

Efikasnost gnojidbe dušikom i kako je povećati

Prof. dr. sc. Vladimir Vukadinović

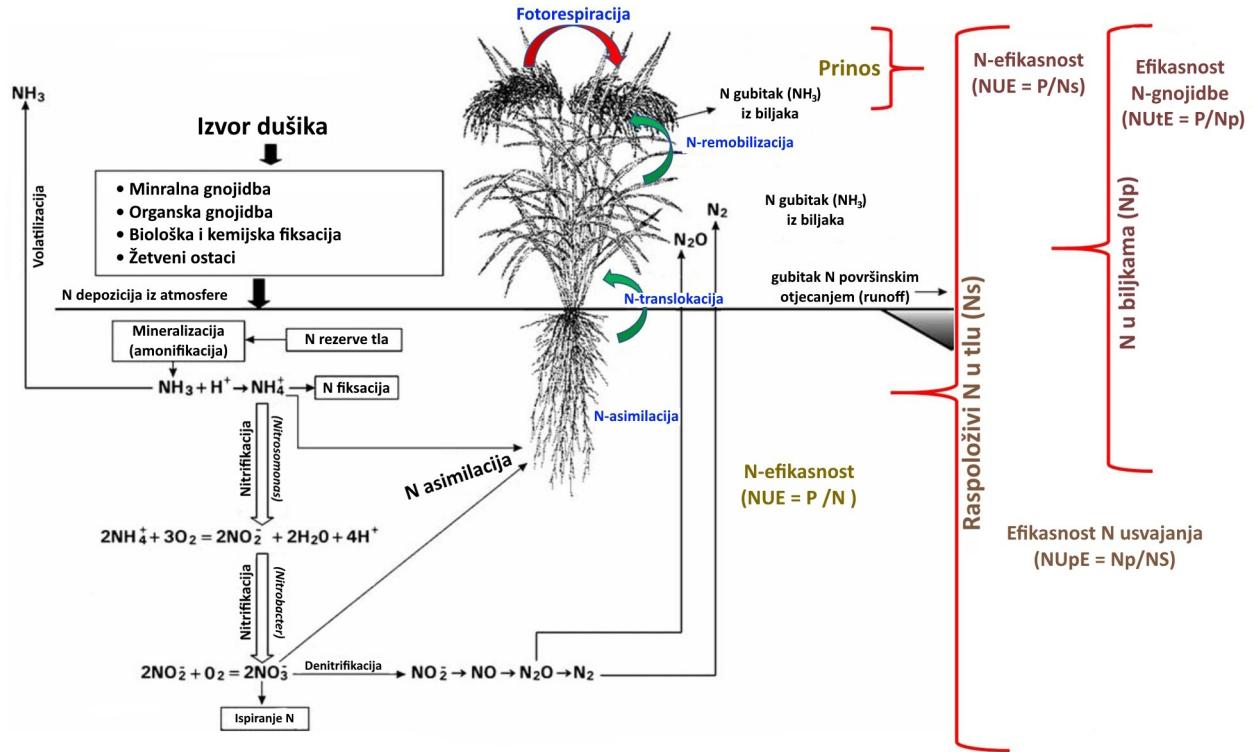
Gnojidba usjeva ima ključnu ulogu u postizanju visokih i kvalitetnih prinosa, odnosno dovoljno hrane za ljude i stoku te je stoga najveći izazov biljne proizvodnje unapređenje gnojidbe, odnosno povećanje usvajanje elemenata ishrane, njihov manji zaostatak ili qubitak iz tla. Biljke su fotoautotrofi koji svoju hranu (šećere) same sintetiziraju u procesu fotosinteze koristeći Sunčevu energiju, ugljični dioksid i vodu, a za sintezu složenih organskih spojeva zahtijevaju više elemenata ishrane. Obzirom na podrijetlo neophodni ili esencijalni elementi ishrane dijele se na organske (C, O i H) koji čine više od 90 % suhe biljne tvari i mineralne, a obzirom na potrebnu količinu na makro (C, O, H, N, P, K, S, Ca, Mg i Fe; vjerojatno još Na i Si) i mikroelemente (B, Mn, Zn, Cu, Mo, Cl i Ni; vjerojatno još Co i V). Dušik (N), fosfor (P) i sumpor (S) usvajaju se u mineralnoj formi, ali su i neizostavni konstituenti organske tvari, a N, P i K zbog velike potrebe obavezno se unose gnojidbom i smatraju se *glavnim elementima ishrane*. Takva podjela je opravdana obzirom na potrebu i utjecaj na povećanje prinosova, ali ne i u fiziološkom smislu jer svaki od njih omogućuje potpuni životni ciklus i ne može se zamijeniti nekim drugim, bez obzira što je koncentracija mikroelemenata u suhoj biljnoj tvari ispod 1 %. *Korisni (beneficijalni) elementi* (Co, Na, Si, Al, Se, V, Ti, La, Ce) pod optimalnim uvjetima rasta biljaka nemaju fiziološku ulogu, ali utjecaj im je to povoljniji što su uvjeti rasta lošiji. U nekim slučajevima korisni elementi mogu djelomično zamijeniti neke od neophodnih elemenata (npr. natrij može zamijeniti nespecifične funkcije kalija). Preostali elementi biljne tvari svrstavaju se u nekorisne ili pak toksične, zavisno od utjecaja na rast i razvitak biljaka. Dušik biljke zahtijevaju u velikim količinama i on u nedostatku najviše ograničava visinu prinosova, a njegova vrlo dinamična priroda, kao i sklonost qubitcima iz tla i onečišćenju okoliša predstavljaju jedinstveno i izazovno okruženje i potrebu za njegovom pravilnom primjenom. Zbog toga, genetska raznolikost biljaka i razvoj novih kultivara uz efikasnije korištenje apliciranih hraniva te bolja praksa uzgoja usjeva u kombinaciji s boljim genetskim odlikama najznačajniji su čimbenici za povećane primarne proizvodnje hrane.

Žitarice poput pšenice, riže i kukuruza osiguravaju 60 % svjetske prehrane, a ostatak predstavljaju ječam, krupnozrne mahunarka i korjenasti usjevi. Ovi usjevi su okosnica ljudske prehrane i to se vjerojatno neće u budućnosti promijeniti. Stoga, uzimajući u obzir ekonomski i ekološki izazov koji predstavlja smanjenje troškova i primjene N-gnojiva u proizvodnji hrane sve više se ulaže u genomska istraživanja za poboljšanje efikasnosti korištenja dušika (tzv. NUE). Fokusiranje na veću efikasnost gnojidbe rezultiralo je poboljšanjem prinosova većine usjeva tijekom posljednjih 50 godina, od čega je ~40 % posljedica bolje agrotehnologije, a ~60 % se odnosi na sjetvu novih kultivara (tzv. genetski dobitak) što ukazuje da je poboljšani NUE još uvijek moguć. Međutim, poboljšanje NUE putem genetskog inženjeringu još uvijek je u fazi provjere.

Danas je glavna metoda za održavanja plodnosti tla i povećanje prinosova primjena mineralnih gnojiva, osobito dušika (N). Dušik koji se koristi u mineralnim gnojivima lako i brzo se usvaja od strane biljaka, korijenom, ali i folijarno preko lista. Zbog jednostavnosti skladištenja i rukovanja N se lako može primijeniti kada je biljka najpotrebniji te su mineralna gnojiva trenutno glavni izvor hranjivih tvari, čak i kad su na raspolaganju organska (životinjska i druga gnojiva).

Premda su gnojiva opće prihvaćena kao biljna hrana jer poboljšavaju rast biljaka, proizvođači moraju osigurati biljkama potrebnu energiju Sunca, dovoljno vode, a tek onda dostatnu količinu neophodnih elemenata gnojidbom jer tlo nije dovoljan, niti pravovremeni izvor hranjivih tvari, osobito glavnih elemenata ishrane bilja N, P i K koji se moraju primijeniti gnojidbom. Dušik je makronutrijent koji najviše ograničava proizvodnju usjeva u većini svjetskih poljoprivrednih područja te je najveći izazov biljne proizvodnje unapređenje gnojidbe dušikom tako da se poveća njegova efikasnost, odnosno povećanje usvajanja, ali uz što manji gubitak iz zone korijena i minimalni zaostatak u tlu nakon žetve ili berbe. Naime, lako pokretljivi oblici dušika u tlu podliježu gubicima iz zone korijena kroz vegetaciju, ali i nakon žetve u procesima *ispiranja, volatizacije, denitrifikacije, kemijske, fizičke i biološke fiksacije*, što se odnosi jednako na organska i mineralna gnojiva

(Slika 1.). Budući da biljke nikad ne usvoje sva aplicirana hraniva, jedan dio se neminovno izgubi u okolišu i predstavlja potencijalnu opasnost za tlo, vodu i atmosferu. Brojna su suvremena tehnološka rješenja koja mogu u znatnoj mjeri spriječiti onečišćenje okoliša gnojivima, osobito lakopokretljivim oblicima dušika. Npr. postavljanje senzora hranjivih tvari u tlu, redovne kemijske analize i kontrola plodnosti tla, obavezno poštivanje gnojidbenih preporuka, uporaba bioloških, sporodjeljujućih, ali i pametnih gnojiva, agrotehnika primjerena kulturi i agroekološkim uvjetima i dr.



Slika 1. Transformacija dušika u tlu

Ukupna količina dušika u svim tlima na Zemlji procjenjuje se na 4×10^{14} t, ali je njegova mineralna količina (N-NO₃ i N-NH₄) u tlu koje biljke mogu odmah asimilirati vrlo promjenjiva jer ga lako i brzo usvajaju najprije mikroorganizmi, korovi, a tek zatim usjevi/nasadi. Naime nitratni ion (NO₃⁻) se pokreće vodom i lako ispirje iz tla, a difuzijom i premešta izvan zone korijena, ili se u kiselim uvjetima (pH ≤ 5) gubi (*denitrifikacija*) u plinovitom obliku (N₂ ili NO_x), a amonijski oblik (NH₄⁺) može ispariti, posebice iz suhog tla pri pH ≥ 7 (*volatizacija*). Također, dinamika je dušika vrlo ovisna o sustavu uzgoja unutar kojeg treba i potražiti mogućnosti za optimizaciju efikasnosti N-gnojidbe, jer je ciklus dušika najuže povezan s prometom organske tvari u tlu. Dakle, dušik je vrlo pokretan i reaktivni element (*reaktivni dušik* su sve vrste dušika osim N₂) koji prolazi kroz mnoge složene transformacije (Slika 1.), imobilizacije i mineralizacije, a lako se i brzo vraća u molekularno stanje u kojem je najstabilniji, te mu je bioraspoloživa količina vrlo promjenjiva, kako u vremenu, tako i po dubini profila. Stoga je podešavanje gnojidbe dušikom vrlo težak zadatak, jer pored složenog ciklusa transformacija i reaktivnih svojstava, dušik se primjenjuje u mnogim oblicima, kao mineralna i/ili organska gnojiva, žetveni ostaci, zelena gnojidba, malčevi i dr., a mikroorganizmi i biljke ga usvajaju u velikoj količini te je istovremeno podložan gubicima.

Efikasnost primjene dušika ili NUE (NUE = Nitrogen use efficiency) je koristan pokazatelj ekološke i ekonomske učinkovitosti proizvodnih sustava jer je pokazatelj ravnoteže između inputa i koristi primarnih proizvodnih sustava pa se njegovim korištenjem u praksi može optimizirati N-gnojidba, ponekad i znatno reducirati, bez pada prinosa i njegove kvalitete.

Efikasnost gnojidbe uobičajeno se iskazuje kao porast prinosa po jednom kg aktivne tvari i može biti agro-nomska, fiziološka ili ekonomska:

$$\begin{aligned}
 \text{Agronomski efikasnost} &= \frac{P_G - P_N}{G} \\
 \text{Fiziološki efikasnost} &= \frac{P_G - P_N}{E_{UF} - E_{UN}} \\
 \text{Ekonomski efikasnost} &= \frac{\text{Cijena}_G}{\text{Cijena } P_G}
 \end{aligned}$$

P_G = prinos kg·ha⁻¹ postignut na gnojenoj parceli; P_N = prinos postignut na negnojenoj parceli; G = aktivna tvar gnojiva u kg·ha⁻¹; E_{UF} = usvajanje hraniva u kg·ha⁻¹ na gnojenoj parceli i E_{UN} = usvajanje hraniva na negnojenoj parceli u kg·ha⁻¹.

Prema klasičnom konceptu gnojidbe dušikom tla siromašna organskom tvari ili ukupnim dušikom gnoje se toliko da se dobije profitabilan prirod, ili tek nešto više od te količine zbog porasta gubitaka, odnosno pada efikasnosti N-gnojidbe. Naime, primjena N-gnojidba rezultira tzv. *priming efektom jer dolazi do stimulacije usvajanje nativnog dušika tla što se označava kao ANI (added nitrogen interaction, ili dodana interakcija dušika)* i u sebi sadrži efekt NRE (*N-recovery efficiency, ili efekt N-oporavka*) koji se može dobro procijeniti samo tehnikom izotopa ¹⁵N. Tla bogata dušikom gnoje se nešto manjim dozama i to u više navrata jer se dušik može dodavati u slučaju potrebe i tijekom vegetacije. Dakako, potrebna količina dušika ovisi od vrste i kultivara te njihovog genetskog potencijala, kao i gustoći (broj biljaka · ha⁻¹), sklopu (prostornom rasporedu) biljaka po jedinici površine i mogućem prinosu. Biljke usvoje prosječno 50 % (ponekad do 70 %) od primijenjene količine mineralnog dušika gnojibom, a kod organske gnojidbe i nešto manje.

Efikasnost gnojidbe i povećanje bioraspoloživosti hraniva iz tla je vrlo složeno i višedimenzionalno svojstvo i najveći izazov za napredak suvremene ishrane bilja jer integrira napredak više znanstvenih disciplina, posebice ishrane bilja, genetike, fiziologije i ekofiziologije. To je posve razumljivo *jer su funkcije tla, kao supstrata biljne ishrane, ovisne od niza njegovih kemijskih, fizikalnih i bioloških svojstava*, npr. sadržaja humusa, strukture od koje ovisi zbijenost, dreniranost, prozračnost, oksidoreduktički procesi u tlu, brzina infiltracije i perkolacije vode i dr., zatim od klime, odnosno količine i rasporeda oborina i temperature, duljinom dana tijekom vegetacije i naravno agrotehnike (obrade, gnojidbe, zaštite, uređenja/popravki i dr.). Također, jedan od razloga sporosti u povećanju globalne efikasnosti gnojidbe zasigurno je to što se interesi razvijenih poljoprivreda ne podudaraju s potrebama za hranom u nerazvijenim i zemljama u razvoju za koje je prioritet osztarivanje većih priloga uz niže inpute i veću profitabilnost, a za bogate i razvijene zemlje prioritet je sve više smanjenje zagađenja i štete za okoliš.

Odavno je poznato da se prinos žitarica može izravno povezati s primjenom dušika pa se utvrđivanje efikasnosti gnojidbe dušikom (NUE) može činiti kao lako primjenjiv jednostavan pojam ili koncept. Zapravo, točno utvrditi efikasnost gnojidbe dušikom je vrlo teško zbog različitih izvora dušika u tlu (npr. anorganska i organska gnojiva, nativna organska tvar tla, biološka fiksacija, atmosfersko taloženje i dr.) i njihovim međusobnim interakcijama, različitoj raspoloživosti, transformacijama, mogućnosti akumulacije i zadržavanja u zoni korijena (pokretljivost u tlu i gubici na više načina). Na točnost proračuna NUE utječu i edafski uvjeti, genetska specifičnost usvajanja i potrebe biljaka za dušikom (maksimum potrebe tijekom vegetacije, količina, kemijski oblik i dr.), zatim način primjene (vrijeme, način i oblik N) te konačno agroekološki uvjeti te vremenske i klimatske promjene. Pri tumačenju NUE rezultata potrebno je dobro razumijevanje kontrolnih čimbenika, prostornih i vremenskih granica i točno utvrđena krajnja upotreba. Naime, biljke reguliraju svoj odgovor na dušik u tlu višestrukim strategijama (npr. oblikovanje, regutiranje i manipuliranje mikrobnim zajednicama u rizosferi) te tako povećavaju svoju konkurentnost prema bakterijama u natjecanju za raspoloživi dušik.

Biljke su sposobne reagirati na status hranjivih tvari u tlu modifikacijama svoje arhitekture i morfologije korienskog sustava, čime zahvaćaju veći volumen tla i utječu na mineralizaciju dušika u tlu. Zatim, njihova simbioza s arbuskularno mikoriznim gljivama (AMF) povećava mogućnost usvajanja dušika i utječe na rezultat NUE. Premda postoji sumnja da AMF može igrati značajnu ulogu u poboljšanju NUE u poljoprivrednim tlima visoke plodnosti, primjena bioinokulanata u poljoprivredi, posebno u uzgoju soje i drugih mahunarki sve je raširenija. Unatoč proturječnim izvješćima o točnim mehanizmima ili stupnju učinka, AMF može utjecati i na kruženje dušika u tlu i na unos dušika s potencijalnim učincima na pogrešne izračune NUE.

Globalna primjena dušika za uzgoj žitarica približno iznosi $94 \cdot 10^6$ tona N-gnojiva godišnje, ali usjevi pro-sječno iskoriste manje od 40 %, dok se preostali dio rasprši u okolišu izazivajući ozbiljne ekološke probleme kao što su onečišćenje vode i emisija stakleničkih plinova. Ukupno $44 \cdot 10^6$ tona N otpada na biološku fiksaciju mahunarkama i drugim biljkama, pri čemu 99 milijuna tona otpada na druge antropogene izvore kao što su uništavanje staništa i fosilna goriva, dok bakterije u tlu, alge i munje doprinose s $154 \cdot 10^6$ tona N na go-dinu. Među usjevima žitarica, ječam ima najveći povrat dušika (63 %), a slijede ga riža (30-50 %), pšenica (35-45 %) i kukuruz (37 %). Budući da je dušik najvažniji *limitirajući faktor povećanja visine prinosa (faktor minimuma)*, u svijetu se primjeni približno 100 Tg N · god⁻¹ reaktivnog dušika u obliku gnojiva, a njegova efikasnost se mijenja, ne samo s vrstom usjeva, već također ovisi o uvjetima okoliša, vrsti korištenih gnojiva, strategiji upravljanja i interakcijama genotipa i okoliša. Prema podacima IFA (*International Fertilizer Association*) globalna primjena N-gnojiva porasla je s $12 \text{ Tg} \cdot \text{god}^{-1}$ u 1961. na $108 \text{ Tg} \cdot \text{god}^{-1}$ u 2019., a očekuje se da se potrošnja svih gnojiva udvostruči do 2050. godine. Pošto su visoke doze *mineralnih (sintetskih) gnojiva*, osobito dušika, uzrok sve bržoj degradaciji kvalitete tla i voda uz sve brže klimatske promjene, *povećanje efikasnosti korištenja dušika (NUE)* mora biti prioritet u svim sustavima uzgoja. Zbog toga je neophodno razumjeti mehanizam NUE kako bi se suočili s problemima koje izaziva primjena dušika u poljima.

Korištenje dušika u biljnoj proizvodnji čini nekoliko faza koje se mogu podijeliti na:

- 1) fazu primarnog unosa dušika, nakon čega slijedi
- 2) redukcija dušika u tlu do biljci raspoloživih oblika,
- 3) njegova asimilacija u aminokiseline,
- 4) translokacija i remobilizacija dušika u reproduktivna tkiva (Slika 1.)

NUE indeksi se izračunavaju u vrijeme žetve, tj. na kraju ciklusa usjeva, a njihova analiza daje detalje o odgovoru biljaka na različite uvjete dostupnosti dušika, a primjenjuje se više raznih formula, njihovih inačica i definicija:

- a) temeljenih na gnojivima (izražavaju količinu primijenjenog gnojiva u odnosu na različite parametre biljke, kao što su nadzemna biomasa, prinos ili sadržaj dušika),
- b) temeljenih na biljkama (usmjereni su na raspodjelu N u biljnim tkivima prema prinosu usjeva ili prinosu N dajući informacije koje ne daju NUE indeksi temeljeni na gnojivima i korisni su za identifikaciju genotipova biljaka s poboljšanom sposobnošću alokacije dušika prema ekonomskom dijelu biljaka),
- c) temeljenih na tlu (ne uzimaju u obzir samo unos N iz gnojiva, nego i doprinos N mineralizacije organske tvari, rezidualni N, dušik iz procesa biološke fiksacije i dr. te pomažu u interpretaciji dinamike N i upravljanja tlom, a rezultati su točniji kad se uključe negnojene kontrolne parcele),
- d) temeljeni na primjeni izotopa (koriste izotop ^{15}N za praćenje protoka dušika iz tla, gnojiva ili biološki vezanog dušika, a daju kvantitativne podatke o veličinama rezervi i kretanju dušika u sistemu tlo - voda - biljka - atmosfera),
- e) ekološki utemeljeni (opisuje masu suhe tvari koja se može proizvesti po jedinici preuzetog dušika u uvjetima ravnotežnog stanja koje se ne događa uvijek u poljoprivrednim sustavima) i
- f) sistemski utemeljeni (omogućuju usporedbe koje se razlikuju u svojstvima tla, sekvencama usjeva, klime itd., čime se bilježe razlike u biofizičkim kontrolama dinamike dušika te se koristite za identifikaciju sustava koji vežu dušik u tlu ili ga otpuštaju u okoliš).

Brojna istraživanja pokazuju da bi se agronomска iskoristivost dušika mogla povećati sve do 80 %, uz očekivanje da će se povećanje u naredna dva desetljeća biti do 70 %. Specifično upravljanje dušikom primjereno agroekološkim, edafskim, agrotehničkim i ekonomskim uvjetima dobar je način za poboljšanje NUE (za 5 - 10 %) i minimiziranje gubitaka dušika u okoliš. Naime, često postoji jaz između onoga što se prakticira i rezultata/zaključaka znanstvenih studija, odnosno poljoprivrednici ne slijede bolje strategije primjene N-gnojiva pa se NUE nije značajno povećao tijekom posljednjih nekoliko desetljeća, osobito u zemljama u razvoju. Npr., sjetva suvremenih kultivara koji imaju viši NUE, zatim primjena dušika u više navrata i to u

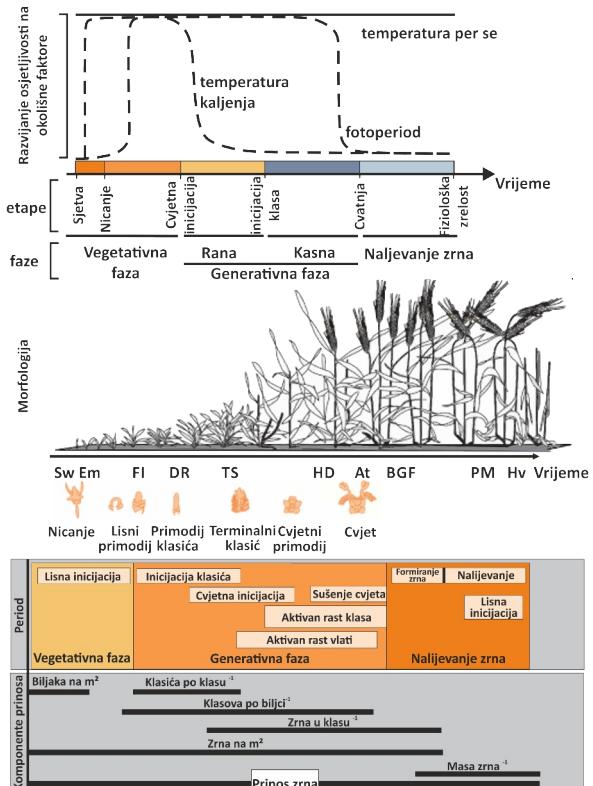
manjim dozama kad god je to moguće i/ili kad ne utječe na poskupljenje proizvodnje (za što je potrebno poznavanje potrebe biljaka tijekom vegetacije, a ne gledanje u kalendar već u rast, razvitak i kondiciju biljaka), redovna analiza tla i/ili biljne tvari, N-gnojidbu, zatim prihranu ne treba obavljati kad je to agrotehnički zgodno i lako (npr. po snijegu, na visokim temperaturama po suhom ili smrznutom tlu, po površini i sl.).

Premda je inkorporacija gnojiva u trake (tzv. lokalizirana gnojidba) općenito najučinkovitija metoda, ona nije uvijek najjeftiniji niti najpogodniji način za primjenu. Unos gnojiva u tlo po cijeloj površini agronomski i ekonomski je mnogo efikasniji i ekološki prihvatljiviji način gnojidbe. Naime, primjena gnojiva „pod brazdu“ osigurava ravnomjernu raspodjelu hranjivih tvari u rizosferi omogućavajući korijenu da rastući dođe u kontakt s gnojivom, a korijen raste tijekom cijele vegetacije u potrazi za vodom i hranivima za razliku od nadzemnog dijela biljke čiji je rast ograničen. Također, potrebno je uzeti u obzir vremensku prognozu, pratiti etape organogeneze (razvojni stadiji), intenzitet metabolizma (najlakše preko brzine porasta) i kondiciju biljaka, kad god je moguće izbjegavati površinsku primjenu dušika po smrznutom ili hladnom i vlažnom tlu (omaške; zbog mogućih gubitaka erozijom sapiranjem i volatilizacijom) i dr.

Jedan od razloga niske efikasnosti gnojidbe je nedovoljna i neadekvatna, često i pogrešna gnojidba zbog nedostatka znanja, ali i neophodnih informacija. Također, promjena prakse bacanja ili uništavanja suvišne, jeftine ili neiskorištene hrane zasigurno bi utjecala na manji gubitak hraniva i veću efikasnost gnojidbe. Osim toga, veoma često se pogrešno smatra kako su agronomski, fiziološka i ekonomski efikasnost gnojidbe jedini i najvažniji pokazatelj uspješnosti gnojidbe, ali gnojidba je najprije u funkciji veće produktivnosti biljno-proizvodnog sustava, a efikasnost hranića iz gnojiva samo je jedan aspekt produktivnosti tla.

Povećanje efikasnosti, osobito N-prihrane, zahtijeva identificiranje *fenofaza* u kojima biljke osjetljivo reagiraju na primjenu gnojiva, zatim treba izabrati kultivare koji zahtijevaju rani unos dušika radi brzog razvoja korijenskog sustava te pokazuju vegetativnu snagu u ranim fazama rasta i razvitka, kao i prilagoditi N-gnojidbu otežanim vremenskim, klimatskim, edafskim i biotskim okolnostima. Rani porast je veoma važan jer u kasnijim etapama razvoja (*organizeze*), osobito u sazrijevanju i tvorbi sjemena ili plodova, biljke imaju veću sposobnost usvajanja hranića, *fotosinteze*, *remobilizacije* i *reutilizacije* dušika i s njim povezanog ugljika. Naime, u nedostatku hranjivih elemenata u etapi formiranju novih organa, posebno fotosintetskog aparata (lišća) i reproduktivskih organa (cvjet, klas i dr.), biljke su sposobne brzo i efikasno premještati tvari iz starijeg lišća u mlađe i aktivnije. Budući da je većina elemenata ugrađena u organsku tvar (tzv. *konstitucijski elementi*), prvo dolazi do hidrolitičkih procesa (razgradnje) i oslobođanja elemenata (tzv. *remobilizacija*), zatim njihove *translokacije* (premještanja), zapravo *retranslokacije* i ponovne ugradnje u nove spojeve i mlađe organe, odnosno na mjesta potrebe.

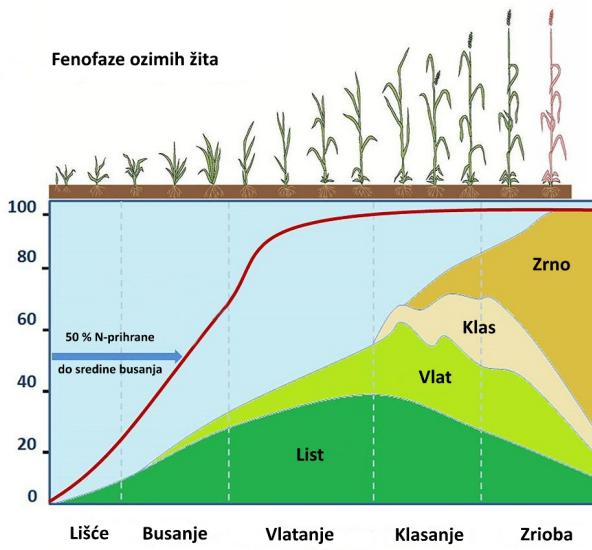
Zitarice prolaze kroz više etapa organogeneze (stadiji razvoja) koje se manifestiraju fenofazama (Slika 2.) u kojima znatno varira potreba za dušikom, a to značajno ovisi od sorte (*genotipska specifičnost*), ali i od uzgoja (datuma sjetve, gustoće usjeva, aklimatizacije na hladnoću (*kaljenje*), snježni pokrivač, ishranjenost, klimatske i edafske faktore. Razumijevanje potrebe ozimih žita, da-kako i drugih biljaka, važno je za pravovremenu primjenu potrebne količine dušika. Male N-doze važne su u ranim fenofazama za vitalnost mlađih biljaka, a ~50 % dušika usvoji se do sredine busanja te više od 70 % akumulira se do početka faze punjenja zrna (Slika 3.). Pšenica do proljetnog kretanja vegetacije akumulira uglavnom tzv. plastične tvari, odnosno takve rezerve hranića koje se lako transformiraju u građevne jedini-



Slika 2. Organogeneza i fenofaze ozime pšenice

ce organske tvari (prije svega nitrate pri $\geq 0^{\circ}\text{C}$). Kod temperatura bliskih indikativnoj temperaturi (za pšenicu to je 0°C , uljanu repicu $\geq 4^{\circ}\text{C}$, kukuruz $\geq 10^{\circ}\text{C}$ itd.) usvajanje hraniva je najvećim dijelom iz vodene faze tla, pa kako je na koncentraciju fosfatnih i kalijevih iona u tlu teško utjecati zbog kemijske (fosfor) i fizičke sorpcije (kalij) ta hraniva treba zaorati (ili deponirati) prije sjetve do dubine najvećeg rasprostiranja korijenskog sustava. Suprotno fosforu i kaliju, dušik u tlu ne može stvarati trajne rezerve.

Ključni izazovi u povećanju efikasnosti gnojidbe uključuju i odgovarajući *fenotip* (izgled, oblik, arhitektura) korijena, snažnu interakciju *genotip x okoliš*, svojstva tla, upravljanje vodom i hranjivim tvarima te adekvat-



Slika 3. Potreba u dušiku ozime pšenice

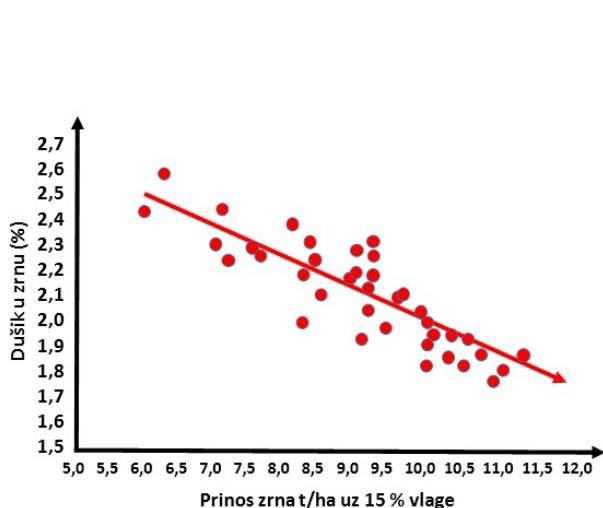
Budući da efikasnost primjene dušika (NUE) za žita regulira nekoliko faktora, *ne postoji pouzdana korelacija između primijenjenog dušika i prinosa usjeva*, ali je veoma važno poboljšanje strategija dijagnosticiranje statusa dušika pa je to trenutno u fokusu istraživanja povećanja učinka gnojidbe dušikom. Zbog toga se intenzivno istražuje brza i pouzdana procjena N-NO₃ i N-NH₄ u tlu, mjerjenje klorofila, refleksija svjetlosti i boje usjeva, NDVI, RVI i drugi indeksi, daljinska istraživanja (sateliti, dronovi, senzorska detekcija u realnom vremenu i sl.) itd.

Prinos i sadržaj bjelančevina u zrnu najbolje reprezentiraju efikasnost korištenja dušika (NUE), ali kako su ta dva najvažnija indikatora u negativnoj vezi, najčešće se pokušava povećati NUE tako da se ne ugrozi visina prinosa, a da kvaliteta zrna bude zadovoljavajuća (Slike 4. i 5.), što zapravo ni malo nije lako. Naime, fiziološki aspekt istraživanja mogućnosti povećanja efikasnosti dušika je veoma složen jer je više metaboličkih procesa povezano s usvajanjem N. Efikasnost korištenja dušika čine dvije ili tri komponente, a to su efikasnost njegovog usvajanja (*NUpE*), efikasnost iskorištenja usvojenog dušika (*NUtE*) i kao treća komponenta sve češće se spominje i *NHI* (*Nitrogen Harvest Index*) te se moraju izračunati sve komponente NUE. Efikasnost usvajanja N (*NUpE*) je omjer ukupnog N u suhoj tvari nadzemnog dijela biljaka nakon žetve i raspoloživog N u tlu, a efikasnost usvojenog N (*NUtE*) je omjer dušika u merkantilnom dijelu suhe tvari (prinos) prema N u suhoj tvari nadzemne biomase u žetvi. Nakon što je biljka usvojila dušik i ugradila ga u proteine, posljednji (treći) dio jednadžbe učinkovitosti korištenja dušika je *remobilizacija* ovog proteinskog dušika i premještanje u zrno. U pšenici 60 - 95 % dušika u zrnu potječe od ranije usvojenog dušika (prije cvatnje) koji se nalazi u vegetativnom biljnog materijalu (lišće, stabljika, korijenje), dok je u kukuruzu 45 - 65 % N u zrnu je usvojeno do svilanja.

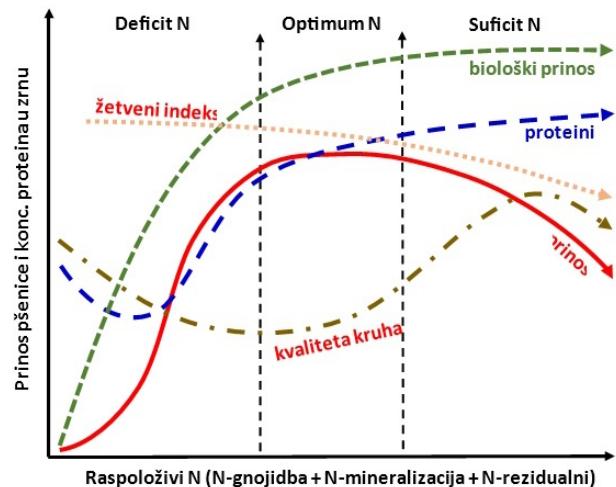
Korijenov sustav biljaka i tlo koje on prožima čine jedinstven sustav nazvan rizosfera s jakim uzajamnim utjecajem. Usvajanjem iz neposredne blizine korijena koncentracija hraniva brzo opada, a dotok novih količina hraniva ovisi o difuziji iona u tlu, kretanju hraniva otopljenih u vodi, brzini rasta korijena koji tako uspijeva zahvatiti sve veći volumen tla i njegove sposobnosti usvajanja pojedinih hranjivih tvari, odnosno aktivne površine korijena te njegovog kapaciteta zamjene iona. Zbog toga su svojstva korijenovog sistema veoma važ-

nu vremensku i prostornu dinamiku raspoloživih oblika hraniva u tlu. Krucijalno pitanje je „može li se poboljšati usvajanje hranjivih tvari uz smanjenu primjenu N-gnojiva uz postizanje željenog prinosa, njegove kvalitete i očuvanje zdravlja tla“. Naime, najnoviji tipovi nanognojiva mogu kontrolirano (polako, brzo ili po potrebi) oslobođati hranjive tvari ovisno o vanjskim faktorima, npr. pod utjecajem promjene pH tla, vlage, korijenskih izlučevina, temperature itd. i tako ubrzati rast biljaka više od konvencionalnih gnojivima. Stoga se očekuje da se nova pametna nanognojiva mogu koristiti efikasnije za ishranu bilja preko korijena ili lista (folijarno). Nanotehnologija je polje koje se veoma brzo razvija i ima potencijal revolucionirati prehrambene sustave, ali objektivno, ona zahtijeva puno znanja, složenu visoku tehnologiju (tzv. nanoinžinjering) u proizvodnji i primjeni.

na za usvajanje hraniva tijekom vegetacije. Aktivnu površinu korijena čini zona s vrlo finim korijenskim dlačicama koje lako mogu doći u neposredan dodir s koloidnim česticama tla. Npr., leguminoze po 1 aru ($1 \text{ ar} = 100 \text{ m}^2$) imaju aktivnu površinu korijena od 5.000 m^2 , a pšenica 10.000 m^2 , dok površina svih čestica tla u oraničnom sloju 1 ara iznosi $\sim 3 \times 10^8 \text{ m}^2$. Stoga je razumljivo da *korijen mora u "potragu" za hranivima* i to postiže isključivo rastom. Osim veličine i aktivne površine za korijen su veoma važna i njegova morfološka svojstva (npr. brzina rasta, dubina prodiranja, gustoća i kapacitet zamjene iona) pa mogućnost usvajanja hraniva u dodiru s adsorpcijskim kompleksom tla ovisi o biljoj vrsti, kultivaru, odnosno hibridu. Leguminoze općenito imaju visok kapacitet zamjene ($40 - 60 \text{ cmol}^{(+)} \text{ kg}^{-1}$ suhe tvari korijena), a pšenica, odnosno biljke iz porodice trava, upola niži. Zbog toga leguminoze relativno više usvajaju dvovalentne katione, a trave jednovalentne.



Slika 4. [Pristojnost pšenice 47 sorti \(Rothamsted, 2004.-2012.\)](#)



Slika 5. [Utjecaj rastuće N-doze na prinos pšenice, proteine i kvalitetu kruha](#)

Fotosinteza je temeljni fiziološki proces koji omogućuje cjelokupan život na Zemlji, a na nju snažno utječe arhitektura nadzemnog dijela budući da je fotosinteza organizirana kao vrlo kompleksan set fizikalno-kemijskih reakcija podržan složenom organskom strukturu unutar kloroplasta. Otuda je fotosinteza, energetski promatrano, relativno nisko efikasan proces. Budući da na intenzitet fotosinteze utječe velik broj biotskih i abiotiskih čimbenika, kao što su: koncentracija klorofila, lisna površina i pokrovnost (*LAI = Leaf Area Index*), njena trajnost (*LAD = Leaf Area Duration*), učinkovitost korištenja zračenja (*RUE = Radiation use Efficiency*), zdravstveno stanje asimilacijske površine, prostorna orientacija lišća, aktivnost enzima fotosinteze i disanja, svojstva provodnog tkiva, intenzitet osvijetljenosti, temperatura, raspoloživost vode i biogenih elemenata, za očekivati je da postoji niz ograničenja uz veliku varijabilnost tijekom vegetacije. Za sintezu molekule šećera potrebno je 30-ak različitih proteina i vrlo komplikiran sustav biomembrana pa je teorijski koeficijent iskorištenja usvojene svjetlosne energije relativno visok (~22,4 %), ali se u našim uvjetima biljne proizvodnje prosječno iskoristi tek 0,5 - 2,0 % godišnje pa tu leže velike mogućnosti poboljšanja primarne produkcije.

Za napredak u povećanju efikasnosti usvajanja dušika veoma su važna genetska istraživanja. Naime, do sada je poznato da na usvajanje N, njegovu akumulaciju i remobilizaciju utječu višestruki skupovi gena koji su podijeljeni u šest kategorija uključujući prijenosnike, signalne molekule, biosintezu aminokiselina i asimilaciju nitratu i na tom planu učinjen je veliki napredak kartiranjem QTL-a (QTL = kvantitativna svojstva lokusa), gena i mehanizma njihovog djelovanja pa bi identifikacija novih QTL/gena/transportera dušika i signalnih molekula mogla bi biti od pomoći za smanjenje potrošnje gnojiva u bliskoj budućnosti.

Osijek, 19. ožujka 2023. god.