	13
5.2. Įtekančios nuotekos: mikrobų ir cheminės dinamikos AR modeliavimas	14
1. Maistinių medžiagų dinamika	14
2. Mikrobų augimo fazės	14
3. Teršalų skaidymosi rodikliai	15
Kodėl šie trys yra tarpusavyje susiję	15
5.3. AR miesto ir pramonės taršos suvokimui	16
5.4. AR interaktyviam lauko planavimui vandens ir dirvožemio projektuose	16
5.5. „Clean-AR“: AR rizikos žemėlapių sudarymui ir užterštumo kontrolei	17
5.6. Nauji tyrimai: AR + multiomika lauko bioinformatikai	17
Literatūra	18





Bendra mokymosi kelio tema	Bioremediacija ir aplinkos valymas naudojant mikroorganizmus (biologiškai įkvėpti sprendimai)
Konkretus mokymosi vieneto pavadinimas	<i>Iš laboratorijos į lauką: kaip mokslininkai išbando mikrobu valymą realiose ekosistemose</i>
Tikslinis naudotojų amžius	14–18 metų
Besimokančiojo reikalavimai	Pagrindinės biologijos, chemijos, aplinkos mokslų žinios
Mokymosi vieneto aprašymas	Šiame skyriuje studentai supažindinami su realaus pasaulio mikrobu bioremediacija. Naudodami papildytosios realybės (AR) įrankius, studentai tyrinėja, kaip mokslininkai projektuoja, stebi ir vertina mikrobu valymą nuo laboratorinių sąlygų iki realių užterštų vietų. Dėmesys skiriamas mikrobu ekologijai, teršalų dinamikai ir papildytos vizualizacijos naudojimui siekiant suprasti aplinkos procesus.
Dalyvaujantys subjektai	Biologija, chemija, aplinkos mokslai, technologijos
Raktiniai žodžiai	Bioremediacija, mikrobai, bioįkvėpimas, papildytoji realybė, lauko bandymai, aplinkos atkūrimas, STEM, vizualizacija
Pagrindiniai įgūdžiai, gebėjimai ir žinios, kurias reikia įgyti	- Mikrobu vaidmens teršalų skaidyme supratimas - Bioremediacijos vizualizavimas naudojant papildytąją realybę (AR) - Aplinkos duomenų interpretavimas - Problemų sprendimas ir sisteminis mąstymas ekologiniame kontekste - Paprastų papildytosios realybės (AR) sustiprintų valymo modelių kūrimas
Naudoti ištekliai ir didaktiniai įrankiai	Mokslinė literatūra (pvz., AEM, „Frontiers“), edukaciniai papildytosios realybės įrankiai (pvz., „JigSpace“, „Merge Cube“), aplinkosaugos atvejų analizės, virtualios išvykos, modeliavimo duomenys
Vertinimo kriterijai ir vertinimas	Vertinimas atliekant papildytosios realybės (AR) pagrindu sukurtas užduotis: taršos vizualizavimas, mikrobu aktyvumo modeliavimas, testai apie degradacijos kelius ir refleksinis grįžtamasis ryšys apie virtualius laboratorijos ir lauko scenarijus





Įvadas

Už Petri lėkštelės ribų – mikrobų valymo bandymai realiame pasaulyje



<https://www.theguardian.com/environment/2023/sep/28/plastic-eating-bacteria-enzyme-recycling-waste>

Kai galvojame apie mokslą praktikoje, dažnai įsivaizduojame baltus laboratorinius chalatus, mikroskopus ir Petri lėkšteles – švarią, kontroliuojamą aplinką, kurioje atradimai daromi idealiomis sąlygomis. Ir nors tai yra svarbi mokslinio proceso dalis, norint išspręsti realias problemas, tokias kaip tarša, reikia daugiau nei vien sėkmės laboratorijoje. Čia ir praverčia lauko bandymai, kai paimami tai, kas veikia laboratorijoje, ir stebima, ar tai išgyvena ir pasiteisina gamtoje.

Vienas įdomiausių šių dienų aplinkos mokslo įrankių yra bioremediacija – procesas, kurio metu maži gyvi organizmai, tokie kaip bakterijos ir grybeliai, naudojami užterštai aplinkai valyti. Šie mikrobai gali „suvalgyti“ kenksmingas medžiagas, tokias kaip nafta, sunkieji metalai ar toksiškos cheminės medžiagos, ir paversti jas nekenksmingomis. Laboratorijoje tyrėjai atrado šimtus mikrobų rūšių, kurios gali virškinti įvairias medžiagas, įskaitant dyzeliną, chromą ir urano junginius (Lovley ir kt., 2022). Bet ar tie patys mikrobai gali išgyventi užterštoje upėje, užterštame miške ar toksiškų atliekų aikštelėje? Tai yra didžiausias klausimas.

Gamta yra nenuspėjama. Tokios sąlygos kaip temperatūra, saulės šviesa, vandens srautas ir kitų organizmų buvimas turi įtakos mikrobų elgesiui už laboratorijos ribų. Net jei mikrobas puikiai skaido teršalus Petri lėkštelėje, jis gali visiškai neveikti, kai patenka į ežerą ar dirvožemį. Pavyzdžiui, *Alcanivorax borkumensis*, natūraliai randama jūrinė bakterija, klesti nafta užterštame jūros vandenyje ir padeda skaidyti angliavandenilius, tačiau tik esant tam tikroms temperatūros ir maistinių medžiagų sąlygoms (Yakimov ir kt., 2007). Štai kodėl mokslininkai turi išbandyti





bioremediacijos strategijas realiose ekosistemose, atlikdami nedidelio masto eksperimentus, vadinamus bandomaisiais tyrimais arba lauko bandymais.

Šie bandymai padeda tyrėjams suprasti, ar pasirinkti mikrobai yra veiksmingi, saugūs ir gali išgyventi natūraliomis sąlygomis. Pavyzdžiui, tyrėjai atliko lauko eksperimentus Rifle, Kolorado valstijoje, naudodami *Geobakterijarūšis*, siekiant sumažinti urano užterštumą gruntiniame vandenyje, į jas įpurškiant paprastų maistinių medžiagų, tokių kaip acetatas (Anderson ir kt., 2003). Kitame projekte Italijoje mokslininkai sukūrė „biobarjerą“ vandeningajame sluoksnyje, kad išbandytų šešiavalenčio chromo (Cr VI) redukciją gruntiniame vandenyje, naudodami natūraliai susidarančius mikrobus (Beccari ir kt., 2010). Šie realaus pasaulio eksperimentai suteikia vertingų įžvalgų apie tai, kaip bioremediaciją galima saugiai ir efektyviai taikyti didesniu mastu.

Šiame skyriuje sužinosite, kaip mokslininkai perkelia mikrobus iš laboratorijos stalo į lauką ir kaip jie kruopščiai ruošia, išbando ir stebi mikrobo valymo pastangas. Taip pat nagrinėsite realius atvejų tyrimus, kuriuose bioremediacija padėjo atkurti užterštas teritorijas, ir sužinosite apie iššūkius, su kuriais susiduria tyrėjai, dirbdami su sudėtinga gamtine aplinka. Svarbiausia, kad pamatysite, kaip šis darbas formuoja švaresnę ir tvaresnę ateitį ir kaip mokslas žengia už laboratorijos ribų, kad patenkintų mūsų planetos poreikius (Singh ir kt., 2023).

2. Kodėl lauko bandymai yra būtini

Prieš bet kokią didelio masto mikrobo naudojimą taršai valyti, mokslininkai turi juos išbandyti ne laboratorijoje realiomis sąlygomis. Šis procesas vadinamas **lauko bandymais**, ir tai yra labai svarbus žingsnis siekiant užtikrinti, kad bioremediacija būtų veiksminga ir saugi, kai taikoma natūralioje aplinkoje, pavyzdžiui, upėse, ežeruose, dirvožemyje ar net požeminio vandens šaltiniuose. Lauko bandymai pateikia atsakymus į pagrindinius klausimus: *Ar mikrobai išgyvens? Ar jie elgsis taip pat lauke, kaip ir laboratorijoje? Ar gali būti netikėtų pasekmių?*

2.1. Laboratorija ir laukas: kontroliuojama ir sudėtinga aplinka

Laboratorijoje mokslininkai gali kontroliuoti beveik viską – temperatūrą, pH, drėgmę, maistines medžiagas ir teršalų tipą. Tačiau gamtoje yra daug daugiau netvarkos. Lauke mikrobai gali susidurti su:

- **Svyruojanti temperatūra** (kurie veikia medžiagų apykaitą),
- **Mažas maistinių medžiagų kiekis** (kurie mažina mikrobo augimą),
- **Vietinių mikroorganizmų buvimas** (kurie gali konkuruoti arba trukdyti),
- **Kintamos teršalų koncentracijos** (kuris gali būti per didelis arba per mažas degradacijai),
- **Fizinės kliūtys** pavyzdžiui, dirvožemio dalelės arba deguonies trūkumas (ypač po žeme arba po vandeniu).

Pavyzdžiui, *Pseudomonas putida*, bakterija, dažnai naudojama bioremediacijos tyrimuose, laboratorinėse kultūrose efektyviai skaido aliejų ir tirpiklius. Tačiau lauko dirvožemiuose su mišriais teršalais jos efektyvumas gali sumažėti dėl konkurencijos su vietinėmis mikrobo bendrijomis ir nereguliaraus deguonies tiekimo (Cases ir de Lorenzo, 2005).





2.2. Biologinio prieinamumo supratimas realiame pasaulyje

Laboratorijoje teršalai dažnai būna ištirpusios arba prieinamos formos, tačiau gamtoje jie gali būti įstrigę dirvožemio dalelėse arba paslėpti nuosėdų sluoksniuose. Dėl to mikrobams juos sunkiau „pasiekti“ ir suskaidyti. Ši koncepcija vadinama **biologinis prieinamumas**, o tai reiškia teršalo prieinamumą mikrobo veikimui.

Pavyzdžiui, po išsiliejimo smulkiose nuosėdose įstrigusią naftą daug sunkiau išvalyti nei vandens paviršiuje plūduriuojančią naftą, nes mikrobai negali jos lengvai pasiekti (Prince ir kt., 2013). Atlikdami bandymus lauke, mokslininkai turi įvertinti ne tik mikrobo gebėjimą, bet ir tai, ar tarša fiziškai prieinama skaidyti.

2.3. Saugos ir poveikio aplinkai stebėsena

Svarbi lauko bandymų priežastis yra **užtikrinant saugumą**. Net jei mikrobai skaido teršalus, jis gali turėti nenumatytų šalutinių poveikių:

- Tai gali pranokti vietines rūšis.
- Tai gali sukelti kenksmingus šalutinius produktus.
- Jis gali išplisti už numatytos teritorijos ribų.

Lauko bandymai leidžia tyrėjams stebėti šiuos rezultatus ir apriboti įvežtų mikrobo plitimą ar poveikį. Pavyzdžiui, tyrėjai genetiškai modifikuotus mikrobus (GMO) tiria tik saugiose lauko vietose, laikydamiesi griežtų taisyklių, prieš svarstydami platesnį jų naudojimą (Ghosal ir kt., 2016).

3. Nuo sėkmės laboratorijoje iki strategijos lauke

Mikrobinio valymo metodo perkėlimas iš laboratorijos į užterštą vietą yra daug daugiau nei vien tik mastelio keitimas. Tam reikia kruopštaus planavimo ir bandymų, siekiant užtikrinti, kad mikrobai efektyviai veiktų realiomis sąlygomis. Bandymai lauke apima kelis etapus – nuo užterštos vietos parinkimo ir mikrobo paruošimo iki jų panaudojimo, jų aktyvumo stebėjimo laikui bėgant ir rezultatų vertinimo. Šie veiksmai padeda patikrinti, ar mikrobai gali klestėti už kontroliuojamos aplinkos ribų, tinkamai sąveikauti su vietinėmis bendruomenėmis ir iš tikrųjų sumažinti taršą sudėtingoje aplinkoje.

Keletas neseniai atliktų tyrimų pabrėžia šio proceso svarbą. Lauko eksperimentai uranu užterštuose vandeninguosiuose sluoksniuose parodė, kad stimuliuojant vietinius *Geobakterija* rūšys gali sumažinti tirpaus urano kiekį iki saugių ribų („turn0search0“, „turn0search6“). Panašiai, bandomojo masto biopilingo tyrimai PAH užterštame dirvožemyje rodo, kad mikrobo valymas gali būti veiksmingas ir ekonomiškai, nors konkrečios vietos barjerai, tokie kaip dirvožemio struktūra ir klimatas, daro didelę įtaką rezultatams („turn0search1“, „turn0search9“). Šios įžvalgos patvirtina, kad lauko bandymai yra gyvybiškai svarbūs norint suprasti kintamumą, biologinį prieinamumą, mikrobo dinamiką ir ekologinį saugumą.

Tolesniuose skyriuose nagrinėsite, kaip mokslininkai kuria ir vykdo lauko bandymų programą, suskirstytą į esminius veiksmus. Žemiau esančioje lentelėje šie veiksmai pateikti aiškiai, o vėliau kiekvienas iš jų išsamiau paaiškintas su papildomomis potėmėmis, kurios praturtina mokymąsi.

3.1. Lauko masto testavimo žingsniai: apžvalginė lentelė

Žingsnis	Potėmės	Tikslas
----------	---------	---------





A. Vietos parinkimas ir taršos vertinimas	• Geocheminis profiliavimas • Natūrali mikrobų pradinė būklė • Biologinio prieinamumo analizė	Suprasti vietos sąlygas ir teršalų kiekį
B. Mikrobų atranka arba stimuliavimas	• Vietinės ir introdukuotos rūšys • Stimuliuojami konsorciumai • Genetiniai / inžineriniai patobulinimai	Pasirinkite mikrobus, atitinkančius teršalą ir ekosistemą
C. Pristatymas ir paruošimas	• Maistinių medžiagų papildai (pvz., acetatas) • Biobarjero įrengimas • Bioplėvelės panaudojimas	Išskleisti mikrobus ir padidinti išgyvenamumą / aktyvumą
D. Stebėjimas ir sekimas	• Cheminių mėginių ėmimas • Molekuliniai įrankiai (DNR/RNR) • Bendruomenės pokyčiai ir PICT vertinimas	Stebėkite teršalų mažėjimą ir mikrobų elgesį
E. Rezultatų vertinimas ir skalavimas	• Teršalų mažinimo rodikliai • Saugos / ekologinis poveikis • Didinimo planavimas	Įvertinkite sėkmę ir vadovaukitės būsimu taikymu

3.2. Išplėstinis paaiškinimas ir potėmės

A. Vietos parinkimas ir taršos vertinimas

Lauko vietos bioremediacijai nustatymas reikalauja kruopštaus tyrimo. Mokslininkai pradeda nuo geocheminio profiliavimo, tirdami dirvožemio ar gruntinio vandens parametrus, tokius kaip pH, ištirpęs deguonis, redokso potencialas ir maistinių medžiagų kiekis, kurie lemia, ar mikrobai gali išgyventi ir skaidyti teršalus (Madison ir kt., 2022). Jie taip pat nustato mikrobų bazinę liniją, sekvenuodami 16S rRNR genus, kad atskleistų vietinės populiacijas, įskaitant bakterijas, gebančias skaidyti chlorintus tirpiklius arba naftos angliavandenilius (Madison ir kt., 2022). Kitas svarbus žingsnis yra teršalų biologinio prieinamumo, t. y. kiek teršalas prieinamas mikrobams, įvertinimas. Labai sorbuotas medžiagas molio turtinguose dirvožemiuose arba įstrigusias ne vandeninės fazės skysčiuose, gali reikėti sustiprinti, kad prasidėtų biologinis skaidymas (Semple ir kt., 2004).

Šie veiksmai kartu padeda pasirinkti vietą, kurioje ir aplinkos sąlygos, ir mikrobų buvimas skatina veiksmingą atkūrimą, išvengiant bandymų nesėkmės dėl netinkamos vietos.

B. Mikrobų atranka arba stimuliavimas

Kai vieta apibūdinta, tyrėjai nusprendžia, ar įterpti specifinių mikrobų (bioaugmentacija), ar suaktyvinti vietinius mikrobus (biostimuliacija). Gruntinio vandens vietose, užterštose chloruotais tirpikliais, tokiais kaip TCE, atliekami mažų, bet aptinkamų populiacijų matavimai. *Dehalokokoidai* (10^1 – 10^2 ląstelių/ml) lėmė kombinuotą elektronų donorų pridėjimo ir bioaugmentacijos naudojimą bandomųjų bandymų metu, užtikrinant greitą ir visišką dechlorinimą (Madison ir kt., 2022). Sienos kitais atvejais vietinių organizmų stimuliavimas maistinėmis medžiagomis, tokiomis kaip acetatas, pasirodė esąs pakankamas. Pavyzdžiui, NGS duomenys ir kPGR kiekybinis įvertinimas parodė, kad anaerobiniame biologiniame skaidyme dalyvaujančių genų (pvz., alkilsukcinato sintazės) po biostimuliacijos buvo 100–1000 kartų daugiau, o tai rodo efektyvų natūralų teršalų slopinimą (Madison ir kt., 2022)., Sienos.

Naudojant specialiai pritaikytus mikrobų konsorciumus, pagrįstus molekuliniais duomenimis, užtikrinamas kelių skaidymo būdų aktyvumas, ypač mišrių teršalų atveju – ši strategija vis labiau populiarėja bandomuosiuose lauko projektuose (Madison ir kt., 2022).

C. Pristatymas ir paruošimas





Mikrobų tiekimas ir jų aktyvumo užtikrinimas in situ priklauso nuo patikimų tiekimo strategijų. Uranu užterštuose vandeninguosiuose sluoksniuose periodiškai įpurškiami elektronų donorai, kurie tiekia kurą. *Geobakterija*-sukeltas U(VI) sumažėjimas per mėnesius (Anderson ir kt., 2003; Lovley ir kt., 2005). Reaktyvūs barjerai, sudaryti iš pralaidžių maistinių medžiagų zonų, taip pat naudojami siekiant nukreipti gruntinio vandens srautą per mikrobų gausias zonas. Dirvožemyje tokie nešėjai kaip bioplėvelės karkasai, granulės arba organinis kompostas palaiko mikrobų kolonizaciją ir sąlyti su teršalais, o tai yra labai svarbu sudėtingose matricose, kur maistinės medžiagos ir mikrobai gali pasiskirstyti netolygiai (Semple ir kt., 2004). Projektuojant tiekimo sistemas, reikia atsižvelgti į poringumo, pralaidumo ir sezoninių sąlygų kintamumą, kad valymo rezultatai būtų nuoseklūs.

D. Stebėjimas ir sekimas

Būtina stebėti ne tik teršalų koncentraciją. Komandos periodiškai atlieka cheminę analizę (pvz., teršalų kiekį, ištirpusį deguonį, pH, metabolinius šalutinius produktus) įvairiuose gyliuose ir vietose. Be to, molekulinės biologijos įrankiai (MBT), tokie kaip kPGR, matuoja funkcinių genų gausą (pvz., naftaleno sukcinato sintazės, *gltA* citrato sintazei), o RNR pagrįsti tyrimai atspindi aktyvų mikrobų metabolizmą (Madison ir kt., 2022).

Svarbiausia, kad *Geobacter* citrato-sintazės geno (*gltA*) transkriptų padidėjimas glaudžiai susijęs su acetato tiekimu ir urano redukcijos aktyvumu lauko dislokavimo metu (Methe ir kt., 2005; Holmes ir kt., 2007). Tyrėjai taip pat stebi oksidacinio streso žymenis, siekdami užtikrinti, kad būtų palaikomos anaerobinės sąlygos ir deguonies antplūdis neslopintų mikrobų skaidymo (Holmes ir kt., 2007).

E. Rezultatų vertinimas ir skalavimas

Teršalų mažinimo rodiklių, tokių kaip laikas iki atitikties reglamentams, analizė padeda įvertinti lauko gyvybingumą. Pavyzdžiui, urano lygis nukrito žemiau saugos ribų per maždaug 40 dienų po acetato stimuliacijos (Lovley ir kt., 2005). Lygiagretus ekologinis monitoringas, įskaitant mikrobų įvairovės pokyčius, vietinių bendrijų atsparumą ir toksiškų šalutinių produktų nebuvimą, patvirtina ekosistemos atkūrimą (Xiong ir kt., 2025). Jei lauko bandymai sėkmingi, planuojant plataus masto diegimą atsižvelgiama į sezoninę srautų dinamiką, maistinių medžiagų logistiką, reguliavimo institucijų patvirtinimus ir suinteresuotųjų šalių pritarimą. Lauko rezultatai informuoja apie sąnaudų ir naudos analizę bei ilgalaikius stebėsenos reikalavimus.

Siekdami geriau suprasti, kaip planuojamas ir optimizuojamas lauko masto mikrobų bioremediacija, tyrėjai dažnai nagrinėja pažangias ir naujai atsirandančias koncepcijas, kurios pagerina valymo strategijų tikslumą ir efektyvumą. Šios papildomos temos atspindi pažangiausius mokslinius metodus ir suteikia platesnį kontekstą studentams, besidomintiems aplinkosaugos inovacijomis.

a. Mikrobų pernaša ir biokonvekcija

Daugelyje užterštų vietų, ypač dirvožemyje ir požeminiuose vandeninguosiuose sluoksniuose, mikrobai ne tik užsibūna ten, kur yra. Jie juda, kartais pasyviai tekėdami vandenyje, o kartais – savo pačių judėjimo būdu. Biokonvekcija reiškia mikrobų populiacijų judėjimą reaguojant į deguonies ar cheminius gradientus. Šie savaime organizuojami srautai gali padėti mikrobams pasiekti gilesnius ar sunkiau prieinamus teršalus.

Supratimas, kaip mikrobai juda per porėtas medžiagas, tokias kaip smėlis ar molis, padeda mokslininkams sukurti geresnes įpurškimo sistemas arba pasirinkti didesnio judrumo mikrobų padermes. Pavyzdžiui, naujausi modeliavimo tyrimai tyrė, kaip bakterijos pasiskirsto požeminio vandens sistemose, siekiant optimizuoti teršalų skaidymą, pabrėžiant skysčių dinamikos svarbą mikrobų valyme (Banerjee ir kt., 2024).





b. Bioplėvelės kaip lauko strategija

Mikrobai dažnai prisitvirtina prie paviršių ir sudaro bioplėvelės, ploni mikrobų bendrijų sluoksniai, apgaubti apsaugine matrica. Lauko sąlygomis bioplėvelės gali būti naudojamos strategiškai: jos padeda mikrobams išlikti savo vietose, atsispirti aplinkos poveikiui ir efektyviau sąveikauti su teršalais. Bioplėvelėmis pagrįsti metodai dažniausiai naudojami nuotekų valyme ir dabar yra išbandomi dirvožemio ir nuosėdų valymui.

Pavyzdžiui, biobarjerinėse sistemose mikrobai formuoja bioplėveles palei pralaidžias požemines sienas. Užterštam gruntiniam vandeniui tekant, bioplėvelėje esantys mikrobai skaido teršalus, tokius kaip sunkieji metalai ar angliavandeniliai. Šis metodas ypač naudingas, kai reikia ilgalaikio arba pasyvaus atkūrimo dideliuose arba sunkiai pasiekiamuose plotuose.

c. Taršos sukeltas bendruomenės tolerancijos lygis (PICT)

Mokslininkai taip pat naudoja metodą, vadinamą Taršos sukeltas bendruomenės tolerancijos lygis (PICT) siekiant įvertinti, kaip užterštoje aplinkoje esančios mikrobų bendruomenės prisitaiko laikui bėgant. Ši koncepcija padeda tyrėjams įvertinti ekosistemos sveikatą ir atsparumą bei nustatyti, ar į lauką patekę mikrobai netyčia keičia natūralią mikrobų pusiausvyrą.

Pavyzdžiui, jei vietinė dirvožemio mikrobų bendruomenė laikui bėgant tampa atsparesnė teršalui, tai gali rodyti sėkmingą adaptaciją arba nuolatinį aplinkos stresą. PICT analizė padeda mokslininkams stebėti mikrobų evoliuciją ir užtikrina, kad ekosistema iš tikrųjų atsigauna, o ne tik tampa atspari.

d. Daugiafunkciniai lauko analizės įrankiai

Šiuolaikinis aplinkos mokslas vis labiau remiasimultomika, genomikos, transkriptomikos, proteomikos ir metabolomikos derinys, siekiant suprasti, kokie mikrobai yra, kiek jie aktyvūs ir kokias chemines medžiagas jie gamina. Šie įrankiai leidžia mokslininkams sekti ne tik mikrobų išgyvenimą lauke, bet ir jų elgesį realiuoju laiku.

Pavyzdžiui, neseniai atliktame tyrime, naudojant aplinkos DNR (eDNR) ir RNR seką, buvo stebimas mikrobų aktyvumas naftos užterštų dirvožemių bioremediacijos metu. Šie metodai padeda užtikrinti, kad mikrobai ne tik būtų, bet ir aktyviai skaidytų teršalus, o proceso metu negamintų kenksmingų šalutinių produktų.

e. Prognozinis modeliavimas ir imitavimas

Prieš didelio masto diegimą mokslininkai naudoja kompiuteriniai modeliavimai ir prognozavimo modeliaiprognozuoti, kaip mikrobai elgsis skirtingomis aplinkos sąlygomis. Šie modeliai atsižvelgia į tokius veiksnius kaip vandens srautas, maistinių medžiagų kiekis, temperatūra ir teršalų koncentracija.

Tokios priemonės padeda planuoti geresnius bandomuosius tyrimus, nustatant idealias sąlygas mikrobų augimui ir aktyvumui. Pavyzdžiui, modeliavimas gali numatyti, ar maistinių medžiagų įpurškimo strategija pasieks užterštą zoną, ar išsisklaidys per greitai. Derindami laboratorinius duomenis ir aplinkos matavimus, prognozavimo modeliai sumažina neapibrėžtumą ir pagerina sėkmės rodiklius.

Perėjimas iš laboratorijos į lauką yra sudėtingas, bet esminis bioremediacijos kelias. Kiekvienas žingsnis – nuo tinkamos vietos ir mikrobų pasirinkimo iki stebėjimo, rezultatų analizės ir plėtos planavimo – užtikrina, kad valymo metodas būtų moksliškai pagrįstas, saugus aplinkai ir praktiškai veiksmingas nenusipėjamomis gamtinėmis sąlygomis. Tokių potemių kaip mikrobų pernaša ir omika integravimas padeda parodyti, kaip pažangūs įrankiai dar labiau patobulina šį procesą.





4. Realus pasaulio atvejų analizės

Prieš pradėdant nagrinėti konkrečius pavyzdžius, svarbu suprasti realaus pasaulio projektų, susijusių su mikrobų bioremediacija, tyrimo tikslą:

Realaus pasaulio atvejų tyrimai pateikia konkrečių įrodymų, kaip bioremediacijos strategijos yra kuriamos, įgyvendinamos ir vertinamos sudėtingomis aplinkos sąlygomis. Jie atskleidžia, kas veikia, kokie iššūkiai kyla ir kaip mokslininkai pritaiko metodus vietos ekosistemoms.

Žemiau rasite du gerai dokumentuotus lauko projektus, vieną, skirtą uranu užteršto gruntinio vandens tyrimams, o kitą – jūrinių naftos išsiliejimų valymui. Kiekviename iš jų parodyta, kaip mikrobai buvo sėkmingai panaudoti sprendžiant realias taršos problemas.

4.1 atvejo analizė: Uranu užterštas požeminis vanduo kasybos paveiktame vandeningajame sluoksnyje

- **Problema ir vieta:** Anksčiau urano kasybos paveiktuose požeminiuose vandenyse buvo pavojingai didelis tirpaus urano (U(VI)) kiekis, keliantis pavojų žmonių sveikatai ir ekosistemoms.
- **Metodas:** Mokslininkai skatino vietinius *Geobakterijarūšys*, ypač *Geobacter metallireducens*, į vandeningąjį sluoksnį įpurškiant acetato kaip elektronų donoro (turn0search21). Tai sustiprino mikrobų vykdomą U(VI) redukciją iki mažiau tirpaus U(IV), kuris iškrenta iš požeminio vandens nusėda.
- **Rezultatai:** Maždaug per 40 dienų žemesnio lygio gręžiniuose urano lygis sumažėjo iki mažesnio nei reglamentuojamas sveikatos rizikos lygis, o atnaujinamuose gręžiniuose urano lygis nepakito, o tai pabrėžia regioninį efektyvumą („turn0search21“). Biometrinis ir molekulinis stebėjimas patvirtino padidėjusį aktyvumą. *Geobakterija*, ypač streso atsako genų, tokių kaip *koisrA* (turn0search6, turn0search14).
- **Reikšmė:** Šis bandomasis lauko tyrimas patvirtino, kad stimuliuojant vietines mikrobų populiacijas galima saugiai ir efektyviai imobilizuoti uraną in situ, kuo mažiau sutrikdant ekologinę veiklą.

4.2 atvejo analizė: Jūrinės naftos išsiliejimo bioremediacija Meksikos įlankoje

- **Problema ir kontekstas:** „Deepwater Horizon“ naftos išsiliejimo metu plačiai paplitusi angliavandenilių tarša kėlė grėsmę jūrų gyvūnijai, pakrančių ekosistemoms ir vietos žuvininkystei.
- **Metodas:** Po išsiliejimo atlikus mikrobų stebėseną pastebėtas vietinių naftą skaidančių bakterijų padidėjimas, ypač *Alcanivorax borkumensis* ir *Oleispira antarctica*. Jų augimą dar labiau skatino maistinių medžiagų (azoto ir fosforo) pridėjimas, siekiant palaikyti biosurfaktantus gaminančias mikrobų bendruomenes (turn0search1, turn0search26, turn0search22).
- **Rezultatai:** Šios vietinės populiacijos greitai tapo dominuojančiomis paveiktose zonose, paspartindamos angliavandenilių skaidymąsi. Lauko tyrimai patvirtino veiksmingą teršalų skaidymą neįvedant svetimų rūšių („turn0search1“, „turn0search7“).
- **Reikšmė:** Šis projektas parodė, kad tinkamai stimuliuojamos vietinės jūrų bakterijos gali atlikti svarbų vaidmenį natūraliai ir tvariai valant naftos išsiliejimus.





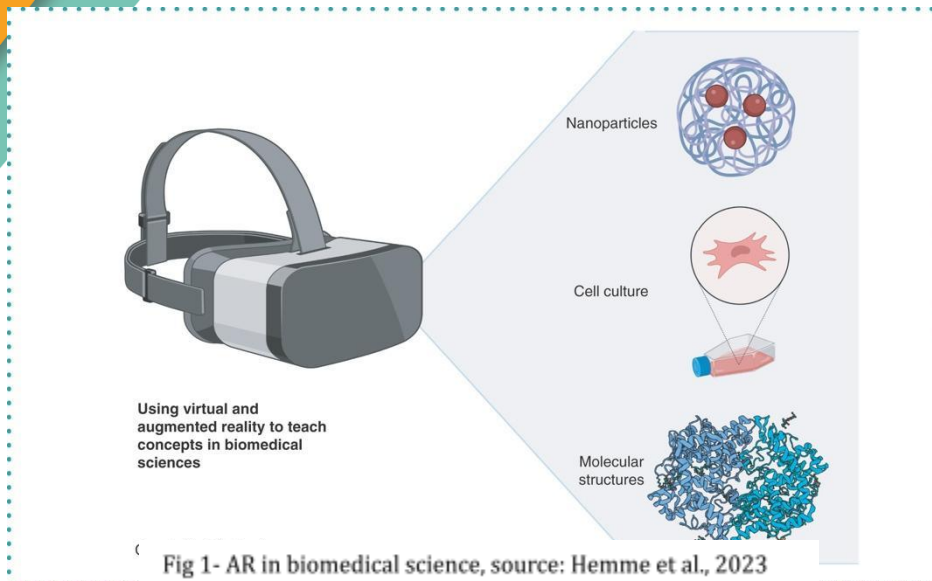
Šie du realaus pasaulio pavyzdžiai rodo, kaip bioremediacijos strategijos yra pritaikytos konkrečioms teršalams ir ekosistemoms. Abiejuose projektuose mokslininkai dirbo su vietinėmis mikrobu bendruomenėmis, stimuliuodami ir stebėdami jų natūralią veiklą, kad saugiai ir ekonomiškai pasiektų išmatuojamų valymo rezultatų. Tokie lauko atvejų tyrimai leidžia studentams pamatyti, kaip biologija, chemija ir aplinkos mokslas susijungia sprendžiant taršos problemas.

Stimuliacija vietoje *Geobakterija* urano šalinimo rūšys: lauko demonstracija (2003 m.), įskaitant genų ekspresiją *coiA* (Lovley ir kt.)

- Lauko tyrimas, rodantis *Alcanivorax borkumensis* dominavimas ir aktyvumas jūrų naftos išsiliejimo zonoje (po „Deepwater Horizon“ operacijos)
- Angliavandenilių bioremediacijos mechanizmų ir mikrobu atsako į realius naftos išsiliejimo atvejus apžvalga. [„Frontiers“ + 15 min. per mėnesį + 15 min. per mėnesį + 15 min. per mėnesį](#)
- Daugiau apie *G. metallireducens* urano ir vanadžio kiekio mažinimas užterštuose vandeninguosiuose sluoksniuose (Vikipedijos santrauka) [NRC žiniatinklio svetainė + 13 Vikipedija + 13 „ScienceDirect“ + 13](#)

AR integracija į mikrobu bioremediacijos lauko bandymus





Mikrobinio bioremediacijos strategijoms pereinant iš laboratorinių įrenginių į sudėtingą lauko aplinką, mokslininkai susiduria su keliais iššūkiais: mikrobų elgesio stebėjimas vietoje, erdvių ir laiko duomenų perdavimas suinteresuotosioms šalims ir ekosistemos saugumo užtikrinimas. Papildytoji realybė (PR) vis dažniau tirama kaip skaitmeninė sąsaja, galinti pagerinti vizualizaciją, stebėjimą realiuoju laiku ir duomenų interpretavimą aplinkos moksluose. Nors PR plačiai taikoma aplinkosauginiame švietime ir pramonės stebėsenoje, jos naudojimas mikrobų bioremediacijoje populiarėja, o tai skatina geoprinių duomenų integravimo, „omikos“ vizualizacijos ir lauko skaitmeninių sąsajų pažangą.

1. AR mikrobų aktyvumui ir teršalų skaidymui vizualizuoti

AR gali padėti mokslininkams vizualizuoti mikrobų sąveiką su teršalais 3D formatu, uždengiant realaus pasaulio aplinką. Lauko bandymų metu labai svarbu suprasti, kur ir kaip veikia mikrobai, ypač požeminėse arba vandens sistemose. Pavyzdžiui, atliekant urano bioremediaciją vietoje, svarbu suprasti erdvinės zonas, kuriose *Geobakterija* Norint įvertinti ištaisymo sėkmę, labai svarbu, ar rūšys yra aktyvios. Tyrimai parodė, kad AR gali būti naudojama perdengimui aplinkos geoprinių duomenys...pvz., teršalų koncentracijas, gruntinio vandens srautą ar maistinių medžiagų pasiskirstymą, fizinėse vietose naudojant planšetinius kompiuterius arba AR akinius (Silva ir Gültekin, 2021). Tai leidžia lauko tyrėjams „pamatyti“, kur tikimasi mikrobų aktyvumo piko, ir padeda susieti degradacijos našumą su aplinkos kintamaisiais, tokiais kaip pH, redokso potencialas ar biologinis prieinamumas.

2. AR ir multi-omikos integravimas lauko stebėjime

Vienas iš pagrindinių iššūkių atliekant lauko bandymus yra interpretavimas daugi funkciniai duomenys (pvz., metagenomika, transkriptomika), surinkti iš mėginių ėmimo gręžinių ir dirvožemio kernų. Tradiciškai šie duomenų rinkiniai analizuojami laboratorijose ir vizualizuojami kompiuteriuose. Tačiau AR gali leisti realiuoju laiku, vietos pagrindu vizualizuoti mikrobų genų raišką arba gyventojų skaičiaus pokyčiai.





Pavyzdžiui, naudodami papildytosios realybės (AR) sąsają, tyrėjai galėtų nukreipti įrenginį į stebėjimo gręžinį ir peržiūrėti santykinį su urano redukcija susijusių genų gausumą (pvz., *ko*, *sodA*) arba angliavandenilių skaidymosi kelius naftos paveiktuose dirvožemiuose (Guo ir kt., 2023). Šis metodas ne tik palaiko sudėtingų mikrobų duomenų erdvinę interpretaciją, bet ir palengvina lauko komandų ir laboratorijos analitikų bendradarbiavimą.

Naujausi mikrobų ekologijos tyrimai pabrėžė AR naudą **metagenominių duomenų pateikimas kontekste**, gerinant mokslinę komunikaciją ir sudarant sąlygas intuityvesniam sprendimų priėmimui stebint objektą (Wang ir kt., 2022).

3. AR rizikos vertinimui ir ekologiniam saugumui

Lauko masto mikrobų tyrimai turi spręsti ekologinius ir saugos klausimus, ypač kai naudojami genetiškai modifikuoti organizmai (GMO). AR gali suteikti vizualinį vaizdą **rizikos žemėlapių** paryškinti:

- Potencialaus mikrobų peraugimo sritys,
- Pakraščių zonos, kuriose galėtų plisti introdukuoti mikrobai,
- Degradacijos židiniai arba toksiškų šalutinių produktų zonos.

Šis metodas atspindi papildytosios realybės (AR) naudojimą sveikatos priežiūros ir biologinės saugos srityse, kur realaus laiko perdangos naudojamos užterštumo zonoms sekti (pvz., „Clean-AR“ skirta oro taršos rizikos žemėlapiams ligoninėse sudaryti; Schmidt ir kt., 2021). Šios strategijos pritaikymas aplinkos bioremediacijai galėtų pagerinti reagavimą lauke ir izoliavimo planavimą.

4. AR palaikoma komunikacija ir suinteresuotųjų šalių įtraukimas

Didelio masto bioremediacijos projektuose dažnai dalyvauja daug suinteresuotųjų šalių: mokslininkai, aplinkosaugos reguliuotojai, žemės savininkai ir vietos bendruomenės. **AR pasirodė esanti veiksminga mokslo komunikacijos priemonė**, leidžiant ne specialistams suprasti sudėtingas atkūrimo strategijas (Garzón ir kt., 2019).

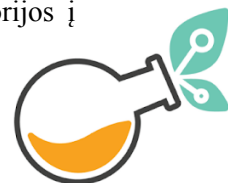
Bandomuosiuose tyrimuose AR buvo naudojama siekiant **siūlomų lauko intervencijų planų perdengimas**, pavyzdžiui, biologinių barjerų zonas arba maistinių medžiagų įpurškimo gręžinius, fiziniuose žemėlapiuose arba tiesioginėse lauko sąlygose. Tai leidžia suinteresuotosioms šalims vizualizuoti galimus rezultatus, įvertinti vietos atkūrimo terminus ir prasmingai dalyvauti tyrimų procese.

Nors mikrobų bioremediacijos srityje ji vis dar atsiranda naujų galimybių, **AR technologijos yra pasirengusios gerokai pagerinti lauko masto operacijas**, ypač integruojant su omikos duomenimis, geoprinės analizės ir ekologinio monitoringo rezultatais. Šios programos puikiai dera su perėjimu „iš laboratorijos į lauką“, todėl nematomi biologiniai ir cheminiai procesai tampa prieinami, išmatuojami ir suprantami realiuoju laiku. Aplinkos tyrimams toliau skaitmenėjant ir demokratizuojantis, papildytoji realybė išsiskiria kaip perspektyvi priemonė, padedanti užtikrinti tiek mokslinį tikslumą, tiek viešąją skaidrumą.

5. AR realaus pasaulio pavyzdžiai aplinkosaugos ar biologijos srityse

Papildytoji realybė (AR) sparčiai vystėsi iš vizualinio įsikišimo įrankio į funkcinę sąsają, skirtą sudėtingam moksliniam stebėjimui ir sprendimų priėmimui. Aplinkos moksle ir biotechnologijose AR pradeda susieti fizinius kraštovaizdžius su realaus laiko duomenimis, suteikdama tyrėjams, inžinieriams ir sprendimus priimančioms asmenims galimybę sąveikauti su nematomais biologiniais ar cheminiais procesais dominančioje vietoje.

Nors tiesioginis AR taikymas mikrobų bioremediacijoje vis dar vystomas, vis daugiau realių pavyzdžių **aplinkos monitoringas, taršos kontrolė, duomenų vizualizacijai ir rizikos vertinimas** demonstruoja galingą papildytosios realybės (AR) potencialą tobulinant „iš laboratorijos į

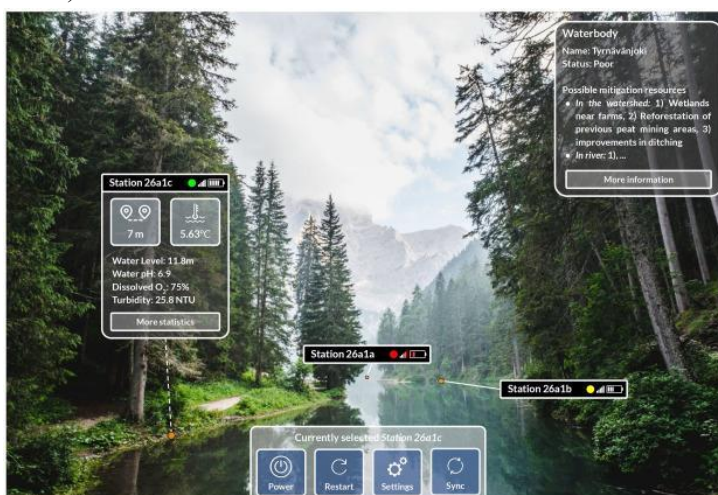


lauką“ procesus. Žemiau pateikiami pagrindiniai pavyzdžiai, susiję su mikrobų valymu realiose ekosistemose.

5.1. AR, skirta vietoje stebimai aplinkai ir duomenų vizualizacijai

Apžvalga

Aplinkos stebėseną lauko vietose paprastai apima jutiklių diegimą, mėginių rinkimą ir analizės atlikimą ne vietoje – metodus, kurie dažnai sulėtina reagavimo laiką ir riboja erdvinį kontekstą. Mikrobinio bioremediacijos atveju tai tampa ypač problemiška, nes mikrobų aktyvumas, redokso sąlygos ar teršalų koncentracijos gradientai yra daugiausia nematomi ir labai dinamiški. **Papildytoji realybė (AR)** sprendžia šias problemas, suteikdamas galimybę realiuoju laiku vizualizuoti erdvėje gautus lauko duomenis, leisdamas mokslininkams sąveikauti su aplinkos informacija ten, kur ji yra aktualiausia (Wang ir kt., 2022; Pokrić ir kt., 2012).



2 pav. HMD pagrindu sukurtos papildytos realybės (AR) programos, skirtos vandens kokybei vizualizuoti, koncepcija. Šaltinis: Cao ir kt., 2024 m.

AR sistemos gali sujungti:

- Aplinkos jutiklių duomenys (pvz., pH, ištirpęs deguonis, temperatūra),
- GIS pagrindu parengti teritorijų išdėstymai (pvz., teršalų šaltinių zonos),
- Prognozavimo modeliai (pvz., COMSOL/MODFLOW),
- Mikrobų aktyvumo modeliai (pvz., eDNR pagrįstas gausumas arba genų raiškos profiliai).

Tai leidžia tyrėjams, aplinkos inžinieriams ar objektų vadovams **„matyti“ cheminius ir biologinius procesus** uždengtas realiame lauke, sudarant sąlygas savalaikėms ir įrodymais pagrįstoms intervencijoms (Zhang ir kt., 2023).

Mokslinis taikymas mikrobų bioremediacijoje

Mikrobinio valymo projektuose AR gali:

- Vaizdinis **realaus laiko koncentracijų** teršalų, tokių kaip uranas, angliavandeniliai ar nitratai, tiesiai ant lauko paviršiaus;
- Perdangos **mikrobų kolonizacijos zonos** (remiantis qPCR, eDNA arba omics duomenimis) fizinėse mėginių ėmimo vietose;





- **Rodyti biologinio prieinamumo zonas**, kur teršalai yra prieinami arba nepasiekiami mikrobų skaidymui dėl dirvožemio poringumo arba rišamosios būsenos (Guo ir kt., 2023);
- **Vizualiai pateikti įpurškimo šulinio įtaką**, pvz., parodant, kaip acetatas plinta po žeme ir stimuliuoja *Geobakterija* populiacijose (Lovley ir kt., 2003; Zhang ir kt., 2023).

Šios programos keičia bioremediacijos stebėseną iš reaktyvios į proaktyvią: galimus gedimus galima nustatyti anksti, o mokslininkai gauna realaus laiko mikrobų aktyvumo ir teršalų elgsenos žemėlapi.

Realaus pasaulio AR sistemų pavyzdžiai

ekoNET: AR technologija paremta aplinkos stebėjimo platforma

Sukurta kaip daiktų interneto pagrindu sukurta taršos stebėjimo sistema, **ekoNET** integruoja mobiliąją papildytąją realybę (AR) su aplinkos jutikliais, kad būtų galima vizualizuoti oro ir vandens kokybę realiuoju laiku vietoje (Pokrić ir kt., 2012). Vartotojai skenuoja aplinką naudodami mobiliuosius įrenginius, kad peržiūrėtų teršalų, tokių kaip CO₂, lygius, NE₂ ir drumstumas.

Bioremediacijos pasekmės: Mikrobinių lauko bandymų metu panaši sistema galėtų būti sukonfigūruota taip, kad būtų rodomi šių objektų žemėlapiai:

- Požeminių teršalų srautai,
- Maistinių medžiagų difuzijos zonos,
- Reaktyviosios barjeros, sustiprintos mikrobų konsorciomis.

Požeminio vandens vizualizavimas naudojant AR

Zhang ir kt. (2023) sukūrė papildytosios realybės (AR) įrankį, skirtą gruntinio vandens srautui, teršalų sklaidai ir valymo infrastruktūrai vizualizuoti naudojant georeferencinius 3D modelius. Ši sistema leido vartotojams suprasti erdvinius ryšius tarp teršalų šaltinių, švartų zonų ir mikrobų aktyvumo zonų realiose pramonės vietovėse.

Taikymas lauko bandymams: AR galėtų padėti bandomuosiuose mikrobų valymo objektuose, parodant, kaip teršalų koncentracijos kinta erdvėje po mikrobų inokuliacijos ar maistinių medžiagų injekcijos, tiesiogiai vietoje, nereikalaujant konsultuotis su GIS platformomis ar laukti laboratorinių tyrimų rezultatų.

Integracija su daugiaomikos ir modeliavimo modeliais

AR turi vis didesnę potencialą palaikyti **daugiaomikos pagrindu sukurta lauko interpretacija** Wang ir kt. (2022 m.) pademonstravo papildytosios realybės (AR) integraciją su metagenomika, leidžiančią vartotojams perdengti funkcinę genų raišką (pvz., *ko*, *alkB*, *narG*) į konkrečias GPS pažymėtas vietas, sukuriant erdvinius mikrobų funkcijų vaizdus.

Aktualumas mikrobų lauko bandymams:

- Lauko komandos galėtų realiuoju laiku vizualizuoti su teršalų skaidymu susijusį mikrobų aktyvumą.
- Omikos duomenys galėtų būti naudojami siekiant patikrinti, ar mikrobai aktyviai mažina teršalus, ar tik išgyvena.

Maistinių medžiagų sklaidos ar mikrobų pernašos prognozavimui galima naudoti tokius modeliavimo įrankius kaip „COMSOL“ ar „MODFLOW“. Kartu su papildyta realybe šie modeliai gali **projekto numatomus rezultatus tiesiai į statybvietai**, padedant planuoti įpurškimo schemas ir stebėjimo stotis (Silva ir Gültekin, 2021).

Bioremediacijos praktikos privalumai

1. Sprendimų priėmimas realiuoju laiku

Derindamos vietoje pateiktas vizualizacijas su tiesioginiais duomenimis, lauko komandos gali





greitai koreguoti bioremediacijos strategijas (pvz., keisti maistinių medžiagų įpurškimą, mėginių ėmimo planus).

2. Pagerintas erdvinis suvokimas

Cheminių gradientų arba mikrobu gausos zonų vizualizavimas tiesiogiai lauke padeda tiksliau nustatyti valymo priemones.

3. Patobulintas bendravimas

Suinteresuotosios šalys (pvz., žemės savininkai, reguliavimo institucijos) gali geriau suprasti nematomus procesus, stiprinti pasitikėjimą ir sudaryti sąlygas aiškesnei rizikos komunikacijai.

4. Saugos ir izoliacijos stebėsena

AR gali padėti nustatyti zonas, kuriose gali peraugti mikrobu perteklius arba atsirasti antrinių teršalų, taip užtikrinant biologinį saugumą tais atvejais, kai naudojami genetiškai modifikuoti organizmai (Schmidt ir kt., 2021).

5.2. Įtekančios nuotekos: mikrobu ir cheminės dinamikos AR modeliavimas

Sukūrė Silva & Gültekin (2021), *Turtingi nuotekos* yra papildytosios realybės (AR) programėlė, imituojanti aplinkos sąveiką tarp teršalų ir mikrobu populiacijų. Modelis apima:

- Maistinių medžiagų dinamika,
- Mikrobu augimo fazės,
- Teršalų skaidymosi greitis.

1. Maistinių medžiagų dinamika

Apibrėžimas:

Maistinių medžiagų dinamika reiškia **esminių maistinių medžiagų judėjimas, transformacija, prieinamumas ir įsisavinimas** (pvz., anglies, azoto, fosforo, deguonies arba elektronų donorų, tokių kaip acetatas), kurie palaiko mikrobu gyvybę ir daro įtaką jų aktyvumui užterštoje aplinkoje.

Bioremediacijos kontekste:

- Lauko valymui naudojami mikroorganizmai auga ir metabolizuoja teršalus, naudodamiesi turimomis maistinėmis medžiagomis.
- Kartais maistinės medžiagos **yanatūraliai esantis**, tačiau daugeliu atvejų jie turi būti **pridėta dirbtinai** (biostimuliacija) siekiant skatinti mikrobu skaidymą.
- Pavyzdžiui, uranu užterštuose vandeninguosiuose sluoksniuose, **acetatas** suleidžiama stimuliuoti *Geobakterija* rūšys, kurios jį naudoja kaip elektronų donorą tirpiam U(VI) redukuoti į netirpų U(IV) (Lovley ir kt., 2003).

AR modeliavime:

- Maistinių medžiagų dinamika vaizduojama kaip **plitimo zonos arba koncentracijos gradientai**, kurie laikui bėgant keičiasi.
- Studentai arba tyrėjai gali matyti, kaip **maistinių medžiagų turtingos vietovės** skatina didesnę mikrobu augimą ir teršalų skaidymą.
- Simuliacijoje taip pat gali būti rodoma **konkurencija dėl maistinių medžiagų**, darantys įtaką tam, kurie mikrobai dominuoja.

2. Mikrobu augimo fazės

Apibrėžimas:

Mikrobu augimo fazės apibūdinamos **keturių etapų ciklas**, kurių mikrobu populiacijos paprastai patiria patekusios į naują aplinką ar substratą:





1. **Vėlavimo fazė**– Adaptacijos laikotarpis, per kurį mikrobai prisitaiko prie naujų sąlygų (nėra augimo).
2. **Logaritminė (eksponentinė) fazė**– Greitas dauginimasis dėl gausaus maistinių medžiagų kiekio.
3. **Stacionari fazė**– Augimas lėtėja, nes mažėja maistinių medžiagų ir kaupiasi atliekos.
4. **Mirties fazė**– Mikrobai žūsta dėl išteklių trūkumo arba susikaupusių toksiškų šalutinių produktų.

Bioremediacijos kontekste:

- Augimo fazių supratimas yra labai svarbus **lauko intervencijų laiko nustatymas** pavyzdžiui, pakartotinė inokuliacija arba pakartotinis maistinių medžiagų naudojimas.
- Pavyzdžiui, jei mikrobų populiacija yra stacionarioje fazėje, teršalų skaidymas sustos be tolesnių veiksmų.

AR modeliavime:

- Šios fazės vaizduojamos vizualiai, pvz. **mikrobų kolonijų burbuliukai plečiasi ir stabilizuojasi** arba keičia spalvą, kai jie pereina į skirtingas fazes.
- Vartotojai gali **pakoreguoti sąlygas (pvz., temperatūrą, maistinių medžiagų patekimą)** ir stebėti, kaip keičiasi augimo fazė, padedant jiems suprasti **subtilus balansas** reikalingų sėkmingai bioremediacijai lauko mastu.

3. Teršalų skaidymosi rodikliai

Apibrėžimas:

Teršalų skaidymosi greitis yra **greitis, kuriuo konkretus teršalas yra suskaidomas arba transformuojamas** į mažiau kenksmingas medžiagas mikrobiniiais arba cheminiais procesais.

Bioremediacijos kontekste:

- Mikrobai gali skaidyti teršalus šiais būdais:
 - o **Aerobinis skaidymas** (su deguonimi) – pvz., angliavandeniliai, susidarantys *Pseudomonas* spp.
 - o **Anaerobinis skaidymas** (be deguonies) – pvz., uranas arba nitratas *Geobakterija* spp.
- Degradacijos greitį įtakojantys veiksniai:
 - o Mikrobinių padermių efektyvumas,
 - o Temperatūra ir pH,
 - o Teršalų koncentracija ir cheminė forma,
 - o Maistinių medžiagų prieinamumas ir redokso sąlygos.

AR modeliavime:

- Degradacijos rodikliai pateikiami per **vizualinio skilimo kreivės, teršalų srauto spalvos pokyčiai** arba **laiko animacijos** rodo, kiek teršalų išlieka laikui bėgant.
- Vartotojai gali stebėti, kaip besikeičiančios aplinkos sąlygos (pvz., įpurškiant daugiau maistinių medžiagų ar keičiant pH) veikia degradacijos laiką.

Kodėl šie trys yra tarpusavyje susiję

Šie trys procesai, **maistinių medžiagų prieinamumas, mikrobų augimas ir teršalų skaidymas**, suformuokite **dinaminis grįžtamasis ryšys** bioremediacijoje:

1. **Maistinių medžiagų prieinamumas** paveikia...
2. **Mikrobų augimas**, kuris vairuoja...
3. **Teršalų skaidymas**, kurie gali sunaudoti maistines medžiagas ir gaminti šalutinius produktus, paveikdami mikrobų sveikatą.

Šios sistemos modeliavimas AR leidžia vartotojams **pamatyti šias tarpusavio priklausomybes** veikiant, suteikiant gilesnį supratimą aplinkos mokslininkams, studentams ar lauko technikams.





Pagrindinės savybės:

- Vizualizuoja cheminės koncentracijos pokyčius laikui bėgant;
- Imituoja mikrobų reakcijas esant skirtingiems aplinkos stresoriams;
- Veikia mobiliosiose AR platformose (pvz., išmaniuosiuose telefonuose, planšetiniuose kompiuteriuose).

Aktualumas bioremediacijai:

Ši programėlė yra ankstyvas, bet praktiškas požiūris į **modeliu pagrįsta AR, skirta korekcinį procesų imitavimui**, padėdamos tyrėjams ar studentams numatyti rezultatus lauko sąlygomis. Realiose valymo projektuose tokios priemonės gali padėti planuoti įpurškimo schemas ar maistinių medžiagų pakeitimus, parodydamos numatomą mikrobų elgesį laikui bėgant ir erdvėje.

5.3. AR miesto ir pramonės taršos suvokimui

Italijos tyrėjai įdiegė papildytosios realybės (AR) sistemą, skirtą visuomenės informuotumui apie oro taršą didinti. Sistema apima **Oro kokybės indekso (OKI) rodikliai ir teršalų šaltiniai** fizinėse vietose naudojant GIS ir mobiliąją papildytąją realybę.

Atvejo analizė:

- Markės regionas, Italija (Sanità ir kt., 2024): Sistema integruoja palydovinius duomenis, miesto jutiklius ir oro kokybės indekso (AQI) modelius, leisdamą vartotojams „vaikščioti“ po užterštas zonas ir vizualizuoti NO₂ lygius, PM_{2,5} ir ozono kiekį realiuoju laiku.

Aktualumas bioremediacijai:

Nors šis naudojimo atvejis buvo sukurtas miesto oro taršai tirti, jis iliustruoja **AR vizualinė galia parodant nematomas aplinkos grėsmes**. Panašiai, AR gali būti pritaikyta mikrobų lauko vietose, kad būtų parodyti požeminiai sunkiųjų metalų ar naftos kamuoliai, mikrobų aktyvumo židiniai arba besivystančios redokso zonos, turinčios įtakos teršalų biologiniam prieinamumui.

5.4. AR interaktyviam lauko planavimui vandens ir dirvožemio projektuose

Pramoninio atkūrimo srityje logistiškai sudėtinga valdyti kelis įterpinius elementus, mėginių ėmimo gręžinius, įpurškimo taškus ir vietinių rūšių zonas. AR gali padėti:

- Infrastruktūros elementų klojimas vietoje;
- Pažangos stebėjimas (pvz., išvalytos zonos, mikrobų gausa);
- Įpurškimo srutų ir degradacijos fronto judėjimo modeliavimas.

Pavyzdys:

- **Mobilioji papildytoji realybė aplinkos stebėsenai** (Stojanovic ir kt., 2012): Pademonstravo mobiliųjų papildytosios realybės (AR) platformų naudojimą aplinkos modeliavimui, susietam su georeferenciniais duomenimis, vizualizuoti.

Aktualumas bioremediacijai:

Šis modelis gali tiesiogiai pagerinti **lauko logistiką ir komunikaciją** mikrobų valymo srityje, leidžiant realiuoju laiku patikrinti, kurias zonas reikia pakartotinai inokuliuoti mikrobais, kur mažėja teršalų kiekis arba kaip po valymo keičiasi mikrobų bendrijos.





5.5. „Clean-AR“: AR rizikos žemėlapių sudarymui ir užterštumo kontrolei

Iš pradžių sukurtas lignonėms, siekiant valdyti ore plintančių ligų riziką, **Švarus AR** naudoja AR akinius ir 3D modeliavimą, kad galėtų:

- Nustatyti užteršimo kelius.
- Pažymėkite didelės rizikos paviršius.
- Stebėkite patogenų plitimą realiuoju laiku (Schmidt ir kt., 2021).

Aktualumas bioremediacijai:

Lauko masto mikrobu taikymuose, ypač su genetiškai modifikuotais mikrobais, sekimas **ekologinio sulaikymo zonos** yra būtinas. AR taip pat galėtų būti naudojama:

- Pažymėkite ribas, kuriose introdukuoti mikrobai neturėtų plisti.
- Nustatykite bioplėvelės peraugimo zonas.
- Įspėti tyrėjus apie nenumatytą mikrobu migraciją už gydymo zonų ribų.

Tai užtikrina **biologinio saugumo atitiktis ir skaidri dokumentacija**, ypač reguliavimo požiūriu jautriose situacijose.

5.6. Nauji tyrimai: AR + multiomika lauko bioinformatikai

Naujausi tyrimai rodo, kad AR gali integruotis su **omikos platformos** (metagenomika, metabolomika, transkriptomika) siekiant pateikti mikrobu funkcinius duomenis erdvėje.

Pavyzdys:

- Wang ir kt. (2022 m.) sukūrė papildytosios realybės (AR) vizualizacijos variklį, kuris integruoja aplinkos DNR (eDNR) duomenis su GPS koordinatėmis, kad būtų sukurti erdviškai tikslūs mikrobu įvairovės ir funkcinių savybių perdengimai realiuose kraštovaizdžiuose.

Aktualumas bioremediacijai:

Tai tiesiogiai naudinga lauko tyrimuose, kai tyrėjai turi įvertinti, ar mikrobai aktyviai skaido teršalus, ekspresuodami specifinius genus (pvz., *alkB*, *pahR*, *ko*) arba sudarant konsorciumus. Naudojant papildytąją realybę (AR), tokius duomenis būtų galima vizualizuoti vietoje, kad būtų galima nedelsiant juos interpretuoti ekologiniu požiūriu.

Šie realaus pasaulio pavyzdžiai iliustruoja, kaip papildytoji realybė (AR) naudojama įvairiuose aplinkosaugos sektoriuose, siekiant vizualizuoti užterštumą, imituoti valymo dinamiką, stebėti ekologinę riziką ir interpretuoti mikrobiologinius duomenis. Kiekvienas pavyzdys pateikia **verčiamas metodus mikrobu bioremediacijos pastangoms**, ypač atliekant lauko bandymus, kai labai svarbu erdvinis suvokimas, stebėjimas realiuoju laiku ir saugumas.

Fazė	Aprašymas
Tyrinėjimas	-Mokslinis atradimas Supažindinti mokinius su realiais mikrobu panaudojimo būdais taršos kontrolėje.
	-Atvejo analizė: Išanalizuokite realius atvejų tyrimus (pvz., naftos išsiliejimo valymą naudojant <i>Alkanivoraksas</i> arba urano valymas <i>Geobakterija</i>).
	-Poreikių analizė. Nustatyti klaidingas nuomones ar spragas, susijusias su mikrobu veikimo ir aplinkos iššūkių supratimu.
Taikymas	-Interaktyvios pamokos. Padėkite mokiniams pereiti iš laboratorijos į lauką, naudodami mikrobu animacijas ir realaus gyvenimo vaizdo įrašus.





Gilinimas	-AR tyrinėjimas. Naudokite tokius įrankius kaip „CoSpaces“ arba „Assemblr EDU“, kad imituotumėte lauko vietas ir vizualizuotumėte teršalų skaidymąsi laikui bėgant.
	-Grupės užduotys. Mokiniai, naudodami papildytąją realybę (AR), kuria mikrobų valymo modelius arba siužetines lentas, kad pristatytų mikrobų skaidymą.
	- AR integracija: mokiniai tyrinėja mikrobų židinius, maistinių medžiagų zonas ir taršos gradientus, naudodami papildytosios realybės perdengimus.
	- Interaktyvus mokymasis: sukurkite virtualias valymo zonas (pvz., naftos išsiliejimo vietos papildytosios realybės žemėlapi ir mikrobų panaudojimo strategiją).
Gilinimas	Žaidimo turinys: Taškai, skirti teisingam mikrobų fazių arba AR sąveikų identifikavimui
	• Užduotys, skirtos išvalyti įvairius teršalus (pvz., naftą ir sunkiuosius metalus)
	• Bendradarbiavimo „Mikrobų ir teršalų“ kovos, siekiant imituoti konkurencinę augimo dinamiką
	AR pagrįsti vertinimai: - Į AR integruoti vertinimai, kurių metu studentai: • Imituoti teršalų skaidymą • Suderinkite mikrobus su teršalais • Interpretuoti realaus pasaulio duomenų rinkinius (pvz., teršalų koncentracijos sumažėjimą) - Formatyvus AR scenarijų kolegų vertinimas - Baigiamoji užduotis: studentai parengia ir pristato užterštos ekosistemos valymo planą, pagrįstą mikrobais, papildytosios realybės principu.

Literatūra

Anderson, R. T., Vrionis, H. A., Ortiz-Bernad, I., Resch, J. T., Long, P. E., Dayvault, R., ... & Lovely, D. R. (2003). *Geobacter rūšių aktyvumo skatinimas in situ, siekiant pašalinti uraną iš uranu užteršto vandeningojo sluoksnio gruntinio vandens*. Taikomosios ir aplinkos mikrobiologijos žurnalas, 69(10), 5884–5891.

Banerjee, R., Singh, J. ir Sarkar, A. (2024). *Biokonvekcija ir bakterijų pernaša per porėtas terpes: implikacijos in situ bioremediacijai*. Aplinkos skysčių mechanika, 24(2), 167–185.

Bioplėvelės panaudojimas aplinkos valyme. [Vikipedija](#)

Biokonvekcija ir mikrobų judrumas porėtoje terpėje. [arXiv](#)

Beccari, M., Di Palma, L., Lombardi, F. ir Majone, M. (2010). *Bandomojo masto chromu užteršto vandeningojo sluoksnio valymo tyrimai naudojant biobarjerines ir reaktyviosios zonos technologijas*. Žurnalas „Pavojingų medžiagų žurnalas“, 178 (1–3), 875–882.

Blanck, H. (2002). *Kritinė taršos sukkelto bendruomenės tolerancijos (PICT) apžvalga ir jos panaudojimas aplinkos rizikai vertinti*. Aplinkos toksikologija ir chemija, 21(3), 503–511.

Cao, J., Liu, X., Su, X., Hædahl, J. E., Berg Fjellestad, T., Haziri, D., Hoang, A. N., Vu, A., Koskiahio, J., Karjalainen, S. M., Ronkanen, A. K., Tarkoma, S., Hui, P., 2024, Ant galvos tvirtinamas papildytosios realybės ekranas vandens kokybės vizualizavimui. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2023.12.002>

Bylos, I. ir de Lorenzo, V. (2005). *Genetiškai modifikuoti organizmai aplinkai: sėkmės ir nesėkmės istorijos ir ko iš jų išmokome*. Tarptautinė mikrobiologija, 8(3), 213–222.





- Išsami apžvalga: PAH užterštos vietos bioremediacija pilno masto biopilingo būdu(2024 m.).[ScienceDirect](#)
- Flemming, H.-C. ir Wuertz, S. (2019).Bakterijos ir archėjos Žemėje ir jų gausa bioplėvelėse.Gamtos apžvalgos mikrobiologija, 17(4), 247–260
- Garzón, J., Pavón, J. ir Baldiris, S. (2019).Sisteminė papildytosios realybės švietimo aplinkoje apžvalga ir metaanalizėŠvietimo tyrimų apžvalga, 27, 244–260.
- Ghosal, D., Ghosh, S., Dutta, T. K. ir Ahn, Y. (2016).Dabartinė žinių apie policiklinių aromatinių angliavandenilių (PAH) mikrobu skaidymą padėtis: apžvalgaMikrobiologijos ribos, 7, 1369.
- Guo, J., Lin, X., Zhao, M. ir kt. (2023).Integruota omika mikrobu monitoringui atliekant naftos užteršto dirvožemio bioremediaciją lauko mastuVisuotinės aplinkos mokslas, 869, 161649.
- Hemme.C.L, Careley.R, Norton.A, Ghumman.M, Nguyen.H, Ivone.R, U menon.J, Shen.J, Bertin.M, King.R, Leibovitz.E, Bergstrom.R, Cho.B, 2023, Virtualios ir papildytos realybės kūrimas
- Taikymas mokslo, technologijų, inžinerijos ir matematikos ugdyme, BioTechniques 75: 11–20, 10.2144/btn-2023-0029
- Holmes, D. E., Utturkar, S. M., D'haeseleer, P. ir kt. (2007).Uranu užterštuose požeminiuose nuosėduose augančių Geobacter uraniireducens transkriptomas.ISME žurnalas.
- Lovley, D. R. ir kt. (2003).Geobacter rūšių aktyvumo skatinimas in situ, siekiant pašalinti uraną iš uranu užteršto vandeningojo sluoksnio gruntinio vandens.Taikomosios ir aplinkos mikrobiologijos, 69(10), 5884–5891.
- Keller, A. A. ir Yang, R. T. (2021).Prognozinis modeliavimas bioremediacijoje: nuo teorijos iki lauko taikymo.Aplinkos mokslas ir technologijos, 55(8), 5082–5094.
- Lovley, D. R. ir kt. (2022).Aplinkos biotechnologija: bioremediacija naudojant mikrobu sistemasMetinė mikrobiologijos apžvalga, 76, 145–165.
- Madison, A. S., Sorsby, S. J., Wang, Y. ir Key, T. A. (2022).In situ bioremediacijos efektyvumo didinimas taikant molekulinės biologijos įrankius lauko mastu.Mikrobiologijos frontas.
- Multiomikos metodai mikrobu ekologijoje vandens inžinerijoje.[arXiv](#)
- Taršos sukulto bendruomenės tolerancijos metodo apžvalga.[Vikipedija](#)
- Pokrić, B. ir kt. (2012).ekoNET: Aplinkos stebėjimo sistema, naudojanti papildytąją terpę (AR) ir jutiklių suliejimąBelaidžių ir mobiliųjų tinklų žurnalas.
- Prince, R. C., McFarlin, K. M., Butler, J. D. ir Febbo, E. J. (2013).Pirminis disperguotos žalios naftos biologinis skaidymas jūrojeChemosfera, 90(2), 521–526.
- Naujausi lauko vandeningojo sluoksnio tyrimai:Bioremediacijos mechanizmų poveikis urano kiekio mažinimui gruntiniuose vandenyse(2024 m.).[ScienceDirect](#)
- Tvarios bioremediacijos strategijų apžvalga (2024 m.).[ScienceDirect](#)
- Sanità, M. ir kt. (2024).Papildytoji realybė oro kokybės stebėjimui Markės regione, ItalijojeWJARR, 22(1), 120–128.
- Schmidt, A., Barz, M. ir Wittstock, A. (2021).„Clean-AR“: papildytosios realybės naudojimas paviršių užteršimo ore plintančiais ligų sukėlėjais rizikai sumažintiDabartinės biomedicininės inžinerijos kryptys, 7(1), 159–162.
- Semple, K. T., Doick, K. J., Jones, K. C. ir kt. (2004).Užteršto dirvožemio ir nuosėdų biologinio prieinamumo ir biologinio prieinamumo apibrėžimas yra sudėtingas.Aplinkos mokslas ir technologijos.
- Silva, E. R. ir Gültekin, A. (2021).AR technologija paremtas mokslo mokymasis vidurinės mokyklos mokiniams: mokinių įtraukimas į taršos ir tvarumo klausimusŽurnalas „STEM ugdymas“, 22(3), 45–53.
- Singh, J. S., Abhilash, P. C. ir Singh, H. B. (2023).Mikrobinis bioremediacija: aplinkos valymo ir tvarumo strategijosVisuotinės aplinkos mokslas, 892, 164503.
- Stojanovic, J. ir kt. (2012).Mobilioji papildytoji realybė aplinkos stebėsenaiAsmeninė ir visur esanti kompiuterija, 16(8), 1027–1039.
- Cr(VI) valymo tyrimas, atliktasGeobakterijarūšys:Cr (VI) užteršto gruntinio vandens bioremediacija(2019 m.).[Vikipedija+3](#).[ScienceDirect](#)“+3.[Vikipedija+3](#)“



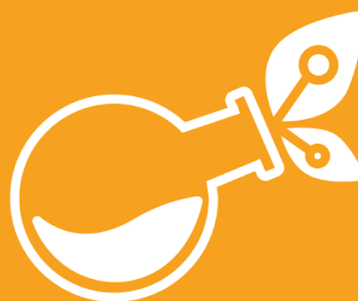


- Thomsen, P. F. ir Willerslev, E. (2015). *Aplinkos DNR – nauja gamtosaugos priemonė, skirta stebėti praeities ir dabarties biologinę įvairovę*. *Biologinė apsauga*, 183, 4–18.
- Wang, X., Gao, Y. ir Liu, J. (2022). *Papildytos realybės pagrindu veikianti metagenomikos duomenų vizualizacija aplinkos monitoringoje*. *Kompiuterių mokslo ribos*, 4, 934694.
- Wu-Juan Sun ir kt. (2024). *Bandomojo masto lauko tyrimai dėl naftos užteršto dirvožemio aktyvuoto mikrobinių valymo* (Aplinkos geochemijos sveikatos tarnyba). [„ResearchGate“ + 1](#), [„PubMed“ + 1](#)
- Xiong, W., Chen, L., Gao, H. ir kt. (2025). *Sunkiųjų metalų tarša ir transformacija dirvožemyje: išsami natūralios bioremediacijos strategijų apžvalga*. *Um Al-Qura taikomųjų mokslų universiteto žurnalas*.
- Yakimov, M. M., Timmis, K. N. ir Golyshin, P. N. (2007). *Privalomos naftą skaidančios jūrinės bakterijos: pagrindiniai naftos išsiliejimų valymo dalyviai*. *Nature Reviews Microbiology*, 5(10), 803–812.
- Zhang, Y., Karpf, A. ir Brovelli, M. A. (2023). *Papildytoji realybė požeminio vandens vizualizavimui pramoniniame monitoringe ir teritorijų atkūrimo procese*. *Kompiuteriai ir geomokslai*, 173, 105055.





Co-funded by
the European Union



BIOS4YOU AR 2.0

BIO-INSPIRED STEM TOPICS FOR ENGAGING YOUNG GENERATIONS
THANKS TO THE USE OF AUGMENTED REALITY



Project Number: KA220-BW-23-30-126516

Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them.