

Boris LAZAREVIĆ, Marija ZRNIĆ

*Sveučilište u Zagrebu Agronomski fakultet, Zavod za ishranu bilja
blazarevic@agr.hr*

UTJECAJ NEMIKROBIOLOŠKIH BIOSTIMULANSA NA UBLAŽAVANJE BIOTSKOG STRESA U BILJAKA

SAŽETAK

Održiva poljoprivreda zahtijeva smanjenje upotrebe sintetskih pesticida i pronalaženje ekološki prihvatljivih alternativa koje mogu osigurati stabilnu i sigurnu proizvodnju hrane. Biostimulansi su raznolika skupina prirodnih tvari i spojeva koji, neovisno o ulozi hraniva, potiču rast i otpornost biljaka te povećavaju učinkovitost iskorištavanja resursa. Posebno je značajna njihova primjena u ublažavanju biotskog stresa, koji uzrokuje znatne gubitke u poljoprivrednoj proizvodnji. Ovaj pregledni rad prikazuje osnovne skupine nemikrobioloških biostimulanasa (hitozan, silicij, zeoliti, huminske tvari, proteinski hidrolizati, ekstrakti algi i biljaka, fosfiti i hormonski biostimulansi) te njihove mehanizme djelovanja. Nemikrobiološki biostimulansi ublažavaju biotski stres različitim mehanizmima, uključujući stvaranje fizičkih barijera, aktivaciju antioksidativnih enzima, modulaciju hormonskih mreža, stimulaciju razvoja korijena i pozitivan učinak na rizosferni mikrobiom. Njihovi mehanizmi djelovanja, kao i podrijetlo, doza i način primjene, značajno se razlikuju među skupinama, što zahtijeva pažljivo odabiranje i prilagodbu u praksi. Integracija ovih biostimulanasa u sustave zaštite bilja može znatno smanjiti potrebu za sintetskim pesticidima, povećati otpornost i vitalnost usjeva te pridonijeti produktivnijoj i ekološki održivoj poljoprivredi. Njihova daljnja istraživanja i standardizacija ključni su preduvjeti za širu primjenu u praksi.

Ključne riječi: hitozan, silicij, fosfiti, fitohormoni, jačanje otpornosti biljaka, fizičke barijere

UVOD

Da bi se osigurala poljoprivredna proizvodnja koja može opskrbiti rastuću populaciju, važno je razumjeti čimbenike koji negativno utječu na nju i kako ih prevladati. Površine upotrebljive u poljoprivredi smanjuju se zbog urbanizacije i klimatskih promjena koje dodatno umanjuju prinose putom abiotskog (suša, temperatura, zaslanjenost) i biotskog stresa (štetni kukci, patogeni), zbog čega dolazi do gubitaka u prinosu i kvaliteti (Jmaili i sur., 2025.). Biotski stres uzrokuje 20 do 40 % tih gubitaka (Saberu Riseh i sur., 2023.). Procjenjuje se da je potreban rast poljoprivredne proizvodnje od 60 do 70 % do 2030. godine kako bi se ti gubitci nadoknadili (Jmaili i sur., 2025.).

Sintetski pesticidi, premda učinkoviti i dostupni, imaju negativne posljedice, poput zagađenja okoliša, rezistentnosti štetnika i štete za organizme koji nisu cilj suzbijanja jer samo 0,1 % pesticida dolazi do ciljanog mjesta djelovanja (Saber i Riseh i sur., 2023.; Jmail i sur., 2025.). Zbog tih ograničenja razvijaju se alternativne metode jačanja biljne otpornosti, poput biostimulansa, koji su predmet ovoga rada zahvaljujući ekološkoj prihvatljivosti (Saber i Riseh i sur., 2023.; Jmail i sur., 2025.).

Biostimulansi su tvari koje potiču rast i otpornost biljaka neovisno o hranivima, poboljšavajući iskorištavanje hraniva i otpornost na stres (Palacio-Márquez i sur., 2022.; Khoulati i sur., 2025.). Europska regulativa definira biljne biostimulanse kao proizvode koji pospješuju učinkovitost iskorištavanja hraniva, otpornost biljaka i kvalitetu usjeva (Jmail i sur., 2025.).

Prema Rouphaelu i Colli (2020.), biostimulansi se dijele na nemikrobiološke i mikrobiološke. Nemikrobiološki uključuju hitozan, huminske kiseline, proteinske hidrolizate, fosfite, ekstrakte morskih algi i silicij, a mikrobiološki obuhvaćaju mikorize, rizobakterije i gljive roda *Trichoderma*. U ovom radu fokus je na nemikrobiološkim biostimulansima, uključujući ekstrakte biljaka, fitohormone i zeolit, i njihovu potencijalu u ublažavanju posljedica biotskog stresa. U tablici 1 prikazan je sažeti pregled glavnih skupina nemikrobioloških biostimulansa s naglaskom na njihove mehanizme djelovanja i ograničenja primjene.

Tablica 1. Nemikrobiološki biostimulansi: mehanizmi djelovanja i ograničenja primjene

Table 1. Non-microbial biostimulants: mechanisms of action and application limitations

Skupina biostimulansa	Osnovni mehanizmi djelovanja	Ograničenja/izazovi
Hitozan	Antimikrobno djelovanje; aktivacija signalnih putova (SA ¹ , JA ²); indukcija obrambenih enzima; modulacija fitohormona	Učinkovitost ovisi o obliku i koncentraciji; varijabilni rezultati u polju
Silicij	Fizička barijera; pojačava enzime; regulira signalne putove (SA, JA, ET ³); inducira sintezu fenola i lignina; VOC ⁴ za biološku kontrolu	Učinci nisu uvijek dosljedni; učinkovitost ovisi o vrsti biljke i uvjetima
Zeoliti	Fizička barijera; higroskopni učinak; regulacija transpiracije i fotosinteze; poboljšanje dostupnosti hraniva; nosači mikroorganizama	Samostalno često slaba učinkovitost; najbolji u kombinaciji s drugim sredstvima
Huminske tvari	Stimulacija korijena (slična djelovanju auksina); aktivacija H ⁺ -ATPaza i enzima za unos hraniva; modulacija hormona (SA, JA, ET); povećanje	Varijabilan sastav i kvaliteta; učinak ovisi o tlu i dozi

	antioksidativnih enzima; sinteza fenola; pozitivan učinak na rizosferu	
Proteinski hidrolizati	Signalne molekule s hormonskim učinkom; stimulacija fotosinteze i metabolizma N ⁵ ; pojačavaju antioksidativne enzime; razvoj korijena; utjecaj na rizosferni mikrobiom	Učinkovitost ovisi o podrijetlu, načinu proizvodnje i fazi primjene
Ekstrakti morskih algi i biljaka	Induciraju sustavnu stečenu otpornost (SAR ⁶); sinteza enzima (POD ⁸ , CAT ⁹ , SOD ¹⁰); povećanje fotosinteze i klorofila; antimikrobno i repelentno djelovanje; utjecaj na mikrobiom	Velika varijabilnost između izvora i pripravaka; cijena; problem standardizacije
Fosfiti	Izravno antimikrobno djelovanje; aktivacija obrambenih putova (SA, fitoaleksini, lignin, fenoli); povećanje antioksidativnih enzima; stimulacija korijena	Rizik rezistentnosti patogena; ne može zamijeniti fosforna gnojiva; opasnost od fitotoksičnosti pri višim dozama
Hormonski biostimulansi	Aktivacija i modulacija hormonskih mreža (SA, JA, ET, ABA ¹¹ , auksini, citokinini, giberelini); <i>priming</i> biljke; hormonsko međudjelovanje; povećana antioksidativna aktivnost; promjena VOC	Potrebno precizno doziranje; mogu izazvati neželjene promjene rasta ako nisu dobro uravnoteženi

Legenda: SA¹ – salicilna kiselina, JA² – jasmonska kiselina, ET³ – etilen, VOC⁴ – hlapive organske tvari, N⁵ – dušik, SAR⁶ – stečena sustavna otpornost, POD⁸ – peroksidaza, CAT⁹ – katalaza, SOD¹⁰ – superoksid dismutaza, ABA¹¹ – abscizinska kiselina

HITOZAN

Hitozan je prirodni polisaharid dobiven deacetilacijom hitina iz egzoskeleta člankonožaca, koji sintetiziraju i gljive, i alge i kvasci. Zbog biorazgradivosti, biokompatibilnosti i netoksičnosti, održiva je alternativa pesticidima i regulatorima rasta (Maluin i Hussein, 2020.; Mukarram i sur., 2023.; Padamini i sur., 2024.).

Otpornost biljaka prema biotskom stresu hitozan povećava putom četiri mehanizma:

1. **Antimikrobno djelovanje** na patogene gljive, bakterije, viruse, nematode i insekte tako što oštećuje plazma membranu patogena, inhibira sintezu RNK i proteina te helira esencijalne metale (Mukarram i sur., 2023.; Rojas-Pirela i sur., 2024.).
2. **Aktivacija obrambenih reakcija** preko signalnih putova koji potiču sintezu fitoaleksina, lignina, fenola i PR-proteina (Chun i Chandrasekaran, 2019; Chakraborty i sur., 2020.).

3. **Povećanje aktivnosti obrambenih enzima** kao što su hitinaze, fenilalanin amonij-lijaza i katalaza (Rojas-Pirela i sur., 2024.).
4. **Poticanje rasta i otpornosti** moduliranjem fitohormona poput auksina, citokinina i jasmonske kiseline te poboljšanjem fotosinteze i usvajanja hraniva (Palacio-Márquez i sur., 2022.; Rojas-Pirela i sur., 2024.).

Hitozan se primjenjuje folijarno, kao predstavljeni tretman ili kao poboljšivač tla, često u obliku nanočestica za bolje prijanjanje i prodiranje u patogene (Tortella i sur., 2023.). U kombinaciji s korisnim rizobakterijama pojačava otpornost biljaka (Rojas-Pirela i sur., 2024.).

Istraživanja potvrđuju njegovu učinkovitost na rajčici (*Solanum lycopersicum*), krumpiru (*Solanum tuberosum*), kukuruzu (*Zea mays*), paprici (*Capsicum annum*), grahu (*Phaseolus vulgaris*) i krastavcu (*Cucumis sativus*), gdje smanjuje simptome bolesti, potiče zacjeljivanje, povećava sadržaj klorofila i produktivnost (Palacio-Márquez i sur., 2022.). Također, ublažava simptome virusne infekcije značajnim biljnim virusima, kao što su virus mozaika krastavca (*Cucumovirus*), X virus krumpira (*Potexvirus*) i virus mozaika duhana (*Tobamovirus*) (Khalil i sur., 2022.).

Kod nematoda poput *Meloidogyne incognita* i *M. javanica*, hitozan potiče razvoj korisnih mikroorganizama koji razgrađuju jajašca i odrasle oblike štetnika smanjujući tako njihovu populaciju i štetu na usjevima (Khalil i sur., 2022.).

SILICIJ

Silicij (Si) čini 27 % Zemljine kore; uglavnom je prisutan kao SiO_2 ili silikat, ali zbog slabe topivosti biljkama je dostupan poglavito kao ortosilicijeva kiselina. Biljke se dijele na vrste s niskom, srednjom i visokom sposobnošću akumulacije (Añibarro-Ortega i sur., 2025.). Početkom 21. stoljeća prepoznat je kao biostimulans koji povećava rast, unos hraniva, fotosintezu, biomasu i kvalitetu plodova, osobito povrća i lisnatih kultura (Giordano i sur., 2024.; Costa, 2025.).

Primijenjen na biljke, silicij djeluje kao:

1. Fizička barijera. Taloži se u epidermi i stijenkama, otežava prodor patogena i hranjenje štetnika, uz taloženje prolinom bogatih proteina (Ma, 2004.; Fauteux i sur., 2005.; Kanakhara i sur., 2025.).

2. Biokemijski aktivator – pojačava aktivnost enzima (POD, polifenol oksidaza – PPO, fenilalanin-amonijak lijaza – PAL, β -1,3-glukanaza, hitinaza), potiče sintezu fenola, fitoaleksina, lignina i jača antioksidativnu zaštitu (Gomes i sur., 2005.; Debona i sur., 2017.).

3. Molekularna regulacija – inducira ekspresiju gena i signalne putove SA, JA i ET, aktivira SAR i otpornost prema gljivama, bakterijama, virusima i nematodama (Brunings i sur., 2009.; Van Bockhaven i sur., 2013.).

4. Biološka kontrola – dovodi do stvaranja biljnih hlapljivih spojeva (*herbivore-induced plant volatiles* - HIPV) koji privlače parazitoide i predatore (Reynolds i sur., 2016.).

Učinci su potvrđeni kod riže (*Oryza sativa*), pšenice (*Triticum aestivum*), rajčice (*Solanum lycopersicum*), krastavca (*Cucumis sativus*), špinata (*Spinacia oleracea*) i jagode (*Fragaria × ananassa*): smanjenje bolesti (*Fusarium*, *Erysiphe* spp., *Botrytis cinerea*, *Magnaporthe oryzae*) i zaraze lisnim ušima (*Aphididae*) i gusjenicama (*Helicoverpa armigera*, *Spodoptera* spp.) (Islam i sur., 2020.; Guntzer i sur., 2012.; Bathoova i sur., 2025.). Na rajčici kombinacija silicija (Si), kalcija (Ca) i mikroelemenata uz reducirano navodnjavanje povećava prinos i kvalitetu (Añibarro-Ortega i sur., 2025.), a kod *baby* špinata kombinacija silicija i ambalaže od polilaktične kiseline smanjuje gubitak mase tijekom skladištenja za 35 % (Giordano i sur., 2024.). Rezultati nisu uvijek dosljedni – na jagodi je u zaštićenim uvjetima učinak bio ograničen, a pesticidi su bili učinkovitiji protiv pepelnice i sive plijesni (Costa i sur., 2025.).

ZEOLITI

Zeoliti su kristalni alumosilikati s poroznom strukturom i sposobnošću ionske izmjene koji se sve češće koriste u poljoprivredi. Za razliku od silicija koji aktivno ulazi u biljku, oni djeluju pasivno tako što moduliraju neposrednu okolinu biljke. Njihovi učinci temelje se na fizikalnim, kemijskim i biološkim mehanizmima. Kao prah ili filmski premaz stvaraju fizičku barijeru: čestice ometaju kretanje i razmnožavanje kukaca, uzrokuju dehidraciju i uginuće (De Smedt i sur., 2015.; Constantinescu-Aruxandei i sur., 2020.). Higroskopni zeoliti bogati aluminijem upijaju vlagu s površine lista i tako sprječavaju razvoj gljivičnih i bakterijskih patogena (Baričević i sur., 2023.). Ne djeluju izravno antimikrobno, ali pozitivno djeluju na transpiraciju, sadržaj klorofila i fotosintezu (De Smedt i sur., 2017.) te poboljšavaju učinkovitost korištenja vode u sušnim uvjetima (Aslan i Arslan, 2024.). Zbog visoka kapaciteta izmjene iona i adsorpcije usporeno otpuštaju hraniva i pesticide te tako produžuju njihovo djelovanje i smanjuju ispiranje. Mogu služiti i kao nosači mikroorganizama, čime se povećava njihovo preživljavanje i aktivnost u tlu (Prisa, 2020.; Quezada i Bragazza, 2023.). Pozitivno djeluju na enzime tla, razvoj korijena i unos hraniva te smanjuju osjetljivost biljaka na patogene (Quezada i Bragazza, 2023.; Constantinescu-Aruxandei i sur., 2020.). Ipak, samostalno pokazuju nisku učinkovitost, pa se preporučuje primjena u kombinaciji s drugim sredstvima kako bi se ostvario sinergijski učinak (Constantinescu-Aruxandei i sur., 2020.).

HUMINSKE TVARI

Huminske tvari (HT) uključuju huminske i fulvinske kiseline koje nastaju razgradnjom organske tvari te kao dio humusa poboljšavaju plodnost tla, strukturu i biološku aktivnost. Povećavaju kationsku izmjenu, dostupnost mikroelemenata i usvajanje dušika (N) i fosfora (P), te imaju važnu ulogu u

otpornosti biljaka na biotski stres (Rouphael i Colla, 2018.).

Mehanizmi djelovanja obuhvaćaju stimulaciju razvoja korijenja djelovanjem nalik na auksin te povećanje aktivnosti H^+ -ATPaza i enzima za apsorpciju nitrata, čime se poboljšava ishrana (Palacio-Márquez i sur., 2022.). HT modulira i hormonske mreže SA, JA i ET važne za sustavnu otpornost na patogene i biljojede (Silva i Canellas, 2022; Canellas i sur., 2024.).

Povećavaju aktivnost antioksidativnih enzima (superoksid dismutaza – SOD, katalaza, peroksidaza) koji štite od reaktivnih kisikovih vrsta (ROS), te potiču sintezu fenola i drugih biljnih metabolita s antimikrobnim i repelentnim učinkom što dovodi do smanjene osjetljivosti na bolesti i štetnike (Pereira i sur., 2021.). Poticajno djeluju na mikrobiom rizosfere, osobito na rodove *Pseudomonas* i *Chitinophaga*, koji pokazuju svojstva suzbijanja patogena. Promjenom sastava korijenovih eksudata ograničavaju kolonizaciju patogena. Metaanaliza (Silva i Canellas, 2022.) pokazuje da organska tvar, uključujući HT, može smanjiti pojavu bolesti i štetnika do 75 %. HT-i su ekonomičan i učinkovit biostimulans koji integrirano poboljšava zdravlje i otpornost biljaka te smanjuje potrebu za pesticidima, što ih čini ključnim alatom održive poljoprivrede (Nehul i sur., 2024.).

PROTEINSKI HIDROLIZATI

Proteinski hidrolizati (PH) su skupina učinkovitih biostimulansa dobivenih enzimatskom ili kemijskom razgradnjom proteina iz biljnog ili životinjskog podrijetla, pri čemu nastaju mješavine slobodnih aminokiselina, oligopeptida i polipeptida. Najčešće se primjenjuju folijarno, rjeđe preko tla ili sjemena, te pokazuju brojne pozitivne učinke na rast, produktivnost i otpornost biljaka.

Zahvaljujući svojoj niskoj molekularnoj masi i bioaktivnim svojstvima, PH-i djeluju kao signalne molekule s učinkom sličnim hormonima (auksin i giberelin). Stimuliraju fotosintezu, metabolizam dušika i ugljika te sintezu biljnih pigmenata i sekundarnih metabolita poput fenolnih spojeva. Također, pojačavaju aktivnost antioksidativnih enzima (npr. SOD, CAT, POD), što omogućuje učinkovitu obranu od oksidativnog stresa izazvanoga patogenima (Colla i sur., 2014.; Malécange i sur., 2023.).

Proteinski hidrolizati dokazano potiču razvoj korijenova sustava, pogotovo povećanjem duljine i gustoće korijenovih dlačica, čime pospješuju usvajanje vode i hraniva (Sun i sur., 2024.). Time se pojačava otpornost biljke na biotski stres.

Osim fizioloških učinaka, PH utječe i na mikrobiom rizosfere i filiosfere. Služi kao izvor N i energije za korisne mikroorganizme te stimuliraju kolonizaciju biljke bakterijama koje poticajno djeluju na rast biljaka (PGPB), što može dovesti do bolje zaštite od bolesti i štetnika (Tejada i sur., 2011.; Colla i sur., 2017.). Na vinovoj je lozi utvrđeno da primjena PH-a smanjuje intenzitet

infekcije plamenjačom (*Plasmopara viticola*), djelomično zbog poticanja biljnih obrambenih mehanizama, a djelomično zbog promjena u sastavu mikrobne zajednice (Colla i sur., 2017.).

Iako je učinkovitost PH-a potvrđena na brojnim kulturama, može ovisiti o podrijetlu, načinu proizvodnje, koncentraciji pripravka, načinu primjene te fazi razvoja biljke (Pasković i sur., 2024.).

EKSTRAKTI MORSKIH ALGI I BILJAKA

Ekstrakti morskih algi i određenih biljaka sve se češće primjenjuju kao biostimulansi jer induciraju otpornost, potiču fiziološke funkcije i povećavaju toleranciju na bolesti i štetnike (Ali i sur., 2021.). Najviše se koriste ekstrakti smeđih algi (*Ascophyllum nodosum*, *Scophyllum*, *Ecklonia*, *Fucus*, *Laminaria*, *Sargassum*), ali i vrsta s izraženim biostimulativnim potencijalom: neem (*Azadirachta indica*), *Quillaja saponaria* i lucerna (*Medicago sativa*) (Rouphael i Colla, 2018.).

Osnovni mehanizmi kojima navedeni ekstrakti djeluju na biljkama:

1. Poticanje obrane – poticanje sinteze enzima (peroksidaza, katalaza, PPO, SOD) i sekundarnih metabolita (fenoli, flavonoidi, lignin) s antimikrobnim djelovanjem. Aktiviraju se signalne molekule ROS, NO i fitohormoni (JA, SA, ET) uključeni u SAR i ISR (Rouphael i Colla, 2018.; Ali i sur., 2021.).

2. Izravno antimikrobno i repelentno djelovanje – bioaktivne tvari inhibiraju patogene i štetnike. Ekstrakt neema bogat azadirachtinom pokazuje insekticidni i fungicidni učinak bez negativna utjecaja na korisne kukce (Campos i sur., 2016.). *Quillaja saponaria* sadrži saponine s insekticidnim i fungicidnim svojstvima (Godlewska i sur., 2020.).

3. Stimulacija rasta i tolerancije na stres – ekstrakti algi sadrže laminarin, manitol, fitohormone i vitamine koji povećavaju fotosintezu, sadržaj klorofila i metabolizam dušika te otpornost na sušu, salinitet i toplinski stres (Palacio-Márquez i sur., 2022.).

4. Utjecaj na rizosferu – potiču razvoj korisnih rizobakterija i mikoriznih gljiva. U paprike i rajčice povećavaju raznolikost rizosfernih zajednica, što poboljšava rast i prinos (Shukla i sur., 2019.; De Saeger i sur., 2020.).

Ekstrakt neema učinkovito smanjuje populacije lisnih uši, bijelih mušica, gusjenica (*Helicoverpa armigera*) i cikada te ima antivirusna i protugljivična svojstva (Campos i sur., 2016.). Saponini iz vrste *Quillaja saponaria* djeluju insekticidno i fungicidno, osobito u kombinaciji s drugim biostimulansima (Moya Elizondo i sur., 2010.). Primjena biostimulansa na bazi *Ecklonia maxima* i ekstrakta kvasca povećala je otpornost rajčice na *Pseudomonas syringae* poticanjem imunogenog odgovora i promjenom hormonskog statusa (Fiorillo i sur., 2025.). Ekstrakti algi, posebno *A. nodosum*, povećavaju otpornost rajčice,

krastavca i žitarica na patogene poticanjem antioksidativnih enzima i sintezom obrambenih metabolita (Shukla i sur., 2019.; De Saeger i sur., 2020.). Ekstrakt lucerne s fitohormonima i fenolima potiče sistemsku otpornost i sintezu flavonoida (Xu i Wang, 2024.). Najčešće se primjenjuju folijarno ili preko tla kao dodatak gnojdbi.

FOSFITI

Fosfit(Phi) je reducirani oblik fosfata (Pi) s višestrukom primjenom u poljoprivredi – kao biostimulans, fungicid i gnojivo (Achary i sur., 2017.; Han i sur., 2021.). Poboljšava rast, prinos i otpornost biljaka na biotski stres te stimulira korisne mikrobne zajednice u rizosferi (Han i sur., 2021.; Nehul i sur., 2024.). Njegova uloga u zaštiti bilja temelji se na dvostrukom mehanizmu djelovanja:

1. Izravno antimikrobno djelovanje – učinkovit je protiv oomyceta (*Phytophthora*), gljiva, bakterija i

metabolizam patogena, izaziva nedostatak ugljikohidrata i inducira ekspresiju gena za hitinaze koje razgrađuju stanične stijenke gljiva (Li i sur., 2025.).

2. Aktivacija obrambenih reakcija – fosfit aktivira signalne putove sa salicilnom kiselinom (SA) i sustavno stečenim imunitetom (SAR), povećava sintezu fitoaleksina, lignina, fenola i proteina, jača stanične stijenke i aktivnost antioksidativnih enzima (POD, PAL) (Li i sur., 2025.).

Primjena fosfita pokazala je dobru učinkovitost: na krumpiru smanjuje plamenjaču (*Phytophthora infestans*) i sekundarne infekcije (*Fusarium*, *Rhizoctonia*) (Lobato i sur., 2011.; Liljeroth i sur., 2016.); na rajčici u kombinaciji s *Bacillus amyloliquefaciens* suzbija venuće od *Ralstonia solanacearum* (Su i sur., 2022.); na soji (*Glycine max*) smanjuje plamenjaču (*Peronospora manshurica*) i trulež korijena (*Phytophthora sojae*) (Silva i sur., 2011.); na riži u kombinaciji s fungicidom smanjuje trulež stabljike (*Nakataea oryzae*) (Martínez, 2016.); na kukuruzu i pšenici pomaže u suzbijanju nematoda (*Meloidogyne*) i bolesti poput plamenjače, poboljšavajući tako vitalnost biljke (Dias-Arieira i sur., 2012.). Osim što ima zaštitnu funkciju, potiče rast korijena i usvajanje hraniva, no ne može potpuno zamijeniti ishranu fosforom (Thao i Yamakawa, 2009.), nego u uvjetima nedostatka fosfora može čak ometati percepciju nedostatka (McDonald i sur., 2001.).

Najveća učinkovitost postiže se pri niskim koncentracijama koje induciraju obranu bez fitotoksičnosti (Li i sur., 2025.). Dugotrajna i isključiva primjena može prouzročiti rezistentnost u patogena, stoga se fosfit preporučuje u integriranim strategijama zaštite, često u kombinaciji s fungicidima (Liljeroth i sur., 2016.; Hunter i sur., 2023.).

HORMONSKI BIOSTIMULANSI

Fitohormoni u poljoprivredi djeluju izravno kao biostimulansi ili se sintetiziraju u biljci nakon primjene biostimulansa. Ekstrakti morskih algi, hidrolizati proteina i biostimulansi na bazi aminokiselina sadrže fitohormone ili spojeve s hormonskim učinkom (auksine, citokinine, gibereline) koji izravno reguliraju rast i obranu (Martinez-Lorente i sur., 2024.). Drugi biostimulansi potiču sintezu endogenih hormona poput jasmonske i salicilne kiseline te etilena, ključnih u obrani od štetnika i patogena (Jahan i sur., 2024.). U praksi djeluju kombinirano – osiguravaju egzogene fitohormone i moduliraju signalne putove – čime povećavaju otpornost i vitalnost (Pereira i sur., 2021.; Jahan i sur., 2024.).

Bez obzira na mehanizam djelovanja, biostimulansi poboljšavaju otpornost moduliranjem hormonskih mreža koje reguliraju biljni imunitet (Rouphael i sur., 2021.). Najvažniji putovi uključuju jasmonsku (JA), salicilnu (SA) i abscizinsku kiselinu (ABA), etilen (ET), auksine, citokinine, gibereline, brasinosteroide i strigolakton, koji uravnotežuju rast i obranu (Calvo i sur., 2017.).

Osnovni je mehanizam djelovanja aktivacija obrambenih hormona. Prethodna priprema (*priming*) s JA-eom, SA-eom i ET-om inducira sustavnu stečenu otpornost (systemic acquired resistance – SAR) te sintezu antimikrobnih spojeva, enzima i fizičkih barijera (Bari i Jones, 2009.; Fazal i sur., 2021.). Hormoni rasta poput citokinina i auksina također mogu sinergistički potaknuti sintezu fitoaleksina i povećati otpornost (Kurepin i sur., 2014.).

Drugi mehanizam je hormonski "crosstalk" – međusobna komunikacija signalnih putova koja određuje prioritet obrane. Biostimulansi povećavaju koncentraciju hormona ili osjetljivost biljke, što ubrzava reakciju na napad patogena. Proces uključuje transkripcijsku regulaciju gena za biosintezu, signalizaciju i obrane (Rouphael i sur., 2021.).

Osim signalizacije, hormonski biostimulansi povećavaju antioksidativnu aktivnost i sintezu sekundarnih metabolita (fenoli, flavonoidi, fitoaleksini) te tako jačaju kemijske i fizičke barijere (Calvo i sur., 2017.). Neki mijenjaju profil hlapljivih organskih spojeva (VOC) i tako privlače prirodne neprijatelje biljojeda, pa posredno poboljšavaju biološku kontrolu (Rouphael i sur., 2021.).

SA, JA i ET ostaju ključni hormoni u usmjeravanju obrane protiv patogena i biljojeda (Bari i Jones, 2009.; Fazal i sur., 2021.). Sve više istraživanja potvrđuje da hormonski biostimulansi imaju velik potencijal u održivoj poljoprivredi jer smanjuju potrebu za pesticidima i povećavaju otpornost na stres (Khetsha i sur., 2023.; Pereira i sur., 2021.). Njihova primjena u integriranoj zaštiti bilja pridonosi većoj produktivnosti i otpornosti kultura.

ZAKLJUČAK

Nemikrobiološki biostimulansi važan su alat u razvoju održive poljoprivrede jer omogućuju smanjenje uporabe sintetskih pesticida i jačanje otpornosti biljaka na biotski stres. Njihovo djelovanje obuhvaća širok raspon mehanizama – od stvaranja fizičkih barijera i aktivacije antioksidativnih enzima do modulacije hormonskih mreža i poticanja korisnog mikrobioma. Međutim, učinkovitost tih pripravaka ovisi o njihovom podrijetlu, sastavu, dozi i načinu primjene, što zahtijeva dodatna istraživanja i standardizaciju. Integracijom biostimulansa u sustave zaštite bilja moguće je smanjiti ovisnost o kemijskim pesticidima i značajno povećati otpornost, vitalnost i produktivnost usjeva. Njihova buduća primjena trebala bi se temeljiti na kombinaciji znanstvenih spoznaja i praktičnih iskustava, uz isticanje sinergije među različitim biostimulansima i ostalim agrotehničkim mjerama.

THE IMPACT OF NON-MICROBIOLOGICAL BIOSTIMULANTS ON MITIGATING BIOTIC STRESS IN PLANTS

ABSTRACT

Sustainable agriculture aims to reduce the use of synthetic pesticides and find environmentally friendly alternatives that can ensure stable and safe food production. Biostimulants represent a diverse group of natural substances that stimulate plant growth and pest resistance and increase nutrient use efficiency, without providing nutritional value to the plants. Their use has a vital role in alleviating plant biotic stress, which causes significant losses in agricultural production. This review article presents the main groups of non-microbiological biostimulants (chitosan, silicon and zeolites, humic substances, protein hydrolysates, seaweed and plant extracts, phosphites, and hormonal biostimulants) and their modes of action. Non-microbiological biostimulants mitigate biotic stress through various mechanisms, including the formation of physical barriers, activation of antioxidant enzymes, modulation of hormonal networks, stimulation of root development, and positive effects on the rhizosphere microbiome. Their mechanisms of action, as well as origin, dosage, and method of application, differ significantly among groups, requiring careful selection and adjustment in practice. The integration of biostimulants into plant protection systems can significantly reduce the need for synthetic pesticides, increase crop resistance and vitality, and contribute to more productive and environmentally sustainable agriculture. Further research and standardization are key prerequisites for broader practical application.

Keywords: chitosan, silicon, phosphites, phytohormones, improving plant resistance, physical barriers

LITERATURA

- Achary, V.M.M., Ram, B., Manna, M., Datta, D., Bhatt, A., Reddy, M.K., Agrawal, P. (2017). Phosphite: a novel P fertilizer for weed management and pathogen control. *Plant Biotechnol. J.*, 15(12), 1493–1508. <https://doi.org/10.1111/pbi.12803>
- Ali, O., Ramsabhag, A., Jayaraman, J. (2021). Biostimulant properties of seaweed extracts in plants: implications towards sustainable crop production. *Plants*, 10(3), 531. <https://doi.org/10.3390/plants10030531>
- Añibarro-Ortega, M., Pereira, A., Pinela, J., Liava, V., Chaski, C., Alexopoulos, A. A., Barros, L., Petropoulos, S. A. (2025). Enhancing Tomato Growth and Quality Under Deficit Irrigation with Silicon Application. *Agronomy*, 15(3), 682. <https://doi.org/10.3390/agronomy15030682>
- Aslan, M. U., Arslan, H. (2024). The effect of zeolites on soil and plant: A review. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 55(9), 1–15. <https://doi.org/10.1080/00103624.2024.2346211>
- Bari, R., Jones, J.D.G. (2009). Role of plant hormones in plant defence responses. *Plant Mol. Biol.*, 69(4), 473–488. <https://doi.org/10.1007/s11103-008-9435-0>
- Baričević, M., Vrandečić, K., Zorica, M., Kos, T. (2023). Zeoliti i njihova primjena u zaštiti bilja. *Poljoprivreda*, 29(2), 33–42. <https://doi.org/10.18047/poljo.29.2.5>
- Bathoova, M., Svubova, R., Gimes, L., Kostolani, D., Slovakova, L., Martinka, M. (2025). The potential of silicon in crop protection against phloem feeding and chewing insect pests - a review. *J. Exp. Bot.*, eraf102. <https://doi.org/10.1093/jxb/erf102>
- Brunings, A. M., Datnoff, L. E., Ma, J. F., Mitani, N., Nagamura, Y., Rathinasabapathi, B., Kirst, M. (2009). Differential gene expression of rice in response to silicon and rice blast fungus *Magnaporthe oryzae*. *Ann. Appl. Biol.*, 155(2), 161–170.
- Campos, E. V. R., Pascoli, M., Fraceto, L. F. (2016). Neem oil and crop protection: From now to the future. *Front. Plant Sci.*, 7, 1494. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01494>
- Canellas, L. P., da Silva, R. M., Busato, J. G. (2024). Humic substances and plant abiotic stress adaptation. *Chem. Biol. Technol. Agric.*, 11(1), Article 66. <https://doi.org/10.1186/s40538-024-00575-z>
- Chakraborty, M., Hasanuzzaman, M., Rahman, M., Khan, M. A. R., Bhowmik, P., Mahmud, N., Tanveer, M., Islam, T. (2020). Mechanism of plant growth promotion and disease suppression by chitosan biopolymer. *Agriculture*, 10(12), 624. <https://doi.org/10.3390/agriculture10120624>
- Chun, S. C., Chandrasekaran, M. (2019). Chitosan and chitosan nanoparticles induced expression of pathogenesis-related protein genes enhances biotic stress tolerance in tomato. *Notulae Bot. Horti Agrobot.*, 47(4), 12231. <https://doi.org/10.15835/nbha47411680>
- Colla, G., Hoagland, L., Ruzzi, M., Cardarelli, M., Bonini, P., Canaguier, R., Roupheal, Y. (2017). Biostimulant action of protein hydrolysates: Unraveling their effects on plant physiology and microbiome. *Front. Plant Sci.*, 8, 2202. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.02202>
- Colla, G., Roupheal, Y., Canaguier, R., Švecová, E., Cardarelli, M. (2014). Biostimulant action of a plant-derived protein hydrolysate produced through enzymatic hydrolysis. *Front. Plant Sci.*, 5, 448. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00448>
- Constantinescu-Aruxandei, D., Lupu, C., Oancea, F. (2020). Siliceous natural

nanomaterials as biorationals—Plant protectants and plant health strengtheners. *Agronomy*, 10(11), 1791. <https://doi.org/10.3390/agronomy10111791>

Costa, D., Elliott, G., Gargan, S., Kingston-Smith, A., Wimalasekera, R. (2025). Does the addition of silicon-based biostimulants increase production and reduce disease incidence in strawberry crops? *Ann. Appl. Biol.*, 186(2), 130–141. <https://doi.org/10.1111/aab.13000>

De Saeger, J., Van Praet, S., Vereecke, D., Park, J., Goormachtig, S. (2020). Toward the molecular understanding of the action mechanism of *Ascochylla nodosum* extracts on plants. *J. Appl. Phycol.*, 32, 573–597. <https://doi.org/10.1007/s10811-019-01903-9>

De Smedt, C., Someus, E., Spanoghe, P. (2015). Potential and actual uses of zeolites in crop protection. *Pest Manag. Sci.*, 71(9), 1355–1367. <https://doi.org/10.1002/ps.3999>

De Smedt, C., Steppe, K., Spanoghe, P. (2017). Beneficial effects of zeolites on plant photosynthesis. *Adv. Mater. Sci.*, 2(1), 1–11. <https://doi.org/10.15761/AMS.1000115>

Debona, D., Rodrigues, F. A., Datnoff, L. E. (2017). Silicon's role in abiotic and biotic plant stresses. *Annu. Rev. Phytopathol.*, 55, 85–107. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080516-035312>

Dias-Arieira, C. R., Marini, P. M., Fontana, L. F., Roldi, M., Silva, T. R. B. (2012). Effect of *Azospirillum brasilense*, Stimulate® and potassium phosphite to control *Pratylenchus brachyurus* in soybean and maize. *Nematropica*, 42(1), 170–175.

Fauteux, F., Rémus-Borel, W., Menzies, J. G., Bélanger, R. R. (2005). Silicon and plant disease resistance against pathogenic fungi. *FEMS Microbiol. Lett.*, 249(1), 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.femsle.2005.06.034>

Fazal, A., Ur, R. A., Abdul, R., Nisar, A., Mohammad, A., Akhtar, R., Muzafar, S., Muhammad, S., Muhammad, R. (2021). The role of phytohormones in combating biotic stress. In *Plant Stress Physiology* (pp. 225–244). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003109013-12>

Fiorillo, A., Manai, M., Marra, M., Camoni, L. (2025). A biostimulant based on *Ecklonia maxima* and yeast extract increases resistance of tomato plants toward *Pseudomonas syringae* pv. tomato DC3000. *Physiol. Plant.*, 177(1), e70301. <https://doi.org/10.1111/ppl.70301>

Giordano, F. S., Reynolds, A., Frias, J. M., Foley, L. (2024). Impact of silicon-enriched plant biostimulant treatment on shelf-life of baby spinach (*Spinacia oleracea*) crops. *J. Agric. Food Res.*, 15, 100924. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100924>

Godlewska, K., Ronga, D., Michalak, I. (2020). Plant extracts – importance in sustainable agriculture. *Ital. J. Agron.*, 16(2), 1851. <https://doi.org/10.4081/ija.2021.1851>

Gomes, F. B., Moraes, J. C., dos Santos, C. D., Goussain, M. M. (2005). Resistance induction in wheat plants by silicon and aphids. *Scientia Agric.*, 62(6), 547–551. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162005000600006>

Guntzer, F., Keller, C., Meunier, J. D. (2012). Benefits of plant silicon for crops: a review. *Agron. Sustain. Dev.*, 32(1), 201–213. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0039-8>

- Han, X., Xi, Y., Zhang, Z., Mohammadi, M., Joshi, J., Borza, T., Wang-Pruski, G. (2021).** Effects of phosphite as a plant biostimulant on metabolism and stress response for better plant performance in *Solanum tuberosum*. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 196, 111873. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111873>
- Hunter, S., McDougal, R., Williams, N., Scott, P. (2023).** Evidence of phosphite tolerance in *Phytophthora cinnamomi* from New Zealand avocado orchards. *Plant Dis.*, 107, 393–400. <https://doi.org/10.1094/PDIS-05-22-1269-RE>
- Islam W, Tayyab M, Khalil F, Hua Z, Huang Z, Chen HYH. (2020).** Silicon-mediated plant defense against pathogens and insect pests. *Pestic. Biochem. Physiol.*, 168, 104641. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2020.104641>
- Jahan, M.S., Hasan, M.M., Rahman, M.A. (2024).** Editorial: Hormones and biostimulants in plants: Physiological and molecular insights on plant stress responses. *Front. Plant Sci.*, 15, 1413659. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1413659>
- Jmaili, K., Asbai, Z., Waddi, K., Bahlaouan, B., Silkina, A., Boutaleb, N. (2025).** Non-microbial biostimulants for plant growth and abiotic stress mitigation: A review of recent scientific innovations. *Int. J. Environ. Stud.*, 82(1), 401–431.
- Kanakhara, M., Panneerselvam, A., Packirisamy, P., Vendan, S. E. (2025).** Enhancing food safety and security through silicon-based approaches in pre-harvest and post-harvest pest management. *Pest Manag. Sci.*, 81(2), 682–694. <https://doi.org/10.1002/ps.8876>
- Khalil, M. S., Badawy, F. A., Morsy, M. E. (2022).** Antinematodal and antiviral potential of chitosan nanomaterials for crop management: A review. *J. Plant Sci. Phytopathol.*, 6(1), 28–36. <https://doi.org/10.29328/journal.jpssp.1001051>
- Khetsha, Z., van der Watt, E., Masowa, M., Legodi, L., Satshi, S., Sadiki, L., Moyo, K. (2023).** Phytohormone-based biostimulants as an alternative mitigating strategy for horticultural plants grown under adverse multi-stress conditions: Common South African stress factors. *Caraka Tani: J. Sustain. Agric.*, 39(1), 128–142. <https://doi.org/10.20961/carakatani.v39i1.80530>
- Khoulati, A., Ouahhoud, S., Taibi, M., Ezrari, S., Mamri, S., Merah, O., Hakkou, A., Addi, M., Maleb, A., Saalaoui, E. (2025).** Harnessing biostimulants for sustainable agriculture: Innovations, challenges, and future prospects. *Discover Agric.*, 3(1).
- Kurepin, L.V., Zaman, M., Pharis, R. (2014).** Phytohormonal basis for the plant growth promoting action of naturally occurring biostimulators. *J. Sci. Food Agric.*, 94(6), 1007–1015. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6545>
- Li, Z., Kong, X., Zhang, Z., Tang, F., Wang, M., Zhao, Y., Shi, F. (2025).** The functional mechanisms of phosphite and its applications in crop plants. *Front. Plant Sci.*, 16, 1538596. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1538596>
- Liljeroth, E., Lankinen, Å., Wiik, L., Burra, D.D., Alexandersson, E., Andreasson, E. (2016).** Potassium phosphite combined with reduced doses of fungicides provides efficient protection against potato late blight in large-scale field trials. *Crop Prot.*, 86, 42–55. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2016.04.003>
- Lobato, M.C., MaChinandiarena, M.F., Tambascio, C., Dosio, G.A.A., Caldiz, D.O., Daleo, G.R., Andreu, A.B. (2011).** Effect of foliar applications of phosphite on post-harvest potato tubers. *Eur. J. Plant Pathol.*, 130, 155–163. <https://doi.org/10.1007/s10658-011-9741-2>
- Ma, J. F. (2004).** Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 50(1), 11–18. <https://doi.org/10.1080>

/00380768.2004.10408447

Malécange, M., Sergheraert, R., Teulat, B., Mounier, E. M., Lothier, J., Sakr, S. (2023). Biostimulant properties of protein hydrolysates: Recent advances and future challenges. *Int. J. Mol. Sci.*, 24(11), 9714. <https://doi.org/10.3390/ijms24119714>

Maluin, F. N., Hussein, M. Z. (2020). Chitosan-based agronanochemicals as sustainable alternative in crop protection. *Molecules*, 25(7), 1611. <https://doi.org/10.3390/molecules25071611>

Martínez, S. (2016). Effects of combined application of potassium phosphite and fungicide on stem and sheath disease control, yield and quality of rice. *Crop Prot.*, 89, 259–264. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2016.08.002>

Martínez-Lorente, S.E., Martí-Guillén, J.M., Pedreño, M.Á., Almagro, L., Sabater-Jara, A.B. (2024). Higher plant-derived biostimulants: Mechanisms of action and their role in mitigating plant abiotic stress. *Antioxidants*, 13(3), 318. <https://doi.org/10.3390/antiox13030318>

McDonald, A.E., Grant, B.R., Plaxton, W.C. (2001). Phosphite (phosphorous acid): Its relevance in the environment and agriculture and influence on plant phosphate starvation response. *J. Plant Nutr.*, 24(10), 1505–1519. <https://doi.org/10.1081/PLN-100106017>

Mohammadi, M., Cheng, Y., Aslam, M., Jakada, B.H., Wai, M., Ye, K., He, X., Luo, T., Ye, L., Dong, C.-M., Hu, B., Priyadarshani, S., Wang-Pruski, G., Qin, Y. (2021). ROS and oxidative response systems in plants under biotic and abiotic stresses: Revisiting the crucial role of phosphite triggered plants defense response. *Front. Microbiol.*, 12, 631318. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.631318>

Moya Elizondo, E. A., San Martín Gamboa, R. M., Apablaza Hidalgo, G. E. (2010). Evaluación de un extracto de saponinas de *Quillaja saponaria* para el control de oídos de trigo y zapallo [Evaluation of a *Quillaja saponaria* saponin extract for control of powdery mildew of wheat and squash]. *Agro Sur*, 38(2), 87–96. <https://doi.org/10.4206/agrosur.2010.v38n2-04>

Mukarram, M., Aftab, T., Zubair, M. (2023). Chitosan-induced biotic stress tolerance and crosstalk with signaling pathways in plants. *Front. Plant Sci.*, 14, 10394624. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.10394624>

Nehul, J. N., Samreen, Dutta, A., Manjunath, P., Belagalla, N., Kundan, Gore, V. B., Khokale, S., Pandey, S. K. (2024). Biostimulants and their role in enhancing plant resistance to pests and pathogens. *Uttar Pradesh J. Zool.*, 45(2), 4726–4737. <https://doi.org/10.56557/upjoz/2024/v45i244726>

Padamini, R., Bhumita, P., Hazarika, S., Ramesha, N. M., Gowda, G. R. V., Chaturvedi, K., Panigrahi, C. K., Karanwal, R. (2024). Exploring the role of chitosan: A natural solution for plant disease and insect management. *Arch. Curr. Res. Int.*, 24, Article 6769. <https://doi.org/10.9734/acri/2024/v24i6769>

Palacio-Márquez, A., Ramírez-Estrada, C. A., Sánchez, E., Barrios, D. L. O., Chávez, C., Sida-Arreola, J. P., Preciado-Rangel, P. (2022). Use of biostimulant compounds in agriculture: Chitosan as a sustainable option for plant development. *Notulae Sci. Biol.*, 14(1), 11124. <https://doi.org/10.15835/nsb14111124>

Pasković, I., Popović, L., Pongrac, P., Polić Pasković, M., Kos, T., Jovanov, P., Franić, M. (2024). Protein hydrolysates—Production, effects on plant metabolism, and

use in agriculture. *Horticulturae*, 10(10), 1041. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10101041>

Pereira, R. V., Filgueiras, C., Dória, J., Peñaflor, M., Willett, D. S. (2021). The effects of biostimulants on induced plant defense. *Front. Agron.*, 3, 630596. <https://doi.org/10.3389/fagro.2021.630596>

Prisa, D. (2020). Particle films: Chabazitic zeolites with added microorganisms in the protection and growth of tomato plants (*Lycopersicon esculentum* L.). *GSC Adv. Res. Rev.*, 4(2), 41–47. <https://doi.org/10.30574/gscarr.2020.4.2.0059>

Quezada, J. C., Bragazza, L. (2023). Foliar applications of a zeolite-based biostimulant affect soil enzyme activity and N uptake in maize and wheat under different levels of nitrogen fertilization. *J. Plant Nutr.*, 46(11), 2182–2194. <https://doi.org/10.1080/01904167.2023.2280124>

Reynolds, O., Padula, M., Zeng, R., Gurr, G. (2016). Silicon: Potential to promote direct and indirect effects on plant defence against arthropod pests in agriculture. *Front. Plant Sci.*, 7, Article 744. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00744>

Rojas-Pirela, M., Carillo, P., Lárez-Velásquez, C., Tortella, G. (2024). Chitosan in plant disease control: mechanisms and applications. *Vigyan Varta*, 5(9), 164–166. https://www.vigyanvarta.in/adminpanel/upload_doc/VV_0924_35.pdf

Rouphael, Y., Colla, G. (2018). Synergistic biostimulatory action: designing the next generation of plant biostimulants for sustainable agriculture. *Front. Plant Sci.*, 9, 1655. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01655>

Rouphael, Y., Colla, G. (2020). Editorial: Biostimulants in Agriculture. *Front. Plant Sci.*, 11.

Rouphael, Y., Kyriacou, M.C., Petropoulos, S.A., De Pascale, S., Colla, G. (2021). Biostimulation as a means for optimizing fruit phytochemical content and functional quality of tomato landraces of the San Marzano area. *Foods*, 10(5), 926. <https://doi.org/10.3390/foods10050926>

Saberi Riseh, R., Vatankhah, M., Hassanisaadi, M., Kennedy, J. F. (2023). Chitosan/silica: A hybrid formulation to mitigate phytopathogens. *Int. J. Biol. Macromol.*, 239, 124192.

Shukla, P. S., Mantin, E. G., Adil, M., Bajpai, S., Critchley, A. T., Prithiviraj, B. (2019). *Ascophyllum nodosum*-based biostimulants: Sustainable applications in agriculture for the stimulation of plant growth, stress tolerance, and disease management. *Front. Plant Sci.*, 10, 655. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00655>

Silva, O.C., Santos, H.A.A., Dalla Pria, M., May-De Mio, L.L. (2011). Potassium phosphite for control of downy mildew of soybean. *Crop Prot.*, 30, 598–604. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2011.02.015>

Silva, R. M., Canellas, L. P. (2022). Organic matter in the pest and plant disease control: a meta-analysis. *Chem. Biol. Technol. Agric.*, 9, Article 70. <https://doi.org/10.1186/s40538-022-00332-0>

Su, M., Li, W., Geng, Q., Huo, W., Huang, M., Chen, J., Wang, J., Wang, H. (2022). Potassium phosphite combined with *Bacillus amyloliquefaciens* F8 controls bacterial wilt in tomato. *Plant Dis.*, 106(8), 1933–1940. <https://doi.org/10.1094/PDIS-08-21-1601-RE>

Sun, W., Shahrajabian, M. H., Kuang, Y., Wang, N. (2024). Amino acids biostimulants and protein hydrolysates in agricultural sciences. *Plants*, 13(2), 210. <https://doi.org/10.3390/plants13020210>

Tejada, M., Benítez, C., Gómez, I., Parrado, J. (2011). Use of biostimulants on soil restoration: effects on soil biochemical properties and microbial community. *Appl. Soil Ecol.*, 49, 11–17. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2011.07.009>

Thao, H.T.B., Yamakawa, T. (2009). Phosphite (phosphorous acid): Fungicide, fertilizer or bio-stimulator? *Soil Sci. Plant Nutr.*, 55(2), 228–234. <https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2009.00365.x>

Tortella, G., Rubilar, O., Pieretti, J. C., Fincheira, P., de Melo Santana, B., Fernández-Baldo, M. A., Benavides-Mendoza, A., Seabra, A. B. (2023). Nanoparticles as a promising strategy to mitigate biotic stress in agriculture. *Antibiotics*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/antibiotics12020338>

Van Bockhaven, J., De Vleeschauwer, D., Höfte, M. (2013). Towards establishing broad-spectrum disease resistance in plants: Silicon leads the way. *J. Exp. Bot.*, 64(5), 1281–1293. <https://doi.org/10.1093/jxb/ers329>

Xu, L., Wang, X. (2024). A comprehensive review of phenolic compounds in horticultural plants. *Int. J. Mol. Sci.*, 26(12), 5767. <https://doi.org/10.3390/ijms26125767>

pregledni članak