

BIOINDIKACINIS UTENOS MIESTO ORO TARŠOS VERTINIMAS

Inga Jakštonienė, Nijolė Rukštelienė

Utenos kolegija,

Maironio g. 18, Utena, Lietuva

Anotacija

Straipsnyje pateikiami 2024 m. II ketv. atlikti bioindikaciniai Utenos miesto oro taršos tyrimai, naudojant kiminių (*Sphagnum*) biosorbcinį metodą ir sėjamosios pipirnės (*Lepidium sativum*) augimo testą. Tyrimai vykdyti septyniose miesto vietose, pasižyminčiose skirtingais taršos šaltiniais ir vienoje foninėje vietoje. Lauko eksperimento metu eksponuoti kiminai, o laboratorijoje vertinti pipirnių morfometriniai rodikliai. Gauti duomenys analizuojami lyginant su Utenos rajono savivaldybės oro monitoringo rezultatais, siekiant įvertinti bioindikacinių metodų tinkamumą aplinkos oro kokybės stebėsenai.

Reikšminiai žodžiai: oro tarša, bioindikacinis tyrimas, sėjamoji pipirnė.

Įvadas

Oro kokybė yra vienas svarbiausių aplinkos veiksnių, lemiančių žmonių sveikatą, ekosistemų stabilumą ir gyvenimo kokybę. Intensyvėjant transporto srautams, plečiantis pramoninei veiklai ir didėjant energijos poreikiui šaltuoju metų laikotarpiu, miestų aplinkoje išauga oro teršalų koncentracijos (WHO, 2021). Tradiciniai oro monitoringo metodai, paremti cheminėmis ar fizikinėmis analizėmis, leidžia tiksliai nustatyti teršalų kiekius, tačiau jie reikalauja didelių finansinių bei techninių resursų (Butkus, Klimavičienė, 2015). Todėl vis dažniau pasitelkiami bioindikaciniai metodai, kurių esmė – oro taršos poveikio vertinimas pagal gyvų organizmų būklę arba jų reakcijas į aplinkos pokyčius (Market et.al., 2003).

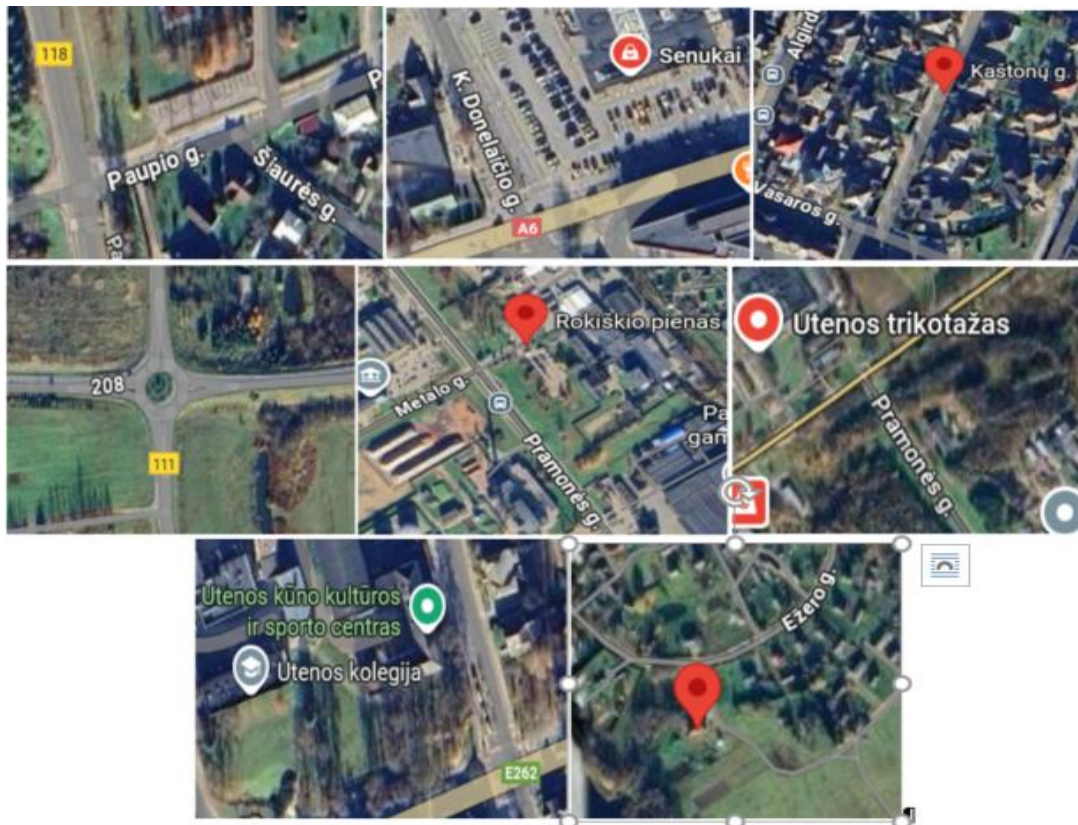
Bioindikacija yra pripažįstama kaip paprastas, prieinamas ir efektyvus būdas gauti informaciją apie aplinkos kokybę. Augalai, ypač samanoms, pasižymi gebėjimu kaupti ore esančius sunkiuosius metalus ir kitus teršalus, todėl jie plačiai taikomi oro taršos tyrimuose (Adamo et.al., 2008). Tuo tarpu greitai augantys augalai, tokie kaip sėjamoji pipirnė (*Lepidium sativum*), leidžia įvertinti teršalų poveikį augimo procesams per trumpą laiką (Ranke, 2009). Tokie metodai padeda ne tik nustatyti teršalų pasiskirstymo dėsnumus, bet ir palyginti skirtingų teritorijų užterštumą. Utenos miestas yra transporto ir pramonės centras rytų Lietuvoje, todėl oro kokybės klausimas čia ypač aktualus.

Tyrimo tikslas. Įvertinti Utenos miesto oro taršą pasitelkiant samanų biosorbcinį metodą ir pipirnių augimo testą bei palyginti gautus rezultatus su savivaldybės vykdomo oro monitoringo duomenimis.

Tyrimo objektas. Utenos miesto oro tarša ir jos poveikis bioindikatoriams – samanoms (kiminams) ir sėjamosioms pipirnėms (*Lepidium sativum*).

Tyrimo hipotezė. Labiau užterštose vietovėse, kur intensyvesnis transporto srautas, kiminai sukaupia daugiau teršalų, kurie sėjamosios pipirnės (*Lepidium sativum*) morfometriniams rodikliams daro neigiamą įtaką.

Tyrimo metodika. Tyrimas buvo atliktas siekiant įvertinti Utenos miesto oro taršą pasitelkiant bioindikacinius metodus. Tyrimo taškai buvo pasirinkti atsižvelgiant į skirtingus taršos šaltinius – transporto intensyvumą, pramoninę veiklą bei individualių namų šildymą (1 pav.), o taip pat į Utenos rajono savivaldybės oro monitoringo vietas, kad būtų galima palyginti rezultatus, gautus skirtingais metodais.



1 pav. Kiminių eksponavimo vietos
(Šaltinis: sudaryta autorių)

Bioindikaciniai tyrimai vyko dviem etapais: lauko ir laboratoriniu. Lauko etapo metu švarūs kiminai buvo eksponuojami nurodytuose tyrimo taškuose 48 paras (1 lentelė), siekiant kaupti ore esančius teršalus. Laboratoriniu etapu eksponuotuose kiminuose auginamos sėjamosios pipirnės ir vertinamas augalo aukštis. Pirmasis tyrimo etapas vyko 2024 m. gegužės 9 – birželio 26 d., o laboratorijoje pipirnės augintos 2024 m. birželio 26 - liepos 1 d. Straipsnyje analizuojami tyrimo duomenys ir lyginami su Utenos rajono savivaldybės vykdomo oro monitoringo rezultatais siekiant nustatyti, kaip vidutiniai pipirnių aukščiai koreliuoja su įvairių teršalų koncentracijomis.

1 lentelė. Kiminių eksponavimo taškų išsidėstymas Utenos mieste 2024 m. gegužės 9 – birželio 26 d.
(Šaltinis: sudaryta autorių)

Tyrimo taškas	Tyrimo vietovė	Taršos šaltinis
1	Paupio g., A. Šapokos gimnazija	Transporto tarša
2	Basanavičiaus – Donelaičio g. sankirta	Transporto tarša
3	Vasaros – Kaštonų g. sankirta	Tarša iš individualių namų
4	Kelių Nr. 208–111 sankirta (žiedas į Kuktiškių miestelį)	Transporto tarša
5	Pramonės g. – Metalų g. sankirta (ties UAB „Rokiškio pieno gamyba“)	Pramonės tarša
6	Basanavičiaus g. – Pramonės g. sankirta (ties AB „Utenos trikotažas“)	Transporto tarša
7	Basanavičiaus g. – Aušros g. sankirta (ties sporto klubu)	Transporto tarša
8	Antalgės kaimas, Utenos r.	Foninė tarša
9	Kontrolė	Nulinė tarša

Biosorbentų paruošimas. Kiminai surenkami iš gana švarios, mažai užterštos vietovės. Iš pelkės paimti augalai kruopščiai atrenkami ir 3 paras mirkomi distiliuotame vandenyje, kas 24 val.

vandenį pakeičiant. Tokiu būdu iš kiminių pasišalina juose buvusios teršalų liekanos. Po to kiminiai išdžiovinami iki orausės būsenos. Išdžiovinti kiminiai pasveriami po 3 g ir sudedami į tinklinius maišelius 2 pav.



2 pav. Eksponavimui paruošti kiminių maišeliai
(Šaltinis: sudaryta autorių)

Biosorbentų eksponavimas. Paruošti biosorbentai tiriamuosiuose taškuose pritvirtinami po 3 vienetus medžiuose, maždaug 2 m aukštyje nuo žemės paviršiaus (3 pav.). Ekspozicija truko 48 paras. Pasibaigus ekspozicijai, biosorbentai nuimami ir sudedami į atskirus, numeruotus polietileninius maišelius, pagal tai, kurioje vietoje jie buvo eksponuoti.



3 pav. Kiminių ekspozicija
(Šaltinis: sudaryta autorių)

Pipirnių sėjimas ir auginimas. Prieš sėją biosorbentai išdžiovinami. Kiekvieno tyrimo taško kiminiai atskirai susmulkinami ir supilami į 2 Petri lėkšteles po 3,0 g kiekvienoje. Taip paruošti kiminiai naudojami kaip terpė pipirnių auginimui. Papildomai paruošiamas kontrolinis mėginys, kuriame vietoje eksponuotų kiminių naudojami švarūs, neeksponuoti kiminiai. Į kiekvieną lėkštelę pasėjama po 25 pipirnių sėklas. Siekiant patikimų rezultatų, sėklos išdėstomos tvarkingai, kad daigai netrukdytų vieni kitų augimui.

Pasėjus, mėginiai sudrėkinami 40 ml distiliuoto vandens, o vėliau drėkinimas kartojamas pagal poreikį, visuomet naudojant vienodą vandens kiekį. Visiems mėginiams užtikrinamos identiškos auginimo sąlygos: termostate palaikoma 25 °C temperatūra (4 pav.). Petri lėkštelės pradinėje stadijoje uždengiamos stikliniais dangteliais, kol sėklos sudygsta (paprastai tai įvyksta per parą). Po sudygimo mėginiai atidengiami ir toliau reguliariai drėkinami distiliuotu vandeniu.



4 pav. Petri lėkštelės termostate
(Šaltinis: sudaryta autorių)

Penktąją auginimo dieną atliekami augalų matavimai naudojant liniuotę. Nustatomas kiekvieno sudygusio pipirinės daigo stiebo aukštis.

Duomenų analizė. Duomenų analizė buvo atlikta naudojant *Microsoft Excel* programą. Koreliacijos ryšio stiprumui įvertinti taikytas *Pearson koreliacijos koeficientas* (r). Šis rodiklis leidžia nustatyti tiesinio ryšio stiprumą ir kryptį tarp dviejų kintamųjų.

Pearson koreliacijos koeficientas apskaičiuotas pagal šią formulę:

$$r = \frac{\sum(x_i - \underline{x})(y_i - \underline{y})}{\sqrt{\sum}}$$

Tiesinei regresijos analizei atlikti naudota *Excel* funkcija *Linest* bei *Trendline* įrankis sklaidos diagramoje. Regresijos lygtis ir determinacijos koeficientas (R^2) pateikti grafikuose. Vizualizacijai naudotos sklaidos diagramos su pridėtomis tendencijos linijomis, leidžiančiomis įvertinti ryšio kryptį ir stiprumą tarp tiriamų kintamųjų.

Tyrimų rezultatai ir jų analizė

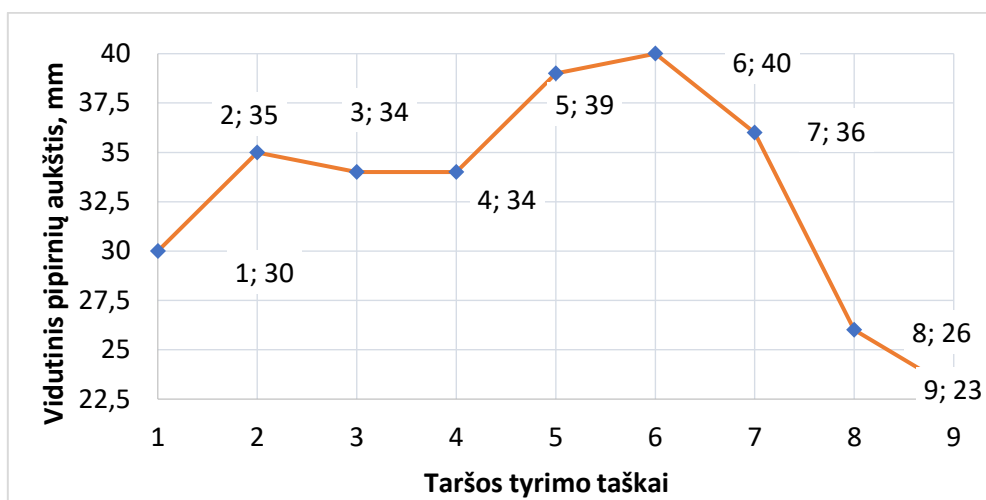
Pipirnių augimo rezultatai (2 lentelė) buvo priešingi hipotezei, kad labiau užterštose vietose eksponuotuose kiminuose augimas bus mažiau intensyvus. Daugelyje mokslinių publikacijų (Adomaitytė, 2015; Mikalaikevičiūtė, Stiklienė, 2017) teigiama, kad eksponuojant kiminus labiau užterštose teritorijose, stebimas neigiamas poveikis sėjamųjų pipirnių daigų aukščiams. Straipsnyje nagrinėjama atveju pats mažiausias augimo intensyvumas stebimas kontroliniuose kiminuose, kurie buvo išplauti, bet neeksponuoti. Šiek tiek geriau augo pipirinės, kai kiminai buvo eksponuoti Antalgės kaime, šalia ežero, kur nėra transporto ir taršą galima vertinti kaip foninę.

2 lentelė. Pipirnių aukščių vidurkiai, mm, auginant 2024 m. II ketvirtyje eksponuotuose kiminuose
(Šaltinis: sudaryta autorių)

Matavimo vietos pavadinimas	Tyrimo taškas	Vidutinis pipirnių aukštis, mm
Paupio g. 1, ties Utenos Adolfo Šapokos gimnazija, Utena	1	30
Ties J. Basanavičiaus g. (magistralinio kelio Kaunas–Zarasai–Daugpilis (Nr. A6)), Kauno g. (krašto kelio Utena–Kaltanėnai–Švenčionys (Nr. 111) ir K. Donelaičio g.	2	35
Ties Vasaros g. ir Kaštonų g. sankirta, Utena	3	34
Ties krašto kelių Nr. 208 (pietrytinis Utenos aplinkkelis) ir Nr. 111 (Utena–Kaltanėnai–Švenčionys) sankryža, Utena	4	34

Matavimo vietos pavadinimas	Tyrimo taškas	Vidutinis pipirnių aukštis, mm
Ties Pramonės g. (rajoninio kelio Utena– Tauragnai–Kirdeikiai (Nr. 4902)) ir Metalo g. sankirta, Utena	5	39
Ties J. Basanavičiaus ir Pramonės g. sankirta, Utena (AB "Utenos trikotažas")	6	40
Ties J. Basanavičiaus g. ir Aušros g. sankirta, Utena	7	36
Antalgės k. Utenos r. (foninė tarša)	8	26
Kontrolė	9	23

Kaip matyti 5 pav., spėjama tarša 1-7 eksponavimo taškuose gana žymiai intensyviną pipirnių augimą: daigai lyginant su kontroline lėkštele buvo aukštesni 7-17 mm.



5 pav. Pipirnių aukščių vidurkis, mm, 2024 m. II ketvirtyje
(Šaltinis: sudaryta autorių)

Taigi, teršalai priešingai pirminei hipotezei, atrodytų skatina pipirinės augimą. Kadangi kiminuose sukauptų medžiagų sudėtis nebuvo tirta, buvo pasinaudota *Utenos rajono savivaldybės Aplinkos monitoringo ataskaita už 2024 m.* (toliau Ataskaita) (Utenos rajono savivaldybės...2024) oro kokybės monitoringo duomenimis. Kaip rašoma Ataskaitoje, Utenos rajono viešosios paskirties teritorijų aplinkoje atlikti NO₂, SO₂, lakiųjų organinių junginių (LOJ) (benzeno, tolueno, etilbenzeno, m/p/o-ksilenų (BTEX)) koncentracijų tyrimai, panaudojant pasyvius sorbentus ir kietųjų dalelių (KD_{2,5} ir KD₁₀) bei anglies monoksido (CO) koncentracijų matavimai. Šios Ataskaitos duomenimis, visose tirtose vietose tarša neviršijo ribinių verčių. Bioindikaciniai tyrimai atlikti gegužės - birželio mėn., todėl lyginimui imti 2024 m. II ketvirčio Ataskaitos duomenys (3 lentelė).

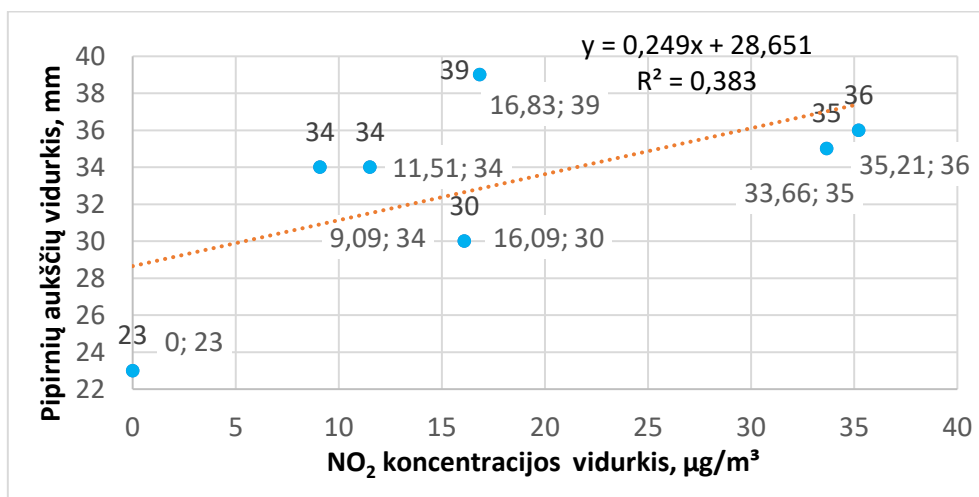
3 lentelė. 2024 m. II ketvirčio Aplinkos oro taršos rezultatų suvestinė bioindikacinio tyrimo taškuose
(Šaltinis: sudaryta autorių, pagal Utenos rajono savivaldybės...2024)

Tyrimo taškas	Teršalų koncentracijų vidurkis, µg/m ³				CO koncentracijos vidurkis, mg/m ³
	NO ₂	KD ₁₀	KD _{2,5}	Benzenas	
1	16,09	15,17	5,0	1,24	0,28
2	33,66	19,07	7,0	2,96	0,26
3	9,09	18,77	9,0	2,41	0,19
4	11,51	32,01	11,0	1,05	0,33
5	16,83	31,87	9,0	1,06	0,30

Tyrimo taškas	Teršalų koncentracijų vidurkis, $\mu\text{g}/\text{m}^3$				CO koncentracijos vidurkis, mg/m^3
	NO ₂	KD ₁₀	KD _{2,5}	Benzenas	
6	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
7	35,21	38,86	11,0	2,06	0,39
8	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
9	0	0	0	0	0

Toliau analizuojamas ryšys tarp savivaldybės monitoringo metu nustatytų oro teršalų koncentracijų ir sėjamųjų pipirnių (*Lepidium sativum*) augimo aukščio. Kadangi 6-ame ir 8-ame tyrimo taškuose savivaldybės monitoringas nebuvo atliktas, tolimesnė analizė apima septynis taškus. Nors ryšys pastebimas, vien koreliacija neleidžia daryti išvados apie tiesioginį poveikį, negalima teigti, kad konkretus teršalas tiesiogiai lemia augimo intensyvumą. Koreliacijos analizei buvo pasirinkti septyni monitoringo taškai, kuriuose buvo fiksuoti oro taršos duomenys. Papildomai įtrauktas kontrolinis taškas, kuriam priskirta nulinė teršalų koncentracija, siekiant palyginti augimo rodiklius mažai užterštoje aplinkoje.

NO₂ koncentracijos ryšys su pipirnių aukščiu. Surinkus duomenis iš septynių skirtingų matavimo taškų, buvo sudaryta sklaidos diagrama, kurioje kiekvienas taškas atspindi konkrečios vietos NO₂ koncentracijos vidurkį ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ir atitinkamą pipirnių aukščio vidurkį (mm) (6 pav.). Vizualiai pastebėta tendencija, jog didėjant NO₂ koncentracijai, pipirnių aukštis taip pat didėja.



6 pav. Pipirnių aukščio ryšys su NO₂ koncentracija

Pateikta linijinė regresija tarp NO₂ koncentracijos vidurkio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ir pipirnių aukščių vidurkio (mm).

Regresijos lygtis $y = 0.249x + 28.651$, determinacijos koeficientas $R^2 = 0.383$.

(Šaltinis: sudaryta autorių)

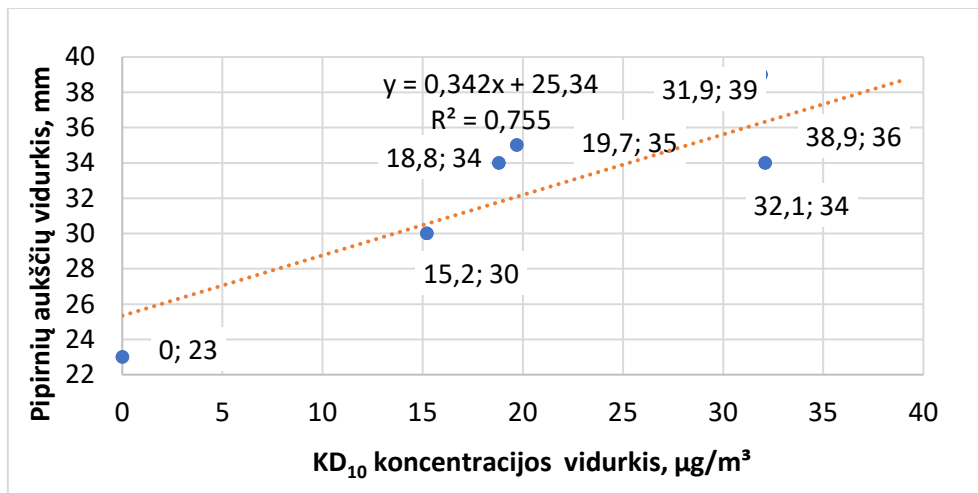
Norint kiekybiškai įvertinti šį ryšį, buvo apskaičiuotas Pearson koreliacijos koeficientas r , kuris parodo ryšio stiprumą ir kryptį tarp dviejų skaitinių kintamųjų. Skaičiavimas atliktas naudojant Excel funkciją =CORREL(x; y), kur x – NO₂ koncentracijos reikšmės, o y – pipirnių aukščiai. Gautas rezultatas $r = 0,62$ rodo vidutinio stiprumo teigiamą koreliaciją, t. y. didėjant NO₂ koncentracijai, pipirnių aukštis linkęs didėti.

Papildomai atlikta tiesinė regresijos analizė, kurios rezultatai pateikti grafike. Regresijos lygtis $y = 0,249x + 28,651$ rodo, kad kiekvienam papildomam NO₂ vienetui pipirnių aukštis padidėja vidutiniškai 0,25 mm. Determinacijos koeficientas $R^2 = 0,383$ rodo, kad apie 38,3 % pipirnių aukščio variacijos paaiškinama NO₂ koncentracijos pokyčiais.

Nors daugelis tyrimų rodo, kad NO₂ gali slopinti augalų augimą dėl oksidacinio streso (Zhou et al., 2019), kai kurios studijos teigia, jog žemos NO₂ koncentracijos gali skatinti augimą, ypač jei augalai gauna papildomo azoto (Wang et al., 2021). Tai gali paaiškinti stebimą teigiamą ryšį šiame tyrime, nes Utenoje NO₂ koncentracijos niekur nesiekė 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, o būdamos tokios mažos, skatina pipirnių augimą ar bent neslopina jo.

KD₁₀ ir KD_{2.5} koncentracijos ryšys su pipirnių aukščiu. 7 ir 8 pav. pateiktas pipirnių aukščių vidurkių ryšys su aplinkos oro užterštumu kietosiomis dalelėmis – KD₁₀ ir KD_{2.5}. Regresinės analizės rezultatai atskleidė statistiškai reikšmingą teigiamą koreliaciją tarp KD koncentracijos ir pipirnių aukščio.

Regresinės analizės rezultatai rodo, kad tiek KD₁₀, tiek KD_{2.5} frakcijos daro statistiškai reikšmingą poveikį sėjamųjų pipirnių (*Lepidium sativum*) augimo aukščiui. KD₁₀ atveju nustatyta regresijos lygtis $y=0,342x+25,34$, o determinacijos koeficientas $R^2=0,755$ rodo, kad 75,5 % augimo variacijos paaiškinama KD₁₀ koncentracijos pokyčiais. Koreliacijos koeficientas $r=0,87$ patvirtina stiprų teigiamą ryšį. KD_{2.5} analizėje gauta regresijos lygtis $y=0,156x+24,41$ o $R^2=0,765$ rodo, kad 76,5 % augimo variacijos paaiškinama KD_{2.5} koncentracija. Koreliacijos koeficientas $r=0,87$ rodo dar stipresnį ryšį nei KD₁₀ atveju.

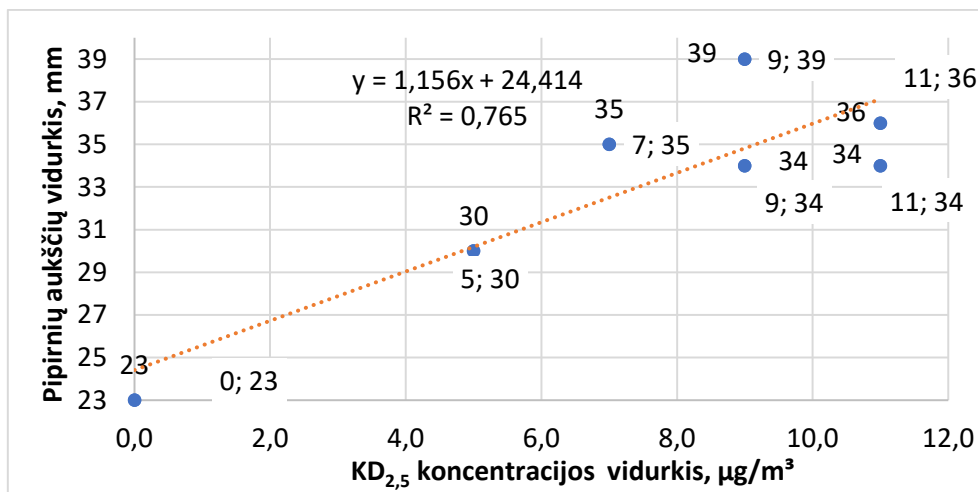


7 pav. Pipirnių aukščio ryšys su KD₁₀ koncentracija

Pateikta linijinė regresija tarp KD₁₀ koncentracijos vidurkio (µg/m³) ir pipirnių aukščių vidurkio (mm).

Regresijos lygtis $y = 0.342x + 25.34$, determinacijos koeficientas $R^2 = 0.755$.

(Šaltinis: sudaryta autorių)



8 pav. Pipirnių aukščio ryšys su KD_{2.5} koncentracija

Pateikta linijinė regresija tarp KD_{2.5} koncentracijos vidurkio (µg/m³) ir pipirnių aukščių vidurkio (mm).

Regresijos lygtis $y = 1.156x + 24.414$, determinacijos koeficientas $R^2 = 0.765$.

(Šaltinis: sudaryta autorių)

Šie rezultatai leidžia teigti, kad abi kietųjų dalelių frakcijos daro reikšmingą poveikį augalų augimui, o KD_{2.5}, dėl mažesnio dalelių dydžio ir didesnio biologinio aktyvumo, gali turėti stipresnį fiziologinį efektą. Pastebėtas augimo intensyvėjimas gali būti interpretuojamas dviem aspektais. Pirma, kietosios dalelės gali veikti kaip abiotinis stresas, aktyvuojantis augalų gynybos

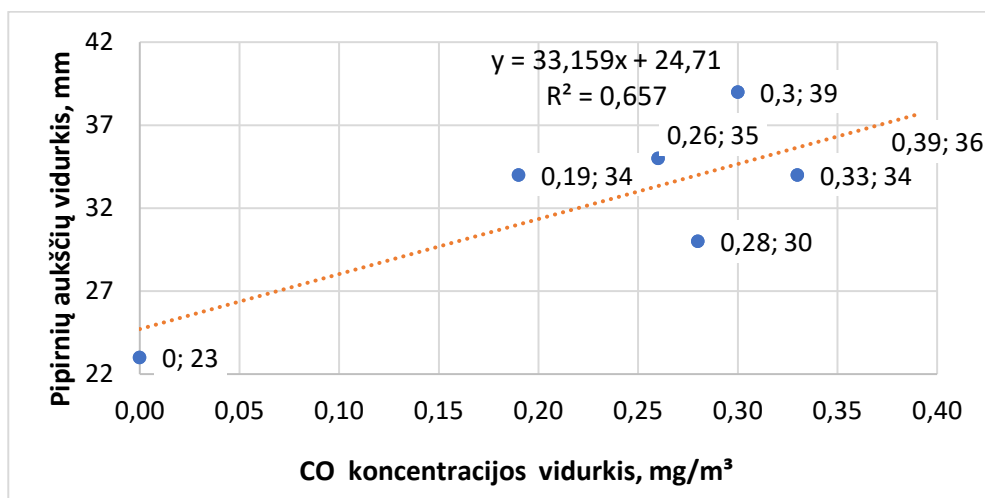
mechanizmus ir skatindamas augimą – tai vadinama hormezės efektu (Salinitro et. al., 2021). Antra, kietosios dalelės, ypač urbanizuotose vietovėse, gali turėti biologiškai prieinamų junginių, tokių kaip amonio druskos ar nitratai, kurie veikia kaip netiesioginis azoto šaltinis, skatinantis augalų metabolizmą (Hachya et.al.,2017; Hao et. Al., 2023).

Vis dėlto, bioindikacinis metodas neleidžia tiksliai nustatyti, kokio dydžio dalelės nusėdo ant augalų paviršiaus. Pasak Sharma ir Agrawal (2005), pipirinės reaguoja į visą teršalų kompleksą – KD daleles, NO₂ ir kitus komponentus. Todėl KD₁₀ ir KD_{2,5} koncentracijos vertinamos kaip bendras oro taršos fonas, o ne konkretus biologinio poveikio veiksnys.

CO koncentracijos ryšys su pipirnių aukščiu. 9 pav. pateikti duomenys rodo teigiamą koreliaciją tarp anglies monoksido (CO) koncentracijos ore ir sėjamųjų pipirnių (*Lepidium sativum*) augimo aukščio vidurkio. Linijinės regresijos analizė atskleidė, kad didėjant CO koncentracijai, augalų aukštis taip pat didėja. Gauta regresijos lygtis: $y=33,159x+24,71$, o determinacijos koeficientas $R^2=0,657$ rodo, kad 65,7% augimo variacijos paaiškinama CO koncentracijos pokyčiais.

Koreliacijos koeficientas $r=0,81$ patvirtina vidutinio stiprumo, statistiškai reikšmingą teigiamą ryšį tarp CO koncentracijos ore ir pipirnių augimo aukščio. Linijinės regresijos rezultatai rodo, kad pipirnių aukštis priklauso nuo CO koncentracijos, o šis ryšys yra pakankamai aiškus, kad būtų laikomas biologiškai reikšmingu.

Nors CO dažniausiai laikomas toksišku teršalu, tyrimai rodo, kad mažos jo koncentracijos gali paveikti augalų fiziologiją, skatindamos gynybinius mechanizmus nuo oksidacinio streso ir reguliuodamos augimo procesus (Wang & Liao, 2016; Mittler, 2017; Bazvand et al., 2024). Tokie adaptaciniai atsakai gali turėti įtakos augalų vystymuisi, tačiau didesnės CO koncentracijos išlieka žalingos augalų augimui.



9 pav. Pipirnių aukščio ryšys su CO koncentracija

Pateikta linijinė regresija tarp CO koncentracijos vidurkio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ir pipirnių aukščių vidurkio (mm).

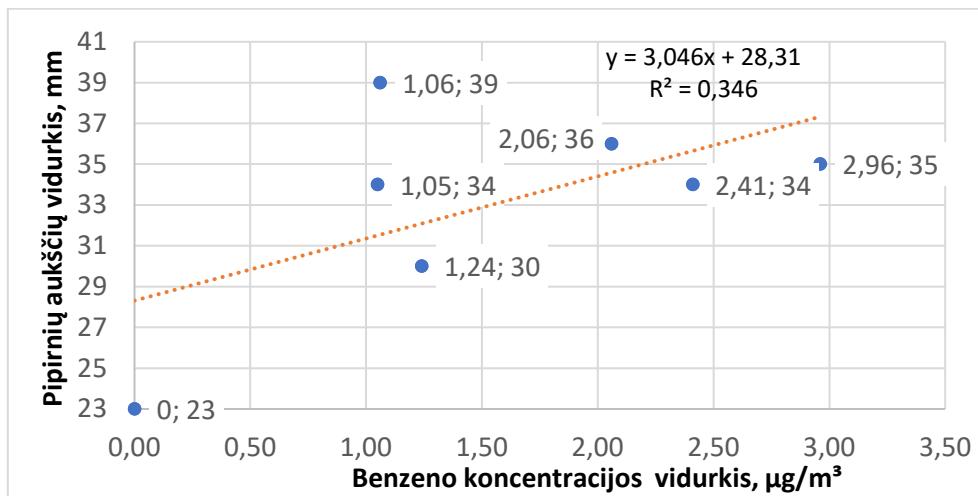
Regresijos lygtis $y = 33,159x + 24,71$, determinacijos koeficientas $R^2 = 0,657$.

(Šaltinis: sudaryta autorių)

Vis dėlto, būtina pažymėti, kad CO poveikis priklauso nuo koncentracijos, ekspozicijos trukmės ir augalo rūšies. Aukštesnės CO koncentracijos gali sukelti oksidacinį stresą ir slopinti augimą, todėl stebėtas teigiamas ryšys gali būti būdingas tik tam tikram koncentracijos intervalui.

Benzeno koncentracijos ryšys su pipirnių aukščiu. 10 pav. eksperimentiniai duomenys atskleidžia, kad tarp benzeno koncentracijos ore ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ir sėjamųjų pipirnių (*Lepidium sativum*) augimo aukščio vidurkio (mm) egzistuoja silpna teigiama koreliacija. Linijinės regresijos analizės metu nustatyta regresijos lygtis $y=3,046x+28,31$, o determinacijos koeficientas $R^2=0,346$ rodo, kad benzeno koncentracija paaiškina tik 34,6% augalų aukščio variacijos. Koreliacijos koeficientas $r=0,59$ patvirtina silpną, tačiau teigiamą statistinį ryšį. Šie rezultatai leidžia daryti prielaidą, kad

benzenas gali turėti tam tikrą poveikį augalų augimui, tačiau likusi variacija tikėtina priklauso nuo kitų aplinkos ar biologinių veiksnių, tokių kaip mikroklimatas ar augalų fiziologinė būklė.



10 pav. Pipirnių aukščio ryšys su benzeno koncentracija

Pateikta linijinė regresija tarp Benzeno koncentracijos vidurkio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ir pipirnių aukščių vidurkio (mm).

Regresijos lygtis $y = 3.046x + 28.31$, determinacijos koeficientas $R^2 = 0.346$.

(Šaltinis: sudaryta autorių)

Nepaisant silpno ryšio, pastebima tendencija, kad didesnis augalų aukštis gali būti susijęs su šiek tiek didesne benzeno koncentracija. Tačiau būtina atsižvelgti į tai, kad bioindikatoriai reaguoja į visą teršalų kompleksą, todėl benzeno poveikis gali būti užgožtas kitų veiksnių, tokių kaip KD, NO_2 , CO ar mikroklimato sąlygos (Sharma & Agrawal, 2005).

Iš biologinės perspektyvos benzenas yra žinomas kaip toksinis organinis junginys, galintis paveikti augalų fiziologinius procesus ir gali sukelti oksidacinį stresą augalų ląstelėse, skatindamas reaktyviųjų deguonies rūšių (ROS) kaupimąsi. Tokios molekulės kaip superoksido anijonas (O_2^-) ir vandenilio peroksidas (H_2O_2) tam tikromis sąlygomis veikia kaip signaliniai junginiai, dalyvaujantys augalų gynybos atsakuose ir netgi augimo reguliavime (Mittler, 2017).

Vis dėlto benzeno poveikis augalams yra priklausomas nuo jo koncentracijos ir poveikio trukmės. Kaip nurodo Khan et al. (2023), didesnės benzeno koncentracijos gali slopinti fotosintezės procesus, pažeisti ląstelių membranas ir riboti ląstelių dalijimąsi. Todėl stebėtas teigiamas ryšys gali būti laikinas arba susijęs su augalų adaptaciniu atsaku į žemą teršalo lygį.

Apibendrinant galima teigti, kad 2024 m. II ketvirtyje Utenos mieste atlikti bioindikaciniai oro taršos tyrimai parodė, jog nedidelės teršalų koncentracijos gali turėti įtakos sėjamųjų pipirnių (*Lepidium sativum*) augimui. Regresinės analizės duomenimis, tarp pipirnių vidutinio aukščio ir NO_2 , KD_{10} , $\text{KD}_{2.5}$ bei CO koncentracijų ore nustatyta vidutinio stiprumo teigiama koreliacija, didėjant teršalų kiekiui, augalų aukštis taip pat didėjo. Tuo tarpu benzeno koncentracijos ir pipirnių augimo ryšys buvo silpnas, o SO_2 koncentracija tyrimo laikotarpiu buvo mažesnė už metodo aptikimo ribą, todėl jos poveikis augimui nebuvo vertintas.

Literatūroje nurodoma, kad kiminai (*Sphagnum*) pasižymi gebėjimu akumuliuoti ore esančius sunkiuosius metalus ir kitus teršalus, todėl plačiai taikomi oro taršos bioindikaciniuose tyrimuose (Adamo ir kt., 2008).

Vis dėlto, esant mažai užterštai aplinkai, kurioje teršalų koncentracijos yra nežymios ar nepastovios, bioindikaciniai metodai gali būti mažiau jautrūs. Siekiant tiksliau įvertinti oro taršos poveikį augalų augimui, rekomenduojama tyrimus tęsti skirtingais metų laikais, ypač šildymo sezono metu, kai oro taršos lygis gali būti žymiai didesnis.

Išvados

1. Tyrimo rezultatai parodė, kad sėjamųjų pipirnių (*Lepidium sativum*) augimas biosorbentuose priklauso nuo absorbuojamų oro teršalų koncentracijos konkrečiame taršos šaltinyje. Pastebėta, jog didesnė teršalų koncentracija kai kuriais atvejais siejosi su intensyvesniu augimu.
2. Statistinė analizė atskleidė, kad pipirnių daigų aukštis reikšmingai koreliuoja su NO₂, KD₁₀, KD_{2.5} ir CO koncentracijomis ore. Regresijos duomenimis, didžiausią augimo variacijos dalį paaiškina CO (R² = 0,657) ir KD_{2.5} frakcijos poveikis. Stebėtas augimo intensyvėjimas gali būti susijęs su hormezės efektu, kai mažos teršalų dozės skatina biologinį atsaką, arba su papildomu azoto ir kitų elementų šaltiniu. Bioindikacinio ir instrumentinio metodo derinimas pasirodė esąs efektyvus vertinant oro taršos poveikį augalams, o pipirnių jautrumas patvirtino jų tinkamumą kaip bioindikatorių aplinkos kokybės pokyčiams.
3. Tarp benzeno koncentracijos ir pipirnių augimo nustatyta silpna teigiama koreliacija (R² = 0,346), rodanti, kad benzenas paaiškina apie 34,6 % augimo variacijos. Nors ryšys statistiškai silpnas, galimas augalų atsakas į žemą teršalo lygį gali būti susijęs su oksidacinio streso signalizacija ar adaptaciniais mechanizmais. Tai rodo, kad net ir mažos teršalų koncentracijos gali turėti biologinį poveikį.
4. Tyrimo rezultatai leidžia daryti prielaidą, kad mažos teršalų koncentracijos gali skatinti pipirnių augimą, o didesnės – jį slopinti. Vis dėlto, samanų biosorbicinis metodas ir pipirnių augimo testas pasitvirtino kaip tinkami bioindikaciniai įrankiai, leidžiantys įvertinti Utenos miesto oro taršą ir palyginti rezultatus su savivaldybės vykdomo oro monitoringo duomenimis.
5. Šiame tyrime atlikta vienkriterinė analizė, leidusi įvertinti atskirų teršalų poveikį pipirnių augimui. Tačiau atsižvelgiant į tai, kad augalai reaguoja į visą teršalų kompleksą, tolimesniuose tyrimuose būtų naudinga taikyti daugiakriterinę analizę ir tęsti stebėjimus skirtingais metų laikais, ypač šildymo sezono metu, kai oro taršos lygis yra didesnis ir poveikis augalams gali būti ryškesnis.

Literatūros sąrašas

1. Adomaitytė, R. (2015). *Bioindikacinis oro taršos vertinimas ir eksperimentiniai tyrimai, naudojant sėjamąją pipirnę*. Magistro darbas. VilniusTech.
2. Adamo, P., Giordano, S., Vingiani, S., Cobianchi, R. C., & Violante, P. (2008). *Trace element accumulation by moss and lichen exposed in Naples urban area*. *Environmental Pollution*, 146(1), 33–40.
3. Butkus, D., & Klimavičienė, L. (2015). *Biokuro katilinės oro ir darbo aplinkos taršos tyrimai*. *Aplinkos tyrimai, inžinerija ir vadyba*, 71(1), 12–19.
4. Bazvand, F., Wojtyła, Ł., Eisvand, H. R., Garnczarska, M., & Adamec, M. (2024). *Exploring the role of carbon monoxide in seed physiology: Implications for stress tolerance and practical uses*. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(1), 223. DOI: 10.3390/ijms26010223
5. Hachiya T, Sakakibara H. (2017). Interactions between nitrate and ammonium in their uptake, allocation, assimilation, and signaling in plants. *Journal of Experimental Botany*, 68(10), 2501–2512. <https://doi.org/10.1093/jxb/erw449>
6. Hao DL, Zhou JY, Li L, Qu J, Li XH, Chen RR, Kong WY, Li DD, Li JJ, Guo HL, Liu JX, Zong JQ, Chen JB. (2023). *An appropriate ammonium:nitrate ratio promotes the growth of centipedegrass: insight from physiological and micromorphological analyses*. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1324820. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1324820>
7. Khan T. et al. (2023). *Evaluating the antioxidative defense response of selected indoor plants against benzene and formaldehyde*. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 99273–99283. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-28166-9>
8. Markert, B. A., Breure, A. M., & Zechmeister, H. G. (Eds.). (2003). *Bioindicators & biomonitors: Principles, concepts and applications* (Vol. 6 of Trace Metals and Other Contaminants in the Environment). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0927-5215\(03\)80130-3](https://doi.org/10.1016/S0927-5215(03)80130-3)

9. Mikalaitėvičiūtė, L., & Stiklienė, A. (2017). *Marijampolės miesto aplinkos oro užterštumo vertinimas biotestavimo metodu*. Žmogaus ir gamtos sauga, ASU, p. 168–171. Akademija. <https://hdl.handle.net/20.500.12259/90600>
10. Mittler, R. (2017). *ROS are good*. *Trends in Plant Science*, 22(1), 11–19. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2016.08.002>
11. Ranke, J. (2009). *Chemicals in the environment: sources, risks, and management*. Wiley-VCH.
12. Salinitro M, Mattarello G, Guardigli G, Odajiu M, Tassoni A. (2021). *Induction of hormesis in plants by urban trace metal pollution*. *Scientific Reports*, 11, 99657. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-99657-3>
13. Sharma, P., & Agrawal, M. (2005). *Biological effects of heavy metals: An overview*. *Journal of Environmental Biology*, 26(2), 301–313.
14. *Utenos rajono savivaldybės aplinkos monitoringo ataskaita už 2024 metus*. (2025). Darnaus vystymosi institutas, Utena. UTENA2024.pdf
15. Wang, M., & Liao, W. (2016). *Carbon monoxide as a signaling molecule in plants*. *Frontiers in Plant Science*, 7, 572. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00572>
16. Wang, J., Wang, Y., Zhang, H., Guo, D., & Sun, G. (2021). *Atmospheric nitrogen dioxide at different concentration levels regulates growth and photosynthesis of tobacco plants*. *Journal of Plant Interactions*, 16(1), 422–431. <https://doi.org/10.1080/17429145.2021.1967474>
17. World Health Organization (WHO). (2021). *Air quality guidelines: global update 2021*. Geneva: WHO.
18. Zhou, B., Guo, Z., Xing, J., & Huang, Y. (2019). *Oxidative stress responses of plants to NO₂ exposure: Mechanisms and implications*. *Plant Physiology and Biochemistry*, 139, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.03.012>

BIOINDICATIVE ASSESSMENT OF AIR POLLUTION IN UTENA TOWN

Inga Jakštonienė, Nijolė Rukštelienė

*Utenos kolegija, Higher Education Institution,
Maironio str. 18, Utena, Lithuania*

Summary

In the second quarter of 2024, bioindicative air pollution studies were conducted in Utena town using the biosorption method with mosses (*Sphagnum*) and the growth test of garden cress (*Lepidium sativum*). The experiment was carried out in different parts of the city to assess air pollution caused by transport and individual households.

The results showed that garden cress growth was more intensive when grown in mosses exposed in areas with higher concentrations of air pollutants. Overall, pollution levels in the studied sites were low and did not exceed the limit values anywhere. The results contradicted the initial hypothesis that higher pollutant concentrations in mosses would inhibit growth, considering the mosses' well-documented ability to accumulate pollutants – especially heavy metals – which can negatively affect plant development. The lowest growth intensity was recorded in the control group, where mosses were not exposed to environmental conditions.

The average height of garden cress plants was compared with data from the *2024 Environmental Monitoring Report of Utena District Municipality*. Regression analysis revealed statistically significant relationships between air pollutant concentrations (PM₁₀, PM_{2.5}, NO₂, CO) and plant growth parameters. The observed increase in growth intensity may be associated with the hormesis effect or with an additional source of nitrogen and other elements.

The results suggest that low concentrations of pollutants may stimulate the growth of garden cress (*Lepidium sativum*), while higher concentrations may inhibit it. Therefore, the application of the bioindicative method involving garden cress cultivation in mosses exposed in low-pollution areas may be insufficiently sensitive and pose interpretation challenges.

Key words: air pollution, bioindicative study, garden cress.