

Biofortifikacija selenom

Sažetak

Selen (Se) je mikronutrijent koji se u prirodi pojavljuje u tragovima, ali u brojnim organskim i anorganskim oblicima. Primijenjen u odgovarajućim koncentracijama ima brojne pozitivne učinke na organizme, dok izloženost prekomjernim koncentracijama Se vodi ka toksičnosti i oksidacijskom stresu. Količina Se koja se dnevno unosi prehranom odraz je zastupljenosti elementa u tlu. Na svjetskoj razini prevladavajući je udio područja siromašnih Se, stoga se pojavljuje i velik broj oboljelih od malnutricije. Obećavajuće rješenje problema je biofortifikacija usjeva, ponajprije pšenice, jedne od najzastupljenijih žitarica u prehrani ljudi. Biofortifikacija usjeva poboljšava kvalitetu prehrambenih proizvoda uslijed povećanja koncentracije bioraspoloživog Se, a na područjima siromašnim Se najčešći izbor je agronomska biofortifikacija.

Ključne riječi: biofortifikacija, selen, antioksidacijski učinak, malnutricija, pšenica

Uvod

Iako rast ljudske populacije više nema eksponencijalan trend već teži linearnom, trenutno je čovječanstvo za manje od osam mjeseci iscrpilo Zemljine resurse za 2021. godinu. Suočeni smo s nedostatkom resursa, a time i hrane, stoga potreba za proizvodnjom zdravih namirnica postaje izraženija nego ikada. K tome, neuravnotežena prehrana danas je česta pojava, pri čemu je hrana koja se konzumira nutritivno siromašna, tj. ne zadovoljava preporučeni dnevni unos vitamina i minerala. Za normalnu funkciju ljudskog organizma potrebno je više od 22 različita mikroelementa (Graham i sur., 2007). Neki od njih potrebni su u većim količinama, dok su drugi poput željeza, bakra, cinka, joda i selena potrebni u tragovima jer su u većim količinama toksični. Nedostatak esencijalnih mikronutrijenata i vitamina rezultira pojavom malnutricije (pothranjenosti) (Lyons, 2018), poznate i pod pojmom „skrivena glad“, koja prema procjeni Svjetske zdravstvene organizacije pogađa više od polovice sveukupnog svjetskog stanovništva. U tom kontekstu, pojmovi kao što su *funkcionalna hrana*, *biofortifikacija* i *fortifikacija hrane* dobivaju na važnosti. Jedan od novijih pristupa rješavanju predstavljenog problema je biofortifikacija, odnosno strategija povećanja koncentracije bioraspoloživih esencijalnih mikronutrijenata u usjevima (Schiavon i sur., 2020), najčešće pšenici, riži, kukuruzu i ječmu. Biofortifikacija je kao pojam u znanstvenoj i stručnoj literaturi u Republici Hrvatskoj značajnije zastupljena posljednjih desetak godina, dok ga je u svijetu prvi puta opisao Bouis 1996. godine. Mikronutrijent koji je posljednjih godina u središtu istraživanja je selen, zbog izraženog antioksidacijskog potencijala, odnosno važne uloge u suzbijanju oštećenja stanica uzrokovanih slobodnim radikalima (Pilon-Smits i Quinn, 2010).

Stoga, cilj ovog rada je prodiskutirati o presudnoj ulozi selena kao mikronutrijenta, predstaviti najnovije spoznaje i strategije biofortifikacije usjeva selenom te status, izazove i značaj biofortifikacije u 21. stoljeću.

Selen – status u organizmima, oblici i bioraspoloživost

Selen (Se) je kemijski element koji se u prirodi pojavljuje u tragovima, ali u brojnim organ-

¹ Nikolina Sabo, mag. educ. biol. et chem., doc. dr. sc. Rosemary Vuković, Ana Vuković, mag. biol. izv. prof. dr. sc. Ivna Štolfa Čamagajevac, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Odjel za biologiju, Cara Hadrijana 8/A, 31000 Osijek, Hrvatska (nsabo@biologija.unios.hr)

skim i anorganskim oblicima. Široko je zastupljen na Zemlji, uključujući stijene, tlo, vodu, zrak te biljna i životinjska tkiva (Fordyce, 2005). Na globalnoj razini, sadržaj Se u tlu vrlo je promjenjiv pa postoji široki raspon koncentracija, od tala siromašnih Se ($<0,5 \text{ mg} \times \text{kg}^{-1}$) sve do iznimno bogatih, selenifernih tala ($1200 \text{ mg} \times \text{kg}^{-1}$) (Gupta i Gupta, 2017; Fairweather-Trait i sur., 2010). Ipak, prevladavajući je udio područja siromašnih Se, a takva je i Republika Hrvatska te većina balkanskih zemalja ($0,024 - 0,45 \text{ mg Se kg}^{-1}$) (Manojlović i Singh, 2012; Maksimović i sur., 1992). Nedostatak Se u tlu osobito je izražen u istočnim dijelovima Republike Hrvatske, budući da su izmjerene koncentracije značajno ispod granica deficita ($0,5 \text{ mg} \times \text{kg}^{-1}$) (Manojlović i sur., 2019; Manojlović i Singh, 2012; Antunović i sur., 2005; Popijač i Prpić-Majić, 2002).

Se je po kemijskim svojstvima sličan sumporu (S), što objašnjava analogiju u reaktivnosti s drugim elementima i spojevima, odnosno česte primjere interakcije Se i S te zamjene jednog elementa drugim u stvaranju spojeva (Pilon-Smits i Quinn, 2010; Fordyce, 2005). Se ima važnu ulogu u održavanju homeostaze, tj. normalnog fiziološkog stanja brojnih organizama pa je tako esencijalan za sisavce, biljke nižeg razvojnog stupnja i mnoge bakterije, dok se kod viših biljaka i kvasaca to svojstvo ne uočava, iako postoje indikacije za brojne pozitivne učinke (Rayman, 2012; Pilon-Smits i Quinn, 2010; Germ i Stibilj, 2007). Međutim, osim pozitivnih učinaka Se, izloženost prekomjernim koncentracijama može voditi k prooksidacijskim reakcijama, koje rezultiraju pojavama toksičnosti i oksidacijskog stresa (Pilon-Smits i Quinn, 2010). Praktično, to znači da ga autotrofni organizmi moraju apsorbirati iz tla, vode ili zraka, dok ga heterotrofi preuzimaju sekundarno putem lanca ishrane, ali da je potreban unos karakteriziran vrlo uskim rasponom.

Iako istraživanjima nije dokazana esencijalnost Se za više biljke, one ga ipak akumuliraju iz okoliša i asimiliraju kroz brojne metaboličke transformacije. Unos i akumulacija Se određeni su njegovim kemijskim oblikom i koncentracijom, svojstvima tla (npr. pH, salinitet i udio karbonata, vrsta i koncentracija iona) te sposobnošću biljke da apsorbira i metabolizira Se (Gupta i Gupta, 2017; Germ i Stibilj, 2007). Biljke konstantno asimiliraju Se koristeći transportne sustave kemijski srodnog S. Najbitniji oblici Se za biljke su selenati (SeO_4^{2-}) i seleniti (SeO_3^{2-}), odnosno anorganski oblici koji se efikasno apsorbiraju, te organski oblici poput selenometionina (SeMet) i selenocisteina (SeCys), čija je sposobnost zadržavanja u organizmu puno veća (Pilon-Smits i Quinn, 2010). Selenat je prevladavajući oblik bioraspoloživog Se u alkalnim tlima bogatim kisikom i brže se asimilira, dok je selenit zastupljeniji u uvjetima anoksije i povećane kiselosti i vlažnosti (Li i sur., 2008). Poveznica između anorganskog i organskog Se je primarno u fotoautotrofima. Se se ispire iz stijena, sedimenata i tala u vode, gdje je dostupan biljnim organizmima. U biljke se većinom unosi SeO_4^{2-} koji se reducira, ugrađuje u organske komponente i dalje prenosi kroz hranidbeni lanac te konačno razgrađuje i izlučuje iz organizma, čime se upotpunjuje biogeokemijski ciklus Se (Hartikainen, 2005). Podaci o kemijskim svojstvima anorganskog Se i metaboličkim transformacijama u organske oblike ključni su u procjeni biorasploživosti. Sadržaj Se, kako u biljnim tako i u životinjskim organizmima, može varirati s obzirom na okolišne uvjete, točnije kvantitetu i kvalitetu oblika Se kojima je organizam izložen.

Prema sposobnostima apsorpcije i akumulacije Se, provođenju metabolizma i stupnju tolerancije, biljke su podijeljene u 3 skupine: primarni akumulatori (hiperakumulatori), sekundarni akumulatori i neakumulatori (Gupta i Gupta, 2017; Pilon-Smits i Quinn, 2010). Sekundarni akumulatori metaboliziraju Se i S u podjednakoj mjeri, u rasponu $100 - 1000 \text{ mg Se kg}^{-1}$ suhe tvari. Neakumulatormim vrstama pripadaju gotovo sve žitarice i trave, koje mogu rasti na seleniferom tlu i akumulirati samo nekoliko miligrama Se, a glavnim uzrokom pojave toksičnosti smatra se supstitucija S sa Se (Terry i sur., 2000). Biljni neakumulatori kojima su u tlu dostupni selenati uglavnom akumuliraju selenate, dok su s dostupnim selenitom sklone akumuliranju organskih oblika Se, od kojih je dominantna komponenta u žitaricama SeMet (Wu i sur., 2015).

Zastupljen je u relativno visokim koncentracijama, a to je ujedno i oblik Se koji se najlakše asimilira i odlikuje antikancerogenim svojstvima (Fairweather-Tait i sur., 2010). Kada se neakumulatorna vrsta obogaćuje Se dolazi do brze sekvencije u vakuole mezofilnih stanica listova (Gupta i Gupta, 2017). Hiperakumulatori imaju velik omjer Se/S, rastu na tlima bogatim Se i akumuliraju ga u 100 puta većoj koncentraciji nego okolna vegetacija (>1000 mg Se kg^{-1} suhe tvari), a bez pojave toksičnosti. Zahvaljujući metaboličkim transformacijama u kojima nastaju brojni organski derivati, ove su biljke povećale toleranciju prema Se, tj. razvile su selenospecifičan metabolizam, kojim ostvaruju potencijal u procesima biofortifikacije i fitoremedijacije (Pilon-Smits i Quinn, 2010).

Biokemijska uloga i antioksidacijski potencijal selen

Se je neophodan za pravilno funkcioniranje ljudskog organizma jer štiti stanice od lipidne peroksidacije, regulira metabolizam hormona štitnjače, čuva zdravlje reproduktivnih organa, jača imunitet, ima antiviralna svojstva, može reducirati rizik nastanka raka i usporiti starenje (D'Amato i sur., 2018; Rayman, 2012). Fiziološke uloge Se u direktnoj su vezi s funkcijama selenoproteina, koji sadrže netipične aminokiseline SeMet i SeCys. U biljnim organizmima Se je djelotvoran pri nižim koncentracijama, osobito u uvjetima okolišnog stresa. Može povećati toleranciju biljaka na stres induciran UV svjetlošću, povišenim salinitetom, niskim temperaturama, teškim metalima, odgoditi senescenciju, regulirati vodni režim tijekom perioda suše te potaknuti sazrijevanje sjemena i rast biljke (Xue i sur., 2001; Pennan i sur., 2002; Kuznetsov i sur., 2003). Stres uzrokovan senescencijom može se reducirati Se-stimuliranom aktivnošću enzimskih i neenzimskih antioksidansa, kao što su komponente askorbat – glutationskog ciklusa (Pilon-Smits i Quinn, 2010; Germ i Stibilj, 2007). Izražen ekološki aspekt Se podrazumijeva toleranciju na sušu i visoku temperaturu, alelopatiju, a osim toga predstavlja i vrlo učinkovit obrambeni mehanizam protiv herbivora i patogena, stimulirajući sintezu fitokemikalija, primjerice glukozinolata (Malagoli i sur., 2015). Suplementacijom biljaka Se ostvarena je i veća otpornost na oksidacijski stres uzrokovan teškim metalima (Malik i sur., 2012; Cartes i sur., 2010; Pedrero i sur., 2008). Istraživanja na pšenici pokazuju da predtretman Se ima pozitivan učinak na rast klijanaca (Guerrero i sur., 2014) te da poboljšava antioksidacijski odgovor prilikom izloženosti različitim vrstama stresa. Primjerice, uočen je pozitivan učinak biofortifikacije sjemena pšenice Se na ukupnu masu klijanaca i enzime askorbat-glutationskog ciklusa u klijancima tretiranim kadmijem (Dragičević, 2015). Konačno, Zahirul Islam i sur. (2019) istraživanjem na klijancima pšenice ustanovili su da tretman sjemena natrijevom selenitom rezultira značajnim povećanjem klijavosti i koncentracija klorofila i karotenoida, kao i biološki aktivnih spojeva poput fenola, flavonoida, vitamina C, antocijanina i enzimskih antioksidansa.

Biofortifikacija usjeva selenom

U ljudskoj prehrani najzastupljeniji izvori Se u mnogim zemljama su biljke, a slijede ih meso te riba i morski plodovi (Hossain i sur., 2021; Fairweather-Tait i sur., 2010). Prema podacima Svjetske zdravstvene organizacije (2009), preporučeni dnevni unos Se za odrasle osobe iznosi 50 – 55 μg po danu. Deficijencija Se javlja se kada je unos Se putem hrane <40 μg po danu, a kronična toksičnost pri unosu > 400 μg po danu (Wu i sur., 2015). Rezultati dosadašnjih istraživanja o sadržaju Se u jestivim dijelovima usjeva na području Republike Hrvatske ukazuju na vrlo nisku koncentraciju Se u različitim vrstama žitarica te voća i povrća. Izrazito niska koncentracija Se izmjerena je u pšenici uzgojenoj na središnjem području Hrvatske, gdje je posljedno došlo i do pojave deficita Se u životinjama (Manojlović i Singh, 2012, Klapec i sur., 2004).

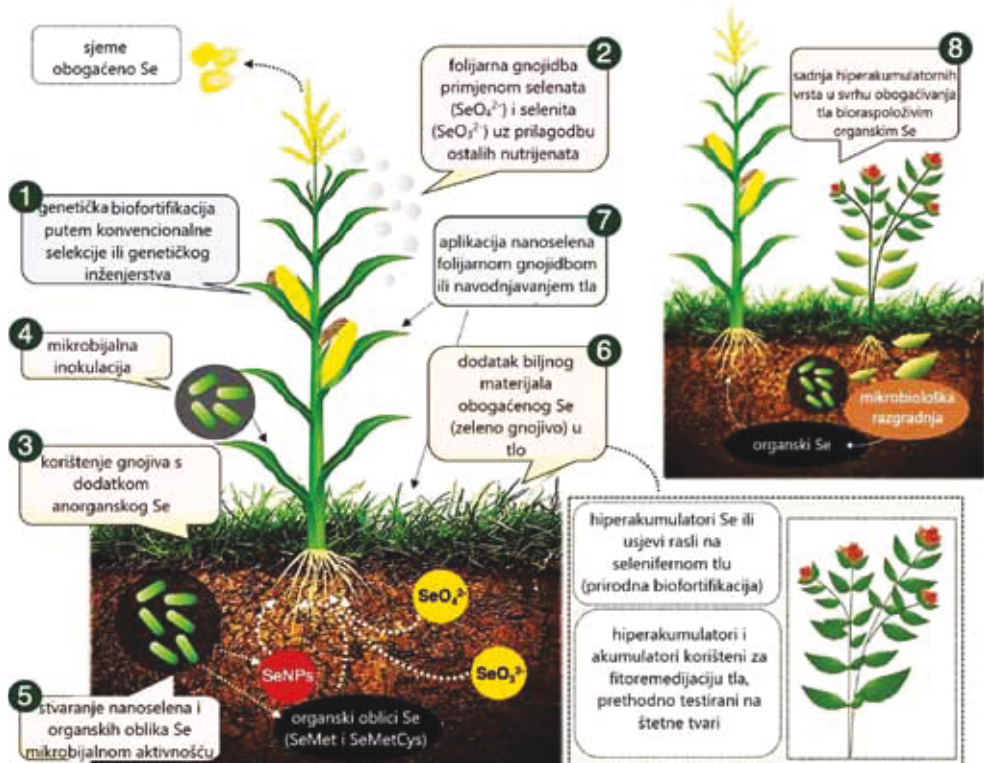
Budući da se nedostatak Se očituje pojavom brojnih bolesti, kako kod ljudi, tako i kod životinja i biljaka, ima velik potencijal u procesima biofortifikacije (Germ i Stibilj, 2007). Kako bi se

zadovoljile preporuke o dnevnom unosu Se i spriječile posljedice malnutricije, provedena su istraživanja na brojnim biljnim vrstama poput pšenice, riže, krumpira, kupusa, brokule, mrkve, leće i lucerne. Žitarice u prehrani su dobar izvor Se koji je većinom prisutan u obliku SeMet, a pšenica (*Triticum aestivum*) je vodeća kultura, tj. najučinkovitiji akumulator među uobičajenim usjevima žitarica (pšenica, riža, kukuruz, ječam i zob) (Broadley i sur., 2010). Pšenica se uzgaja u cijelom svijetu i sadrži biološki aktivne spojeve i antioksidanse. Kako mladi izdanci pšenice sadrže više biološki aktivnih spojeva i antioksidansa nego sjeme pšenice, mogu se koristiti za pripremu ekstrakata, tj. dodataka prehrani, nakon tretmana obogaćivanja Se, korištenjem dubinskog hidroponskog sustava protočne tehnike (Zahirul Islam i sur., 2019).

Strategije biofortifikacije selenom – konvencionalni i novi pristupi

Potpuno razumijevanje biogeokemijskog ciklusa Se, mehanizama unosa i asimilacije od strane biljaka neophodno je za uspješnu provedbu biofortifikacije usjeva Se. Biofortifikacija je, dakle, biotehnološka strategija obogaćivanja usjeva esencijalnim mikronutrijentima i drugim korisnim spojevima s ciljem poboljšanja nutritivne vrijednosti hrane, primjerice biljaka, životinja ili gljiva (Schiavon i sur., 2020). Zasniva se na uzgoju kultivara čiji merkantilni (jestivi) dio može povećati koncentraciju nutrijenata u ljudskom tijelu. Inovativna je i relativno laka za uspostavu, sigurna, pristupačna te dugoročno učinkovita u rješavanju problema malnutricije (Novoselec i sur., 2018). Uspješnost ishoda biofortifikacije ovisit će o lokalnim ekološkim i ekonomskim aspektima u proizvodnji hrane, ali i o prihvaćanju ovakvog načina proizvodnje hrane od strane poljoprivrednika i stanovništva koje se njome hrani. Kako bi se ostvarilo prihvaćanje, odabrana žitarica treba pripadati osnovnim namirnicama tog prostora, biti visokorodna i isplativa poljoprivrednicima, a većina ciljanih potrošača treba konzumirati biofortificiranu hranu u količinama koje će dovesti do vidljivog poboljšanja (Schiavon i sur., 2020). Biofortifikacijom se povećava dostupnost esencijalnih nutrijenata na samom početku proizvodnje hrane, za vrijeme sjetve usjeva, što je ekonomska prednost u odnosu na proizvodnju funkcionalne hrane (Zahirul Islam i sur., 2019). Tome u prilog ide činjenica da je ekstrakt ili čaj obogaćen Se znatno jeftiniji u odnosu na funkcionalnu hranu i suplemente (kapsule i tablete), a usto i prihvatljiviji izbor zbog bogatijeg nutritivnog sastava.

Do danas su razvijene brojne biofortifikacijske strategije, čiji je pregled prikazan na Slici 1. Neke od njih su prilično zahtjevne, a česti su i primjeri integracije u svrhu povećanja učinkovitosti. Svi postupci koji se koriste općenito dovode do povećanja koncentracije Se, ali rezultati se razlikuju ovisno o biljnoj vrsti, fazi rasta kada se tretman primjenjuje, izvoru Se, primijenjenoj dozi te vremenu primjene (D'Amato i sur., 2020). Ovisno o tome koji dio biljke se konzumira, odabire se prikladan oblik Se. Primjerice, novija istraživanja pokazuju da primjenom natrijevog selenita (Na_2SeO_3) dolazi do akumulacije selenita u korijenu, dok se primjenom natrijevog selenata (Na_2SeO_4) izdancima akumuliraju selenat i organski oblici Se. Iako su organski oblici Se primjereniji za ljudsku upotrebu, prilično su skupi pa se anorganski Se pokazao se kao jeftino i učinkovito rješenje, budući da biljke i tako u metaboličkim transformacijama anorganski Se prevode u organske oblike. Selenat i selenit razlikuju se, dakle, s obzirom na mobilnost i apsorpciju u biljke te metaboličkim putevima koje prolaze (Li i sur., 2008). U praksi se pokazalo da, ako su u tlu dostupni i selenat i selenit, u pšenicu se u puno većoj mjeri unosi selenat (Manojlović i sur., 2019; Sabo, 2016), no kada se primjenjuju u kombinaciji, selenit pokazuje dominaciju (Guerrero i sur., 2014). Stoga, u većini recentnih istraživanja tijekom uhodavanja metode pretežno se koristi Na_2SeO_4 u širem rasponu koncentracija (0, 25, 50, 75 i 100 μM Se).



Slika 1. Pregled strategija biofortifikacije kojima se ostvaruje obogaćivanje usjeva Se: 1) genetička biofortifikacija; agronomska biofortifikacija 2) folijarnom primjenom ili 3) gnojidbom tla te integrirana s mikroorganizama 4) inokuliranim u biljke ili 5) primijenjenima u tlu; 6) primjena zelenog gnojiva bogatog organskim oblicima Se, dobivenog od hiperakumulatora/akumulatora Se korištenih u fitoremedijaciji ili raslih na seleniferom tlu; 7) biofortifikacija nanoselenom (SeNPs) tehnikom folijarne gnojidbe ili navodnjavanjem tla; 8) sadnja hiperakumulatora Se u blizini usjeva ili između redova usjeva.

Figure 1. Overview of biofortification strategies that can be exploited to enrich crops in selenium: 1) genetic biofortification; agronomic biofortification with Se-fertilizers 2) via foliar application or 3) soil amendment and integrated with microorganisms 4) inoculated into plants or 5) applied to soil; 6) application of green manure enriched in organic Se, obtained from Se hyperaccumulators/accumulators used in phytoremediation or grown on seleniferous soil; 7) biofortification with nanoselenium (SeNPs) via foliar application or soil irrigation; 8) Co-cropping or intercropping using Se hyperaccumulators.

Izvor/Source: preuzeto i modificirano prema Schiavon i sur. (2020)./Source: adapted and modified from Schiavon *et al.* (2020).

Brojni su primjeri dobre prakse u svijetu, kojima se pokazalo da je od izuzetne važnosti odabrati odgovarajuću strategiju s obzirom na mikrouvjete okoline. Agronomska biofortifikacija uobičajeno se provodi na područjima siromašnim Se, a uključuje direktnu anorgansku gnojidbu tla (apsorpcija preko korijena), folijarnu primjenu anorganskih gnojiva (apsorpcija preko lista) ili organska gnojiva (Hossain i sur., 2021; Schiavon i sur., 2020), kao i predtretment

sjemena (Sarwar i sur., 2020). Osim u prehrani ljudi, biofortificirano sjeme koristi se kao hrana za životinje, a izmet životinja obogaćenih Se ponovno kao gnojivo za nove usjeve (Wu i sur., 2015). Istraživanja su pokazala da je folijarna gnojidba uspješnija i jeftinija u odnosu na gnojidbu tla te pokazuje brojne prednosti (Galić i sur., 2021). S obzirom na to da je sadržaj Se u pšenici panonske regije nedostatan te da pšenični proizvodi imaju visoku stopu potrošnje, i hrvatski su znanstvenici započeli s istraživanjima i implementacijom agronomске biofortifikacije (Manojlović i sur., 2019). Agronomska strategija može biti integrirana s iskorištavanjem različitih skupina mikroorganizama („*beneficial microorganisms (BMOs)*“) kojima se ili inokuliraju biljke ili se primjenjuju u tlu (Schiavon i sur., 2020). Različiti mikroorganizmi koji su u primjeni pokazuju višestruke blagotvorne učinke, kao što je povećan unos nutrijenata, rast i prinos, otpornost na abiotički stres te sprječavanje razvoja patogenih gljiva (Ye i sur., 2020). Nadalje, genetička biofortifikacija obuhvaća nekoliko strategija. Prva je konvencionalna, zasniva se na biljnoj genetici, a ostvaruje oplemenjivanjem, tj. selekcijom kultivara visokog kapaciteta unošenja i mobilnosti Se u jestive dijelove biljke te unošenja organskog Se, a kao takva ima najčešću upotrebu. Iduća razina je integracija oplemenjivanja s biofortifikacijom u smislu selekcije biofortificiranih kultivara, a podrazumijeva identifikaciju obećavajućih roditeljskih linija (Hossain i sur., 2021). Ova strategija je vrlo zahtjeva i složena te podrazumijeva dodatan angažman i ispitivanja. Konvencionalno oplemenjivanje pospješuje se i integracijom s modernim molekularnim pristupom, onda kada postoji značajna raznolikost u primarnoj, sekundarnoj i tercijarnoj genskoj zalih („*gene pool*“) divljih tipova usjeva (Hossain i sur., 2021). Do danas, u žitaricama je identificiran niz lokusa za kvantitativna svojstva („*quantitative trait loci (QTL)*“) povezanih s visokom sposobnošću akumulacije Se u sjemenu i izdancima. Odabir takvih kultivara može se koristiti u oplemenjivanju uz pomoć molekularnih markera („*marker-assisted breeding (MAB)*“) za prijenos takvih segmenta DNA na visokorodne sorte uzgajane na područjima siromašnim Se, no u tom slučaju u kombinaciji s agronomskom biofortifikacijom, tj. primjenom gnojiva (Schiavon i sur., 2020). Međutim, ako nema velike genetičke raznolikosti, pribjegava se genskim transformacijama i transgenima, odnosno genetičkom inženjerstvu (Hossain i sur., 2021). Postupak se zasniva na uvođenju stranog gena koji ima ključnu ulogu u metabolizmu Se ili S, odnosno njihovoj akumulaciji. Transgene biljke odlikuju se većom akumulacijom i tolerancijom Se, što omogućuje njihovo korištenje u fitoremedijaciji (Pilon-Smits i Quinn, 2010). Od preostalih strategija, valja spomenuti primjenu zelenog gnojiva bogatog organskim oblicima Se, koje se dobiva od hiperakumulatora ili sekundarnih akumulatora korištenih u fitoremedijaciji te hiperakumulatora raslih na selenifernom tlu (Schiavon i sur., 2020). Još jedan način korištenja Se-hiperakumulatora je sadnja u blizini usjeva ili među redovima usjeva, kako bi se tlo obogatilo biorasploživim oblicima organskog Se. Konačno, najnoviji pristupi biofortifikaciji uključuju korištenje selenovih nanočestica („*selenium nanoparticles (SeNPs)*“) te tzv. prirodnu biofortifikaciju, odnosno iskorištavanje selenifernih tala i navodnjavanje vodama bogatim Se. Međutim, ove su metode još u razvoju te, osim brojnih pozitivnih indikacija, ističu se i potencijalno negativni učinci na hranidbene lance i okoliš (Schiavon i sur., 2020).

Status i izazovi biofortifikacije u 21. stoljeću

Razvoj modernih molekularnih alata i analitičkih tehnologija doveo je do značajnog napretka u biofortifikaciji Se. Međutim, neke od strategija, poput genetičkog inženjerstva, daleko su od masovne implementacije i prihvaćanja kao što je to slučaj s agronomskom biofortifikacijom i konvencionalnim oplemenjivanjem. Neodlučnost u vezi genetičkog inženjerstva, odnosno postojanje ograničenja u mnogim zemljama, javlja se zbog etičkih pitanja oko korištenja transgena, tj. rizika od prijenosa transgena na srodne organizme, pojave otpornosti na antibiotike te ozbiljnijih oblika alergija (Sarwar i sur., 2020). Nadalje, značajni naponi ulažu se u integraciju biofortifikacije i fitoremedijacije, tj. korištenja biljaka koje mogu akumulirati velike količine Se, a važan su alat u borbi protiv zagađenja (Schiavon i sur., 2020). Veza između fitore-

medijacije i biofortifikacije može biti teže ostvariva ako u biljnim akumulatorima korištenim u fitoremedijaciji od kojih se pravi zeleno gnojivo dolazi do akumulacije teških metala (npr. Cd, Hg i As) i drugih otrova. U cilju je identificirati jestive biljne vrste koje mogu akumulirati veće i sigurne koncentracije Se, ali ne i druge otrovne spojeve. U novijim istraživanjima težište je prebačeno na usavršavanje sinteze nanoselena i utvrđivanje korelacije između veličine i oblika čestica i učinkovitosti biofortifikacije usjeva (Schiavon i sur., 2020). Jednako tako, potrebno je provesti dodatna istraživanja na suplementima za pospješivanje apsorcije Se u crijevima (npr. vitamina C, β -karotena, polipeptida bogatih cisteinom te određenih organskih kiselina i aminokiselina) radi povećanja bioraspodivnosti Se u biofortificiranim usjevima (Novoselec i sur., 2018).

Zaključak

Se je mikronutrijent koji biljkama pomaže u suočavanju sa stresnim uvjetima okoliša, poboljšava nutritivna svojstva te povećava prinos usjeva. U prehrani ljudi, osobito u našoj regiji, pšenica je glavna žitarica kojom se ostvaruje unos Se. Biofortifikacija usjeva Se obećavajuća je i učinkovita biotehnoška strategija, isplativija od proizvodnje funkcionalne hrane, kojom se može osigurati preporučeni dnevni unos Se ishranom i time prevenirati pojavu malnutricije. Istraživanja su pokazala da je jedna od najčešće korištenih i najuspješnijih strategija agronomsko biofortifikacija folijarnom primjenom anorganskih gnojiva na željenim usjevima u kombinaciji s oplemenjivanjem kultura, odnosno uzgojem hibrida povećane sposobnosti unosa mikroelemenata, a s ciljem obogaćivanja usjeva te povećanja prinosa i biomase na poljoprivrednim površinama siromašnim mikronutrijentima ili mikronutrijentima slabe biološke raspoloživosti.

Napomena

Dio sadržaja u radu izvod je iz završnog rada nastalog pod mentorstvom izv. prof. dr. sc. Ivne Štolfa Čamagajevac te doc. dr. sc. Rosemary Vuković (Odjel za biologiju, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku).

Literatura

- Antunović, Z., Steiner, Z., Šperanda, M., Domaćinović, M., Karavidović, P. (2005) Content of selenium and cobalt in soil, plants and animals in Eastern Slavonia. *Proceedings of XII International Conference Krmiva*, p. 204. Opatija, Croatia.
- Bouis, H. (1996) Enrichment of Food Staples Through Plant Breeding: A New Strategy for Fighting Micronutrient Malnutrition. *Nutrition Reviews*, 54(5), 131–137. DOI:10.1111/j.1753-4887.1996.tb03915.x
- Broadley, M.R., Alcock, J., Alford, J., Cartwright, P., Foot, L., Fairweather-Tait, S.J., Zhao, F.J. (2010) Selenium biofortification of high-yielding winter wheat (*Triticum aestivum* L.) by liquid or granular Se fertilisation. *Plant and Soil*, 332(1), 5–18. DOI:10.1007/s11104-009-0234-4.
- Cartes, P., Gianfreda, L., Mora, M.L. (2005) Uptake of Selenium and its antioxidant activity in ryegrass when applied as selenate and selenite forms. *Plant and Soil*, 276, 359–367.
- D'Amato, R., Regni, L., Falcinelli, B., Mattioli, S., Benincasa, P., Dal Bosco, A., Pacheco, P., Proietti, P., Troni, E., Santi, C. et al. (2020) Current Knowledge on Selenium Biofortification to Improve the Nutraceutical Profile of Food: A Comprehensive Review. *J. Agric. Food Chem.*, 68, 4075–4097. DOI:10.1021/acs.jafc.0c00172.
- Dragičević, G. (2015) *Utjecaj selena na antioksidacijski odgovor klijanaca pšenice tretiranih kadmijem*. Magistarski rad. Osijek: Sveučilište J. J. Strossmayera.
- Fairweather-Tait, S.J., Collings, R., Hurst, R. (2010) Selenium bioavailability: current knowledge and future research requirements. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 91, 1484–1491.
- Fordyce, F.M. (2005) Selenium deficiency and toxicity in the environment. U: Selinus, O., Alloway, B. J. (ur.) *Essentials of Medical Geology: impacts of the natural environment on public health*. Amsterdam: Elsevier Academic Press, str. 373–416.
- Galić, L., Vinković, T., Ravnjak, B., Lončarić, Z. (2021) Agronomic Biofortification of Significant Cereal Crops with Selenium—A Review. *Agronomy*, 11, 1015. DOI:https://doi.org/10.3390/agronomy11051015
- Germ M, Stibilj V. (2007) Selenium and plants. *Acta agriculturae Slovenica*, 89, 65–71.
- Graham, R. D., Welch, R. M., Saunders, D. A., Ortiz-Monasterio, I., Bouis, H. E., Bonierbale, M., Meisner, C. A. (2007) Nutritious subsistence food systems. *Advances in Agronomy*, 92, 1–74. DOI: https://doi.org/10.1016/S0065-2113(04)92001-9
- Guerrero, B., Llugany, M., Palacios, O., Valiente, M. (2014) Dual effects of different selenium species on wheat. *Plant Physiology and Biochemistry*, 83, 300–307. DOI:10.1016/j.plaphy.2014.08.009.
- Gupta, M., Gupta, S. (2017) An Overview of Selenium Uptake, Metabolism, and Toxicity in Plants. *Frontiers in Plant Science*, 7, 2074. DOI: 10.3389/fpls.2016.02074.
- Hartikainen, H. (2005) Biogeochemistry of selenium and its impact on food chain quality and human health. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 18(4), 309–318.
- Hossain, A., Skalicky, M., Brestic, M., Maitra, S., Sarkar, S., Ahmad, Z., Vemuri, H., Garai, S., Mondal, M., Bhatt, R., et al. (2021) Selenium Biofortification: Roles, Mechanisms, Responses and Prospects. *Molecules*, 26, 881. DOI: https://doi.

org/10.3390/molecules26040881

- Klapec, T., Mandić, M. L., Grgić, J., Primorac, L., Perl, A., Krstanović, V. (2004) Selenium in selected foods grown or purchased in eastern Croatia. *Food Chemistry*, 85(3), 445–452. DOI:10.1016/j.foodchem.2003.07.03
- Kuznetsov, V.V., Kholodova, V.P., Kuznetsov V.I.V., Yagodin, B.A. (2003) Selenium regulates the water status of plants exposed to drought. *Doklady Biological Sciences*, 390(1/6), 266–268. DOI:10.1023/a:1024426104894.
- Li, H.F., McGrath, S.P., Zhao, F.J. (2008) Selenium uptake, translocation and speciation in wheat supplied with selenate or selenite. *New Phytologist*, 178, 92–102.
- Lyons, G. (2018) Biofortification of cereals with foliar selenium and iodine could reduce hypothyroidism. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1–8. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00730>
- Maksimović, Z.J., Djujić, J.V., Ršumović, M. (1992) Selenium deficiency in Yugoslavia. *Biological Trace Element Research*, 33(1), 187–196.
- Malagoli, M., Schiavon, M., Pilon-Smits, E.A. (2015) Effects of selenium biofortification on crop nutritional quality. *Frontiers in plant science*, 6, 280. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00280>
- Malik, J. A., Goel, S., Kaur, N., Sharma, S., Singh, I., Nayyar, H. (2012) Selenium antagonises the toxic effects of arsenic on mungbean (*Phaseolus aureus* Roxb.) plants by restricting its uptake and enhancing the antioxidative and detoxification mechanisms. *Environmental and Experimental Botany*, 77, 242–248. DOI: [10.1016/j.envexpbot.2011.12.001](https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2011.12.001)
- Manojlović, M. S., Lončarić, Z., Cabilovski, R. R., Popović, B., Karalić, K., Ivezkić, V., Ademi, A., Singh, B. R. (2019) Biofortification of wheat cultivars with selenium. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science*, 1–10. DOI:10.1080/09064710.2019.1645204
- Manojlović, M., Singh, B.R. (2012) Trace elements in soils and food chains of the Balkan region. *Acta Agriculturae Scandinavica B. Soil & Plant Science*. 62(8):673–695. DOI: 10.1080/09064710.2012.690445.
- Novoselec, J., Klir, Z., Domaćinović, M., Lončarić, Z., Antunović, Z. (2018) Biofortification of feedstuffs with microelements in animal nutrition. *Poljoprivreda*, 24(1), 25–34. DOI:10.18047/poljo.24.1.4
- Pedrero, Z., Madrid, Y., Hartikainen, H., Camara, C. (2008) Protective effect of selenium in broccoli (*Brassica oleracea*) plants subjected to cadmium exposure. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56, 266–271. DOI: 10.1021/jf072266w.
- Pennanen, A., Xue, T., Hartikainen, H. (2002) Protective role of selenium in plant subjected to severe UV irradiation stress. *Journal of Applied Botany*, 76, 66–76.
- Pilon-Smits, E.A.H., Quinn, C.F. (2010) Selenium metabolism in plants. *Cell Biology of Metals and Nutrients* 17:225–241, DOI:10.1007/978-3-642-10613-2_10.
- Popijač, V., Prpić-Majić, D. (2002) Soil and wheat Grain Selenium content in the Vicinity of Koprivnica, Croatia. *Arhiv za higijenu rada i toksikologiju*, 53, 125–133.
- Rayman, M.P. (2012) Selenium and human health. *The Lancet*, 379(9822), 1256–1268, DOI:10.1016/s0140-6736(11)61452-9
- Sabo, N. (2016) *Uloga glutationa u odgovoru biljaka na različite oblike selena*. Magistarski rad. Osijek: Sveučilište J. J. Strossmayera.
- Sarwar, N., Akhtar, M., Kamran, M. A., Imran, M., Riaz, M. A., Kamran, K., Hussain, S. (2020) Selenium biofortification in food crops: key mechanisms and future perspectives. *Journal of Food Composition and Analysis*, 93, 103615, DOI:10.1016/j.jfca.2020.103615.
- Schiavon, M., Nardi, S., dalla Vecchia, F., Ertani, A. (2020) Selenium biofortification in the 21st century: status and challenges for healthy human nutrition. *Plant and Soil*. DOI:10.1007/s11104-020-04635-9
- Terry, N., Zayed, A.M., de Souza, M.P., Tarun, A.S. (2000) Selenium in higher plants. *Annual review of plant physiology and plant molecular biology*, 51, 401–32.
- World Health Organization. Global Health Risks: Mortality and Burden of Disease Attributable to Selected Major Risks. URL: http://www.who.int/healthinfo/global_burden_disease/GlobalHealthRisks_report_annex.pdf (18.8.2021.)
- Wu, Z., Bañuelos, G.S., Lin, Z.-Q., Liu, Y., Yuan, L., Yin, X., Li, M. (2015) Biofortification and phytoremediation of selenium in China. *Frontiers in Plant Science* 6:136. DOI: 10.3389/fpls.2015.00136
- Xue, T.L., Hartikainen, H., Piironen, V. (2001) Antioxidative and growth-promoting effects of selenium on senescing lettuce. *Plant Soil* 237: 55–61.
- Ye, Y., Qu, J., Pu, Y., Rao, S., Xu, F., Wu, C. (2020) Selenium Biofortification of Crop Food by Beneficial Microorganisms. *Journal of Fungi*, 6, 59, DOI: 10.3390/jof6020059
- Zahirul Islam, M., Park, B.-J., Kang, H.-M., Lee, Y.-T. (2019) Influence of selenium biofortification on the bioactive compounds and antioxidant activity of wheat microgreen extract. *Food Chemistry*, 125763. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.12576>.

Prispjelo/Received: 21.10.2021.

Prihvaćeno/Accepted: 12.11.2021.

Professional paper

Selenium biofortification

Abstract

Selenium (Se) is a micronutrient that occurs in trace amounts but numerous organic and inorganic forms. Applied in appropriate concentrations, it has numerous positive effects on the living organisms, while exposure to excessive concentrations of Se leads to toxicity and oxidative stress. The amount of Se that is ingested daily through food reflects the presence of the element in soil. Globally, the share of low Se areas is predominant, and consequently, many malnutrition patients also occur. A promising solution to the problem is the biofortification of crops, primarily wheat, one of the main cereals in human nutrition. Crop biofortification improves the quality of food products due to the increase in the concentration of bioavailable Se, and in low Se areas, the most common choice is agronomic biofortification.

Keywords: biofortification, selenium, antioxidant effect, malnutrition, wheat