

Nanodalelių patekimo į augalą, judėjimo jame ir poveikio jam tyrimų apžvalga

Rūta Paulauskaitė¹, Jurga Miliauskienė¹, Lina Ragelienė²

¹Lietuvos agrarinių ir miškų mokslų centro filialas Sodininkystės ir daržininkystės institutas, Kauno g. 30, LT-54333 Babtai, Kauno r.

²Vytauto Didžiojo universitetas, Vileikos g. 8, LT-44404 Kaunas

Agronomijoje vis plačiau naudojami taikant nanotechnologijas pagaminti preparatai: herbicidai, insekticidai, fungicidai, trąšos ir kt. Lietuvoje agronomijos srityje su nanodalelėmis atliktų tyrimų yra vos keli, todėl labai svarbu apžvelgti nanodalelių poveikį. Nanodalelės gali turėti tiek teigiamą, tiek neigiamą poveikį aplinkai: mikroorganizmams, augalams, gyvūnams. Jų poveikis priklauso nuo dalelės dydžio, formos, aglomeracijos, ar jos tuščiavidurės ar pilnos, nuo paviršiaus modifikavimo, gebėjimo perduoti šilumą, jautrumo temperatūrai ir fotoluminescencijai. Pagal šiuos kriterijus nanodalelės skirstomos į keturias grupes: organinės ir neorganinės kilmės, anglies ir hibridinės struktūros nanodalelės. Nanodalelių poveikis augalams priklauso nuo patekimo į augalą ir judėjimo jame būdų. Dalelės gali patekti į augalą per lapus ir šaknis. Apoplastiniu būdu dalelės juda nekirsdamos ląstelių ir jų nepažeisdamos, o simplastiniu būdu juda per ląsteles, įveikdamos plazminės membranos barjerą. Pagrindinis šio straipsnio tikslas yra apžvelgti nanodalelių rūšis, jų patekimo į augalą ir judėjimo jame būdus bei poveikį augalams.

Reikšminiai žodžiai: aktyvūs deguonies junginiai, augalai, dispersinė sistema, nanodalelė.

Įvadas. Norint pagerinti maisto kokybę ir padidinti derlių reikia ieškoti alternatyvių, dirvą tausojančių būdų. Vienas iš tokių būdų – agronomijoje naudoti trąšas, pagamintas taikant nanotechnologijas (Mwaanga, 2018; Marchiol, 2018). Nanodaleles augalai lengviau pasisavina, jų efektyvumas didesnis, todėl gali būti sunaudojamas mažesnis kiekis nei įprastų mikroelementinių trąšų, taip nealinant dirvos ir mažinant trąšų patekimą į gruntinius vandenis. Kita problema kyla dėl globalinio atšilimo. Keičiantis aplinkos veiksniams, pastebimi temperatūros ir kritulių pokyčiai. Didesni ekstremumai gali sukelti sausras ir užmirkimus. Tokie abiotiniai veiksniai neigiamai veikia derliaus kiekį, nes sukelia augalų oksidacinį stresą (Abd-Isalam, Prasad, 2018; Kheir et al., 2019; Uprety et al., 2019). Pasikeitus aplinkos veiksniams arba augalus paveikus nuodingomis nanodalelėmis augale indukuojami streso veiksniai, kurie sulėtina arba sustabdo augalo

augimą, sumažina derlių. Streso paveiktuose augaluose susiformuoja aktyvūs deguonies junginiai (ADJ), tokie kaip singuletinis deguonis, superoksidas, hidroksido peroksidazė ir hidroksido radikalai, kurie paveikia ląstelės struktūrą, organelas ir funkcijas. Augalai, siekdami pašalinti abiotinių veiksnių ląstelėms padarytą žalą, aktyvina antioksidacinę sistemą, kuri suaktyvina nefermentinių (karotenoidų, tokoferolių, askorbato ir glutationo) ir fermentinių (superoksido dismutazės, katalazės ir askorbato peroksidazės) antioksidantų sintezę (Lobo et al., 2010; Sharma et al., 2012; Soundararajan et al., 2014; Mittler, 2002; Racchi, 2014). Siekiant apsaugoti derlių nuo neigiamų aplinkos veiksnių, taip pat naudojamos nanotechnologijomis pagrįstos priemonės.

Nanotechnologija ir nanodalelės yra svarbios tvariam vystymuisi užtikrinti, vykstant aplinkos pokyčiams (Grieger et al., 2010; Peralta-Videa et al., 2016; Mukherjee et al., 2014). Nanodalelės gali turėti tiek naudingą, tiek kenksmingą poveikį aplinkai: mikroorganizmams, augalams, gyvūnams. Šios dalelės gali paveikti augalų genų ekspresiją, biochemiją, fiziologiją ir morfologiją. Jos pagerina augalų sudygamą, didina šaknų ilgį, gali turėti įtakos mineralinių medžiagų apykaitai augale, fotosintezei, transpiracijai ir kt. (Tripathi et al., 2017; Anjum et al., 2014; Monreal et al., 2010; Siddiqui, Al-Whaibi, 2014b). Nanodalelėmis paveikus augalų ląsteles, pastebimi augimo, biologinių funkcijų, genų ekspresijos bei vystymosi pokyčiai. Nanodalelės gali paveikti augalo proteomiką ir transkriptomiką (Rico et al., 2011), keisti augalo biomasę, lapų plotą ir chlorofilų kiekį (Mukherjee et al., 2014; Wang et al., 2011; Yang et al., 2015).

Intensyvus nanotechnologinių produktų naudojimas didina dirvožemyje ir ekosistemose besikaupiančių nanodalelių kiekius, kurie veikia gyvus organizmus. Pavyzdžiui, TiO_2 daro naudingą poveikį sėklų dygimui, šaknų augimui ir pagerina daigų augimą šių augalų: baltažiedžio vairo (Lyu et al., 2017), kopūstų, kukurūzų, salotų, avižų (Andersen et al., 2016; Lyu et al., 2017), linų (Aghdam et al., 2016; Lyu et al., 2017). Buvo tyrinėtos sidabro nanodalelės ir nustatytas jų toksiškas poveikis heterotrofiniams mikroorganizmams ir augalams (Tripathi et al., 2017).

Nanodalelių samprata, jų patekimas į augalą ir judėjimas jame. Nanotechnologija yra daugiadisciplininis mokslas, susidedantis iš fizikos, chemijos, biologijos, inžinerijos ir elektronikos (Wang et al., 2014). Kaip teigia Tarptautinė bendrosios ir taikomosios chemijos sąjunga (IUPAC), nanodalelės priskiriamos koloidams ir apibrėžiamos kaip heterogeninės didelio dispersiškumo laipsnio sistemos, kuriose dispersinės fazės dalelių dydis kinta nuo 1 iki 100 nm (ISO/TS 80004-1 2010). Nanodalelės gali susidaryti aplinkoje natūraliai arba taikant nanotechnologijas gali būti

sukuriamos naujos medžiagos. Natūraliai nanodalelės susidaro smulkiame smėlyje, dulkėse, išsiveržusių ugnikalnių pelenuose, vandenyno pursluose, susidarant trinčiai (pavyzdžiui, tarp metalų), vykstant erozijai, fotocheminių reakcijų metu. Prie natūralių nanodalelių priskiriamos ir bakterijos bei virusai, kurių dydis – 0,7–400 nm (nanoorganizmai). Taikant nanotechnologiją sukurtos nanomedžiagos naudojamos buityje (dantų pasta, kremai ir kosmetika, valikliai, nanodangos), agronomijoje kaip trąšos, pesticidai, hormonų reguliatoriai.

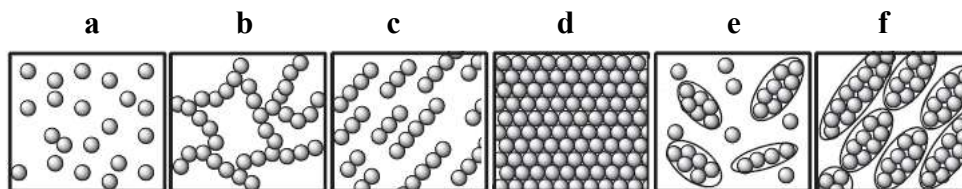
Nanodalelės skirstomos į keturias grupes: organinės, neorganinės kilmės, anglies ir hibridinės struktūros nanodalelės (1 lentelė) (Jeevanandam et al., 2018; Loevestam et al., 2010).

1 lentelė. Nanodalelių grupės ir pavyzdžiai

Table 1. Groups and examples of Nanoparticles

Nanodalelės			
organinės kilmės	neorganinės kilmės	anglies	hibridinės struktūros
Polimerai, liposomos, paviršinio aktyvumo medžiagos, pigmentai	Metalai: Au, Ag, Fe; metalų oksidai: TiO ₂ , ZnO, SiO ₂ , BO, Mo, ir kiti	Fulerenas, grafenas, viengubo sluoksnio, daugiasluoksniai anglies nanovamzdeliai	Kvantiniai taškai, apsauginės struktūros

Pagrindinės nanodalelių charakteristikos yra jų dydis, forma – tuščiaidurės ar pilnos, paviršiaus modifikavimas, optinės savybės, gebėjimas perduoti šilumą, jautrumas temperatūrai, fotoluminescencija. Nanodalelių struktūra ir jų poveikis aplinkai yra glaudžiai susiję, o nanodalelių agliutinacija lemia agregatinę būseną (1 pav.).

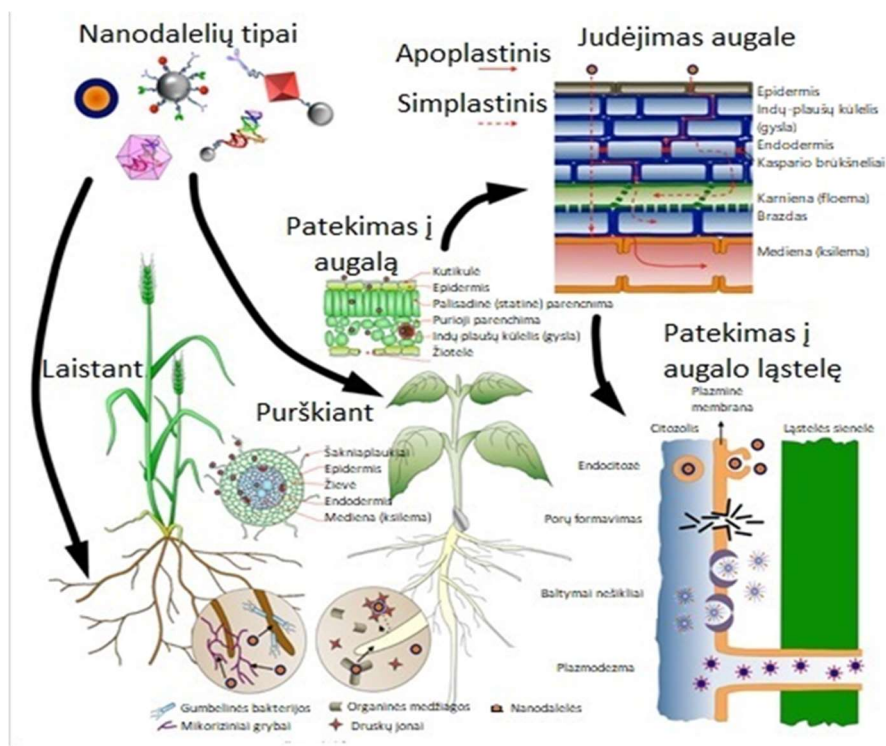


1 pav. Nanodalelių agregatinės būsenos: a) netaisyklinga forma; b) frakcinė struktūra; c) sudaryta taisyklinga struktūra; d) vientisa, taisyklinga struktūra; e) mažo tankio dispersinė sistema; f) didelio tankio dispersinė sistema (Stoeva et al., 2002)

Fig. 1. Aggregation of nanoparticles. (a) irregular structure, (b) fractional structure, (c) homogeneous structure, (d) stable structure, (e) low density dispersive system, (f) high density dispersion system (Stoeva et al., 2002)

Sistema, kurioje vienos ar kelių medžiagų dalelės yra pasklidusios kitoje tolydinėje medžiagoje, yra vadinama dispersine sistema. Šios sistemos skirstomos į homogenines (vienfazės – terpėje tolygiai pasklidusi fazė) ir heterogenines (daugiafazės – fazės yra atskirtos sąlyčio paviršiumi). Pagal dalelių dydį heterogeninės sistemos skirstomos į stambiadispersines, kuriose dalelės didesnės kaip 100 nm (pvz.: suspensijos, emulsijos), ir smulkiadispersines, kuriose fazės dalelės yra 1–100 nm dydžio (pvz.: zoliai, koloidiniai tirpalai).

Sistemos dispersiškumas apibūdina dalelių aglomeraciją. Dalelių aglomeracija turi didelį poveikį atliekant toksikologijos tyrimus (Hussein-Al-Ali et al., 2014). Pavyzdžiui, smulkiadispersinės sistemos lengviau prasiskverbia per augalo žioteles ir ląstelių membranas. Į augalą nanodalelės gali patekti keliais būdais: per šaknis ir (arba) per lapus (2 pav.). Nuo patekimo būdo ir nanodalelės formos priklauso, kaip augalas bus paveiktas. Augale nanodalelės juda simplastiniu ir apoplastiniu būdais.



2 pav. Nanodalelių patekimo į augalą ir judėjimo jame keliai pagal A. Pérez de Luque (2017)

Fig. 2. Nanoparticle entry and movement pathways in plants. Picture translated by Pérez de Luque, 2017

Apoplastiniu būdu nanodalelė augale juda tik apoplastu ir nesiskverbia į ląstelių vidų. Šiuo keliu judančios nanodalelės prasiskverbia tik iki karnienos (floema), todėl jos kaupiasi šaknyse, nes karniena visos medžiagos juda gravitacijos veikimo kryptimi. Nanodalelės, judančios simplastiniu keliu, keliauja per ląsteles, įveikdamos plazmines membranas. Prasiskverbimas per membraną priklauso nuo nanodalelės formos, krūvio, apvalkalo, giminingumo membranai. Yra keturi nanodalelių patekimo į ląsteles būdai: 1) endoplazminis, 2) suformuojant poras, 3) dalyvaujant baltymams nešikliams, 4) plazmodezmomis. Augale simplastiškai judančios nanodalelės patenka į lapus (Pérez de Luque, 2017).

Įvairios kilmės nanodalelių poveikis augalams. *Organinės nanodalelės.* Nanokapsuliavimo būdas naudojant liposomas buvo pritaikytas agrokultūroje parazitiniams augalams kontroliuoti, pesticidų ir herbicidų gamyboje (Marchiol, 2018). Parazitiniai džioveklinių šeimos augalai sukaupia daug vandens ir mitybinių medžiagų iš dirvožemio, taip sudarydami konkurenciją kultūriniam augalams. Nanokapsuliuotų herbicidų apvalkalas yra pritaikytas reaguoti į aplinkos pokyčius. Šių medžiagų kapsulės, patekusios ant tinkamo paviršiaus, šiuo atveju – džioveklės lapų, suyra ir viduje esantys herbicidai tiesiogiai veikia tik džiovekles. Taip galima apsaugoti kultūrinius augalus nuo galimos parazitinių augalų ir piktžolių žalos (Pérez de Luque, Rubiales, 2009). Taikant nanokapsuliavimo metodą buvo pagerintas atrazino (herbicidas, skirtas žolėms naikinti kukurūzų laukuose) poveikis bastutinių šeimos žolėms. Buvo atlikti tyrimai su nanokapsuliuotu atrazinu ir nepaveiktu atrazinu. Po 10 kukurūzų ir po 15 bastutinių šeimos žolių sėklų buvo pasodinta į vazonus. Kukurūzų ir bastutinių šeimos žolių mišinys, praėjus keturioms dienoms po sėjos, buvo laistomas 2,5 kg ha⁻¹ nekapsuliuotu ir kapsuliuotu atrazinu ir daigintas 14 dienų. Rezultatai parodė, kad kukurūzams atrazinas poveikio neturėjo, jų daigumas nepakito (90 %), tačiau bastutinių šeimos žolių sėklų sudygo tik 40 % naudojant atraziną ir visiškai nesudygo laistant nanokapsuliuotu atrazinu (Pereira et al., 2014). Atliekant kitą tyrimą tirtas skirtingų koncentracijų (5 μg ml⁻¹ ir 10 μg ml⁻¹) natrio alginato nanodalelių kaip insekticidų poveikis cikadėlėms (vabzdžiai, mintantys augalų sultimis). Augalų lapai apipurkšti nanodalelėmis ir po 1, 7, 15 dienų skaičiuojamos cikadėlės. Atlikus skaičiavimus, praėjus 1, 7, 15 dienų po purškimo nanodalelėmis ant augalų lapų, nustatyta, kad mažiausiai cikadėlių buvo praėjus 15 dienų po purškimo 10 μg ml⁻¹ koncentracijos tirpalu: ant 3 lapų rasta vidutiniškai 1–7 cikadėlės, o ant nepaveiktų augalų jų buvo 10–15 (Kumar et al., 2014).

Neorganinės nanodalelės. Neorganinės nanodalelės plačiai taikomos agronomijoje gaminant trąšas, fungicidus, insekticidus, naudojamos augalų apsaugai nuo grybelių (Rai, Ingle, 2012; Ram et al., 2014, Phogat et al., 2016). Šiai grupei priklausantys metalų oksidai, tokie kaip ZnO, TiO₂, Fe₂O₃, CuO, yra plačiai ištyrinėti (2 lentelė). Silicis yra antras labiausiai paplitęs elementas dirvoje, jis sudaro apie 28 % žemės plutos ir mažina druskingų sąlygų sukeltą augalų stresą. Silicio oksido nanodalelės turi teigiamą poveikį augalų augimui ir derliui. Jos nusėda į augalo ląstelės sienelę ir formuoja makromolekulinius kompleksus: celiuliozę, pektinus, glikoproteinus ir ligninus. Taip sukuriamos koloidinės sistemos su didesniu paviršiaus plotu. Tai reiškia, kad silicio oksido nanodalelės gali turėti poveikį ksilemai ir vandens apytakai. Silicio oksidas taip pat teigiamai veikia atsaką į aplinkos stresą. K. Manizheh ir kt. (2014) tyrė silicio oksido nanodalelių poveikį bazilikams. Tyrimai atlikti šiltnamyje, kur daliai augalų buvo sukeliama druskingumo stresas. Augalai buvo palaistyti skirtingų koncentracijų (1, 3 ir 6 ds m⁻¹) NaCl, o vėliau dvi savaites laistyti silicio nanodalelių tirpalu. Rezultatai parodė, kad, esant mažiausiai druskos koncentracijai ir laistant silicio oksido nanodalelėmis, stresas augale nepasireiškė, chlorofilų *a* ir *b* kiekis iš esmės padidėjo. Silicio nanodalelės turėjo patikimą teigiamą poveikį bazilikų atsigavimui, prolino kiekiui, taip pat žaliai ir sausai biomasei.

2 lentelė. Metalų oksidų nanodalelių poveikis augalams

Table 2. Effects of metal oxide nanoparticles on plants

Nanodalelė / medžiaga	Dydis ir koncentracija	Tirtas augalas	Poveikis	Autoriai
Fe ₃ O ₄ ir CoO	Nenurodyta straipsnyje	Svidrės ir moliūgai Žirniai	Užblokuoja akvaporinus ir stabdo kvėpavimą. Sukelia oksidacinį stresą. Dauguma dalelių rastos laisvos citoplazmoje. Didžiausias skirtumas buvo pastebėtas nustatant lipidų peroksidaciją.	(Wang et al., 2011)
TiO ₂	80 ir 800 mg kg ⁻¹	Špinatai	Pagerina augimą (pagerina šviesos pasisavinimą).	(Giorgetti et al., 2019)

2 lentelės tęsinys.
Table 21 continued.

Nanodalelė / medžiaga	Dydis ir koncentracija	Tirtas augalas	Poveikis	Autoriai
ZnO	0, 25, 50, 75 ir 100 mg l ⁻¹ ;	Svidrės	Pailgėjo šaknys ir padidėjo jų skaičius.	
	50 nm; 2 000 mg l ⁻¹	Miežiai	Sumažino kadmio sukkelto oksidacinio streso rodiklius.	
	50 nm; 200, 300 mg l ⁻¹	Miežiai ir ryžiai	Nepastebėta efekto sėklų daigumui, 50 % sumažėjo chlorofilų <i>a</i> ir <i>b</i> kiekis, padidėjo karotenoidų gamyba.	(Wang et al., 2015; Yang et al., 2015; Mukherjee et al., 2014; Moreno et al., 2010)
	8 nm; 500 mg l ⁻¹	Sojos	Padidėjo šaknys ir jų skaičius.	
	10 nm; 25, 250, 500 mg kg ⁻¹	Vaireniai	Sumažėjo chlorofilų ir katalazės kiekis lapuose, APOX šaknyse ir lapuose, padidėjo lipidų peroksidazės kiekis.	
CuO	50 ir 100 mg kg ⁻¹	Žirniai	Sumažėjo derlius (52 %), sumažėjo boro kiekis (80 %) ir geležies kiekis (42 %) sėklose ir padidėjo baltymų kiekis (33 %), palyginti su kontrole.	(Ochoa et al., 2018; Zafar et al., 2017)
	10 mg l ⁻¹	Garstyčios	80 % padidėjo antioksidantų kiekis.	
MnO	6,4 mg kg ⁻¹	Kviečiai	Sutrumpėjo šaknys ir padidėjo antžeminė dalis, toksiško poveikio nenustatyta.	(Dimkpa et al., 2018)
Fe ₂ O ₃	0, 5, 10, 15, 20 mg l ⁻¹	Miežiai	Sumažėjo Cd sukkelto oksidacinio streso rodikliai.	(Yang et al., 2015)

2 lentelės tęsinys.
Table 21 continued.

Nanodalelė / medžiaga	Dydis ir koncentracija	Tirtas augalas	Poveikis	Autoriai
SiO ₂	100, 200, 300 ir 400 mg l ⁻¹	Žirniai	300 mg l ⁻¹ padidino daigumą nuo 82,3 iki 97,7 %, šaknų sausą masę – 78,7 %, ilgį – iki 32,7 %.	(Alshaal et al., 2017; Siddiqui, Whaibi, 2014a; Kalteh et al., 2014)
	10–12 nm; 8 g l ⁻¹	Pomidorai	Pagerėjo daigumas.	
	7 nm; 0,01 mg ml ⁻¹	Bazilikai	Padidėjo chlorofilų <i>a</i> ir <i>b</i> , prolino kiekiai.	

Nanodalelės gali būti naudojamos sėkloms apvelti, taip pagerinant jų daigumą. Buvo pastebėta, jog, naudojant silicio oksido daleles (10–12 nm) žirnių ir pomidorų sėkloms apvelti, statistiškai patikimai pagerėja žirnių (iki 97,7 %) ir pomidorų (iki 94 %) sėklų daigumas (Alshaal et al., 2017; Siddiqui, Al-Whaibi, 2014a). Svogūnų sėklas paveikus skirtingų koncentracijų (0, 10, 20, 30, 40 μg ml⁻¹) silicio oksido nanodalelėmis (20 nm), po 10 dienų nustatyta, kad jų daigumas padidėjo nuo 94,28 iki 96,52 %, naudojant mažesnių koncentracijų (iki 20 μg ml⁻¹) silicio oksido nanodaleles (Raskar, Laware, 2014). Tiriant kviečių sėklas (Rizwan et al., 2019), po 20 valandų inkubacijos kambario temperatūroje tamsoje su cinko (20–30 nm, 25, 50, 75, 100 mg l⁻¹) ir geležies (50–100 nm, 5, 10, 15, 20 mg l⁻¹) oksidų nanodalelėmis, sėklos buvo perkeltos į šiltnamį, pasėtos ir augintos 124 dienas. Atlikus analizes ir matavimus nustatyta, kad nanodalelių paveikti augalai yra žalesni, vešlesni ir didesni. Augalų aukštis, naudojant 100 mg l⁻¹ ZnO ir 20 mg l⁻¹ Fe, padidėjo atitinkamai 37 ir 35 %, o varpų ilgis – atitinkamai 49 ir 50 %, palyginti su nepaveiktais augalais.

Atliekant kitą tyrimą kukurūzai buvo auginti klimato kameroje ir laistyti iki 30 nm dydžio TiO₂ nanodalelių 1 g l⁻¹ koncentracijos suspensija. Nustatyta, kad kukurūzų šaknų ląstelių porų skersmuo sumažėjo nuo 6,6 iki 3 nm (po 5 val. poveikio), taip pat sumažėjo šaknų ir lapų sausa masė atitinkamai nuo 16,08 iki 15,1 g ir nuo 2,94 iki 2,74 g, palyginti su nepaveiktais augalais (Asli, Neumann, 2009). Sidabro nanodalelių (10–30 nm) poveikis žirniams buvo tirtas veikiant juos penkių skirtingų koncentracijų (20, 40, 60, 80 ir 100 ppm) nanodalelėmis. Nustatyta, kad, naudojant 60 ppm koncentracijos sidabro nanodaleles, žirnių sausa masė

padidėjo nuo 3,9 iki 6,8 g, lapų plotas – nuo 4,6 iki 7,2 cm², palyginti su nepaveiktais augalais. Taip pat iki 30 % padidėjo baltymų koncentracija, palyginti su nepaveiktais augalais. Kitos koncentracijos neparodė statistiškai patikimų pokyčių (Hediat, Salama, 2012).

Anglies nanodalelės. Grafenas – tai anglies alotropinė atmaina, sudaryta iš vieno sluoksnio anglies atomų, kurie yra išsidėstę šešiakampe gardele. Buvo tirtas grafeno suspensijos (0, 500, 1000 ir 2000 mg l⁻¹) 20 dienų poveikis kopūstų, pomidorų ir špinatų daigams (Begum et al., 2011). Didžiausią grafeno koncentracija tiek šaknų, tiek lapų masę sumažino: kopūstų – atitinkamai 12 ir 19 %, pomidorų – atitinkamai 14 ir 8 %, palyginti su nepaveiktais augalais. Nustatyta, jog špinatai buvo jautriausi grafeno suspensijos poveikiui. Jų šaknų ir lapų masė sumažėjo atitinkamai 61 ir 25 %, palyginti su nepaveiktais augalais. Taip pat pastebėta, jog, didėjant grafeno koncentracijai augaluose, mažėja lapų skaičius ir padidėja aktyvių deguonies junginių gamyba. D. Lin ir B. Xing (2007) tyrė vieno sluoksnio anglies nanovamzdelių poveikį rapsų, ridikėlių, salotų, kukurūzų, agurkų ir svidrių daigumui. Paveikus 2 000 mg l⁻¹ koncentracijos anglies nanovamzdeliais buvo nustatytas statistiškai patikimas daugiamečių svidrės daigumo sumažėjimas (10 %), palyginti su nepaveiktų sėklų daigumu. Visų kitų tirtų augalų daigumui anglies nanovamzdeliai poveikio neturėjo. Kai kurie tyrėjai tyrė vieno sluoksnio anglies nanovamzdelių poveikį kopūstų, morkų, agurkų, salotų, svogūnų ir pomidorų šaknų ir lapų ilgiui (Cañas et al., 2008). Po 10 sėklų buvo daiginama Petri lėkštelėse, 24 ir 48 val. veikiant keturių skirtingų koncentracijų (0, 56, 315 ir 1,750 mg l⁻¹) anglies nanovamzdeliais. Atlikti matavimai parodė, kad stipresnis poveikis tirtų augalų, išskyrus salotas, šaknims pasireiškia, sėklas veikiant anglies nanovamzdeliais 24 valandas. Svogūnų ir agurkų šaknų ilgis statistiškai patikimai pailgėjo po 24 val. trukmės daugiasluoksnių anglies nanovamzdelių poveikio. M. H. Lahiani ir kiti tyrėjai vertino daugiasluoksnių anglies nanovamzdelių poveikį miežių, sojų ir kukurūzų daigumui ir augimui. Sėklos buvo pasėtos Petri lėkšteles su agaru terpe ir veiktos skirtingų koncentracijų (50, 100 ir 200 µg ml⁻¹) nanovamzdeliais. Po 10 ir 90 dienų trukmės poveikio pastebėta, kad efektyviausia yra 100 µg ml⁻¹ koncentracija: nustatytas statistiškai patikimas sojų šaknų (33 %) ir kukurūzų lapų (30 %) pailgėjimas, palyginti su nepaveiktais augalais.

Hibridinės struktūros nanodalelės. Buvo tirtas grafeno kvantinių taškų (vidutiniškai 5 nm dydžio) poveikis česnako ir kalendros daigumui ir augimui (Chakravarty et al., 2015). Po 20 sėklų 30 sekundžių buvo laikoma distiliuotame vandenyje su grafeno kvantiniais taškais, paskui 3 val. sėklos buvo laikomos vandenyje ir pasodintos dirvožemyje 3 cm

gylyje. Nustatyta, kad paveiktų kalendros ir česnako augalų šaknų ir lapų masė padidėjo, palyginti su nepaveiktais augalais, paveikti augalai buvo aukštesni ir žalesni. Siekiant palyginti anglies kvantinių taškų ir vieno sluoksnio nanovamzdelių kvantinių taškų poveikį pomidorams buvo tirti sėklų daigumo ir produktyvumo rodikliai po dviejų mėnesių auginimo (Alimohammadi et al., 2011). Atlikus matavimus nustatyta, jog naudojant abi kvantinių taškų formas sumažėjo augalų šaknų ilgis ir skaičius, taip pat augaluose buvo nustatyta žymiai mažesnė chlorofilų koncentracija, todėl pomidorai atrodė blankesnės žalios spalvos, palyginti su nepaveiktais pomidorais.

Apibendrinimas. Atlikti tyrimai parodė, kad nanodalelės gali teigiamai ir neigiamai paveikti augalo genų ekspresiją, biochemiją, fiziologiją ir morfologiją, pakeisti mineralinių medžiagų apykaitą augale, žydėjimą, padidinti arba sumažinti augalo vykdomą transpiraciją, šaknų ilgį, paveikti fotosintezės aktyvumą. Poveikis priklauso nuo dispersinės sistemos stabilumo, nanodalelių charakteristikos, patekimo į augalą ir judėjimo jame būdų.

Gauta 2019-05-07
Parengta 2019-06-05

Literatūra

1. Abd-Elsalam K. A., Prasad R. 2018. Nanobiotechnology Applications in Plant Protection. Springer International Publishing, 1(1): 63–86.
2. Aghdam M., Mohammadi H., Ghorbanpour M. 2016. Effects of nanoparticulate anatase titanium dioxide on physiological and biochemical performance of *Linum usitatissimum* (Linaceae) under well-watered and drought stress conditions. *Brazilian Journal of Botany*, 39(1): 139–146.
3. Alimohammadi M., Xu Y., Wang D., Biris A. S., Khodakovskaya M. V. 2011. Physiological responses induced in tomato plants by a two-component nanostructural system composed of carbon nanotubes conjugated with quantum dots and it's in vivo multimodal detection. *Nanotechnology*, 22(29): 510–520.
4. Alshaal T., Alsaedi A., El-Ramady H., Almohsen M. 2017. Enhancing seed germination and seedlings development of common bean (*Phaseolus vulgaris*) by SiO₂ nanoparticles. *Egyptian Journal of Soil Science*, 57(4): 407–415.

5. Andersen C. P., King G., Plocher M., Storm M., Pokhrel L. R., Johnson M. G., Rygiewicz P. T. 2016. Germination and early plant development of ten plant species exposed to titanium dioxide and cerium oxide nanoparticles. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 35(9): 2223–2229.
6. Anjum N. A., Singh N., Singh M. K., Sayeed I., Duarte A. C., Pereira E., Ahmad I. 2014. Single-bilayer graphene oxide sheet impacts and underlying potential mechanism assessment in germinating faba bean (*Vicia faba* L.). *Science of the Total Environment*, 47(2): 834–841.
7. Asli S., Neumann P. M. 2009. Colloidal suspensions of clay or titanium dioxide nanoparticles can inhibit leaf growth and transpiration via physical effects on root water transport. *Plant, Cell & Environment*, 32(5): 577–584.
8. Begum P., Ikhtiari R., Fugetsu B. 2011. Graphene phytotoxicity in the seedling stage of cabbage, tomato, red spinach, and lettuce. *Carbon*, 49(12): 3907–3919.
9. Cañas J., Long M., Nations S., Rodica V., Dai L., Luo M., Ambikapathi R., Lee E H., Olszyk D. 2008. Effects of functionalized and nonfunctionalized single-walled carbon nanotubes on root elongation of select crop species. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 27(9): 1922–1931.
10. Chakravarty D., Erande M. B., Late D. J. 2015. Graphene quantum dots as enhanced plant growth regulators: effects on coriander and garlic plants. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95(13): 2772–2778.
11. Dimkpa C., Singh U., Adisa I., Bindraban P., Elmer W., Gardea-Torresdey J., White J. 2018. Effects of Manganese Nanoparticle Exposure on Nutrient Acquisition in Wheat (*Triticum aestivum* L.). *Agronomy*, 8(9): 158.
12. Giorgetti L., Spanò C., Muccifora S., Bellani L., Tassi E., Bottega S., Gregorio S. di, Siracusa G., Sanità di Toppi L., Ruffini Castiglione M. 2019. An integrated approach to highlight biological responses of *Pisum sativum* root to nano-TiO₂ exposure in a biosolid-amended agricultural soil. *Science of The Total Environment*, 650(2): 2705–2716.
13. Grieger K., Baun A., Owen R. 2010. Redefining risk research priorities for nanomaterials. *Journal of Nanoparticle Research*, 12(2): 383–392.
14. Hediat M., Salama H. 2012. Effects of silver nanoparticles in some crop plants, Common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and corn

- (*Zea mays* L.). International Research Journal of Biotechnology, 3(10): 190–197.
15. Hussein-Al-Ali S. H., El Zowalaty M. E., Hussein M. Z., Geilich B. M., Webster T. J. 2014. Synthesis, characterization, and antimicrobial activity of an ampicillin-conjugated magnetic nanoantibiotic for medical applications. International Journal of Nanomedicine, 9: 3801–3814.
 16. ISO/TS 80004-1 2010, DD CEN ISO/TS 27687:2009: Nanotechnologies. Terminology and definitions for nano-objects. Nanoparticle, nanofibre and nanoplate, British Standards Institute.
 17. Yang Z., Chen J., Dou R., Gao X., Mao C., Wang L. 2015. Assessment of the Phytotoxicity of Metal Oxide Nanoparticles on Two Crop Plants, Maize (*Zea mays* L.) and Rice (*Oryza sativa* L.). International Journal of Environmental Research and Public Health, 12(12): 15100–15109.
 18. Jeevanandam J., Chan Y. S., Dufresne A., Michael K. 2018. Review on nanoparticles and nanostructured materials: history, sources, toxicity and regulations. Beilstein Journal of Nanotechnology, 9(1): 1050–1074.
 19. Kheir A. M. S., El Baroudy A., Aiad M. A., Zoghdan M. G., Abd El-Aziz M. A., Ali M. G. M., Fullen M. A. 2019. Impacts of rising temperature, carbon dioxide concentration and sea level on wheat production in North Nile delta. Science of The Total Environment, 15 (2): 3161–3173.
 20. Kumar S., Bhanjana G., Sharma A., Sidhu M. C., Dilbaghi N. 2014. Synthesis, characterization and on field evaluation of pesticide loaded sodium alginate nanoparticles. Carbohydrate Polymers, 101: 1061–1067.
 21. Lahiani M. H., Dervishi E., Chen J., Nima Z., Gaume A., Biris A. S., Khodakovskaya M. V. 2013. Impact of Carbon Nanotube Exposure to Seeds of Valuable Crops. ACS applied materials & interfaces, 5(16): 7965–7973.
 22. Lin D., Xing B. 2007. Phytotoxicity of nanoparticles: Inhibition of seed germination and root growth. Environmental Pollution, 150(2): 243–250.
 23. Lyu S., Wei X., Chen J., Wang C., Wang X., Pan D. 2017. Titanium as a Beneficial Element for Crop Production. Frontiers in Plant Science, 8: 597.
 24. Lobo V., Patil A., Phatak A., Chandra N. 2010. Free radicals, antioxidants and functional foods: Impact on human health. Pharmacognosy Reviews, 4(8): 118–126.

25. Loevestam G., Rauscher H., Roebben G., Sokull-Kluettgen B., Gibson P., Putaud J., Stamm H. 2010. Considerations on a definition of nanomaterial for regulatory purposes. Publications Office of the European Union.
26. Manizheh K., Zarrin A., Shahram A., Aliabadi M. M., Nosratabadi A. F. 2014. Effect of silica Nanoparticles on Basil (*Ocimum basilicum*) Under Salinity Stress. *Journal of Chemical Health Risks*, 4(3): 123–132.
27. Marchiol L. 2018. Nanotechnology in Agriculture: New Opportunities and Perspectives. *New Visions in Plant Science*, 9(4): 161.
28. López-Moreno M. L., Rosa G. de la, Hernández-Viezcás J. A., Castillo-Michel H., Botez C. E., Peralta-Videa J. R., Gardea-Torresdey J. L. 2010. Evidence of the differential biotransformation and genotoxicity of ZnO and CeO₂ nanoparticles on soybean (*Glycine max*) plants. *Environmental Science Technology*, 44(19): 7315–7320.
29. Mittler R. 2002. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. Elsevier Ltd, England.
30. Monreal C., DeRosa M. C., Walsh R., Sultan Y., Schnitzer M. 2010. Nanotechnology in fertilizers. *Nature Nanotechnology*, 5(2): 91.
31. Mukherjee A., Peralta-Videa J. R., Bandyopadhyay S., Rico C. M., Zhao L., Gardea-Torresdey J. L. 2014. Physiological effects of nanoparticulate ZnO in green peas (*Pisum sativum* L.) cultivated in soil. *Metallomics*, 6(1): 132–138.
32. Mwaanga P. 2018. Risks, Uncertainties, and Ethics of Nanotechnology in Agriculture. *New Visions in Plant Science*, 22(3).
33. Ochoa L., Zuverza-Mena N., Medina-Velo I. A., Flores-Margez J. P., Peralta-Videa J. R., Gardea-Torresdey J. L. 2018. Copper oxide nanoparticles and bulk copper oxide, combined with indole-3-acetic acid, alter aluminum, boron, and iron in *Pisum sativum* seeds. *Science of the Total Environment*, 634: 1238–1245.
34. Peralta-Videa J., Huang Y., Parsons J., Zhao L., Lopez-Moreno L., Hernandez-Viezcás J., Gardea-Torresdey J. 2016. Plant-based green synthesis of metallic nanoparticles: scientific curiosity or a realistic alternative to chemical synthesis? *Nanotechnology for Environmental Engineering*, 1(1): 1–29.
35. Pereira A. E. S., Grillo R., Mello N. F. S., Rosa A. H., Fraceto L. F. 2014. Application of poly (epsilon-caprolactone) nanoparticles containing atrazine herbicide as an alternative technique to control

- weeds and reduce damage to the environment. *J. Hazard. Mater.*, 15(268): 207–215.
36. Pérez-de-Luque A., Rubiales D., 2009. Nanotechnology for parasitic plant control. *Pest Management Science*, 65(5): 540–545.
 37. Phogat N., Khan S. A., Shankar S., Ansary A. A., Uddin I. 2016. Fate Of Inorganic Nanoparticles In Agriculture. *Advanced Materials Letters*, 7(1): 3–12.
 38. Racchi M. 2014. Antioxidant Defenses in Plants with Attention to Prunus and Citrus spp. *Antioxidants*, 3(1): 189.
 39. Rai M., Ingle A. 2012. Role of nanotechnology in agriculture with special reference to management of insect pests. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 94(2): 287–293.
 40. Ram P., Vivek K., Kumar S. P. 2014. Nanotechnology in sustainable agriculture: Present concerns and future aspects. *African Journal of Biotechnology*, 13(6): 705–713.
 41. Raskar S. V., Laware S. L. 2014. Effect of zinc oxide nanoparticles on cytology and seed germination in onion. *International Journal of Current Microbiology and Applied Science*, 3: 467–473.
 42. Rico C. M., Majumdar S., Duarte-Gardea M., Peralta-Videa J. R., Gardea-Torresdey J. L. 2011. Interaction of Nanoparticles with Edible Plants and Their Possible Implications in the Food Chain. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(8): 3485–3498.
 43. Rizwan M., Ali S., Ali B., Adrees M., Arshad M., Hussain A., Zia ur Rehman M., Waris A. A. 2019. Zinc and iron oxide nanoparticles improved the plant growth and reduced the oxidative stress and cadmium concentration in wheat, *Chemosphere*, 187: 35–42.
 44. Sharma P., Jha A. B., Dubey R. S., Pessarakli M. 2012. Reactive Oxygen Species, Oxidative Damage and Antioxidative Defense Mechanism in Plants under Stressful Conditions. *Journal of Botany*, 1–26.
 45. Siddiqui M. H., Al-Whaibi M. H. 2014a. Role of nano-SiO in germination of tomato. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 21(1): 13.
 46. Siddiqui M. H., Al-Whaibi M. H. 2014b. Role of nano-SiO₂ in germination of tomato (*Lycopersicon esculentum* seeds Mill.). *Saudi Journal of Biological Sciences*, 21(1): 13–17.
 47. Soundararajan P., Sivanesan I., Jana S., Jeong B. 2014. Influence of silicon supplementation on the growth and tolerance to high temperature in *Salvia splendens*. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 55(4): 271–279.

48. Stoeva S., Klabunde K. J., Sorensen C. M., Dragieva I. 2002. Gram-Scale Synthesis of Monodisperse Gold Colloids by the Solvated Metal Atom Dispersion Method and Digestive Ripening and Their Organization into Two- and Three-Dimensional Structures. *Journal of the American Chemical Society*, 124(10): 2305–2311.
49. Szymańska R., Kołodziej K., Ślesak I., Zimak-Piekarczyk P., Orzechowska A., Gabruk M., Żądło A., Habina I., Knap W., Burda K., Kruk J. 2016. Titanium dioxide nanoparticles (100–1 000 mg/l) can affect vitamin E response in *Arabidopsis thaliana*. *Environmental Pollution*, 213: 957–965.
50. Tripathi D. K., Tripathi A., Singh Shweta S., Singh Y., Vishwakarma K., Yadav G., Sharma S., Singh V. K., Mishra R. K., Upadhyay R. G., Dubey N. K., Lee Y., Chauhan D. K. 2017. Uptake, Accumulation and Toxicity of Silver Nanoparticle in Autotrophic Plants, and Heterotrophic Microbes: A Concentric Review. *Frontiers in Microbiology*, 8: 7.
51. Uprety D. C., Reddy V. R., Mura J. D. 2019. Temperature Changes. In: D. C. Uprety, V. R. Reddy, J. D. Mura, *Climate Change and Agriculture: A Historical Analysis*. Springer Singapore, 43–51.
52. Wang X., Yang X., Chen S., Li Q., Wang W., Hou Ch., Gao X., Wang L., Wang S. 2015. Zinc Oxide Nanoparticles Affect Biomass Accumulation and Photosynthesis in *Arabidopsis*. *Frontiers in Plant Science*, 6: 1243.
53. Wang H., Kou X., Pei Z., Xiao J. Q., Shan X., Xing B. 2011. Physiological effects of magnetite (Fe_3O_4) nanoparticles on perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) and pumpkin (*Cucurbita mixta*) plants. *Nanotoxicology*, 5(1): 30–42.
54. Wang E. C., Wang A. Z. 2014. Nanoparticles and their applications in cell and molecular biology. *Integrative Biology*, 6(1): 9–26.
55. Zafar H., Ali A., Zia M. 2017. CuO Nanoparticles Inhibited Root Growth from *Brassica nigra* Seedlings but Induced Root from Stem and Leaf Explants. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 181(1): 365–378.

Uptake and Effect of Nanoparticles in Plants (Review)

R. Paulauskaitė, J. Miliauskienė, L. Ragelienė

Summary

Agronomy is increasingly using nanotechnology products: herbicides, insecticides, fungicides, fertilizers. Nanoparticles can have both positive and negative effects on the environment: microorganisms, plants, animals. Their effect depends on the particle size, shape, agglomeration, surface modification, ability to transfer heat, sensitivity of temperature, photoluminescence. According to these criteria, nanoparticles are divided into four groups: organic nanoparticles, inorganic nanoparticles, carbon – based nanoparticles and hybrid structures. The effect of nanoparticles on plants depends on the way in which they enter and move in plants. The particles can enter the plant through leaves and roots. There are apoplastic and symplastic pathways. When particles move around the cells without damaging them is regarded as apoplastic. When nanoparticles move through the cells theirs penetrate the membrane's barrier. The main objective is to review types of nanoparticles, their pathways and effects on plants.

Key words: plants, reactive oxygen species, dispersive system, nanoparticles.