

Učinak nanomaterijala na biljke

Jaklinović, Mirna

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:727774>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-19**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



Sveučilište u Zagrebu
Prirodoslovno-matematički fakultet
Biološki odsjek

Učinak nanomaterijala na biljke
Effects of nanomaterials on plants

Seminarski rad

Mirna Jaklinović

Preddiplomski studij Znanosti o okolišu
(Undergraduate Study of Environmental Sciences)

Mentorica: prof. dr. sc. Biljana Balen

Zagreb, 2021.

Ovaj rad, izrađen na Zavodu za molekularnu biologiju, pod vodstvom prof. dr. sc. Biljane Balen, predan je na ocjenu Biološkom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu radi stjecanja zvanja prvostupnice znanosti o okolišu.

Sadržaj

1.	UVOD	1
2.	NANOTEHNOLOGIJA.....	1
3.	NANOMATERIJALI	2
3.1.	METALNI NANOMATERIJALI.....	3
3.2.	NANOMATERIJALI NA BAZI UGLJIKA.....	3
3.3.	POLIMERNI NANOMATERIJALI.....	3
3.4.	HIBRIDNI NANOMATERIJALI.....	4
4.	NANOMATERIJALI U AGROKULTURI.....	4
5.	UTJECAJ NANOMATERIJALA NA BILJKE.....	5
6.	FITOTOKSIČNOSTI NANOMATERIJALA	10
7.	UNOS NANOMATERIJALA	11
8.	TRANSLOKACIJA NANOMATERIJALA	11
9.	MEHANIZAM PRIJENOSA NANOMATERIJALA	12
10.	ZAKLJUČAK	13
11.	LITERATURA	14
12.	ZAHVALE.....	24
13.	SAŽETAK	24
14.	SUMMARY	24

1. UVOD

Razvojem moderne tehnologije ubrzano se razvija i nanotehnologija pa se postavljaju brojna politička, pravna i etička pitanja kao i pitanja utjecaja, sigurnosti i toksičnosti na okoliš. Nanotehnologija nam može pomoći da sva pitanja riješimo brže i uspješnije no ikad prije.

2. NANOTEHNOLOGIJA

Iako nanotehnologiju smatramo modernom znanošću, ona ima dugu povijest; naime, koristila se u svakodnevnom životu, a ljudi nisu bili ni svjesni da je koriste. Presvlačili su keramičko posuđe glazurom nanobakra i nanosrebra, a u tim posudama je hrana ostajala duže svježa. Štitili su drvo na brodovima od gljivica i brzog propadanja premazivanjem posebnom bakrenom emulzijom (Jerković, 2015). Važna prekretnica za buduća istraživanja nanomaterijala bio je razvoj elektronskog mikroskopa 1931. godine (Ernst Ruska i Max Knoll) (Jerković, 2015). Začetnikom nanotehnologije smatra se Eric K. Drexler, američki inženjer poznat po popularizaciji potencijala molekularne nanotehnologije. Svoje ideje je 1992. predstavio pred američkim Kongresom nakon čega je pronašao sponzore kako bi mogao započeti istraživanja koja su omogućila razvoj nanoprocera i kvantnih računala (Jerković, 2015). Drexler je potaknuo razvoj molekularne nanotehnologije koja se temelji na konceptu kontrole pozicioniranja atoma. Cilj je bio stvaranje bilo koje željene strukture u skladu sa zakonima fizike i kemije postavljanjem pojedinačnog atoma na odgovarajuće mjesto, a da pritom sve bude i ekonomično (Jerković, 2015). Japanski fizičar Norio Taniguchi je 1974. uveo izraz nanotehnologija u svom izvješću „*On the basic concept of nanotechnology*“ u kojem je predložio da se naziv nanotehnologija koristi za sve procese u kojima se pojavljuju objekti manji od jednog mikrometra (Jerković, 2015).

„Nano“ potječe iz grčke riječi „nannos“ što u prijevodu znači „patuljak, nešto sićušno“. Pod „nanotehnologijom“ podrazumijeva se istraživanje i manipulacija materijom čija je veličina ispod 100 nanometara (nm), što znači da se radi o redu veličina molekula i virusa. Kažu da se nanosvijet nalazi na granici svijeta vidljivog golim okom i svijeta atoma i molekula (Pavić, 2012). Nanotehnologija se često naziva i molekularna nanotehnologija kako bi se naznačilo da se radi o stvaranju uređaja, strojeva i materijala atom po atom, molekula po molekula (Jerković, 2015). Razvojem skenirajućih mikroskopa (eng. *scanning tunneling microscope*, STM) i mikroskopa

atomske sile (eng. *atomic force microscope*, AFM) omogućeno je promatranje pojedinačnih atoma na površinama te manipulacija i praćenje kretanja pojedinih atoma. STM je obavezna tehnika u svim istraživanjima u kojima je potrebno odrediti strukturu površine na atomskoj skali i ona daje sliku rasporeda atoma u realnom prostoru (Jerković, 2015). AFM je instrument namijenjen promatranju površina, ne nužno vodljivih. Mjeri silu koja djeluje između mikroskopa i materijala, za razliku od STM-a koji mjeri struju vodljivih materijala i njihovih površina (Jerković, 2015).

„Bilo kuda, nano svuda!“. Nanotehnologija jedna je od najnovijih tehnologija koja je našla svoju primjenu u raznim granama industrije, i pokriva područja fizike, kemije, biologije i informatike, a ubrzano se razvija diljem svijeta (Pavić, 2012). Prednosti nanotehnologije su preciznost, učinkovitost, stvaranje manje količine otpada, proizvodnja materijala s posebnom namjenom i mnoge druge. Njena najveća i glavna prednost, a ujedno i opasnost, jest veličina čestica, te je zbog toga nanotehnologija predmet intenzivnih istraživanja.

3. NANOMATERIJALI

Nanotehnologijom je moguće dobiti nove, jeftinije, lakše i jače materijale. Svi nanomaterijali sastoje se od kristalnih ili amorfnih čestica te sadrže velik broj atoma. Smanjenjem veličine čestice pokazuju bitno drugačija svojstva. Tako na primjer točka taljenja čestice zlata opada s veličinom čestica ispod 5 nm (Jerković, 2015). Primjerice, izolator kao silikon postaje vodič, stabilni materijali poput aluminijska postaju zapaljivi, inertni materijali kao platina postaju katalizatori (Jerković, 2015). Europska komisija je 18. listopada 2011. godine prihvatila definiciju nanomaterijala koja glasi: “Nanomaterijali su prirodni, slučajno dobiveni ili proizvedeni materijali koji sadrže čestice ili u vezanom stanju ili kao agregat ili aglomerat, kod kojih jedna ili više vanjskih dimenzija spada u red veličine od jednog do 100 nanometara.”(Jerković, 2015).

Značajan pomak u polju nanotehnologije kombinirane s biotehnologijom je poboljšala uporabu nanotehnologije u raznim područjima istraživanja (Ashkavand i sur., 2015). Nanomaterijali su razvili jedinstvene karakteristike, uključujući veliku reaktivnu površinu, morfologiju, različite veličine pora i visoku reaktivnost u odnosu na druge materijale (Prasad i sur., 2016). Ova jedinstvena svojstva daju im katalitička, magnetska, termalna, električna i fluorescentna svojstva koja se primjenjuju u medicini, elektronici, energetici i sanaciji okoliša

(Sharma i sur., 2012; Prasad i sur., 2014; Prasad i sur., 2016). Metali od kojih su nanomaterijali napravljeni daju im razna svojstva zbog kojih se mogu koristiti kao herbicidi, pesticidi, antibaktericidi i gnojiva (Prasad i sur., 2014). Istraživanja nastavljaju proučavati sve aspekte nanomaterijala, uključujući utjecaj na rast i zaštitu biljaka u različitim uvjetima (Omar i sur., 2019).

Nanomaterijali se dijele u različite kategorije ovisno o njihovoj morfologiji, veličini i kemijskim svojstvima. Postoje četiri glavne vrste nanomaterijala: metalni nanomaterijali, nanomaterijali na bazi ugljika, polimerni nanomaterijali i hibridni nanomaterijali (Omar i sur., 2019).

3.1. METALNI NANOMATERIJALI

Metalni nanomaterijali u cijelosti su izrađeni od tvari koje imaju svojstva lokalizirane površinske plazmonske rezonancije. Uglavnom ih grade alkalijски metali, plemeniti metali kao što su bakar, srebro i zlato te imaju foto-električna svojstva (Marmioli i sur., 2015). Najčešće sintetizirani nanomaterijali su željezo, magnezij, kobalt, cink, bakar, zlato, cezij, srebro, nikal, mangan i njihovi oksidi. Željezo, kobalt, magnezij i mangan obično se koriste za sintezu magnetskih nanočestica (Ashfaq i sur., 2013).

3.2. NANOMATERIJALI NA BAZI UGLJIKA

Nedavno su sintetizirani različiti materijali na bazi ugljika kao što su grafen, ugljikove nanocjevčice (eng. *carbon nanotubes*, CNT), ugljikova nanovlakna (eng. *carbon nanofiber*), grafit, fuleren i dijamant. Zahvaljujući jedinstvenim karakteristikama nanomaterijala baziranih na ugljiku kao što su struktura, mehanička, optička i električna svojstva, oni doprinose poboljšanju učinkovitosti solarnih panela, poboljšanju prinosa usjeva, sredstva za zaštitu bilja, sanaciji okoliša, učinkovitosti akumulatora (Miralles i sur., 2012). Unatoč nizu pozitivnih karakteristika, nanomaterijali na bazi ugljika djeluju toksično na genskoj, staničnoj i fiziološkoj razini, o čemu postoji malo podataka s obzirom da je proveden mali broj istraživanja o fitotoksičnosti nanomaterijala na bazi ugljika (Afreen i sur., 2018).

3.3. POLIMERNI NANOMATERIJALI

Izraz „polimerni nanomaterijali“ odnosi se na razne nanočestice na bazi polimera. Polimerni nanomaterijali imaju ključnu ulogu u područjima elektronike, sanacije okoliša, kontroli zagađenja okoliša i medicine (Chandra i sur., 2015). Široku upotrebu pronašli su i u izradi boja,

ljepila i premaza, pripravi lijekova, dijagnostici i agrokulturi (Prasad i sur., 2017). Zbog fizikalno-kemijskih karakteristika, polimerni nanomaterijali mogli bi u budućnosti omogućiti sintezu novijih nanomaterijala (Pradhan i sur., 2013).

3.4. HIBRIDNI NANOMATERIJALI

Hibridni nanomaterijali su konjugati organskih i anorganskih struktura koje imaju izuzetna svojstva, pogodna za biološku primjenu, pripravu lijekova, medicinu i agrokulturu. Metalni nanomaterijali, nanomaterijali na bazi ugljika i polimerni nanomaterijali kombinirani zajedno tvore hibridne nanomaterijale (Qi i sur., 2013). U usporedbi s drugim nanomaterijalima, hibridni nanomaterijali pokazuju veću primjenjivost i učinkovitost zbog kombinacije nanomaterijala od kojih su građeni i njihovih karakteristika (Ashfaq i sur., 2014).

4. NANOMATERIJALI U AGROKULTURI

Razvoj nanomaterijala omogućio je lakši razvoj genetski modificiranih usjeva, uzgoj životinja, proizvodnju biocida i u poljoprivrednoj proizvodnji (Musee, 2011). Za njihovu primjenu u poljoprivredi potrebni su jeftiniji nanomaterijali i tehnologija primjenjiva na terenu (Delgado-Ramos, 2014). Primjena nanomaterijala potiče ranije klijanje biljaka, kao što i poboljšava biljnu proizvodnju (Khiew i sur., 2011). Nanoagrokultura koristi nanotehnologiju kako bi poboljšala prinos biljaka za hranu, gorivo i druge svrhe. Znanstvenici izvještavaju o velikom nedostatku informacija o učincima nanočestica na rižu, rajčicu, kukuruz i ostale prehrambene usjeve (Bagheri i sur., 2012). Učinci nanomaterijala razlikuju se ovisno o vrsti biljke, fazi rasta biljke, načinu i trajanju izloženosti, kemijskom sastavu, obliku, koncentraciji, strukturi površine, agregaciji i veličini nanomaterijala (Khiew i sur., 2011). Interakcija biljnih stanica s nanomaterijalima dovodi do modifikacije ekspresije biljnih gena i povezanih bioloških puteva, što na kraju utječe na rast i razvoj biljaka (Ghormade i sur., 2011).

Istraživanja pokazuju kako su povećane količine nanomaterijala toksične za vodeni svijet, bakterije i humane stanice u uvjetima *in vitro*. Na nanoskali čak i benigne tvari mogu postati opasne. Prema fizici čestica i prema istraživanjima atmosferskih onečišćenja, nanomaterijali su obično u rasponu veličina koji mogu ostati danima ili tjednima prisutni suspendirani u zraku (Elliott, 2011). Nanomaterijali zbog svoje veličine lako ulaze i sakupljaju se u svim biljnim

sustavima. Stoga bi nanomaterijali trebali biti dizajnirani da imaju sva potrebna svojstva, poput koncentracije s visokom učinkovitošću, stabilnosti i topljivosti, vremenskog otpuštanja kao odgovor na određene podražaje, pojačane ciljane aktivnosti i manje toksičnosti uz siguran i jednostavan način isporuke (Ghormade i sur., 2011). Velika većina istraživačkih radova izvedenih na različitim nanomaterijalima i proizvodima u poljoprivredi provodi se zbog istraživanja potencijalne toksičnosti tih nanomaterijala prije što se njihova uporaba može smatrati sigurnom (Hassan i sur., 2013).

5. UTJECAJ NANOMATERIJALA NA BILJKE

Budući da se nanomaterijali na bazi ugljika smatraju visoko hidrofobnima s tendencijom agregacije, moglo bi se očekivati da imaju i veliku ulogu u živim sustavima (De La Torre-Roche i sur., 2013). Ovo hidrofobno svojstvo poboljšava interakciju nanomaterijala na bazi ugljika s mnogim organskim tvarima. Ugljikove nanocijevi s malim površinama potiču protok organskih tvari u citoplazmu (De La Torre-Roche i sur., 2013).

U istraživanjima De La Torre-Roche i suradnika (2013) i Liu i suradnika (2013) objavljeno je da je prisutnost fullerena u obliku crnih agregata obilnija u sjemenu i korijenju u usporedbi s lišćem i stabljikama sjemenki riže. Međutim, u zrelim biljkama uočava se snažnija translokacija iz korijena u nadzemni dio biljke. Agregati fullerena uglavnom su bili prisutni u blizini transportnog sustava i lišća stabljika, pri čemu su korijeni lišeni fullerena (Santos i sur., 2013). Proučavanje fullerena u lišću pokazalo je da su slijedili put prijenosa hranjivih sastojaka i vode kroz ksilem (De La Torre-Roche i sur., 2013).

Ugljične nanocijevi (eng. *carbon nanotubes*, CNT) mogu imati jedan ili više slojeva ugljika smještenih u cilindru (Li i sur., 1996). CNT se ponašaju kao vlakna, čija se svojstva vrlo razlikuju od ugljika ili grafita (Philip i sur., 2000). Stoga CNT posjeduju izvrsnu čvrstoću i poznate su kao najjače-najmanje vlakno (Mani i sur., 2014). Većina istraživanja sve se više provodi kako bi se shvatio mehanizam unosa i transporta nanomaterijala na bazi ugljika u netaknute biljne stanice (Chai i sur., 2013). Postoje dokazi da se CNT mogu premjestiti u plodove, lišće i korijen, što uključuje snažnu interakciju sa stanicama sadnice rajčice. To je rezultira značajnim promjenama u ukupnoj ekspresiji ploda, lišća i korijena (Khodakovskaya i sur., 2011). CNT imaju fitotoksični učinak na biljne stanice zbog njihove agregacije i uzrokuju staničnu smrt jer dolazi do bubrenja

stanice i ispuštanja elektrolita (De La Torre-Roche i sur., 2013). Teoretski, jednostruka ugljična nanocijev (eng. *single wall carbon nanotube*, SWCNT) je prevelika da bi prodrla u staničnu stijenku. Međutim, dokazi o strukturi stanične membrane slične endocitozi u stanicama lista *Arabidopsis thaliana* u koje su unesene SWCNT, ukazuju na postojanje ugljikovih nanocijevi u stanicama i izuzetno su važni kao smjernice za dodatna ispitivanja drugih jestivih biljaka (Lin i sur., 2009; Shen i sur., 2010).

Višeslojne ugljične nanocijevi (eng. *multi wall carbon nanotube*, MWCNT) dugačke su 1 mm i promjera 20 nm (Lin i sur., 2002). Istraživanja su dokazala da MWCNT ulaze u sjeme rajčice i pojačavaju klijavost poboljšavajući unos vode iz sjemena (Wang i sur., 2012). MWCNT povećale su klijavost sjemena na 90% u 20 dana u usporedbi sa 71% u kontrolnom uzorku i biljnoj biomasi (Tan i Fugetsu, 2007).

Nanočestice metala i metalnih oksida pokazuju svojstva poput fluorescencije, fotokatalitičke razgradnje ili magnetizma, koje imaju biotehnološku primjenu u sanaciji tla, razvoju senzora i agrokemikalijama (Franke i sur., 2006). U prirodnim živim sustavima učinak metala i metalnih oksida na biljke uvelike ovisi o kemijskim svojstvima metala i oksida, koloidnim svojstvima sedimenata, tla ili mulja i organskom sadržaju (Niederberger i sur., 2006). Najučestaliji nanomaterijali na bazi metalnih oksida su nanočestice titanijeva dioksida (TiO_2), cerijeva dioksida (CeO_2), željezova (II, III) oksida (Fe_3O_4) i cinkova oksida (ZnO). Nanočestice Fe_3O_4 induciraju određeni učinak stabilnosti na vodene suspenzije nanocijevi fullerena i ugljika. Dokumentirano je da učinak huminskih kiselina i promjenjivi pH mogu utjecati na učinak nanočestica Fe_3O_4 povećanjem pH, što rezultira višom razinom agregacije. Sličan učinak je pokazan za CeO_2 (Anna i sur., 2003). Nanočestice metala, prisutne u niskim koncentracijama, imaju negativnu ulogu u razvoju biljaka (Stoimenov i sur., 2002). Ako biljke apsorbiraju višak metala, može doći do pojave toksičnih učinaka, uključujući smanjenje rasta i nepravilnosti u diobi stanica (Niederberger, 2007). Višak nanočestica metala, djelujući kao kofaktor enzima, sudjeluje u stvaranju intermedijarnih metabolita. Međutim, odgovor biljaka na metalne nanočestice varira ovisno o prirodi metala, vrsti biljke i stupnju rasta (Stoimenov i sur., 2002).

Pregled pozitivnih i negativnih učinaka nanomaterijala na određenu vrstu biljke kao i njihova primjena dan je u Tablici 1.

Tablica 1. Učinci i primjena nanomaterijala na biljke

NANOMATERIJAL	PRIMJENA	BILJKA	POZITIVNI UČINCI	NEGATIVNI UČINCI	REFERENCA
Na bazi ugljika					
Fuleren 1-2 nm	Agrokultura	<i>Cucurbita pepo</i> <i>Glycine max</i> <i>Momordica charantia</i> <i>Populus deltoids</i> <i>Solanum lycopersicum</i> <i>Zea mays</i>	Povećanje biomase i prinosa, smanjenje nakupljanja pesticida	Povećani udio trikloretilena (C ₂ HCl ₃)	Kole i sur., 2013 Ma i Wang, 2010 De La Torre-Roche i sur., 2013
MWCNT SWCNT 4-30 nm	Genetički inženjering biljaka	<i>Arabidopsis thaliana</i> <i>Eruca sativa</i> <i>Gossypium hirsutum</i> <i>Nicotiana</i> <i>bentahmiana</i> <i>Nicotiana tabacum</i> <i>Oryza sativa</i> <i>Solanum lycopersicum</i>	Pojačana klijavost, rast i cvjetanje, visoka učinkovitost u isporuci DNA	Kondenzacija kromatina i apoptoza protoplasta, akumulacija reaktivne molekule kisika (ROS) koja izaziva stres u protoplastima	Shen i sur., 2010 Ivanov i sur., 2016 Khodakovskaya i sur., 2013 Demirer i sur., 2018 Serag i sur., 2013
Metalne NP					
Ag 1-40 nm	Istraživanje interakcije biljaka i nanočestica	<i>Brassica juncea</i> <i>Citrullus lanatus</i> <i>Cucurbita pepo</i> <i>Oryza sativa</i> <i>Raphanus sativum</i> <i>Zea mays</i>	Povećanje rasta sadnica, duljine korijena i poboljšanje fotosintetske učinkovitosti	Oksidativni stres	Almutairi i Alharbi, 2015 Sharma i sur., 2012
Au 5-20 nm	Istraživanje interakcije biljaka i nanočestica	<i>Arabidopsis thaliana</i> <i>Gloriosa superba</i> <i>Hordeum vulgare</i> <i>Oryza sativa</i> <i>Solanum lycopersicum</i>	Poboljšana klijavost sjemena i vegetativan rast	Velika akumulacija nanočestica u korijenu	Milewska-Hendel i sur., 2017 Dan i sur., 2015 Avellan i sur., 2017 Gopinath i sur., 2014 Zhu i sur., 2012
Cu 10-30 nm	Istraživanje interakcije biljaka i nanočestica	<i>Cucumis sativus</i> <i>Phaseolus radiatus</i> <i>Triticum aestivum</i> <i>Sorghum bicolor</i>	Ø	Smanjenje ukupne biomase, velika akumulacija nanočestica, deregulacija ekspresije gena	Alawadhi i sur., 2018 Lee i sur., 2008

NP soli i oksida metala					
CdSe/ZnS 1-10 nm	Istraživanje interakcije biljaka i nanočestica, nano-biosenzori	<i>Allium cepa L</i> <i>Arabidopsis thaliana</i> <i>M. sativa</i>	Učinkovito otkrivanje patogena kada se koriste kao biosenzori	Povećana proizvodnja ROS, prijenos nanočestica u trofički lanac, smanjena održivost biljnih stanica, smanjenje duljine korijena	Santos i sur., 2010 Modlitbová i sur., 2018 Koo i sur., 2015 Rad i sur., 2012
CuO 20-30 nm	Genetički inženjering biljaka	<i>Arabidopsis thaliana</i> <i>Cucumis sativus</i> <i>Oryza sativa</i> <i>Triticum aestivum</i>	Osnovne hranjive tvari za rast biljaka zbog prisutnosti Cu	Povećana proizvodnja ROS, smanjenje duljine korijena	Alawadhi i sur., 2018 Shi i sur., 2013 Wang i sur., 2016
Fe ₃ O ₄ <100 nm	Istraživanje interakcije biljaka i nanočestica, nano-gnojivo	<i>Triticum aestivum</i> <i>Zea Mays</i>	Pozitivni učinci na visinu biljke i površinu lista	Smeđe mrlje na lišću veće površine	Fathi i sur., 2017 Racuciu, 2012
TiO ₂ <5 nm	Nano-gnojivo	<i>Arabidopsis thaliana</i> <i>Oryza sativa</i> <i>Spinacia oleracea</i>	Povećan rast biljaka i klijavost sjemena	Ø	Gao i sur., 2008 Liu i sur., 2019 Kurepa i sur., 2010
ZnO 30-200 nm	Nano-pesticidi, “dostavljači” mikronutrijenata	<i>Allium cepa</i> <i>Arabidopsis thaliana</i> <i>Brassica napus</i> <i>Cucumis sativus</i> <i>Lactuca sativa</i> <i>Lolium perenne</i> <i>Oryza sativa</i> <i>Raphanus sativus</i> <i>Zea mays</i>	Smanjeno vrijeme cvatnje, poboljšanje proizvodnje sjemena, povećan rast biljaka i klijavost sjemena	Šupljine u tlu, modifikacije mikrobnog enzimskog djelovanja, inhibicija rasta korijena	Laware i Raskar, 2014 Lin i Xing, 2007
Polimerni nanomaterijali					
Na bazi hitozana 90 nm	Nano-gnojivo, herbicidi, genetički inženjering biljaka	<i>Camellia sinensis</i> <i>Triticum aestivum</i>	Biorazgradljiv i biokompatibilan materijal, antimikrobno djelovanje, poticanje rasta biljaka	Ø	Malerba i Cerana, 2018 Islam i sur., 2017 Abdel-Aziz i sur., 2016 Dasgupta i sur., 2015
Dendrimeri 10-20 nm	Genetički inženjering biljaka	<i>Agrostis stolonifera</i>	Endosomni bijeg isporučene DNA	Ø	Pasupathy i sur., 2008 Kretzmann i sur., 2017

Liposomi 100 nm	“Dostavljači“ nutrijenata i DNA	<i>Nicotiana benthamiana</i> <i>Solanum lycopersicum</i>	Poboljšana isporuka DNA fuzijom membrane, zaštita nukleinskih kiselina od nukleaze, specifično ciljanje stanice	Visoka toksičnost, loša stabilnost, brzi zazor	Karny i sur., 2018
--------------------	------------------------------------	---	---	---	--------------------

6. FITOTOKSIČNOSTI NANOMATERIJALA

Istraživanja fitotoksičnosti na višim biljkama važan je kriterij za razumijevanje toksičnosti nanomaterijala. Veliki broj istraživanja posvećen je potencijalnoj toksičnosti nanomaterijala na biljke te negativnim i pozitivnim ili nebitnim učincima (Bystrzejewska-Piotrowska i sur., 2009; Sohaebuddin i sur., 2010; Muller i sur., 2005). Većina istraživanja pokazuje fitotoksičnost nanomaterijala (Ghodake i sur., 2010; Stampoulis i sur., 2009). Nanočestice aluminijevog oksida (Al_2O_3) inhibiraju produljenje korijena krastavca (*Cucumis sativus*), kukuruza (*Zea mays*), soje (*Glycine max*), mrkve (*Daucus carota*) i kupusa (*Brassica oleracea*) (Kollmeier i sur., 2000; Ryan i sur., 1992), dok se za nanočestice cinkovog oksida (ZnO NP) pokazalo da su jedan od najotrovnijih nanomaterijala koji bi mogao zaustaviti rast korijena ispitanih biljaka (Stella i sur., 2010; Huang i sur., 2002). Slične studije provedene su primjenom nanočestica Al_2O_3 , silicijeva dioksida (SiO_2), ZnO i Fe_3O_4 na vrsti *Arabidopsis thaliana*, a rezultati su pokazali da nanomaterijali ZnO u koncentraciji od 400 mgL^{-1} mogu inhibirati klijanje (Bin Hussein i sur., 2002). Iz toksikološke perspektive, površina i veličina čestica važne su karakteristike materijala. Kako se veličina čestica smanjuje, površina joj se povećava i omogućuje veći udio atoma ili molekula da se prikaže na površini, a ne u unutrašnjosti nanomaterijala (Fugetsu i Parvin, 2011). Povećanje površine određuje potencijalni broj reaktivnih skupina na površini čestica (Begum i sur., 2011). Promjena strukturnih i fizikalno-kemijskih svojstava nanomaterijala, sa smanjenjem veličine, mogla bi biti odgovorna za brojne interakcije materijala koje rezultiraju toksikološkim učincima (Lee i sur., 2012). Jedno od najranijih opažanja pokazalo je veću toksičnost veličinom manjih nanomaterijala (Begum i sur., 2011). To je uočeno kod različitih vrsta nanomaterijala, uključujući nanomaterijale titanijeva dioksida (TiO_2), čađe, kobalta (Co) i nikla (Ni). Utvrđeno je da nanočestica TiO_2 promjera 21 nm rezultira 43 puta većom toksičnošću od čestica promjera 250 nm slične mase (Feizi i sur., 2012). Nanočestice silicijevog dioksida (SiO_2) obilježene fluorescein izotiocijanatom (eng. *fluorescein isothiocyanate*, FTIC) i fotostabilnih kadmij-selenidnih kvantnih točkica testirane su zbog njihove sposobnosti korištenja kao biooznaka i promicanja klijavosti sjemena (Begum i sur., 2011). Utvrđeno je da nanočestice silicijevog dioksida obilježene FTIC-om poboljšavaju klijanje sjemena u riži, dok su kvantne točkice zaustavile klijanje. Višestruka ispitivanja pokazala su da su nanočestice toksičnije od mikročestica (Currie i Perry, 2007). Unutarnja površinska reaktivnost još je jedan čimbenik koji je odredio toksičnost nanomaterijala. Utvrđeno je da vrste kristalnih minerala anataza titanijeva dioksida nisu pokazale toksičnost

nanočestica (Stephen i sur., 2012). Sveukupno, trenutni profil fitotoksičnosti nanomaterijala vrlo je spekulativan i preliminaran, a učinci njihovih jedinstvenih karakteristika slabo su razumljivi i potrebne su dodatne studije o toksičnosti, posebno na komercijalnim usjevima hrane.

7. UNOS NANOMATERIJALA

Predloženo je nekoliko načina za unos nanomaterijala u biljne stanice. Neki od podataka sugeriraju da bi nanomaterijali mogli ući u biljne stanice vežući se na proteinski nosač, kroz akvaporin, ionske kanale ili endocitozu stvaranjem novih pora, završavajući time što su ograničeni na organske kemikalije (Maine i sur., 2001). Ova je pojava poželjna u slučaju ugljikovih nanocijevi, a ne drugih vrsta nanomaterijala (Smirnova i sur., 2012). U međuvremenu, veći omjer površine i mase nanočestica u odnosu na disperzne metale uzrokuje veću reaktivnost nanočestica (Larue i sur., 2012). Slijedom toga, nanomaterijali mogu stvoriti komplekse s membranskim prijenosnicima ili eksudatima korijena prije nego što se unesu u biljke. Većina nanomaterijala na bazi metala za koje je zabilježeno da ih biljke unose uključuju elemente za koje su identificirani prijenosnici iona (Tani i Barrington, 2005). Jednom kada nanomaterijali uđu u biljne stanice, mogu se transplantirati apoplastično ili simplastično iz jedne stanice u drugu putem plazmodesmata (Hauck i sur., 2008).

8. TRANSLOKACIJA NANOMATERIJALA

Neka istraživanja sugeriraju da translokacija nanomaterijala ovisi o količini korištenog nanomaterijala i vrsti biljke (Yang i Ma, 2010). Nanomaterijali prelaze s lišća na korijenje, stabljiku i sjeme u razvoju te s jednog korijena na drugi. Veća translokacija ostalih hranjivih sastojaka bilježi se povećanjem na njezinu potražnju (Zhu i sur., 2008). Mehanizam translokacije započinje prodorom nanomaterijala kroz stanične stijenke i membranu stanica korijena. U ovom slučaju, veličina pora stanične stijenke mora biti u rasponu od 3–8 nm, što je manje od nanomaterijala. Stupanj penetracije proučavan je na poriluku (*Allium porrum*) i utvrđeno je da je put nanomaterijala (cerijev dioksida, CeO_2) u listu praćen stomatalnim putem (Birbaum i sur., 2010).

9. MEHANIZAM PRIJENOSA NANOMATERIJALA

Prvi korak ka razumijevanju mogućih koristi primjene nanotehnologije u poljoprivredi trebala bi biti analiza mehanizma prijenosa nanomaterijala u biljkama. Prijenos nanomaterijala otkriven je na različitim razinama: lanci nanomaterijala-agregata koji nose stanice blizu točke nanošenja, kada je takva primjena izvršena "injekcijom" suspenzije nanomaterijala u šupljinu korijena stabljike, što sugerira prisutnost fluksa nanočestica iz jedne stanice u drugu (Lin i sur., 2009). Biljke pružaju potencijalni put za transport nanomaterijala u okoliš i služe kao važan put za njihovu bioakumulaciju u prehrambenom lancu (Sharif i sur., 2013). Stanična stijenka biljne stanice djeluje kao prepreka za lak ulaz bilo kojim vanjskim agensima, uključujući nanomaterijale. Svojstva filtracije određuju se promjerom pora stanične stijenke, u rasponu od 5 do 20 nm (Lin i sur., 2009). Samo agregati nanomaterijala promjera manjeg od promjera pora stanične stijenke mogu lako proći i doći do stanične membrane (Zhang i sur., 2008).

10.ZAKLJUČAK

Bez sumnje, nanotehnologija je znanost koja uvodi mnoge promjene u područje elektronike, energije, medicine i znanosti o životu. Međutim, zbog jedinstvenih svojstava provedena su brojna istraživanja o toksikološkom učinku nanomaterijala na biljke, no za realizaciju korisnih učinaka potrebno je provoditi još mnogo istraživanja. Vidljivo je iz prikupljenih podataka kako učinak nanomaterijala varira od biljke do biljke i ovisi o načinu primjene, veličini i koncentraciji nanomaterijala. Zanimljivo je da nanomaterijali ne samo da pospješuju rast biljaka, već štite od okolišnog stresa, ali njihova toksičnost i dalje ostaje problem. Postojeće metode primjene trebaju se istražiti i provjeriti kako bi se poboljšala učinkovitost nanomaterijala na budućim primjenama.

11.LITERATURA

- Abdel-Aziz HMM, Hasaneen MNA, Omer AM, (2016) „Nano chitosan-NPK fertilizer enhances the growth and productivity of wheat plants grown in sandy soil.“ Spanish Journal of Agricultural Research, vol. 14, pp. 1-9
- Afreen S, Omar RA, Talreja N, Chauhan D, Ashfaq M, (2018) “Carbon-based nanostructured materials for energy and environmental remediation applications.” Approaches in Bioremediation, Nanotechnology in the Life Sciences, pp. 369-392
- Alawadhi H, Ramamoorthy K, Mosa KA, Elnaggar A, Ibrahim E, El-Naggar M, Wartanian S, Hani H, (2018) “Copper nanoparticles induced genotoxicity, oxidative stress, and changes in superoxide dismutase (SOD) gene expression in cucumber (*Cucumis sativus*) plants.” Frontiers in Plant Science, vol. 9, article 872
- Almutairi ZM, Alharbi A, (2015) “Effect of silver nanoparticles on seed germination of crop plants.” International Science Index, Nuclear and Quantum Engineering, vol. 9, no. 6, pp. 572-576
- Anna M, Albert GN, Esko IK, (2003) “The role of metal nanoparticles in the catalytic production of single-walled carbon nanotubes.” Journal of Physics, vol. 15, no. 42, article 3011
- Ashfaq M, Singh S, Sharma A, Verma N, (2013) „Cytotoxic evaluation of the hierarchical web of carbon micro-nanofibers.“ Industrial & Engineering Chemistry Research, vol. 52, no. 12, pp. 4672-4682
- Ashfaq M, Khan S, Verma N, (2014) “Synthesis of PVA-CAP-based biomaterial *in situ* dispersed with Cu nanoparticles and carbon micro-nanofibers for antibiotic drug delivery applications.” Biochemical Engineering Journal, vol. 90, pp.79-89
- Ashkavand P, Tabari M, Zarafshar M, Tomášková I, Struve D, (2015) “Effect of SiO₂ nanoparticles on drought resistance in hawthorn seedlings.” Forest Research Papers, vol. 76, no. 4, pp. 350-359
- Avellan A, Schwab F, Masion A, Chaurand P, Borschneck D, Vidal V, Rose J, Santaella C, Levard C, (2017) “Nanoparticle uptake in plants: gold nanomaterial localized in roots of *Arabidopsis thaliana* by X-ray computed nanotomography and hyperspectral imaging.” Environ. Sci. Technol. 51, 8682-8691

- Bagheri H, Ayazi Z, Es'haghi A, Aghakhani A, (2012) "Reinforced polydiphenylamine nanocomposite for microextraction in packed syringe of various pesticides." *Journal of Chromatography A*, vol. 1222, pp. 13-21
- Begum P, Ikhtiari R, Fugetsu B, (2011) "Graphene phytotoxicity in the seedling stage of cabbage, tomato, red spinach, and lettuce." *Carbon*, vol. 49, no. 12, pp. 3907-3919
- Bin Hussein MZ, Zainal Z, Yahaya AH, Foo DWV, (2002) "Controlled release of a plant growth regulator, α -naphthaleneacetate from the lamella of Zn-Al-layered double hydroxide nanocomposite." *Journal of Controlled Release*, vol. 82, no. 2-3, pp. 417-427
- Birbaum K, Brogioli R, Schellenberg M, Martinoia E, Stark WJ, Günther D, Limbach LK, (2010) "No evidence for cerium dioxide nanoparticle translocation in maize plants." *Environmental Science and Technology*, vol. 44, no. 22, pp. 8718-8723
- Bystrzejewska-Piotrowska G, Golimowski G, Urban PL, (2009) "Nanoparticles: their potential toxicity, waste and environmental management." *Waste Management*, vol. 29, no. 9, pp. 2587-2595
- Chai M, Shi F, Li R, Liu L, Liu Y, Liu F, (2013) "Interactive effects of cadmium and carbon nanotubes on the growth and metal accumulation in a halophyte *Spartina alterniflora* (Poaceae)." *Plant Growth Regulation*, vol. 71, no. 2, pp. 171-179
- Chandra S, Chakraborty N, Dasgupta A, Sarkar J, Panda K, Acharya K, (2015) "Chitosan nanoparticles: a positive modulator of innate immune responses in plants." *Science Reports*, vol. 5, article 15195
- Chekin F, Bagheri S, Arof AK, Hamid SBA, (2012) "Preparation and characterization of Ni(II)/polyacrylonitrile and carbon nanotube composite modified electrode and application for carbohydrates electrocatalytic oxidation." *Journal of solid state Electrochemistry*, vol. 16, no. 10, pp. 3245-3251
- Currie HA, Perry CC, (2007) "Silica in plants: biological, biochemical and chemical studies." *Annals of Botany*, vol. 100, no. 7, pp. 1383-1389
- Dan Y, Zhang W, Xue R, Ma X, Stephan C, Shi H, (2015) "Characterization of gold nanoparticle uptake by tomato plants using enzymatic extraction followed by single-particle inductively coupled plasma-mass spectrometry analysis." *Environmental Science and Technology*, vol. 49, pp. 3007-3014

- Dasgupta A, Chakraborty N, Panda K, Chandra S, Acharya K, Sarkar J, (2015) “Chitosan nanoparticles: a positive modulator of innate immune responses in plants.” *Science Reports*, vol. 5, article 15195
- De La Torre-Roche R, Hawthorne J, Deng Y, Xing B, Cai W, Newman LA, Wang Q, Ma X, Hamdi H, White JC, (2013) “Multiwalled carbon nanotubes and C60 fullerenes differentially impact the accumulation of weathered pesticides in four agricultural plants.” *Environmental Science and Technology*, vol. 47, no. 21, pp. 12539-12547
- Delgado-Ramos GC, (2014) “Nanotechnology in Mexico: global trends and national implications for policy and regulatory issues.” *Technology in Society*, vol. 37, no. 1, pp. 4-15
- Demirer GS, Zhang H, Matos J, Goh N, Cunningham FJ, Sung Y, Chang R, Aditham AJ, Chio L, Cho M-J, Staskawicz B, Landry MP, (2018) “High aspect ratio nanomaterials enable delivery of functional genetic material without DNA integration in mature plants.” *Nat Nanotechnol*, vol. 14, no. 5, pp. 456-464
- Elliott KC, (2011) “Nanomaterials and the precautionary principle.” *Environmental Health Perspectives*, vol. 119, no. 6, pp. 240-245
- Fathi A, Zahedi M, Torabian S, Khoshgoftar A, (2017) “Response of wheat genotypes to foliar spray of ZnO and Fe₂O₃ nanoparticles under salt stress.” *Journal of Plant Nutrition*, vol. 40, no. 10, pp. 1376-1385
- Feizi H, Rezvani Moghaddam P, Shahtahmassebi N, Fotovat A, (2012) “Impact of bulk and nanosized titanium dioxide (TiO₂) on wheat seed germination and seedling growth.” *Biological Trace Element Research*, vol. 146, no. 1, pp. 101-106
- Franke ME, Koplin TJ, Simon U, (2006) “Metal and metal oxide nanoparticles in chemiresistors: Does the nanoscale matter?” *Small*, vol. 2, no. 1, pp. 36-50
- Fugetsu B, Parvin B, Refi I, (2011) “Graphene phytotoxicity in the seedling stage of cabbage, tomato, red spinach, and lettuce.” *Carbon*, vol. 49, no. 12, pp. 3907-3919
- Gao F, Liu C, Qu C, Zheng L, Yang F, Su M, Hong F, (2008) “Was improvement of spinach growth by nano-TiO₂ treatment related to the changes of Rubisco activase?” *BioMetals*, vol. 21, no. 2, pp. 211-217

- Ghodake G, Seo YD, Park D, Lee DS, (2010) “Phytotoxicity of carbon nanotubes assessed by *Brassica juncea* and *Phaseolus mungo*.” Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics, vol. 5, no. 2, pp. 157-160
- Ghormade V, Deshpande MV, Paknikar KM, (2011) “Perspectives for nano-biotechnology enabled protection and nutrition of plants.” Biotechnology Advances, vol. 29, no. 6, pp. 792-803
- Gopinath K, Gowri S, Karthika V, Arumugam A, (2014) “Green synthesis of gold nanoparticles from fruit extract of *Terminalia arjuna*, for the enhanced seed germination activity of *Gloriosa superba*.” Journal of Nanostructure in Chemistry, vol. 4, no. 115
- Hassan F, Shahram A, Farzin A, Saeed JP, (2013) “Comparative effects of nanosized and bulk titanium dioxide concentrations on medicinal plant *Salvia Officinalis* L.” Annual Review & Research in Biology, vol. 3, no. 4, pp. 814-824
- Hauck TS, Ghazani AA, Chan WCW, (2008) “Assessing the effect of surface chemistry on gold nanorod uptake, toxicity, and gene expression in mammalian cells.” Small, vol. 4, no. 1, pp. 153-159
- Huang F-M, Tai K-W, Chou M-Y, Chang Y-C, (2002) “Cytotoxicity of resin-, zinc oxide-eugenol-, and calcium hydroxide-based root canal sealers on human periodontal ligament cells and permanent V79 cells.” International Endodontic Journal, vol. 35, no. 2, pp. 153-158
- Ivanov I, Khodakovskaya M, Dervishi E, Lahiani MH, Chen J, (2016) “Comparative study of plant responses to carbon-based nanomaterials with different morphologies.” Nanotechnology, vol. 27, article 26
- Islam P, Water JJ, Bohr A, Rantanen J, (2017) “Chitosan-based nanoembedded microparticles: impact of Nanogel composition on physicochemical properties.” Pharmaceutics, vol. 9, no. 1, pp. 1-12
- Jerković Z, (2015) “Ekološki aspekti primjene nanomaterijala-nanoekologija”, završni rad, International Interdisciplinary Journal of Young Scientists from the Faculty of Textile Technology, Zagreb
- Karny A, Zinger A, Kajal A, Shainsky-Roitman J, Schroeder A, (2018) „Therapeutic nanoparticles penetrate leaves and deliver nutrients to agricultural crops.“ Scientific Reports, vol. 8, article 7589

- Khiew P, Chiu W, Tan T, Radiman S, Abd-Shukor R, Chia CH, (2011) “Capping effect of palm-oil based organometallic ligand towards the production of highly monodispersed nanostructured material.” *Palm Oil: Nutrition, Uses and Impacts*, pp. 189-219
- Khodakovskaya MV, Kim B, Kim JN, Alimohammadi M, Dervishi E, Mustafa T, Cernigla CE, (2013) “Carbon nanotubes as plant growth regulators: effects on tomato growth, reproductive system, and soil microbial community.” *Small*, vol. 9, no. 1, pp. 115-123
- Kole C, Kole P, Randunu KM, Choudhary P, Podila R, Ke PC, Rao AM, Marcus RK, (2013) “Nanobiotechnology can boost crop production and quality: first evidence from increased plant biomass, fruit yield and phytomedicine content in bitter melon (*Momordica charantia*).” *BMC Biotechnology*, vol. 13, article 37
- Kollmeier M, Felle HH, Horst WJ, (2000) “Genotypical differences in aluminum resistance of maize are expressed in the distal part of the transition zone. Is reduced basipetal auxin flow involved in inhibition of root elongation by aluminum?” *Plant Physiology*, vol. 122, no. 3, pp. 945-956
- Koo Y, Wang J, Zhang Q, Zhu H, Chehab EW, Colvin VL, Alvarez PJJ, Braam J, (2015) “Fluorescence reports intact quantum dot uptake into roots and translocation to leaves of *Arabidopsis thaliana* and subsequent ingestion by insect herbivores.” *Environmental Science & Technology*, vol. 49, no. 1, pp. 626-632
- Kretzmann J A, Ho D, Evans CW, Plani-Lam JHC, Garcia-Bloj B, Mohamed AE, O'Mara ML, Ford E, Tan DEK, Lister R, Blancafort P, Norret M, Swaminathan Iyer K, (2017) “Synthetically controlling dendrimer flexibility improves delivery of large plasmid DNA.” *Chemical Science*, vol. 8, pp. 2923-2930
- Kurepa J, Paunesku T, Vogt S, Arora H, Rabatic BM, Lu J, Wanzer MB, Woloschak GE, Smalle JA, (2010) “Uptake and Distribution of Ultrasmall Anatase TiO₂ Alizarin Red S Nanoconjugates in *Arabidopsis thaliana*.” *Nano Letters*, vol. 10, pp. 2296-2302
- Larue C, Veronesi G, Flank A, Surble S, Herlin-Boime N, Carrière M, (2012) “Comparative uptake and impact of TiO₂ nanoparticles in wheat and rapeseed.” *Journal of Toxicology and Environmental Health A: Current Issues*, vol. 75, no. 13–15, pp. 722-734
- Laware SL, Raskar S, (2014) “Influence of zinc oxide nanoparticles on growth, flowering and seed productivity in onion.” *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, vol. 3, no. 7, pp. 874-881

- Lee WM, An Y-J, Yoon H, Kweon H-S, (2008) “Toxicity and bioavailability of copper nanoparticles to the terrestrial plants mung bean (*Phaseolus radiatus*) and wheat.” *Environmental Toxicology and Chemistry*, vol. 27, no.9, pp. 1915-1921
- Lee W, Kwak JI, An Y, (2012) “Effect of silver nanoparticles in crop plants *Phaseolus radiatus* and *Sorghum bicolor*: media effect on phytotoxicity.” *Chemosphere*, vol. 86, no. 5, pp. 491-499
- Li WZ, Xie SS, Qian LX, Chang BH, Zou BS, Zhao RA, Wang G, (1996) “Large-scale synthesis of aligned carbon nanotubes.” *Science*, vol. 274, no. 5293, pp. 1701-1703
- Lin Y, Rao AM, Sadanadan B, Kenik EA, Sun Y-P, (2002) “Functionalizing multiple-walled carbon nanotubes with aminopolymers.” *Journal of Physical Chemistry*, vol. 106, no. 6, pp. 1294-1298
- Lin D, Xing B, (2007) “Phytotoxicity of nanoparticles: Inhibition of seed germination and root growth.” *Environmental Pollution*, vol. 150, no. 2, pp. 243-250
- Lin C, Fugetsu B, Su Y, Watari F, (2009) “Studies on toxicity of multi-walled carbon nanotubes on *Arabidopsis* T87 suspension cells.” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 170, no. 2-3, pp. 578-583
- Lin S, Reppert J, Hu Q, Hudson JAS, Reid ML, Ratnikova TA, Rao AM, Luo H, Ke PC, (2009) “Uptake, translocation, and transmission of carbon nanomaterials in rice plants.” *Small*, vol. 5, no. 10, pp. 1128-1132
- Lin MT, Occhialini A, Andralojc PJ, Parry MAJ, Hanson MR, (2014) “A faster Rubisco with potential to increase photosynthesis in crops.” *Nature*, vol. 513, pp. 547-550
- Liu Q, Zhang X, Zhao Y, Lin J, Shu C, Wang C, Fang X, (2013) “Fullerene-induced increase of glycosyl residue on living plant cell wall.” *Environmental Science and Technology*, vol. 47, no. 13, pp. 7490-7498
- Liu J, Williams PC, Goodson BM, Geisler-Lee J, Fakhara, M, Gemeinhardt ME, (2019) “TiO₂ nanoparticles in irrigation water mitigate impacts of aged Ag nanoparticles on soil microorganisms, *Arabidopsis thaliana* plants, and *Eisenia fetida* earthworms.” *Environmental Research*, vol. 172, pp. 202-215
- Ma X, Wang C, (2010) “Fullerene nanoparticles affect the fate and uptake of trichloroethylene in phytoremediation systems.” *Environmental Engineering Science*, vol. 27, no. 11, pp. 989-992

- Maine MA, Duarte MV, Suñé NL, (2001) “Cadmium uptake by floating macrophytes.” *Water Research*, vol. 35, no. 11, pp. 2629-2634
- Malerba M, Cerana R, (2018) “Recent advances of chitosan applications in plants.” *Polymers*, vol. 10, no 2, pp. 1-10
- Marmiroli M, Imperiale D, Pagano L, Villani M, Zappettini A, Marmiroli N, (2015) “The proteomic response of *Arabidopsis thaliana* to cadmium sulfide quantum dots, and its correlation with the transcriptomic response.” *Frontiers in Plant Science*, vol. 6, article 1104
- Milewska-Hendel A, Zubko M, Karcz J, Stróz D, Kurczynska E, (2017) “Fate of neutral-charged gold nanoparticles in the roots of the *Hordeum vulgare* L.” *Scientific Reports*, vol. 7, article 3014
- Miralles P, Church TL, Harris AT, (2012) “Toxicity, uptake, and translocation of engineered nanomaterials in vascular plants.” *Environmental Science and Technology*, vol. 46, no. 17, pp. 9224-9239
- Modlitbová P, Porízka P, Novotný K, Drbohlavová J, Chamradová I, Farka Z, Zlámalová-Gargošová H, Romih T, Kaiser J, (2018) “Short-term assessment of cadmium toxicity and uptake from different types of Cd-based quantum dots in the model plant *Allium cepa* L.” *Ecotoxicology and environmental safety*, vol. 153, pp. 23-31
- Muller J, Huaux F, Moreau N, Missona P, Heiliera JF, Delosc M, Arrasa M, Fonsecab A, Nagy JB, Lisona D, (2005) “Respiratory toxicity of multi-wall carbon nanotubes.” *Toxicology and Applied Pharmacology*, vol. 207, no. 3, pp. 221-231
- Musee N, (2011) “Nanowastes and the environment: potential new waste management paradigm.” *Environment International*, vol. 37, no. 1, pp. 112-128
- Niederberger M, Garnweitner G, Buha J, Polleux J, Ba J, Pinna N, (2006) “Nonaqueous synthesis of metal oxide nanoparticles: review and indium oxide as case study for the dependence of particle morphology on precursors and solvents.” *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, vol. 40, no. 2-3, pp. 259-266
- Niederberger M, (2007) “Nonaqueous sol-gel routes to metal oxide nanoparticles.” *Accounts of Chemical Research*, vol. 40, no. 9, pp. 793-800
- Omar RA, Afreen S, Talreja N, Chauhan D, Ashfaq M, (2019) “Impact of Nanomaterials in Plant Systems.” *Plant Nanobionics*, pp. 117-140

- Pasupathy K, Lin S, Hu Q, Luo H, Ke PC, (2008) “Direct plant gene delivery with a poly(amidoamine) dendrimer.” *Biotechnology Journal*, vol. 3, no. 8, pp. 1078-1082
- Pavić A, (2012) “Nanotehnologija”, seminarski rad, Sveučilište u Rijeci, Nastavni centar Bjelovar, Bjelovar
- Philip GC, Keith B, Masa I, Zettl A, (2000) “Extreme oxygen sensitivity of electronic properties of carbon nanotubes.” *Science*, vol. 287, no. 5459, pp. 1801-1804
- Pradhan S, Patra P, Das S, Chandra S, Mitra S, Dey KK, Akbar S, Palit P, Goswami A, (2013) “Photochemical modulation of bio safe manganese nanoparticles on *Vigna radiata*: a detailed molecular, biochemical, and biophysical study.” *Environmental Science Technology*, vol. 47, pp.13122-13131
- Prasad R, Kumar V, Prasad KS, (2014) “Nanotechnology in sustainable agriculture: present concerns and future aspects.” *African Journal of Biotechnology*, vol. 13, no. 6, pp. 705-713
- Prasad R, Pandey R, Barman I, (2016) “Engineering tailored nanoparticles with microbes: *quo vadis*.” *Wiley interdisciplinary reviews. Nanomedicine and nanobiotechnology*, vol. 8, no. 2, pp. 316-330
- Prasad R, Bhattacharyya A, Nguyen QD, (2017) “Nanotechnology in sustainable agriculture: recent developments, challenges, and perspectives.” *Frontiers in Microbiology*, vol. 8, article 1014
- Qi M, Liu Y, Li T, (2013) “Nano-TiO₂ improve the photosynthesis of tomato leaves under mild heat stress.” *Biological trace element research*, vol. 156, no. 1-3, pp. 323-328
- q S, Shekhawat GS, (2014) “Toxicity of ZnO engineered nanoparticles and evaluation of their effect on growth, metabolism and tissue specific accumulation in *Brassica juncea*.” *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 2, no. 1, pp. 105-114
- Rad F, Mohsenifar A, Tabatabaei M, Safarnejad MR, Shahryari F, Safarpour H, Foroutan A, Mardi M, Davoudi D, Fotokian M, (2012) “Detection of *Candidatus phytoplasma aurantifolia* with a quantum dots fret-based biosensor.” *Journal of Plant Pathology*, vol. 94, pp. 525-534
- Racuciu M, (2012) “Iron oxide nanoparticles coated with b-cyclodextrin polluted of *Zea mays* plantlets.” *Nanotechnology Development*, vol. 2, article 6

- Ryan PR, Shaff JE, Kochian LV, (1992) “Aluminum toxicity in roots: correlation among ionic currents, ion fluxes, and root elongation in aluminum-sensitive and aluminum-tolerant wheat cultivars.” *Plant Physiology*, vol. 99, no. 3, pp. 1193-1200
- Santos AR, Miguel AS, Tomaz L, Malhó R, Maycock C, Vaz Patto MC, Fevereiro P, Oliva A, (2010) “The impact of CdSe/ZnS quantum dots in cells of *Medicago sativa* in suspension culture.” *Journal of Nanobiotechnology*, vol. 8, article 24
- Santos SMA, Dinis AM, Rodrigues DMF, Peixoto F, Videira RA, Jurado AS, (2013) “Studies on the toxicity of an aqueous suspension of C60 nanoparticles using a bacterium (gen. *Bacillus*) and an aquatic plant (*Lemna gibba*) as in vitro model systems.” *Aquatic Toxicology*, vol. 142–143, pp. 347-354
- Serag MF, Kaji N, Habuchi S, Bianco A, Baba Y, (2013) “Nanobiotechnology meets plant cell biology: carbon nanotubes as organelle targeting nanocarriers.” *RSC Advances*, vol. 3, pp. 4856-4862
- Sharif G, Westerhoff P, Herckes P, (2013) “Sorption of trace organics and engineered nanomaterials onto wetland plant material.” *Environmental Sciences: Processes and Impacts*, vol. 15, no. 1, pp. 267-274
- Sharma P, Bhatt D, Zaidi MGH, Saradhi PP, Khanna PK, Arora S, (2012) “Silver nanoparticle-mediated enhancement in growth and Antioxidant status of *Brassica juncea*.” *Applied Biochemistry and Biotechnology*, vol. 167, pp. 2225-2233
- Sharma P, Jha AB, Dubey RS, Pessarakli M, (2012) “Reactive oxygen species, oxidative damage, and antioxidative defense mechanism in plants under stressful conditions.” *Journal of Botany*, vol. 2012, pp. 1-26
- Shen CX, Zhang QF, Li J, Bi FC, Yao N, (2010) “Induction of programmed cell death in *Arabidopsis* and rice by single-wall carbon nanotubes.” *American Journal of Botany*, vol. 97, no. 10, pp. 1602-1609
- Shi J, Yang Y, Hu T, Yuan X, Peng C, Chen Y, Yang J, Zhang H, (2013) “Phytotoxicity and accumulation of copper oxide nanoparticles to the Cu-tolerant plant *Elsholtzia splendens*.” *Nanotoxicology*, vol. 8, pp. 179-188
- Smirnova E, Gusev A, Zaytseva O, Zaytseva O, Sheina O, Tkachev A, Kuznetsova E, Lazareva E, Onishchenko G, Feofanov A, Kirpichnikov M, (2012) “Uptake and accumulation of multiwalled carbon nanotubes change the morphometric and biochemical

characteristics of *Onobrychis arenaria* seedlings.” *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, vol. 6, no. 2, pp. 132-138

- Sohaebuddin SK, Thevenot PT, Baker D, Eaton JW, Tang L, (2010) “Nanomaterial cytotoxicity is composition, size, and cell type dependent.” *Particle and Fibre Toxicology*, vol. 7, article 22
- Stampoulis D, Sinha SK, White JC, (2009) “Assay-dependent phytotoxicity of nanoparticles to plants.” *Environmental Science and Technology*, vol. 43, no. 24, pp. 9473-9479
- Stella WYW, Priscilla TYL, Djurišić AB, Kenneth MYL, (2010) “Toxicities of nano zinc oxide to five marine organisms: influences of aggregate size and ion solubility.” *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, vol. 396, no. 2, pp. 609-618
- Stephen GW, Li H, Jennifer H, Da-Ren V, In-Chul K, Yinjie JT, (2012) “Phytotoxicity of metal oxide nanoparticles is related to both dissolved metals ions and adsorption of particles on seed surfaces.” *Journal of Petroleum & Environmental Biotechnology*, vol. 3, article 4
- Stoimenov PK, Klinger RL, Marchin GL, Klabunde KJ, (2002) “Metal oxide nanoparticles as bactericidal agents.” *Langmuir*, vol. 18, no. 17, pp. 6679-6686
- Tan X-M, Fugetsu B, (2007) “Multi-walled carbon nanotubes interact with cultured rice cells: evidence of a self-defense response.” *Journal of Biomedical Nanotechnology*, vol. 3, no. 3, pp. 285-288
- Tani FH, Barrington S, (2005) “Zinc and copper uptake by plants under two transpiration rates. Part I. Wheat (*Triticum aestivum* L.).” *Environmental Pollution*, vol. 138, no. 3, pp. 538-547
- Wang X, Han H, Liu X, Gu X, Chen K, Lu D, (2012) “Multi-walled carbon nanotubes can enhance root elongation of wheat (*Triticum aestivum*) plants.” *Journal of Nanoparticle Research*, vol. 14, no. 6, pp. 1-10
- Wang Z, Xu L, Zhao J, Wang X, White JC, Xing B, (2016) “CuO nanoparticle interaction with *Arabidopsis Thaliana*: toxicity, parentprogeny transfer, and gene expression.” *Environmental Science and Technology*, vol. 50, pp. 6008-6016
- Yang K, Ma Y, (2010) “Computer simulation of the translocation of nanoparticles with different shapes across a lipid bilayer.” *Nature Nanotechnology*, vol. 5, no. 8, pp. 579-583

- Zhang L, Feng C, Chen Z, Liu L, Jiang K, Li Q, Fan S, (2008) “Superaligned carbon nanotube grid for high resolution transmission electron microscopy of nanomaterials.” Nano Letters, vol. 8, no. 8, pp. 2564-2569
- Zhu H, Han J, Xiao JQ, Jin Y, (2008) “Uptake, translocation, and accumulation of manufactured iron oxide nanoparticles by pumpkin plants.” Journal of Environmental Monitoring, vol. 10, no. 6, pp. 713-717
- Zhu ZJ, Wang H, Yan B, Zheng H, Jiang Y, Miranda OR, Rotello VM, Xing B, Vachet RW, (2012) “Effect of surface charge on the uptake and distribution of gold nanoparticles in four plant species.” Environmental Science and Technology, vol. 46, pp. 12391-12398

12.ZAHVALE

Veliko hvala prof. dr. sc. Biljani Balen na pruženoj prilici, njenom mentorstvu, sugestijama, preporučenoj literaturi i metodologiji istraživanja te pomoći pri izradi ovog rada.

13.SAŽETAK

Nanotehnologija je revolucionarna znanost koja uvodi novitete u područje elektronike, energije, medicine i prirodnih znanosti. Nanomaterijali su naširoko korišteni u rastu biljaka i poboljšanju prinosa usjeva zbog sposobnosti translokacije nanomaterijala unutar biljke. Unatoč velikom broju dostupnih informacija o toksičnosti nanočestica na biljke, svega nekoliko istraživanja je temeljeno na istraživanju mehanizma utjecaja nanočestica na rast i razvoj biljaka. Fitotoksičnost nanomaterijala ovisi o svojstvima, uglavnom o njihovoj koncentraciji, veličini i obliku, ali isto tako i o vrsti i starosti biljke.

14.SUMMARY

Nanotechnology is an evolutionary science and has introduced many applications in the field of electronics, energy, medicine and life science. Nanomaterials are widely used in the growth of plants and they enhance crop yields because of their ability to translocate within the plant. Despite the plenty of information available on the toxicity of nanomaterials to plant system, few studies have been conducted on mechanisms, by which nanomaterials effect on plant growth and development. The phytotoxicity depends on various aspects, mainly on the concentration of the nanomaterials and their size and shape, but also about the type and age of the plant.