

Valentina Španić

SITNO, ALI MOĆNO ZRNO PŠENICE

Izdavač

Poljoprivredni institut Osijek

Urednik

Dr. sc. Marko Josipović

Recenzenti

Doc. dr. sc. Vesna Peršić, Odjel za biologiju, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

Prof. dr. sc. Andrijana Rebekić, Fakultet agrobiotehničkih znanosti Osijek, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

Prof. dr. sc. Hrvoje Šarčević, Agronomski fakultet, Sveučilište u Zagrebu

Lektura

Prof. hrv. jez. i knjiž. Maja Celing Celić

Grafička priprema i tisak

Grafika d.o.o., Osijek

ISBN 978-953-7843-13-7 (tisak)

ISBN 978-953-7843-14-4 (e-knjiga)

CIP zapis je dostupan u računalnom katalogu Gradske i sveučilišne knjižice Osijek pod brojem 150906028.

Valentina Španić

SITNO, ALI MOĆNO ZRNO PŠENICE



Osijek, 2023.

**‘Ako pšenično zrno pavši na zemlju ne umre,
ostaje samo; ako li umre, donosi obilat rod.’
(Iv 12, 24-26)**

SADRŽAJ

PREDGOVOR	1
1. Kratki uvod	3
2. Krušna pšenica (<i>Triticum aestivum</i> ssp. <i>aestivum</i>) u svijetu i Republici Hrvatskoj	5
3. Klasifikacija krušne pšenice prema potrebama za jarovizacijom	9
4. Kako nastaje zrno pšenice?	11
4.1. Cvat i cvijet	11
4.2. Plod pšenice	13
4.2.1. Nalijevanje zrna	14
4.2.2. Dormantnost zrna	15
4.2.3. Klijanje zrna	17
4.2.4. Priježetveno proklijavanje zrna	17
5. Karakteristike zrna pšenice	21
5.1. Veličina zrna	21
5.2. Boja zrna	23
5.3. Tvrdća zrna	26
6. Usvajanje hranjiva u zrno pšenice	29
6.1. Dušik (N)	30
6.2. Fosfor (P)	32
6.3. Kalij (K)	34
6.4. Sumpor (S)	35
6.5. Kalcij (Ca) i magnezij (Mg)	38
7. Mikroelementi u zrnu pšenice	39
7.1. Cink (Zn)	40
7.2. Željezo (Fe)	42
7.3. Mangan (Mn)	43
7.4. Bakar (Cu)	45
7.5. Bor (B)	47

8. Korisni ili beneficiani elementi za pšenicu	49
8.1. Silicij (Si)	49
8.2. Selen (Se)	50
9. Toksični elementi u zrnu pšenice	51
9.1. Kadmij (Cd)	52
9.2. Olovo (Pb)	53
10. Upotreba pšenice u ljudskoj prehrani	55
10.1. Prerada	55
10.2. Važnost načina prerade	56
10.3. Nutritivna vrijednost zrna pšenice	58
10.4. Cjelovito zrno pšenice	60
10.5. Gluten u zrnu pšenice	62
10.6. Podjela krušne pšenice na osnovi kvalitete zrna i brašna	65
10.7. Negativne karakteristike glutena za ljudsko zdravlje	68
11. Upotreba pšenice za ishranu stoke	71
12. Mikotoksini/metaboliti narušavaju kvalitetu zrna pšenice	73
12.1. Trihoteceni i njihove maskirane forme te zearelenon	73
12.2. Novonastali (eng. <i>emerging</i>) mikotoksini/metaboliti	75
12.3. Fumonizini i multitoksini	76
12.4. Mikotoksini/metaboliti <i>Alternaria</i> , <i>Penicillium</i> i <i>Aspergillus</i> vrsta	77
12.5. Sustav brzog uzbuñivanja za hranu i hranu za životinje (RASFF)	78
13. Zrna oštećena kukcima	79
14. Literatura	83
Kratice	113
Životopis	117

PREDGOVOR

Sitno, ali moćno zrno pšenice je knjiga koja detaljno istražuje karakteristike i značaj pšeničnog zrna, s posebnim naglaskom na njegovu ulogu u prehrani ljudi i životinja. Sadržaj je podijeljen u 13 poglavlja, s dodatnim poglavljem u kojem je navedena korištena literatura. Knjiga počinje opisom proizvodnje pšenice u svijetu i Republici Hrvatskoj te navođenjem klasifikacija pšenice prema više kriterija. Napisana je jasnim i pristupačnim stilom, a namijenjena je stručnjacima u poljoprivredi, proizvođačima, ali i studentima različitih disciplina.

Za izradu knjige korišteni su primarno znanstveni članci i literatura dostupna na internetu, što je detaljno navedeno u popisu literature. Većina fotografija preuzeta je iz korištenih izvora ili su originalni rad autora.

S obzirom na to da uvijek postoji prostor za poboljšanje, sve su sugestije i konstruktivne kritike dobrodošle i bit će primljene s velikom zahvalnošću. Posebno se zahvaljujem recenzentima prof. dr. sc. Andrijani Rebekić s Fakulteta agrobiotehničkih znanosti Osijek Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, doc. dr. sc. Vesni Peršić s Odjela za biologiju Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku i prof. dr. sc. Hrvoju Šarčeviću s Agronomskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu za njihove vrijedne povratne informacije i doprinos korisnim savjetima.

1 • Kratki uvod

Svjesni da veličina često određuje percepciju moći, sitno zrno pšenice u svojem skromnom obliku krije nevjerojatnu snagu koja utječe na različite sfere ljudske civilizacije, od ekonomije do gastronomije. Pšenica je temeljna žitarica sveprisutna u globalnoj poljoprivredi i prehrani, od drevnih civilizacija do modernog doba, od znanstvenih institucija i privatnih kompanija gdje se razvijaju nove sorte do kuhinja gdje se zrno ove zlatne žitarice pretvara u okus. No, pšenica je dio šire obitelji žitarica, skupine jednogodišnjih biljaka iz porodice trava s jestivim plodom ili sjemenom. Jedinstvena je zbog svoje agronomске prilagodljivosti, lakoće skladištenja, nutritivne vrijednosti i sposobnosti da se od njenog brašna proizvedu raznovrsni prehrambeni proizvodi. Od svih sjemenki u biljnom carstvu, samo pšenično zrno sadrži jedinstveni skup proteina glutenina i glijadina, koji tvore polimerne proteinske mreže s jedinstvenim viskoelastičnim svojstvima. Pšenica je jedna od najstarijih i najekstenzivnije uzgajanih žitarica u koje se još ubrajaju i druge važne vrste kao što su kukuruz (*Zea mays*), ječam (*Hordeum vulgare*), raž (*Secale cereale*), riža (*Oriza spp.*), zob (*Avena sativa*), proso (*Panicum spp.*), sirak (*Sorghum spp.*), heljda (*Fagopyrum esculentum*) te hibrid pšenice i raži pod nazivom tritikale (*Triticosecale*).

Prema botaničkoj podijeli razlikujemo prave ili strne žitarice s cvijetom u obliku klasa (pšenica, raž, ječam, zob i tritikale), i prosolike žitarice s cvijetom u obliku metlice (zob, proso, sirak, riža i kukuruz) te heljda koja ima cvat u obliku četke. Pšenica ima izuzetnu gensku raznolikost koja se ispoljava kroz različite podvrste s različitim brojem kromosoma. Pa tako, kultiviranoj pšenici pripadaju jednozrnac (*T. monococcum* ssp. *monococcum*) s diploidnim genomom AA, zatim dvozrnac (*T. turgidum* ssp. *dicoccum*) i durum pšenica (*T. turgidum* ssp. *durum*), koje imaju tetraploidni genom (AABB) te krušna ili obična pšenica (*T. aestivum* ssp. *aestivum*) i pir (*T. aestivum* ssp. *spelta*) s heksaploidnim genomom AABBDD (Feuillet i sur., 2008).

Prema sistematskoj klasifikaciji, krušna ili obična pšenica pripada redu Poales, porodici Poaceae, potporodici Pooideae, rodu *Triticum*. Krušna pšenica je aloheksaploid (6X) s 21 parom kromosoma ($2n = 42$) tijekom mejoze. Ti kromosomi su podijeljeni u tri (homeologne) povezane grupe kromosoma koji se nalaze u A, B i D genomu. Svaka od homeolognih grupa sadrži sedam parova kromosoma (AABBDD), a svaki kromosom u heksaploidnoj pšenici ima homeologa u ostala dva genoma (Sears, 1966). Krušna pšenica (*Triticum aestivum* L., AABBDD) je nastala kombinacijom *Aegilops tauschii* (DD) i *T. turgidum* (AABB). Općenito je prihvaćeno da je

divlja pšenica *T. urartu* (diploid) donor genoma A u tetraploidnih i heksaploidnih pšenica. Donor genoma B je još uvijek relativno nepoznat, a smatra se da je povezan s genomom S iz *Sitopsis* vrsta (*Aegilops speltoides*, *Ae. longissima*, *Ae. sharonensis*, *Ae. searsii*, *Ae. bicornis* i *Ae. mutica*) iz roda *Aegilops* L. (Li i sur., 2022).

Pšenica se, ovisno o zahtjevima izlaganju niskim temperaturama – proces poznat kao jarovizacija – kategorizira u dvije osnovne skupine. Prva skupina su ozime sorte pšenice koje zahtijevaju niske temperature u fazama klijanja, nicanja i busanja, te u prvoj (do pojave drugog ili trećeg lista) i drugoj etapi organogeneze (diferencijacija konusa rasta na začetak nodija i internodija stabljike), kako bi uspješno prešle iz vegetativne u reproduktivnu fazu. Ovisno o stupnju potrebe za hladnim razdobljem tijekom razvoja ozime sorte se dijele na tri tipa: prave (jake) ozimine zahtijevaju od četiri do šest tjedana hladnoće kako bi se postigao maksimalan učinak jarovizacije, poluozimine (prijelazni ili fakultativni tip) trebaju od dva do četiri tjedna, i slabe ozimine koje zahtijevaju niske temperature u periodu kraćem od dva tjedna. Druga skupina su jare (proljetne) sorte pšenice koje ne trebaju niske temperature za svoj razvoj. Ako ozime sorte nisu izložene potrebnom periodu niskih temperatura, neće proizvesti klasove i zrno, što znači da će, ako se siju u proljeće ostati u fazi busanja te će u vrijeme žetve više nalikovati travi. Stoga se ozima pšenica sije u jesen, jer zahtijeva izloženost periodu nižih temperatura tijekom zime, dok se jara pšenica sije u rano proljeće i ne zahtijeva niske temperature za klasanje i cvatnju.

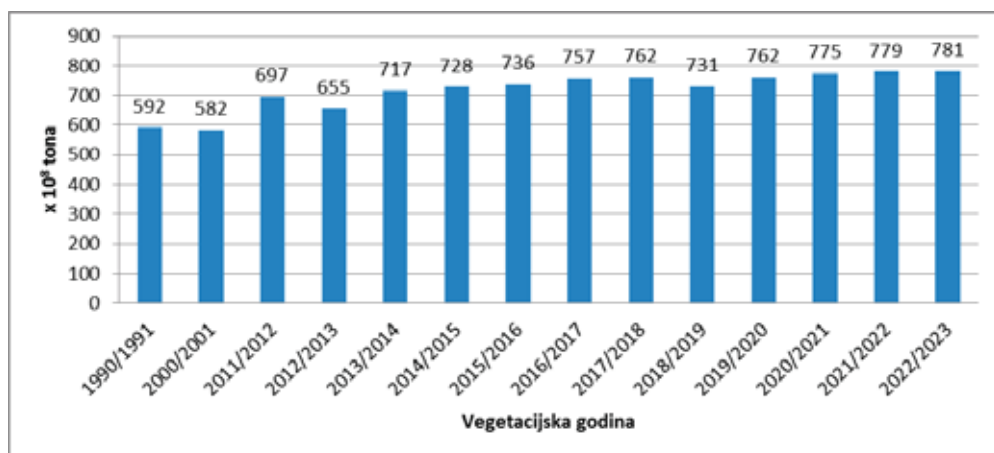
Kod ozimih formi idealne temperature za proces jarovizacije koji olakšava prijelaz u reproduktivnu fazu su između 2 i 10 °C. Na temperaturama iznad 11 °C, učinkovitost jarovizacije se drastično smanjuje, a iznad 18 °C dolazi do potpunog gubitka učinka jarovizacije zbog čega ne dolazi do prelaska u reproduktivnu fazu (Yan i sur., 2015).

2. Krušna pšenica (*Triticum aestivum* ssp. *aestivum*) u svijetu i Republici Hrvatskoj

Krušna je pšenica nastala prije oko 10 000 godina spontanom križanjem, a danas svjetskom stanovništvu osigurava petinu kalorija i proteina (Shiferaw i sur., 2013). U 2018./2019. godini globalna je proizvodnja pšenice iznosila $7,3 \times 10^8$ tona na površini od $2,14 \times 10^6$ km² (FAOSTAT, 2020). Između 2019./2020. i 2022./2023. godine, svjetska je proizvodnja pšenice doživjela blagi rast, dosegnuvši 780 milijuna tona (Slika 1) (FAO, 2022). Ovaj podatak pšenicu svrstava u treću najvažniju žitaricu u smislu svjetske proizvodnje, nakon riže i kukuruza. Prema dostupnim podacima najveći proizvođači pšenice u svijetu su Kina i Europska unija (EU) (Slika 2). Proizvedena količina pšenice osigurava više od 20 % svjetskih zaliha hrane (International Grains Council, 2010). Iako su površine zasijane pšenicom na svjetskoj razini smanjene za 1 % u razdoblju od 2016. do 2018. u odnosu na razdoblje od 1992. do 1994., proizvodnja pšenice povećana je za 36,3 % kao posljedica povećanja uroda zrna za 37,8 % (Erenstein i sur., 2022). Predviđa se da će do 2050. godine potrebe za proizvodnjom pšenice rasti zbog povećanja broja stanovnika, ubrzane urbanizacije i razvoja industrije, što bi u nekom trenutku moglo rezultirati nedostatkom hrane na svjetskom tržištu (Shewry i Hey, 2015). Prema statističkim podacima, smatra se da bi do 2050. godine porast stanovništva mogao dosegnuti brojku od 9 milijardi ljudi (World Bank, 2022).

Urod zrna pšenice može se smanjiti kao rezultat biotičkih i abiotičkih stresova koji su sve učestaliji uslijed klimatskih promjena. Bolesti pšenice, kao jedan od biotičkih stresova, mogu drastično smanjiti urod zrna u prosjeku od 30 do 100 % (Wise i sur., 2006; Bhatta i sur., 2018; Španić i sur., 2019a). Stoga se produktivnost uroda zrna pšenice razlikuje u zemljama i regijama gdje se pojavljuju različite bolesti kao što su fuzarijska palež klasa (*Fusarium* spp.), hrđe (*Puccinia* spp.), pepelnica (*Blumeria graminis* f. sp. *tritici*), smeđa pjegavost lišća (*Septoria tritici* Berk. & M.A. Curtis), smeđa pjegavost pljevica (*Septoria nodorum* (Berk.) Berk) zajedno sa štetnicima poput žitnog balca (*Oulema melanopus* Linnaeus) i crvene pšenične mušice (*Sitodiplosis mosellana* Géhin) itd. U kontroli bolesti i štetnika djelomičnu zaštitu biljkama pšenice omogućavaju fungicidi i insekticidi. Međutim, osim štetnih utjecaja na okoliš, njihovo korištenje predstavlja dodatni trošak za proizvođače. Stoga je uzgoj genotipova pšenice otpornih i/ili tolerantnih na bolesti i štetnike prepoznat kao najučinkovitija strategija zaštite (Rizwan i sur., 2007; Španić i sur., 2013). Pored biotičkih, i abiotički stresovi, poput ekstremnih temperatura, manjka ili suviška vode, povišenog saliniteta, prisutnosti teških metala i ultraljubičastog zračenja, predstavljaju ozbiljnu prijetnju za proizvodnju usjeva u poljoprivredi i imaju štetan

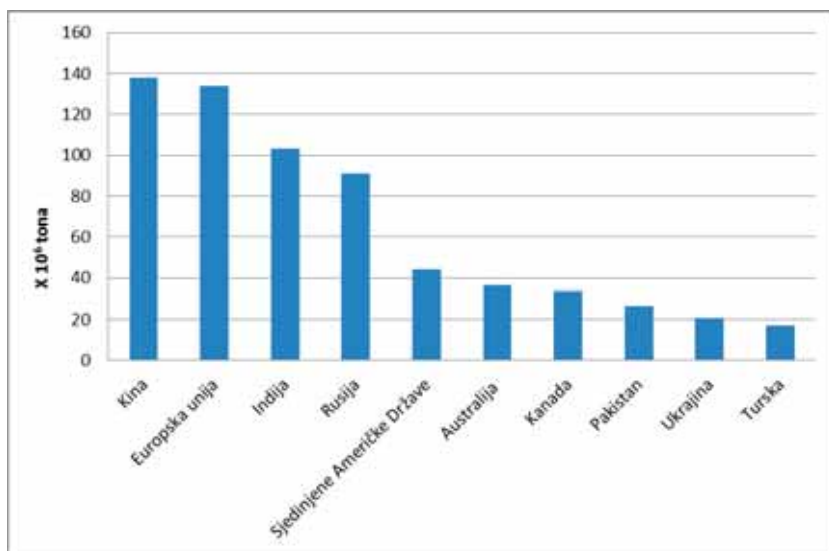
utjecaj za okoliš te mogu uzrokovati značajno smanjenje uroda zrna (Wania i sur., 2016). Suša je jedan od ključnih abiotičkih stresova koji utječe na urod i kvalitetu zrna pšenice kroz različite fiziološke, morfološke i biokemijske promjene u biljkama (Khatiwada i sur., 2020). Istraživanja pokazuju da će svaki porast temperature za 2 °C rezultirati značajnim gubicima uroda zrna pšenice, posebno u umjerenim i tropskim regijama (Challinor i sur., 2014).



Izvor: <https://www.statista.com/statistics/267268/production-of-wheat-worldwide-since-1990/>

Slika 1. Svjetska proizvodnja pšenice u razdoblju od 1990. do 2023. godine

Svi okolišni čimbenici i stresovi utječu na kvantitativna svojstva u različitoj mjeri i na različite načine (Anandan i sur., 2009), što otežava iskorištavanje punog genetskog potencijala određenog genotipa za maksimalan urod i kvalitetu zrna (Nuttall i sur., 2017). Svaki je genotip pšenice obično prilagođen rastu i razvoju u određenom arealu uzgoja (Iwańska i sur., 2020). Analiza stabilnosti i interakcije između genotipa i okoline mogla bi ubrzati oplemenjivanje pšenice kako bi se povećala otpornost i/ili tolerancija na stresne uvjete i time povećala genetska dobit od fenotipske selekcije (Huang i sur., 2016). Nadalje, kombiniranje podataka iz fenotipskih i genomskih analiza može biti korisno u odabiru genotipova s većim urodom zrna u različitim okolišnim uvjetima (Eltaher i sur., 2021).



Izvor: <http://www.worldagriculturalproduction.com/crops/wheat.aspx>

Slika 2. Prikaz prvih deset najvećih proizvođača pšenice u svijetu u 2021./2022. godini

Površina korištenog poljoprivrednog zemljišta u Republici Hrvatskoj (RH) se proteže na oko 1,8 milijuna hektara (ha), dok je površina nekorisćenog poljoprivrednog zemljišta nešto više od 1,1 milijun hektara (Projekt, 2020). Od ukupnih je poljoprivrednih površina u RH žitaricama zasijano više od 60 %. U usporedbi s brojem stanovnika u europskim okvirima, RH je razmjerno bogata poljoprivrednim zemljištem, pri čemu je visok potencijal slabo iskorištenih livada i pašnjaka. S obzirom na mogućnost konkurentnosti RH na europskom tržištu, neiskorištene poljoprivredne površine trebalo bi iskoristiti kako bi se povećala poljoprivredna proizvodnja. Prema podacima Državnog zavoda za statistiku, ukupna proizvodnja pšenice u RH u 2021. godini je iznosila 962 000 tona (Tablica 1), s prosječnim urodom zrna od 6,7 tona po hektaru.

Tablica 1. Proizvedena površina, urod zrna te ukupna proizvodnja pšenice u RH za 2021. i 2022. godinu

Godina	Površina, tisuće hektara	Urod zrna po hektaru, t	Ukupno, tisuće tona
2021.	144	6,7	962
2022.	161	6,0	970

Izvor: <https://podaci.dzs.hr/2022/hr/29384>

U 2022. godini, površina zasijana pšenicom u RH je bila nešto veća u odnosu na prethodnu godinu, no zabilježen je pad prosječnog uroda zrna po hektaru, što je rezultiralo ukupnom proizvodnjom pšenice od 970 000 tona. Najveći proizvođač pšenice u 2020. godini je bio Belje Plus d.o.o. s 4.033 ha, slijedi PP Orahovica d.o.o. s 2.442 ha, dok je treći po proizvodnji pšenice bio Novi Agrar d.o.o. s 2.169 ha (Tablica 2).

Tablica 2. Deset najvećih proizvođača pšenice u RH u 2020. godini

Naziv tvrtke/subjekta	Površina pod pšenicom (ha)
Belje Plus d.o.o.	4.033,37
PP Orahovica d.o.o.	2.442,20
Novi Agrar d.o.o.	2.169,35
Vupik Plus d.o.o.	2.156,87
Kutjevo d.o.o.	1.573,86
PPK Valpovo d.o.o.	1.436,06
Diba d.o.o.	827,09
Privredno prehrambeni kompleks d.o.o.	692,52
PIK Vinkovci Plus d.o.o.	584,97
Poljoprivredna zadruga Jankovci	540,50

Izvor: <https://www.agroklub.com/ratarstvo/top-10-najvecih-proizvodaca-psenice-u-hrvatskoj/66347/>

Niži prosječni urod zrna u RH u velikoj je mjeri posljedica neadekvatnog provođenja agrotehničkih mjera. Često se ne primjenjuje dovoljno zaštite protiv bolesti, štetnika ili korova, a i upotreba gnojiva nije u skladu s preporukama agronomске struke, uglavnom zbog visoke cijene mineralnih gnojiva i zaštitnih sredstava. Proizvođači smatraju da ne trebaju puno ulagati jer su otkupne cijene pšenice prenisko postavljene da bi opravdale veće troškove.

3. Klasifikacija krušne pšenice prema potrebama za jarovizacijom

Kao i sve pšenice iz roda *Triticum* i krušna se dijeli na ozimi i jari tip. Jare forme se siju u proljeće i nemaju nikakve potrebe za jarovizacijom (Španić, 2016). Slabe ozimine će jarovizirati na nižim temperaturama u trajanju ne duljem od 2 tjedna. Fakultativni tipovi pšenica imaju manje potrebe za niskim temperaturama (2 – 4 tjedna) od pravih (jakih) ozimina (6 – 8 tjedana). U RH i svijetu, ozima pšenica zauzima veće površine i u prosjeku rezultira većim urodima zrna od jarih formi te je i njezin opći ekonomski značaj veći. Međutim, jare forme imaju zrno bolje kvalitete. Klimatske promjene uzrokuju pojavu sve viših temperatura tijekom zime, uzrokujući kašnjenje u reproduktivnom razvoju za uspješnu proizvodnju zrna ozime pšenice u određenim arealima uzgoja.

Većina europskih sorti krušne pšenice prolazi kroz proces jarovizacije koji obično traje između 30 i 50 dana. Ključni gen odgovoran za jarovizaciju (eng. *Vernalization1*) je *Vrn1* (Milec i sur., 2023). *Vrn1* je prisutan kao homeolog (*Vrn-A1*, *Vrn-B1* i *Vrn-D1*) na kromosomima 5A, 5B i 5D (Snape i sur., 2001), a za *Vrn-A1* je utvrđeno da je odgovoran i za razlike genotipova u izduljivanju stabljike (Chen i sur., 2009). Vrijeme cvatnje će kontrolirati gen odgovoran za osjetljivost na dužinu dana (eng. *Photoperiod1*, *Ppd1*), a koji je također prisutan kao homeolog na kromosomima 2A, 2B i 2D (Chen i sur., 2018). Kombinacije alela na lokusima *Vrn1* i *Ppd1* rezultiraju varijacijama u agronomskim svojstvima i fiziološkom razvoju (Whittal i sur., 2018). Dok na opću prilagodbu u vremenu cvatnje utječu glavni geni *Vrn1* i *Ppd1*, vrijeme cvatnje kod genotipova ozime i jare pšenice kontrolirano je i genima za ranozrelost poznatim kao *Eps* geni (eng. *earliness per se*, *Eps*).

Kao što je navedeno, fenološke faze pšenice u velikoj su mjeri kontrolirane *Vrn*, *Ppd* i *Eps* genima. Ovi geni, u kombinaciji s vremenskim uvjetima i dužinom trajanja ovih faza, imaju značajan utjecaj na konačni urod zrna. Regulacija fenoloških faza može se postići odabirom odgovarajućih sorti pšenice i vremena sjetve, uzimajući u obzir prilagodljivost sorte specifičnim okolišnim uvjetima. Ipak, nedostaje istraživanja o tome kako geni koji usklađuju razvojne faze pšenice s okolišem utječu na stvarni urod zrna. Oplemenjivači pšenice mogu poboljšati urod optimiziranjem razdoblja cvatnje u specifičnim okolišnim uvjetima, što će omogućiti odabir genotipova pšenice koji su prilagođeni određenim uvjetima za bolji urod (Dreisigacker i sur., 2021).

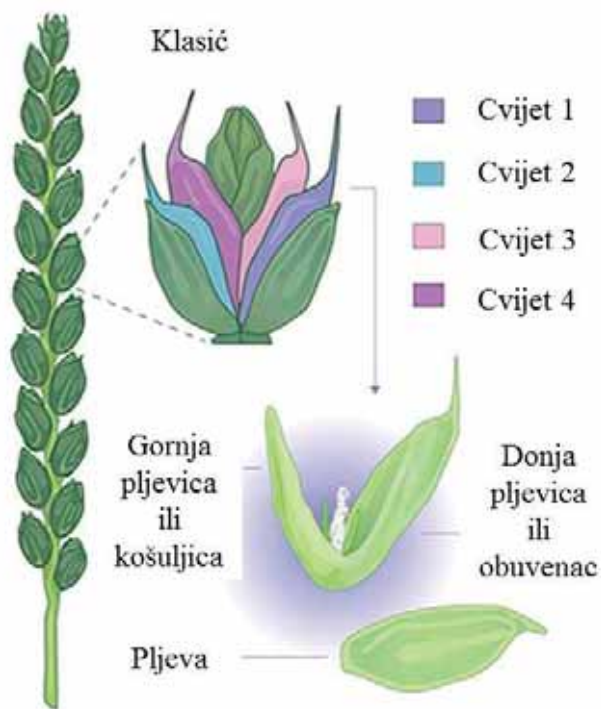
4. Kako nastaje zrno pšenice?

4.1. Cvat i cvijet

Pšenica je uglavnom samooplodna biljka, no u 1 do 4 % cvjetova može doći do spontane stranooplodnje (Okada i sur., 2018). Cvat pšenice je klas (lat. *spica composita*) te se sastoji od klasnog vretena koje je diferencirano na nodije i internodije jer je ono produžetak vršnog internodija stabljike pa je i samo člankovito (Španić, 2016). Na nodijima klasnog vretena se nalaze naizmjenično poredani klasići (Slika 3). Jedan klas u prosjeku ima između 18 i 22 klasića, a svaki klasić obično ima 3 do 4 cvijeta (Kovačević i Rastija, 2014). Kod nekih genotipova pšenice, najveći broj cvjetova razvija se u srednjem klasiću (do 9). Svaki cvijet je zaštićen donjom pljevicom (obuvenac, lat. *lemma inferior*) i gornjom pljevicom (košuljica, lat. *palea superior*), koje mogu biti bezbojne ili obojene, te će se kasnije od njih odvojiti golo zrno (Ponsner i Hibbs, 2005). Da bi jedan cijeli klas procvjetao potrebno je dva do tri dana, ovisno o vremenskim uvjetima (Bentley i sur., 2013).

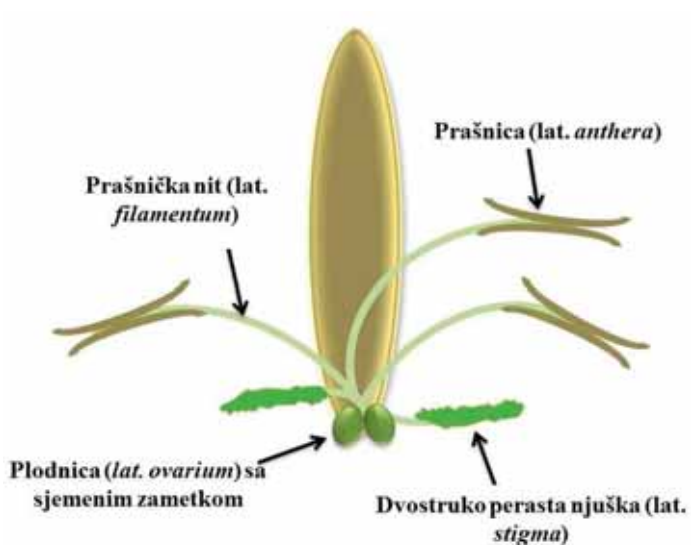
Cvijet pšenice se sastoji iz muškog dijela, koji uključuje tri prašnika (lat. *stamen*). Svaki prašnik se sastoji od prašničke niti (lat. *filamentum*) i prašnice (lat. *anthera*). Ženski dio cvijeta, odnosno tučak (lat. *pistillum*), uključuje plodnicu (lat. *ovarium*) sa sjemenim zametkom, vrat (lat. *stylus*) i dvostruko perastu njušku (lat. *stigma*), kako je prikazano na slici 4. Dio cvijeta su i obuvenac i košuljica koji zatvaraju tučak i tri prašnika.

Cvatnja počinje nekoliko dana nakon što se klas pojavi iz rukavca lista zastavičara. Do oprašivanja dolazi kada polenovo zrnce s prašnica dođe u kontakt s njuškom tučka unutar zatvorenog cvijeta, gdje se prašnici još uvijek nalaze unutar pljevica. Ovaj proces obično započinje u sredini klasa (Frankel i Galun, 1977). Dvije se jezgre iz spermalne stanice, nastale mitozom iz generativne stanice, prenose pomoću polenove mješine (nastale iz vegetativne stanice) koja je proključala kroz vrat tučka do embrionske vreće. Spermalne jezgre oplode embrionsku vreću tako da jedna oplodi jajnu stanicu te nastaje zigota (2n), dok druga spermalna jezgra, spajajući se s dvije polarne jezgre, stvara triploidnu endospermalnu jezgru. Iz zigote se razvija embrio, a iz triploidne stanice endosperm. Ovaj složeni mehanizam nastajanja diploidne zigote i triploidnog staničja naziva se dvostruka oplodnja.



Izvor: https://efreesm.live/product_details/28253244.html

Slika 3. Klas s naizmjenično poredanim klasićima i građa klasića



Izvor: <https://www.buzzaboutbees.net/wind-pollination.html>

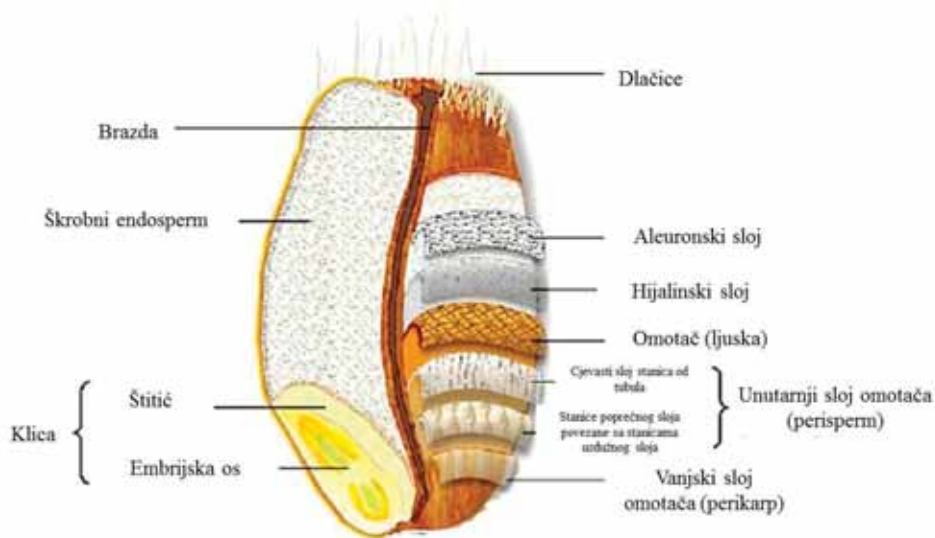
Slika 4. Dijelovi muškog i ženskog dijela cvijeta pšenice

Sjemenka pšenice u kojoj se nalazi i klica (zametak) se postupno razvija iz sjemenog zametka u plodnici, dok zid plodnice tučka prerasta u usplođe, vanjski dio omotača (perikarp). Iz integumenata, koji čine vanjski dio sjemenog zametka, razvija se sjemena ljuska (perisperm) uz koju prijanja perikarp nastao iz zida plodnice. Iako je sjemenka pšenice neodvojiva od ploda, ona nije isto što i plod (jednosjemeni plod). Sjemenka i usplođe čine zrno (plod). Ovo je izuzetno važna faza razvoja s obzirom na nalijevanje zrna jer postoji snažna korelacija između mase zrna i broja te veličine stanica perikarpa (vanjskog sloja omotača) u vrijeme cvatnje (Herrera i Calderini, 2020).

4.2. Plod pšenice

Plod pšenice se naziva pšeno (zrno, lat. *caryopsis*) i obavijen je omotačem koji čine usplođe i sjemena lupina (lat. *testa*), a u unutrašnjosti ploda se nalaze endosperm i klica (lat. *embryo*) (Slika 5). Na trbušnoj strani zrna proteže se brazdica, dok se na vrhu nalazi bradica.

Anatomski, zrno pšenice obavija omotač (ljuska) koji se sastoji od vanjskog sloja (perikarpa) i unutarnjeg sloja (perisperma). Uloga omotača je zaštita klice i endosperma od nepovoljnih okolišnih utjecaja. Endosperm, koji čini od 80 do 90 % zrna, sadrži na svom perifernom djelu aleuronski sloj s albuminima, globulinima, uljima i slično, te unutrašnji dio bogat ugljikohidratima (Slika 5). Aleuronski sloj ima važnu ulogu u sintezi enzima koji će tijekom klijanja sudjelovati u razgradnji endosperma. Ovi enzimi razgrađuju složene organske tvari, koje klica apsorbira dok se ne razviju funkcionalni korijen i list buduće biljke.



Izvor: Onipe i sur. (2015)

Slika 5. Anatomska građa zrna pšenice

Zrno može sadržavati 70 do 75 % ugljikohidrata, 10 do 15 % proteina i 2,5 % masti. Između aleuronskog sloja i perisperma nalazi se hijalinski sloj. Unutrašnjost endosperma čine škrobna zrna s rezervnim proteinima odnosno glijadinima i gluteninima. Škrob je glavna skladišna komponenta endosperma, a sastoji od amiloze i amilopektina. Krušna pšenica sadrži 25 do 30 % amiloze i 70 do 75 % amilopektina, a oba dijela doprinose kvaliteti prerade u brašno i tijesto. Amiloza je jednostavan polimer lančastog oblika koji ima jedinice glukoze povezane α -1,4-glikozidnim vezama (polisaharid sastavljen od molekula glukoze). Amilopektin je visoko razgranati polimer glukoze povezan α -1,4-glikozidnim vezama, osim na točkama grananja gdje su molekule glukoze povezane α -1,6-glikozidnim vezama. Škrob sadrži i relativno male količine minerala, uključujući i funkcionalno značajan fosfor, koji se u škrobu nalazi u obliku fosfolipida, fosfat-monoestera, i anorganskog fosfata. Treći dio zrna, klica, koja čini 1,5 do 3,0 % zrna, predstavlja zametak buduće biljke. Klica se sastoji od embrijske osi, koja sudjeluje u stvaranju nove biljke, štitića (lat. *scutellum*), koji štiti klicu i sadrži rezervne hranjive tvari, pupoljka (lat. *plumula*) i klicinog korjenčića (lat. *radicula*) (Kovačević i Rastija, 2014; Španić, 2016). Iz klice, koja sadrži genetsku informaciju za kontrolu klijanja, korjenčića i pupoljka se formira nova biljka, koristeći endosperm kao izvor hranjivih tvari za svoj rast i razvoj.

4.2.1. Nalijevanje zrna

Nakon oplodnje, klica i endosperm se počinju razvijati, umnažaju se stanice i postupno se povećava volumen zrna. Faza formiranja zrna pšenice traje otprilike 10 do 12 dana, nakon čega zrno dostiže svoju normalnu veličinu. Tijekom formiranja zrna asimilati se većinom koriste za izduživanje vlasi i povećanje suhe mase suhe, dok se sadržaj vode u zrnu smanjuje na oko 65 %. Nakon formiranja zrna slijedi faza nalijevanja zrna koja se podudara s početkom starenja biljke. Tijekom ove faze fotosintetska učinkovitost postupno opada. Budući da fotosinteza lista zastavičara ima najveću ulogu pri usvajanju hranjiva za punjenje zrna, poželjno je da on ostane što duže fotosintetski aktivan.

Prva faza nalijevanja zrna je mliječna zrioba u kojoj se povećava akumulacija organske i mineralne tvari u zrnu, što doprinosi povećanju zrna i premještanju rezervnih tvari u zrno. Mliječna zrioba traje od 10 do 12 dana, a za to vrijeme odumiru bazni listovi i funkcije stabljike prestaju. Biljka preusmjerava produkte fotosinteze u zrno u razvoju. Saharozu, proizvedenu fotosintezom, prelazi u amiloplast i metabolizira se u heksoza fosfat, koji sudjeluje u biosintezi škroba, proteina i ulja. Kada se endosperm razvije, većina heksoza fosfata koristi se za biosintezu škroba fosforilacijom i proizvodnjom adenozin trifosfata (ATP-a). Osim toga, odvija se i prijenos aminokiselina kroz membrane i translokacija od vegetativnih organa do zrna što je posredovano membranskim transportnim proteinima: transporterima aminokiselina (AATs). Naime, glavni transportni oblik reduciranog dušika u biljkama su aminokiseline, a transporteri aminokiselina osim akumulacije dušika u zrnu, mogu utjecati na urod zrna raspodjeljujući dušik u različite organe biljke (Wan i sur., 2021).

Nakon mliječne zriobe, zrno pšenice ulazi u tjestasto stanje, koje traje od 6 do 10 dana. U ovoj fazi, sadržaj vode pada na 50 %, a zrno poprima žutozelenu boju. Slijedi voštana zrioba kada se u zrnu skupljaju organske tvari, a koja također traje od 6 do 10 dana i počinje kada sadržaj vode u zrnu padne na 40 %. U ovoj fazi, jednostavni organski spojevi kao što su nisko molekularni šećeri (glukoza) i dušični spojevi (aminokiseline) transformiraju se u složene spojeve, poput škroba i proteina (Kovačević i Rastija, 2014). Nakon voštane slijedi puna zrioba, faza u kojoj se sadržaj vode smanjuje ispod 14 %. U ovoj fazi biljka se osušila i više nema fotosintetsku aktivnost.

4.2.2. Dormantnost zrna

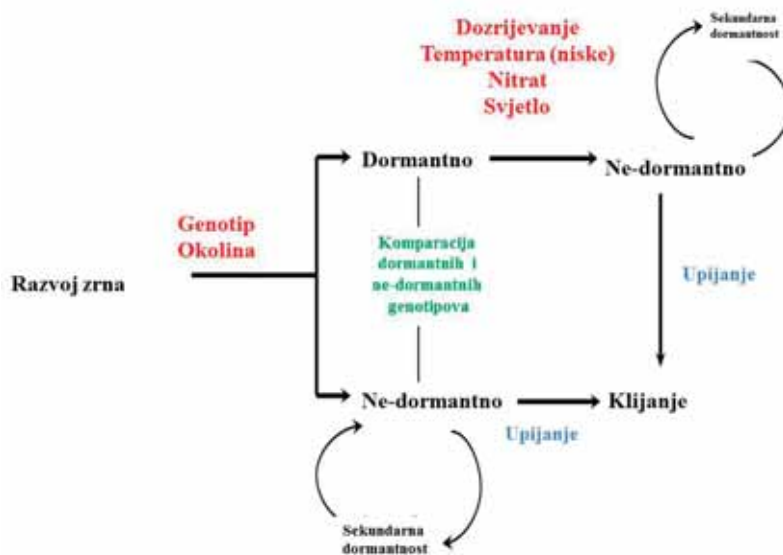
Tijekom sazrijevanja sjemena zametak dehidrira i ulazi u fazu mirovanja. Klijanje zahtijeva rehidraciju, a završetak klijanja ovisi o istim uvjetima kao i vegetativan rast: dostupnosti kisika i vode te odgovarajućoj temperaturi. Međutim, zrno možda neće proklijati čak i kad su svi odgovarajući okolišni uvjeti ispunjeni, što je poznato kao dormantnost zrna. Dormantnost (mirovanje) zrna je intrinzična blokada koja omogućava zrnu pšenice da ostane u stanju mirovanja dok se ne stvore povoljni uvjeti za klijanje, pružajući vrijeme za raspršivanje. Na dormantnost zrna utječu i genetski i okolišni čimbenici. Iako je dormantnost nasljedno svojstvo, njen intenzitet može se modulirati uvjetima okoline tijekom razvoja i sazrijevanja zrna, kao i tijekom skladištenja (Benech-Arnold i sur., 2013; Rodríguez i sur., 2015).

Dormantnost zrna kontrolira vrijeme klijanja, što je ključno svojstvo za sprječavanje priježetvenog proklijavanja zrna tj. klijanja fiziološki zrelog sjemena na matičnoj biljci (Nakamura, 2018), koje je karakteristično za neke genotipove kada sazrijevaju po vlažnom vremenu. Priježetveno klijanje smanjuje kvalitetu zrna i uzrokuje ozbiljne ekonomske gubitke. S druge strane, poželjno je da mirovanje prestane ubrzo nakon žetve radi klijanja pri sjetvi. Niže temperature tijekom sazrijevanja mogu doprinijeti jačoj dormantnosti zrna. Postoji i tzv. sekundarna dormantnost, koja nastupa kada uvjeti za klijanje nisu povoljni i zrno ponovno ulazi u stanje mirovanja (Slika 6).

Na poticanje i održavanje primarne dormantnosti tijekom razvoja zrna utječu i genetski i okolišni čimbenici. Prijelaz iz stanja dormantnosti može se potaknuti signalima iz okoline poput temperature (hladnoće), nitrata i svjetlosti, kao i razdobljem nakon sazrijevanja, razdobljem skladištenja tijekom kojeg se mirovanje prekida. Zrna koja nisu dormantna dovršavaju klijanje ili mogu ući u sekundarnu dormantnost ako su okolišni uvjeti nepovoljni za klijanje. Nakon žetve, dormantnost se postupno smanjuje tijekom skladištenja na sobnoj temperaturi, što dovodi do "naknadnog sazrijevanja" i povećava stopu klijanja pri optimalnim temperaturama. Smatra se da se skraćivanje trajanja dormantnosti može ubrzati povećanjem temperature tijekom skladištenja (Rodríguez i sur., 2015).

Vanjska ovojnica zrna, aleuronski i hijalinski sloj, te endosperm koji okružuje klicu također doprinose dormantnosti (Steinbach i sur., 1995), inhibirajući klijanje ograničavanjem opskrbe kisikom. Također, postoji povezanost između boje zrna i

dormantnosti pri čemu genotipovi s crvenim zrnom obično pokazuju višu razinu dormantnosti od genotipova s bijelim zrnom (Flintham, 2000). Razina dormantnosti u bijelom zrnju pšenice ne prelazi onu u crvenom zrnju, što upućuje na to da pšenica s crvenim zrnju posjeduje još neke gene za dormantnost zrna koji nisu prisutni u pšenici s bijelim zrnju (Flintham, 1993). Dominantni gen za crvenu boju zrna (*R*) povećava njegovu dormantnost. Pretpostavlja se da je funkcija gena *R* na mirovanje zrna akumulacija inhibitora klijanja budući da prekursor crvenog pigmenta, katehin koji je topiv u vodi, može inhibirati klijanje zrna.



Izvor: Gao i Ayele (2014)

Slika 6. Vremenski razvoj poticanja dormantnosti i klijanje zrna

Dormantnost zrna često je kombinacija: 1) dormantnosti uzrokovane vanjskim omotačem zbog višestrukih staničnih slojeva koji okružuju klicu (aleuronski i hijalinski sloj i endosperm) i sprječavaju izlazak korijena, i 2) dormantnosti klice, kada ona sama nije u stanju klijeti (Yan i sur., 2014). Prekid dormantnosti događa se kad sjeme apsorbira vodu (imbibicija) što dovodi do razgradnje apscizinske kiseline, a to je preduvjet za aktivaciju klijanja drugim biljnim hormonom, giberelinom. Gubitak dormantnosti u zrnju pšenice povezan je s fiziološkim promjenama u zrnju, što uključuje promjene u ekspresiji gena i proteina, oksidativne modifikacije genskih transkripata i proteina, te epigenetske modifikacije (Gao i Ayele, 2014). Smatra se da apscizinska kiselina ima ključnu ulogu u mehanizmu dormantnosti, djelujući antagonistički s giberelinom u kontroli dormantnosti i klijanja zrna. Dok apscizinska kiselina pozitivno regulira indukciju i održavanje dormantnosti, giberelin pospješuje klijavost (Tuan i sur., 2018). Na njihovu ravnotežu mogu utjecati stresni uvjeti poput reaktivnih kisikovih jedinica, ali i okolišni čimbenici poput temperature i svjetlosti, utječući tako na mirovanje i klijanje zrna.

Tijekom sazrijevanja zrna, apscizinska kiselina pozitivno regulira nakupljanje rezervnih hranjiva, inhibira rast klice, omogućuje tolerantnost na isušivanje i potiče primarnu dormantnost. Apscizinska kiselina akumulirana u zrnu potječe od sinteze u majčinskom i zigotnom tkivu, ali samo ona proizvedena u zigotnom tkivu tijekom kasnih faza sazrijevanja zrna ima dominantnu ulogu u indukciji dormantnosti (Sano i Marion-Poll, 2021). Apscizinska kiselina se sintetizira oksidativnim cijepanjem C40 epoksi-karoteno-ida u ksantoksin, koji se zatim prevodi u apscizinsku kiselinu preko aldehida apscizinske kiseline (Rodríguez i sur., 2015). Hidroksilacijom se proizvodi 8'-hidroksi apscizinska kiselina, koja se spontano izomerizira u fazeinsku kiselinu, a ovaj proces se smatra dominantnim putem razgradnje apscizinske kiseline. Nadalje, ekspresija gena uključenih u metabolizam apscizinske kiseline i giberelina ovisi o prisutnosti vode i količinama kisika u stanicama i tkivu (Hoang i sur., 2013). Visoke temperature, koje pojačavaju ekspresiju mirovanja, održavaju visoke koncentracije apscizinske kiseline u klici. Inhibicijski učinak bijelog ili plavog svjetla na klijanje zrna ječma i pšenice povezano je s povećanjem sadržaja apscizinske kiseline u klici (Hoang i sur., 2014).

Pšenica ima nekoliko lokusa za kvantitativno svojstvo (QTL-ova) dormantnosti, uključujući *QPhs.ocs-3A.1* i *Phs1* (Torada i sur., 2008). *MFT* je identificiran kao glavni gen za QTL *QPhs.ocs-3A.1* za dormantnost kod pšenice (Nakamura i sur. 2011).

4.2.3. Klijanje zrna

Tijekom klijanja, pričuvni škrob se razgrađuje hidrolitičkim enzimima, a otopljeni šećeri, aminokiseline i drugi spojevi se prenose u rastući embrio. Za razgradnju škroba odgovorna su dva enzima: a- i b-amilaza. a-amilaza hidrolizira škrob do oligosaharida (djeluje unutar molekule), a b-amilaza razgrađuje molekulu škroba od nereducirajućeg kraja, dajući disaharid maltozu koja se dalje djelovanjem maltaze može razgraditi u dvije molekule glukoze. Tijekom procesa bubrenja zrna, klica regulira mobilizaciju vlastitih pričuva hrane pomoću izlučivanja fitohormona, uglavnom giberelina, čija je uloga stimulacija metaboličke funkcije aleuronskog sloja (Jacobson i sur., 1995). Giberelini povećavaju stvaranje a-amilaze na razini transkripcije. Primarno djeluju tako da induciraju ekspresiju gena za a-amilazu (Lee i sur., 2010).

Zrna pšenice su biološki materijal čija se svojstva razlikuju zbog mnogobrojnih čimbenika, kao što su genotip, plodnost tla, uvjeti uzgoja i agronomska praksa. Kada se zrno posije u vlažno i aerirano tlo, ono počinje klijeti. Pupoljak iz klice raste i probija koleoptilu, a na površini tla izbija prvi pravi list. Kako rast biljke napreduje, razvijaju se korijen i četiri sekundarna korijenčića. Ako se sjeme posije previše duboko, klica može prestati rasti prije nego što dosegne površinu tla. U takvim uvjetima, prvi se list može pojaviti iz koleoptile, ali se često ne razvija pravilno, i ne probija se iz tla, što na kraju dovodi do propadanja klijanaca.

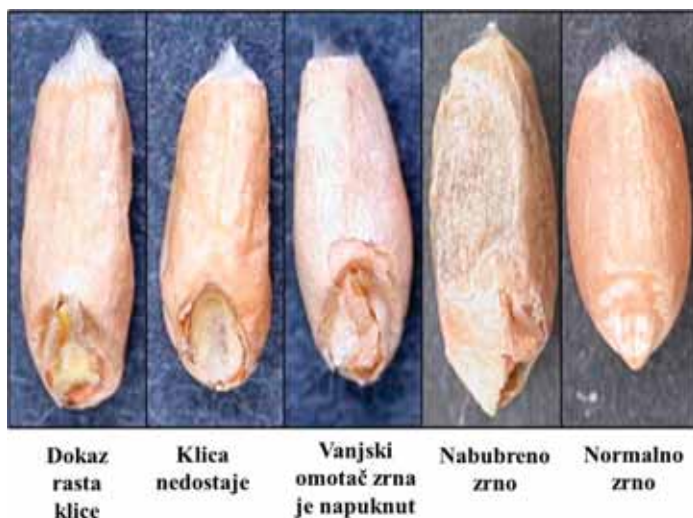
4.2.4. Priježetveno proklijavanje zrna

Tijekom zriobe zrna pojavom kišnih ili vlažnih uvjeta, zrno u klasu može proklijati na samoj biljci, što je poznato kao priježetveno proklijavanje zrna. Niske

temperature i niska vlaga pomažu u održavanju dormantnosti sjemena, dok visoke temperature u kasnijim fazama razvoja zrna mogu prekinuti dormantnost klice, povećavajući rizik od priježetvenog proklijavanja zrna, posebno ako padne više od 15 do 20 mm kiše oko vremena žetve (Biddulph i sur., 2007). Genotipovi koji ranije sazrijevaju manje su skloni ovom fenomenu (Hucl i Matus-Cadiz, 2002). Tolerancija genotipa na priježetveno proklijavanje ovisi o interakciji genotipa i okoline, što ukazuje na to da se genetski učinci mogu razlikovati u različitim okolinama, a određeni aleli postaju dominantni u povoljnim vremenskim uvjetima (Rutter i sur., 2006).

Priježetveno proklijavanje može imati i negativne posljedice, uključujući gubitak vijabilnosti zrna nakon naknadnog isušivanja, ako je klica već nabubrila i tako prešla prag tolerancije na isušivanje. To također smanjuje i dugovječnost zrna (Gualano i sur., 2014). Općenito, početak klijanja pokreće sintezu enzima koji potiču mobilizaciju rezervnih hranjivih tvari, razgradnju endosperma, što značajno smanjuje kvalitetu zrna. Proizvodi od proklijalih zrna mogu biti spužvasti, vlažni, loše boje i lošije kvalitete (Groos i sur., 2002). Utjecaj priježetvenog proklijavanja zrna na kvalitetu konačnog prehrambenog proizvoda ovisi o količini prisutnih enzima i stupnju razgradnje škrobnih zrnaca, ulja i proteina (Sorenson i Wiersma, 2004). Osim utjecaja na kvalitetu priježetveno proklijavanje može značajno utjecati i na urod zrna (Singh i sur., 2014).

Otpornost na priježetveno proklijavanje zrna može se procijeniti razinom aktivnosti α -amilaze (mjereno brojem padanja po Hagberg-Pertenu) i/ili vizualnom ocjenom prisutnosti proklijalih zrna (Slika 7). Kada dođe do proklijavanja zrna na biljci, eksprimiraju se aleuronski hidrolitički enzimi kao što su α -amilaze i proteaze, koji razgrađuju pohranjeni škrob i rezerve proteina u škrobnom endospermu. Ovi enzimi su neophodni za novonastalu biljku (klicu) kako bi osigurali energiju i hranjive tvari, što je razlog zašto zrno pšenice koje klija proizvodi amilaze, lipaze i proteaze.



Izvor: <http://agrilife.org/texasrowcrops/files/2015/06/Sprouting-Symptoms.jpg>

Slika 7. Primjeri vizualne ocjene simptoma priježetvenog proklijavanja zrna

Broj padanja zrna (po Hagberg-Pertenu) ovisi o genotipu pšenice i načinu na koji biljka reagira na okolišne uvjete tijekom vegetacije, ali i nakon zriobe. Ako je broj padanja manji od 300 sekundi, to ukazuje na smanjenu kvalitetu i veću osjetljivost genotipa na priježetveno proklijavanje zrna. U istraživanju Peršić i sur. (2023) deset genotipova pšenice je imalo broj padanja po Hagberg-Pertenu iznad 300 sekundi, dok je proteolitička aktivnost varirala od 0,25 do 0,34 $\mu\text{mol TYR g}^{-1}$ brašna (Tablica 3). Metoda mjerenja broja padanja po Hagberg-Pertenu zasniva se na brzom želatinizaciji škroba u suspenziji brašna i vode te mjerenju likvefakcije škrobne paste pod utjecajem α -amilaze. Visoka amilolitička aktivnost dovodi do brzog raspada škroba. Dakle, viši broj padanja ukazuje na nižu amilolitičku aktivnost i obrnuto. Kod priježetvenog proklijavanja, dormantnost zrna je prekinuta, što se fiziološki manifestira kao povećanje aktivnosti α -amilaze i proteaza, a povezano je s niskom vrijednošću broja padanja (Bainotti i sur., 2009).

Tablica 3. Broj padanja po Hagberg-Pertenu i proteolitička aktivnost u brašnu 10 genotipova ozime pšenice

	Broj padanja (s)	Proteolitička aktivnost ($\mu\text{mol TYR g}^{-1}$ brašna)
Genotip 1	402	0,34
Genotip 2	302	0,27
Genotip 3	388	0,29
Genotip 4	364	0,27
Genotip 5	341	0,31
Genotip 6	330	0,25
Genotip 7	405	0,26
Genotip 8	364	0,28
Genotip 9	301	0,25
Genotip 10	357	0,28

Izvor: Peršić i sur. (2023)

Boja zrna pšenice također je povezana s njezinom otpornošću na priježetveno proklijavanje. Genotipovi s crvenim zrnom obično su otporniji na priježetveno proklijavanje u usporedbi s onima s bijelim zrnom, pa se crvena boja često koristi kao pokazatelj te otpornosti (Torada i Amano, 2002). Metabolizmom flavonoida sintetiziraju se katehin i proantocijanidini koji su povezani s crvenom bojom omotača zrna pšenice. Tri gena, *R-A1*, *R-B1* i *R-D1* na 3. kromosomu kontroliraju boju omotača zrna i nakupljanje katehina, koji je prekursor crvenog pigmenta koji sprječava priježetveno proklijavanje zrna (Lin i sur., 2016).

Smatra se da su u nasljeđivanje otpornosti na priježetveno proklijavanje zrna uključeni i dominantni i aditivni učinci gena (Kadariya i sur., 2011). Lokusi za

kvantitativna svojstva *TaPHS1*, *TaMKK3*, *Tamyb10* i *TaVp1* imaju velik utjecaj na osjetljivost na priježetveno proklijavanje, dok su drugi geni poput *TaSdr*, *TaQsd* i *TaDOG1* odgovorni za manje, ali značajne udjele varijacija (Vetch i sur., 2019). Identificirano je 29 stabilnih glavnih lokusa za kvantitativno svojstvo za tolerantnost na priježetveno proklijavanje zrna na 12 različitih kromosoma, uključujući 1B, 2B, 2D, 3A, 3B, 3D, 4A, 4B, 5A, 6A, 7B i 7D (Gupta i sur., 2020). Nekoliko gena povezanih s bojom zrna pokazalo je snažan utjecaj na priježetveno proklijavanje (Lin i sur., 2016). Stoga, nasljeđivanje priježetvenog proklijavanja, koje je kvantitativno i podložno utjecaju okoline, uključuje brojne čimbenike, što čini selekciju za ovo svojstvo relativno složenom (Nornberg i sur., 2016).

5. Karakteristike zrna pšenice

5.1. Veličina zrna

Najvažnije komponente uroda zrna pšenice su broj klasova po m², broj zrna po klasu i masa 1000 zrna (Kovačević i Rastija, 2014). U optimalnim uvjetima uzgoja, broj zrna po m² se ističe kao glavna komponenta uroda zrna (Beral i sur., 2020), a određuje se prije klasanja kao rezultat množenja broja klasova po m² i broja zrna po klasu (Slafer i Andrade, 1993). Međutim, ako nakon cvatnje nastupi biotički ili abiotički stres, masa 1000 zrna postaje važna komponenta za određivanje uroda zrna, pri čemu postoji negativna korelacija s brojem zrna po m² (Slafer i sur., 2014). S obzirom na klimatske promjene, koje dovode do učestalijih suša i visokih temperatura tijekom faze nalijevanja zrna, masa 1000 zrna može biti značajno smanjena. Nadalje, manja masa 1000 zrna može ukazivati na smanjenu translokaciju hranjivih tvari u zrna tijekom faze nalijevanja. Dias i Lidon (2009) navode da su trajanje faze nalijevanja zrna i masa zrna u značajnoj pozitivnoj korelaciji.

Veličina zrna pšenice uvjetovana je genetski, ali i trajanjem faze nalijevanja zrna. Poznato je da ako su listovi zastavičari dulje zeleni nakon perioda klasanja, razdoblje nalijevanja zrna se produžuje, što je u pozitivnoj korelaciji s većim urodom zrna, osobito tijekom razdoblja toplinskog stresa (Dolferus i sur., 2019). Stoga je poželjno izabrati genotipove pšenice s eng. *'stay-green'* svojstvom, koje omogućuje biljkama da listove zastavičare i klasove održe duže zelenim, te time produže fotosintetsku aktivnost i poboljšaju proces nalijevanja zrna čak i u stresnim uvjetima.

Masa zrna određena je duljinom i širinom zrna, te predstavlja važnu komponentu uroda zrna koja je određena genetskim i okolišnim čimbenicima. Uobičajene dimenzije zrna pšenice su duljina između 5 i 9 mm i masa od 35 do 50 mg. Duljina i širina zrna mogu biti izmjerene ručno, no to je često vremenski zahtjevan proces. Stoga se danas često koristi jednostavna i pristupačna oprema za brzi prikaz 2-D slika pojedinačnih zrna, omogućujući procjenu relativno velikog broja uzoraka mjereći duljinu, širinu i površinu svakog pojedinačnog zrna (Komyshev i sur., 2017). Različiti uređaji omogućuju analizu uzoraka zrna s obzirom na veličinu, oblik i masu. Na primjer, mjerenja provedena na Marvin uređaju za analizu zrna pokazala su da masa 1000 zrna u 10 genotipova pšenice varira od 37,07 do 44,69 g (Tablica 4). Masa zrna, izražena kao masa 1000 zrna, glavna je komponenta uroda i stabilnije se nasljeđuje od uroda zrna (Kuchel i sur., 2007). Zbog svoje fenotipske stabilnosti i umjerene do visoke heritabilnosti, koja se kreće od 0,6 do 0,8, služi kao selekcijski kriterij u procesu oplemenjivanja pšenice za povećanje uroda zrna (Duan i sur.,

2020). Analiza komponenti varijance za različite genotipove pšenice na različitim lokacijama, pokazala je da je udio varijance lokacije veći od udjela varijance genotipa i interakcije lokacija x genotip za svojstvo veličine zrna (Protić i sur., 2010). Lokusi za kvantitativna svojstva (QTL-ovi) identificirani su u većini homeolognih grupa, a najveći utjecaj na veličinu i/ili oblik zrna imaju oni na kromosomima 1A, 3A, 4B, 5A i 6A (Vasilis i sur., 2010). Morfometrijske analize sugeriraju da je zrno pšenice evoluiralo od dugog i tankog primitivnog zrna do šireg i kraćeg modernog zrna. Poboljšanje mase zrna može biti ključno za postizanje cilja udvostručenja proizvodnje pšenice do 2050. godine. Međutim, povećanje mase zrna može imati i ograničen utjecaj na ukupan urod zrna pšenice zbog potrebe za postizanjem ravnoteže između mase zrna i broja zrna (Wang i sur., 2018). Masa 1000 zrna pokazala je visoku značajnu korelaciju s površinom i širinom zrna, dok s duljinom zrna nije utvrđena značajna korelacija (Tablica 5).

Tablica 4. Masa 1000 zrna, površina, širina i dužina zrna izmjerena na uređaju Marvin u 2019. godini

Genotip	Masa 1000 zrna (g)	Površina	Širina (mm)	Duljina (mm)
Genotip 1	38,20	16,5	3,2	6,9
Genotip 2	40,17	17,0	3,3	7,0
Genotip 3	40,00	17,0	3,3	7,0
Genotip 4	38,54	16,5	3,2	6,9
Genotip 5	39,19	17,0	3,2	7,0
Genotip 6	38,34	16,6	3,2	6,9
Genotip 7	37,04	16,2	3,2	6,8
Genotip 8	38,23	16,4	3,2	6,9
Genotip 9	44,07	17,9	3,4	6,9
Genotip 10	44,69	17,8	3,4	6,9

Izvor: Sortni pokusi, V. Španić

Tablica 5. Koeficijent korelacije mase 1000 zrna s površinom, širinom i duljinom zrna (n=10)

	Površina	Širina	Duljina
Masa 1000 zrna	0,98**	0,96**	0,18

**Označene korelacije značajne su pri $p < 0,05$

U istraživanju Kim i sur. (2021), utvrđeno je da je površina zrna bolji pokazatelj mase zrna od njegove duljine i širine. Masa zrna ima bitnu ulogu pri sjetvi pšenice, jer varijabilnosti u masi zrna povećavaju heterogenost klijanja i nicanja, što neizravno može dovesti do nižih uroda zrna. Također je važno istaknuti da ishrana biljaka značajno utječe na veličinu zrna pšenice, posebno tijekom faze nalijevanja zrna.

Osobito su važni dušik, fosfor, kalij, magnezij i cink. Na primjer, primjena dušika u ranoj fazi vegetacije pomaže u stvaranju veće biomase biljke, koja sadrži visoke razine ugljikohidrata u stabljici, a ti se ugljikohidrati kasnije prenose u zrno tijekom njegovog sazrijevanja. Visoki urodi zrna mogu se postići ako su sve komponente uroda, broj klasova po m², broj zrna po klasu i masa zrna, adekvatne s obzirom na očekivani urod zrna (Tablica 6).

Tablica 6. Ciljani urod zrna i komponente uroda zrna

Očekivani urod zrna	Komponente uroda zrna
10 t/ha	420 klasova po m ²
	48 zrna po klasu
	50 mg po zrnu
	na 15 % vlage
8 t/ha	336 klasova po m ²
	48 zrna po klasu
	50 mg po zrnu
	na 15 % vlage
6 t/ha	252 klasova po m ²
	48 zrna po klasu
	50 mg po zrnu
	na 15 % vlage

Izvor: <https://www.yara.co.uk/crop-nutrition/wheat/increasing-wheat-grain-size/>

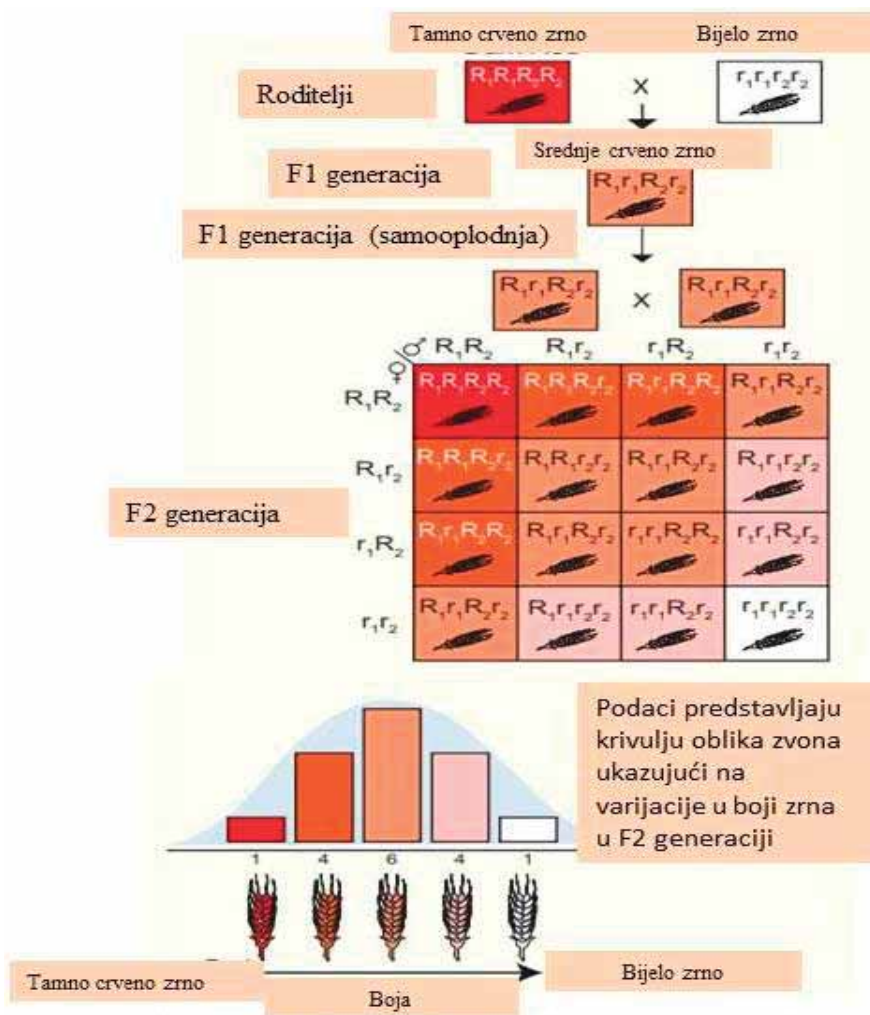
5.2. Boja zrna

Boja zrna pšenice je poligenetsko svojstvo, a pigmenti koji određuju boju zrna lokalizirani su u unutarnjem sloju ljuske (omotaču). Većina genotipova pšenice ima crvenu boju zrna, dok je bijela boja rjeđa. Geni koji kontroliraju crvenu ili bijelu boju zrna, nalaze se na kromosomima 3A, 3B i 3D. Crvenu boju zrna kontroliraju jedan do tri dominantna alela *R-A1* (na kromosomu 3AL), *R-B1* (3BL) i *R-D1* (3DL), dok bijelu boju zrna određuju recesivni aleli *r-A1*, *r-B1* i *r-D1* (Himi i Noda, 2005). Crveni pigment se sastoji od derivata katehina i tanina nastalih u procesu biosinteze flavonoida. Stoga, crvena zrna sadrže više fenolnih spojeva, dok bijela imaju nisku razinu polifenol oksidaze. U bijelim zrnima pšenice, uz smanjenu masu 1000 zrna, sadržaj pepela i proteina, također je snižena aktivnost polifenol oksidaze, što je u pozitivnoj korelaciji sa sadržajem polifenola (Kang i sur., 2011).

U drugoj filijalnoj generaciji (F₂), nakon križanja pšenice crvenih i bijelih zrna, zbog genetskog razdvajanja i rekombinacije, biljke pšenice pokazuju širok raspon intenziteta boje zrna (Slika 8). Svaki crveni alel aditivno doprinosi boji zrna pšenice,

a tamnija boja zrna povezana je s većom tvrdoćom zrna. Boja zrna pšenice je važan parametar kvalitete koji utječe na boju brašna i njegovih proizvoda.

Pored bijele i različitih nijansi crvene, boja zrna pšenice može biti i ljubičasta ili plava (Slika 9). Ljubičasta boja zrna kontrolirana je *Pp* genima u vanjskom omotaču (perikarpu) i povezana je s prisustvošću antocijana. Plavu boju zrna određuju geni za plavu boju aleuronskog sloja (*Ba*). Dominantni gen *Ba1*, koji kontrolira plavu boju u krušnoj pšenici, prenesen je s kromosoma 4el iz *Thinopyrum ponticum* (Podp.) u dugi krak kromosoma 4B, dok je *Ba2* prenesen iz *T. boeoticum* na 4A (4AmL) (Sgarabella i sur., 2023). Nadalje, *Pp* geni se kod krušne pšenice nalaze na kromosomima 2A (*Pp3*) i 7D (*Pp-D1*) i odgovorni su za regulaciju transkripcije strukturnih gena u biosintezi antocijana (Khlestkina i sur., 2014).



Izvor: https://www.brainkart.com/article/Polygenic-Inheritance-in-Wheat-%28Kernel-colour%29_38216/

Slika 8. Poligenetsko nasljeđivanje boje zrna pšenice



Boja zrna pšenice se razlikuje zbog nakupljanja antocijana u različitim slojevima zrna:
 a) bijelo zrno (bez antocijana), b) ljubičasti vanjski sloj (*Pp*),
 c) plavi aleuronski sloj (*Ba*) i d) tamnoljubičasto zrno (*Ba + Pp*)

Izvor: Böhmendorfer i sur. (2018)

Slika 9. Različita obojenja zrna pšenice

U ljubičastim zrnima pšenice, najzastupljeniji antocijanini su cijanidin 3-glukozid, cijanidin 3-rutinozid i sukcinil glukozid (Knievel i sur., 2009). Za plavu aleuronsku pšenicu, dominantni antocijanini su delfinidin 3-glukozid i delfinidin 3-rutinozid, dok su cijanidin 3-glukozid i cijanidin 3-rutinozid prisutni u manjim količinama u usporedbi s ljubičastim zrnima. Tri nepotpuno dominantna gena *Ba* koji reguliraju biosintezu antocijana u aleuronskom sloju, lokalizirani su u heksaploidnoj pšenici plavog zrna, a nastali su introgresijom *Ba* gena prenesenih iz *Agropyron* vrsta (Zeven, 1991). Žutu boju endosperma određuju dva lokusa *Psy1* i *Psy2*, smještena na homeolognim grupama 5 i 7 kromosoma, a povezana su s prisustvošću karotenoida i fitoen sintazom, ključnim enzimom koji ograničava brzinu biosinteze

karotenoida (Li i sur., 2023). Obojena zrna pšenice, koja su bogata sadržajem antocijana u vanjskom omotaču (ljubičasta zrna pšenice) ili aleuronskom sloju (plava zrna pšenice) mogu imati značajnu ulogu u prevenciji raznih bolesti povezanih s oksidativnim stresom (Fan i sur., 2020). Međutim, vrlo teško je razviti genotipove s plavim ili ljubičastim zrnima koji bi zadovoljili proizvođače u pogledu uroda i kvalitete zrna. Zrna s intenzivnijim obojenjem najčešće imaju niže urode zrna i slabiju otpornost na stresne uvjete. Ipak, obojena zrna pšenice imaju visoku prehrambenu vrijednost zbog prisutnosti antocijana, organskih biljnih boja koje se nalaze otopljene u staničnom soku i mijenjaju boju ovisno o pH-vrijednosti staničnog soka (Saini i sur., 2020). Osim antocijana, takva zrna sadrže i karoten, tokoferole i fenolne kiseline, koji imaju antioksidacijska svojstva. Fenolne kiseline i flavonoidi, iako prisutni u niskim koncentracijama, imaju značajan utjecaj na kvalitetu zrna i primarni su uzroci pigmentacije zrna (Liu i sur., 2010).

Boja zrna također varira ovisno o okolišnim uvjetima i uvjetima same žetve. U jednom istraživanju, agroklimatska zona doprinijela je s 13,0 - 17,9 % varijance u boji zrna, dok je godina doprinijela s 71,3 – 78,6 % (Lukow i sur., 2013). Nepravilni uvjeti skladištenja, razni fitopatogeni, te oštećenja od topline i mraza mogu štetno utjecati na prirodnu boju zrna, dok primjena dušika može poboljšati sintezu antocijana promicanjem njegove biosinteze upotrebom fenilalanina kao prekursora (Suchila i sur., 2022). Plijesan na zrnu pšenice često smanjuje kvalitetu zrna zbog karakteristične sive boje koja negativno utječe i na boju rafiniranog brašna.

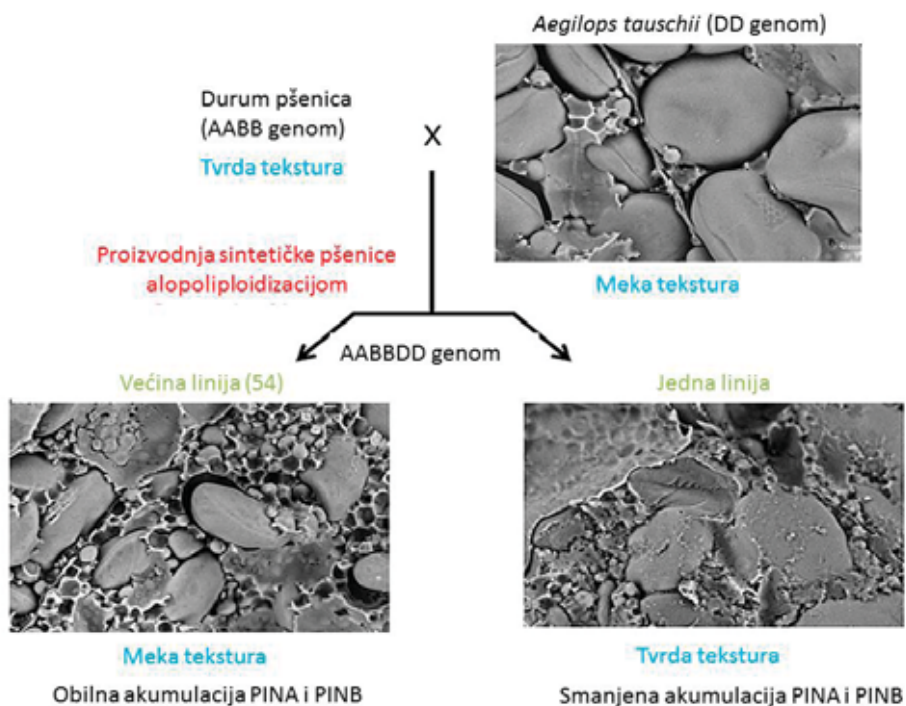
5.3. Tvrdoća zrna

Tvrdoća zrna, odnosno tekstura endosperma pšenice, je jedna od važnih karakteristika kvalitete, jer olakšava klasifikaciju pšenice i utječe na kvalitetu meljave (prinos meljave, veličinu čestica brašna, oblik i gustoću čestica brašna), pečenja i proizvoda za krajnju upotrebu. Ova karakteristika može se definirati i mehaničkom silom koja se koristi za drobljenje zrna pšenice. S obzirom na to da zrno pšenice sadrži više slojeva, tvrdoća zrna ne ovisi samo o škrobnom endospermu, već i vanjskim slojevima zrna te prijanjanju endosperma uz te slojeve (Hourston i sur., 2016). Pšenica se prema teksturi endosperma kategorizira kao meka, srednje meka, srednje tvrda, tvrda i ekstra tvrda (Kent i Evers, 1994). Meka zrna pšenice lako se lome i rezultiraju velikim brojem netaknutih škrobnih zrnaca, dok tvrde vrste zrna zahtijevaju relativno više energije za meljavu, rezultirajući grubljim i oštećenim škrobnim zrcima. Uočeno je da škrobne granule genotipova s tvrdim zrnima imaju više utora u usporedbi s genotipovima s mekim zrnima (Brites i sur., 2008).

Smatra se da je tvrdoća zrna povezana s intenzitetom prijanjanja između škroba i proteina, ali postoji i mišljenje da tvrdoća zrna ovisi o kontinuitetu proteinskog

kompleksa (Hruškova i Švec, 2009). Isti autori ističu visoku korelaciju između sadržaja proteina i tvrdoće zrna. Ključne genetske odrednice tvrdoće zrna su dva puroindolinska gena, *Pina-D1* i *Pinb-D1*, smještena na Ha (od eng. riječi *Hardness*) lokusu na kromosomu 5D (Zahra i sur., 2020). Ha lokus sadrži gene koji kodiraju 15-kD marker protein koji se naziva friabilin, koji određuju mekoću pšenice. Friabilin se sastoji od tri glavna polipeptida: puroindolina a (*Pina*), puroindolina b (*Pinb*) i proteina mekoće zrna 1 (*Gsp-1*) (Mikulikova, 2007). QTL-ovi povezani s tvrdoćom zrna također su identificirani na kromosomima pšenice 2B, 2D, 4B i 6A u RIL (eng. *recombinant inbred line*) populaciji s mekim zrnom (El-Feki, 2013). Nešto kasnije, genetska mapa visoke gustoće olakšala je identifikaciju deset QTL-ova povezanih s mekim zrnima na kromosomima 5AL, 7AS, 1BS i 4BS (Kumar i sur., 2019). Nadolska-Orczyk i sur. (2009) su utvrdili da postoji negativna korelacija između tvrdoće zrna i mase zrna.

Tvrdoća zrna obično ovisi o različitim okolišnim, fizičkim i kemijskim čimbenicima, poput sadržaja proteina, staklavosti zrna (presjek endosperma brašnistih ili mekih zrna je bijele bolje, a kod staklastih poluproziran), veličine zrna, pentozana topivih u vodi, te sadržaju vlage i lipida. Razlike u tvrdoći pšenice vjerojatno proizlaze iz povezanosti između škrobnih zrnaca i skladišnih proteina. Staklaste, odnosno tvrde pšenice, su kompaktnije što uzrokuje raspršivanje svjetlosti s površine zrna i prolazak kroz zrno, dajući brašno boljih karakteristika kod pečenja. Tvrde sorte pšenice karakterizira veća hektolitarska i veća specifična masa zrna (Ugarčić i sur., 2016). U kontekstu tvrdoće zrna, polarni lipidi također imaju važnu ulogu. Greenblatt i sur. (1995) su utvrdili povezanost između polarnih lipida na vodom ispranim površinama pšeničnog škroba i friabilina, proteina povezanog s mekoćom zrna (Greenblatt i sur., 1995). Nadalje, Kim i sur. (2012) su sugerirali da proteini PINA i PINB interakcijski djeluju kako bi spriječili razgradnju polarnih lipida tijekom sazrijevanja sjemena i da je taj proces ključan za razvoj mekoće zrna. Naime, za postizanje meke teksture potrebna je prisutnost funkcionalnog para proteina PINA i PINB u endospermu (Miki i sur., 2020). U eksperimentu gdje je *Aegilops tauschii* Coss. s mekom strukturom zrna križan s durum pšenicom koja ima tvrdi teksturu zrna, većina dobivenih sintetičkih linija pšenice pokazala je meku teksturu s glatko zaobljenim zrcima škroba. Međutim, postojala je jedna iznimka koja je imala tvrdi teksturu sa zrcima škroba čvrsto povezanim s proteinskim kompleksom, što je rezultiralo smanjenim nakupljanjem proteina PINA i PINB (Slika 10). Prema tome, može se zaključiti da geni *Pina-D1* i *Pinb-D1* u krušnoj pšenici potječu od donora D-genoma pšenice *Aegilops tauschii*. Sorte durum pšenice, s druge strane, imaju vrlo tvrda zrna (s indeksom tvrdoće [HI] > 75) zbog odsutnosti D genoma, a time i Ha lokusa.



Izvor: Miki i sur. (2020)

Slika 10. Proizvodnja sintetičke heksaploidne pšenice (AABBDD genom)

U krušnoj pšenici, za postizanje fenotipa mekog zrna s indeksom tvrdoće (HI) manjim od 40, potrebna je ekspresija oba gena, *Pina* i *Pinb*, u njihovom divljem tipu, dok mutacije bez *Pina* ili *Pinb* rezultiraju tvrdim zrnima (Tu i Li, 2020). Manipulacija ekspresijom ovih gena u genotipovima, bilo s prisutnim ili odsutnim gena *Pina* i *Pinb*, ne samo da utječu na tvrdoću zrna i svojstva mljevenja u linijama krušne i durum pšenice, već također mijenja neke parametre kvalitete i interakciju skladišnih proteina.

6. Usvajanje hranjiva u zrno pšenice

U procesu razvoja zrna pšenice, ključnu ulogu ima usvajanje hranjiva, koje uključuje prijenos esencijalnih mineralnih elemenata iz raznih dijelova biljke prema zrnu, čime se osigurava njegov optimalan rast i razvoj. Osim atmosferskog kisika i vode dobivene iz tla, biljke obično trebaju 14 esencijalnih mineralnih elemenata. Šest od njih potrebno je u relativno velikim količinama i obično se nazivaju “makronutrijenti”. Makronutrijenti se sastoje od dušika (N), kalija (K), fosfora (P), sumpora (S), kalcija (Ca) i magnezija (Mg). Druga skupina “mikronutrijenata” ili “elementa u tragovima” potrebna je u mnogo manjim koncentracijama u biljnim tkivima, a čine ih klor (Cl), bakar (Cu), mangan (Mn), željezo (Fe), cink (Zn), kobalt (Co), molibden (Mo) i nikel (Ni). Međutim, ovaj je popis generalizacija i neki bi autori mogli uključiti minerale poput bora (B), natrija (Na) i silicija (Si) (Marschner, 2012).

Visoka učinkovitost mobilizacije hranjivih tvari intrinzična je značajka starenja biljaka. Ovaj složeni proces, koji na kraju dovodi do smrti fotosintetskih i drugih vegetativnih organa, uključuje dobro koordiniranu aktivaciju gena koji kodiraju kataboličke enzime. Ti enzimi postupno razgrađuju stanične komponente (proteine, polisaharide i nukleinske kiseline), a nastali šećeri, nukleozidi i aminokiseline se zatim premještaju floemom do tkiva u razvoju gdje sudjeluju u biosintezi. Jednim imenom sve ove procese zajedno se naziva reutilizacija elemenata (Distelfeld i sur., 2014; Vukadinović i Vukadinović, 2016). Dakle, senescencija (starenje) u biljkama predstavlja specijaliziranu vrstu programirane stanične smrti koja olakšava učinkovit prijenos hranjivih tvari iz dijelova biljaka koji stare (izvor, eng. *source*) prema vegetativnim ili reproduktivnim dijelovima u razvoju, primjerice plod ili zrno (izljev, eng. *sink*). Iako je dobno ovisna i vezana uz dozrijevanje, razni vanjski čimbenici poput okolišnih signala, te biotičkih i abiotičkih stresora, također mogu potaknuti senescenciju.

Reutilizacija hranjivih elemenata usko je integrirana s učinkovitošću unosa hranjivih tvari u biljke. Zrna pšenice u razvoju dobivaju veliki dio mobilnih esencijalnih makro- i mikronutrijenata iz tkiva koji stare, s manjim doprinosom unosa iz korijena (Kichey i sur., 2007). Primjerice, sitnozrnate žitarice, poput pšenice, ječma i riže mogu mobilizirati do 90 % dušika iz vegetativnih biljnih dijelova u zrno, dok u kukuruzu 35 – 55 % dušika iz zrna potječe od unosa iz tla nakon cvjetanja (Gregersen i sur. 2008). Rana i/ili učinkovita remobilizacija hranjivih tvari povezana je s višom koncentracijom proteina u zrnu, ali i s višim koncentracijama poželjnih mikronutrijenata kao što su željezo i cink (Waters i sur., 2009). Masa zrna regulirana je kroz reproduktivnu fazu, od razvoja klasa do zriobe, a na nju utječu značajke fotosintetskih tkiva i organa i mjesta pohrane asimilata kao što su kapacitet cvjetova

i broj stanica zrna (dioba stanica tijekom ranog razvoja endosperma zrna). Tako se npr. povećanjem fotosinteze lista zastavičara i ugljikohidrata topivih u vodi povećava masa 1000 zrna, a time i urod zrna (Zhang i sur., 2021).

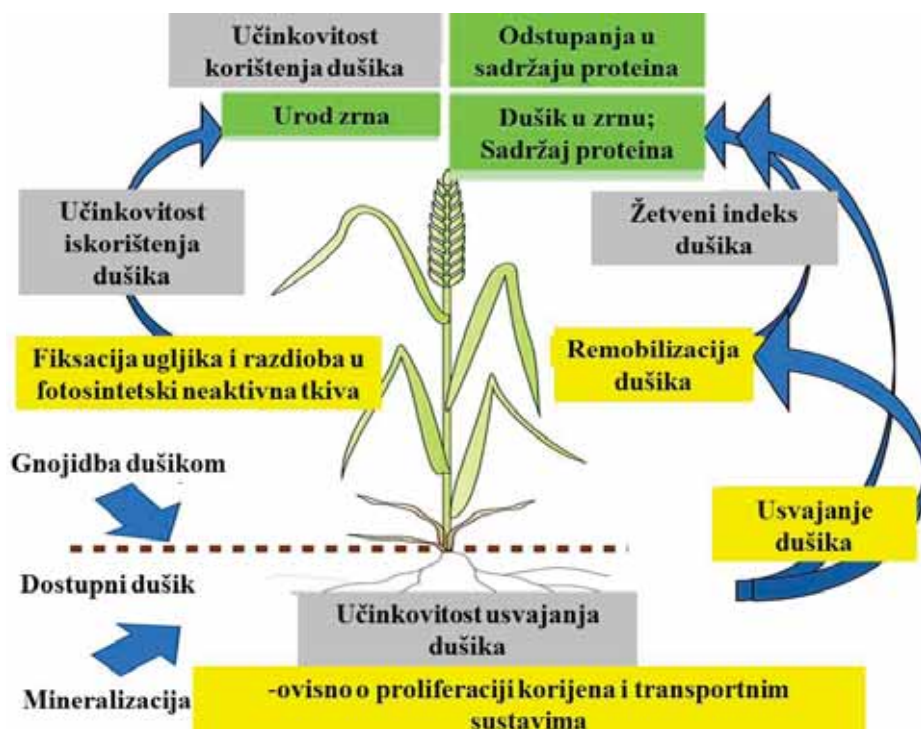
6.1. Dušik (N)

Nakon ugljika, dušik je obično najzastupljeniji element u suhoj tvari biljaka, što ukazuje na njegovu istaknutu ulogu u svim aspektima biljnog metabolizma. Većina biljnog dušika je fiksirana u aminokiselinama i proteinima (oko 85 %) te nukleinskim kiselinama (oko 5 %), što ostavlja oko 10 % u anorganskim i niskomolekularnim organskim spojevima dušika, koji su relativno pokretljivi u cijeloj biljci. Najvažnija je funkcija dušika osigurati amino skupine u aminokiselinama, građevnim blokovima svakog proteina. Dušik je također ugrađen u strukturu prstena purinskih i pirimidinskih baza nukleotidima, sastavnih dijelova nukleinskih kiselina. No nukleotidi također imaju mnoge vitalne funkcije, kao što su energetska homeostaza, signalizacija i regulacija proteina. Osim toga, dušik je bitan u biokemiji mnogih neproteinskih spojeva, kao što su koenzimi, fotosintetski pigmenti, sekundarni metaboliti, poliamini, signalne molekule i neki fosfolipidi. Središnja uloga dušika u sintezi proteina znači da je njegova ishrana međusobno povezana s onom drugih nutrijenata, uglavnom ugljika i kalija (Mathuis, 2013; Taiz i sur., 2015).

U pšenicu, dušik se prvo apsorbira te asimilira, a zatim translocira i remobilizira. Biljke usvajaju dušik u obliku nitratnih (NO_3^-) i amonijevih iona (NH_4^+), od kojih se većina asimilira u organski dušik koji se pohranjuje u tkivima (Alpuerto i sur., 2021). Dušik se remobilizira iz vegetativnih organa, uključujući listove i stabljiku, u zrna tijekom procesa starenja biljke i razvoja zrna. Reducirani dušik se translocira u obliku glutamata i glutamina, ali i kao aspartat, treonin i serin (Kichey i sur., 2007). Translokacija NO_3^- od korijena do izdanka zahtijeva katione za održavanje elektroneutralnosti, a to se obično postiže K^+ ionima. Stoga je odgovarajuća opskrba kalijem ključna za ishranu dušikom. U fazi nalijeivanja zrna, unos dušika je znatno manji od stvarne potrebe za akumulacijom dušika u zrnu, pa se velika količina dušika remobilizira iz vegetativnih organa. Zbog toga su u listovima zastavičarima zabilježene promjene u sadržaju metabolita, aktivnosti enzima i ekspresiji gena povezanih s asimilacijom i remobilizacijom dušika nakon cvatnje (Gregersen i Holm, 2007).

Urod i kvaliteta zrna u velikoj mjeri ovise o raspoloživosti dušika u tlu, količini dodanoga dušičnog gnojiva te o učinkovitosti pojedinog genotipa da učinkovito koristi biljci raspoloživi dušik (Gaju i sur., 2011). Međutim, biljke su u stanju iskoristiti samo 30 do 40 % dušika dodanog putem gnojiva, dok se preostali dio zadržava u okolišu. Učinkovitost korištenja dušika (eng. *Nitrogen use efficiency*, NUE) koja se mjeri kao omjer mase suhe tvari zrna (kg) i količine dostupnog dušika (također u kg) iz tla i gnojiva, a može se podijeliti u dvije komponente: (i) učinkovitost usvajanja dušika (eng. *Nitrogen uptake efficiency*) i (ii) učinkovitost iskorištenja dušika (eng. *Nitrogen utilisation efficiency*). Učinkovitost usvajanja dušika predstavlja omjer količine dušika (kg) koji je usjev usvojio i količine dušika (kg) dostupnog iz tla i

primijenjenog gnojiva (Slika 11). Učinkovitost iskorištenja dušika je masa suhe tvari zrna (kg) po kg usvojenog dušika. Matematički, ukupna učinkovitost korištenja dušika je produkt ovih dviju komponenti (Hawkesford i Riche, 2020). Postoji i pojam žetvenog indeksa dušika, koji predstavlja udio ukupnog dušika koji je usjev usvojio, a koji se dalje raspodjeljuje u zrno. Ovaj indeks je modifikacija žetvenog indeksa koji se odnosi samo na raspodjelu suhe tvari (Hawkesford i Riche, 2020). Važno je napomenuti da usjev s niskim urodom zrna može imati visok žetveni indeks dušika, ali istovremeno ostaviti značajnu količinu neiskorištenog dušika u tlu. Budući da se dušik dodan pšenici u kasnijoj fazi razvoja većinom raspodjeljuje na zrno u razvoju, teoretski je moguće opskrbiti biljke dušikom ranije u periodu vegetativnog rasta kako bi se dobio maksimalni prinos, a potom kasnom opskrbom dušičnim gnojivom osigurati visok sadržaj proteina u zrnu. Doista, utvrđeno je da je primjena dušičnog gnojiva na krušnu pšenicu nakon oprašivanja dala veću koncentraciju proteina u zrnu, posebno u onim usjevima koji su dali dovoljno dobar prinos. Osim toga, gnojidba dušikom mora odgovarati proizvodu za koji se uzgaja pojedini usjev. Krušna pšenica mora imati visok sadržaj proteina u zrnu, tako da ukupni prinos može biti žrtvovan, dok kod pšenica koje se uzgajaju za stočnu hranu ukupni prinos je bitniji, iako bi sadržaj proteina trebao biti što viši.



Izvor: Hawkesford i Riche (2020)

Slika 11. Mjere učinkovitost korištenja dušika (prikazano u sivim okvirima). Fiziološki proces prikazan je u žutim okvirima. Strelice s desne strane pokazuju kretanje dušika.

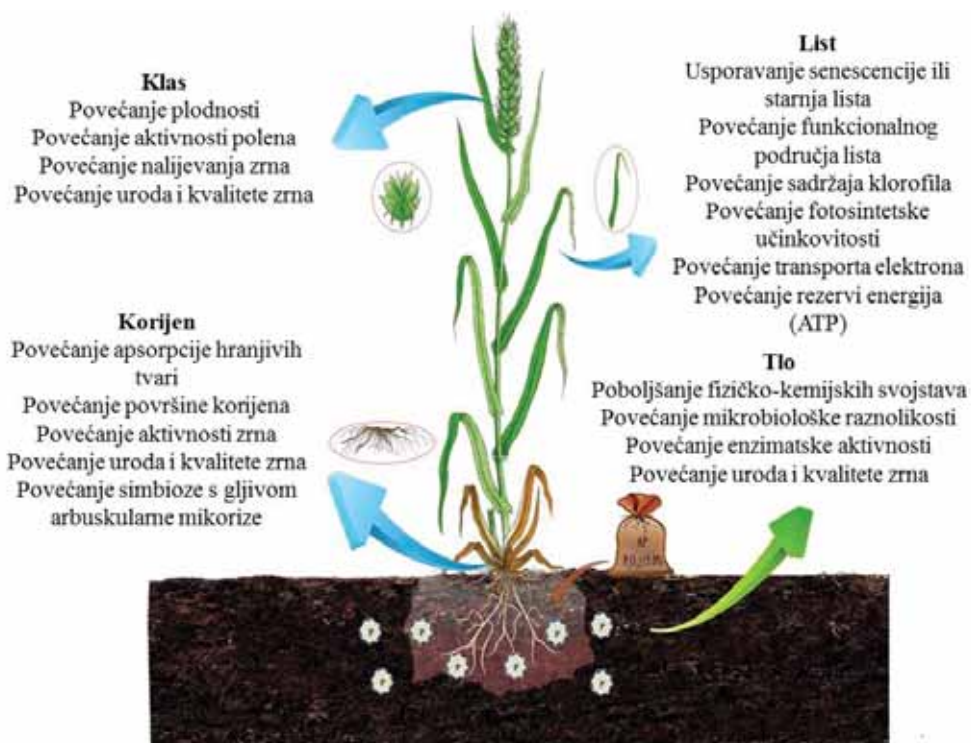
U pšenici se između 50 i 95 % dušika u zrnu prije žetve akumulira remobilizacijom dušika pohranjenog u izdancima i korijenu prije cvatnje, pri čemu su listovi i stabljika najvažniji izvori dušika, dok korijen i pljevice doprinose s oko 10 odnosno 15 % (Gaju i sur., 2014). Dakle, akumulacija dušika prije cvatnje predstavlja primarni izvor dušika za zrno. U uvjetima smanjene dostupnosti dušika u tlu, razvoj pšenice može biti ograničen kapacitetom fotosintetskih tkiva i organa, dok u uvjetima gdje je na raspolaganju dovoljno dušika u tlu, ograničavajući faktor za razvoj zrna često postaje kapacitet pohrane asimilata. Neki autori ističu da je genetska kontrola remobilizacije dušika povezana s regulacijom procesa senescencije listova (Masclaux i sur., 2001). Razvoj genotipova koji učinkovito koriste dušik predstavlja jedan od pristupa smanjenju potrebe za dušičnim gnojivima, uz istovremeno održavanje zadovoljavajućih uroda i kvalitete proteina u zrnu.

6.2. Fosfor (P)

U stanicama se fosfor može pojaviti u anorganskom ili organskom obliku. Topljivi oblici anorganskog fosfora su ortofosfat (Pi) ili H_2PO_4^- te pirofosfat (PP). Kao sastavni dio organskih molekula, fosfor se može vezati putem reakcija esterifikacije na mnoge sporedne skupine kao što su hidroksilne skupine šećera i alkohola. Alternativno, Pi se veže na druge fosfatne skupine preko pirofosfatnih veza. Stvaranje i razgradnja ovih esterskih i pirofosfatnih veza jedan je od središnjih mehanizama u staničnoj energetske homeostazi. Prema tome, fosfor je element koji je potreban za prijenos energije (adenozin trifosfat, ATP je najveće unutarstanično skladište energije) i prijenos signala te za izgradnju strukture nukleinskih kiselina i fosfolipida. Usvajanje fosfora odvija se aktivnim transportom ortofosfatnih iona iz tla u korijen pomoću specifičnih proteina prijenosnika koji se nalaze na staničnim membranama korijenskih stanica. Ovaj proces zahtijeva energiju jer se fosfor često mora transportirati protiv koncentracijskog gradijenta (Raghothama i Karthikeyan, 2005). U pšenici postoje dva prijenosnika fosfora: *TaPHT1.2* i *TaPHT1.4* (Hasan i sur., 2016). *TaPHT1.2* je prijenosnik fosfora koji većinom dolazi do izražaja u korijenu, a inducira se u uvjetima nedostatka fosfora. *TaPHT1* je češće eksprimiran u korijenu fosforom-učinkovitih genotipova. *TaPht1.4* je transporter fosfora koji se specifično eksprimira u korijenu i snažno se inducira u uvjetima nedostatka fosfora. Osim strukturnih uloga, fosfor je bitan za regulaciju aktivnosti proteina. Reverzibilna fosforilacija proteina, koja je posredovana kinazama i fosfatazama, jedan je od najistaknutijih mehanizama za modulaciju aktivnosti proteina (Marschner, 2012).

Potrebe za fosforom u zrnu zadovoljavaju se iz dva izvora: unutarstanična redistribucija fosfora iz različitih biljnih organa i istodobno usvajanje fosfora iz egzogenih izvora (zalihe u tlu i primijenjeno gnojivo). Međutim, usvojena količina fosfora u zrnu ovisi o genotipu, uvjetima uzgoja prije i poslije cvatnje, te raspoloživosti vode. Remobilizacija fosfora povećava se u uvjetima njegovog nedostatka ili tijekom razdoblja nalijevanja zrna, što je posljedica starenja biljnog tkiva (Etienne i sur., 2018). Vegetativni organi biljke služe kao privremena skladišta fosfora prije njegove konač-

ne remobilizacije u zrno (El Mazlouzi i sur., 2020; El Mazlouzi i sur., 2022). Da bi povećale iskoristivost fosfora biljke su modificirale strukturu i fiziologiju korijena (npr. rast korijena i lučenje fosfataze) kako bi povećale masu korijena i mobilizirale više fosfora iz tla (Schachtman i sur., 1998). Batten (1992) ističe da žetveni indeks fosfora u pšenici, koji se mjeri kao udio fosfora u zrnu u odnosu na ukupan fosfor u nadzemnim organima, varira od 30 do 90 % u poljskim uvjetima. Nedostatak fosfora u ranoj fazi razvoja biljaka ima izraženije negativne posljedice na produktivnost pšenice nego nedostatak fosfora u kasnijim fazama (Grant i sur., 2001). U slučaju nedostatka fosfora, smanjit će se urod zrna kao rezultat smanjenoga broja produktivnih vlati. Optimalna primjena fosfora ključna je za održavanje ravnoteže fotosintetskih tkiva i organa s mjestima pohrane asimilata, ublažava dehidraciju i oksidativni stres te povećava otpornost biljke na stres, a time i produktivnost pšenice. Također, optimalnim primjenama fosfora potiče povećanje površine i aktivnosti korijena, funkcionalne lisne površine, poboljšava fotosintetsku učinkovitost i proizvodnju fotoasimilata u listovima, smanjuje sterilnost cvjetova, a povećava vijabilnost polena, urod i kvalitetu zrna (Slika 12).



Izvor: Xu i sur. (2022)

Slika 12. Mehanizam otpornosti na niske temperature unošenjem optimalnih količina fosfora

6.3. Kalij (K)

Biljke sadrže otprilike 1 % kalija u svojoj suhoj tvari, što implicira potrebu za značajnim apsorpcijom ovog elementa. Slično nitratima, apsorpcija kalija u korijen biljke posredovana je putem više sustava s različitim stupnjevima afiniteta. Pasivni transport kalija odvija se kroz ionske kanale (niskog afiniteta). Za razliku od toga, aktivni transport, koji uključuje H⁺-spregnute kotransportere, odgovoran je za apsorpciju kalija s visokim afinitetom (Marschner, 2012). Kalij ima vrlo važnu ulogu u povećanju uroda zrna i poboljšanju kvalitete pšeničnih proizvoda (Singh i sur., 2011). Kalij je neophodan za sve žive organizme iz niza razloga, a najvažniji je njegova sposobnost aktiviranja mnoštva enzima. Aktivacija mnogih enzima ovisnih o K⁺ događa se u prisutnosti 50 – 80 mM K⁺, što je vrijednost koja je bliska onoj izmjerenoj u citoplazmi. Važan je za preživljavanje biljaka, sintezu ugljikohidrata i proteina te razvoj stanica što pomaže u održavanju ionske stanične ravnoteže, ali djeluje i kao aktivator enzima, te poboljšava translokaciju hranjivih tvari i povećava otpornost na stresne uvjete. Kalij je jedan od najvažnijih čimbenika koji doprinose turgoru stanica u biljkama te sudjeluje u elongaciji stanica i rastu biljaka. Osim navedenoga, kalij učinkovito koordinira odnos između fotosintetskih tkiva i organa s mjestom pohrane asimilata (eng. *source* i *sink*), sintezu škroba te transport i transformaciju produkata fotosinteze (Sharma i sur., 2022). Općenito se smatra da kalij ima ograničenu pokretljivost u tlu, što znači da je njegova pokretljivost veća od fosfora, ali znatno manja u usporedbi s drugim makronutrijentima poput dušika ili sumpora. Međutim, u biljci je kalij vrlo pokretan. Biljke lako mogu remobilizirati kalij iz starijeg u mlađe tkivo. Zbog toga se simptomi nedostatka kalija obično prvo pojavljuju na donjim (ili starijim) listovima, a kako se nedostatak kalija povećava, simptomi se šire uzlazno prema gornjim (mlađim) listovima.

Genotipovi pšenice pokazuju razlike u učinkovitosti usvajanja kalija, koje su često povezane s njihovim morfološkim svojstvima. U istraživanju Ruan i sur. (2015) se pokazalo da su kalij-učinkovitiji genotipovi imali povećanu biomasu i duljinu korijena i izdanka, kako u uvjetima s optimalnom gnojidbom kalijem, tako i u uvjetima nedostatka kalija, u usporedbi s kalij-neučinkovitim genotipovima. Razlike između kalij-učinkovitih i neučinkovitih genotipova postaju još izraženije nakon produženog izlaganja uvjetima nedostatka kalija. Na slici 13 prikazana je usporedba između klasova genotipova pšenice koji su tretirani kalijem (+K), i onih koji su se razvili bez dodatka kalija (-K). Klasovi tretirani kalijem bili su vizualno robusniji i dulji u odnosu na netretirane.



Izvor: Salih i sur. (2016)

Slika 13. Klasovi pšenice bez tretmana kalijem (-K) i dodatkom kalija (+K) u količini od 120 kg K₂O/ha

Istovremena primjena gnojiva (fosfor, kalij i sumpor) može poboljšati iskorištavanje dušičnih gnojiva i povećati učinkovitost korištenja dušika (Duncan i sur., 2018). Tijekom dvogodišnjeg istraživanja, primjena dušičnih gnojiva značajno je povećala broj plodnih vlati pšenice, dok primjena kalijevih gnojiva sama po sebi nije imala značajan utjecaj na svojstva pšenice koja doprinose urodu zrna. Međutim, kombinirana primjena obje vrste gnojiva dovela je do poboljšanja vegetativnog razvoja biljaka i povećanja broja plodnih vlati (Sharma i sur., 2022). Pretpostavlja se da urod zrna pšenice ne ovisi samo o količini dostupnog dušika u tlu, već i oblicima dušika, te da se ovaj proces može dodatno regulirati upotrebom kalija.

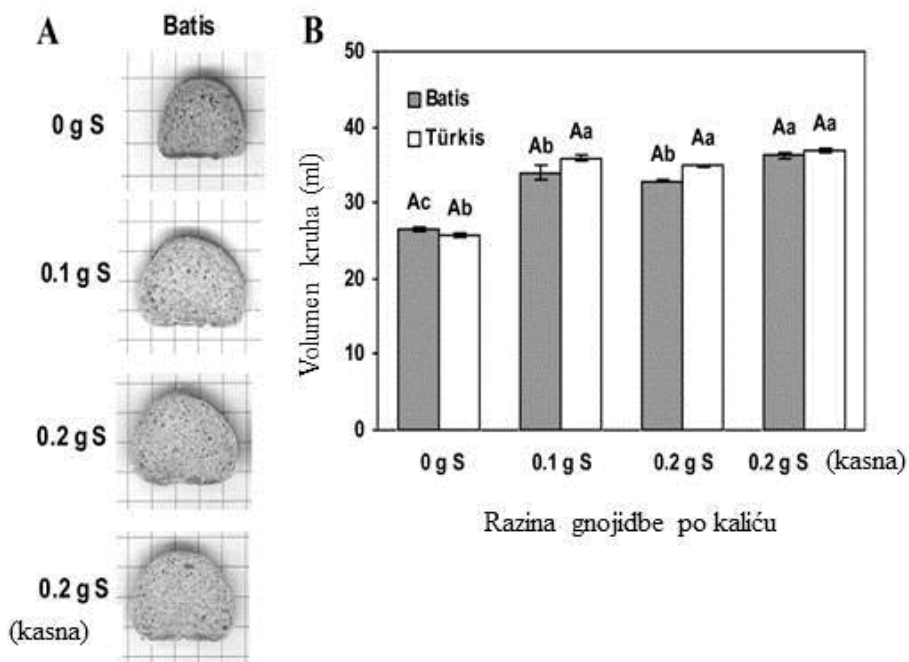
6.4. Sumpor (S)

Sumpor je sekundarni makronutrijent, odnosno esencijalan je i potreban biljkama u značajnim količinama, ali ipak u manjim količinama u usporedbi s primarnim makronutrijentima, kao što su dušik, fosfor i kalij. Njegova uloga je vrlo važna u metaboličkim procesima biljaka, te značajno utječe na njihov rast i razvoj. Sumporovi spojevi sudjeluju u detoksikaciji reaktivnih kisikovih jedinki koji nastaju pod utjecajem različitih abiotičkih i biotičkih stresova. Također, sumpor je važan sastojak aminokiselina, proteina i vitamina (Narayan i sur., 2022). Biljke primarno apsorbiraju sumpor iz tla kao u obliku sulfata. Apsorpcija i transport sulfata u biljkama su procesi ovisni o energiji, posredovani nizom različitih prijenosnika sulfata

(Smith i sur., 1995). Međutim, anionski oblik sumpora (SO_4^{2-}) je općenito prisutan u minimalnim količinama u tlu. Višak sulfata se pohranjuje kao slobodni sulfatni ioni, uglavnom u vakuolama. Ipak, sulfat koji apsorbira korijenje prvenstveno se transportira do listova, gdje se reducira u kloroplastima ili pohranjuje u vakuolama. Sumpor se u biljnom tkivu primarno pojavljuje kao sulfat ili u proteinima, a u manjim količinama prisutan je kao cistein i metionin, glutation, sulfolipidi i drugi sekundarni spojevi poput glukozinolata (Hawkesford, 2000). U zrnu pšenice, količina sumpora prisutna u drugim oblicima osim proteina je minimalna.

Smanjeni unos sumpora u pšenicu prvenstveno je posljedica korištenja visoko koncentriranih gnojiva koja ne sadrže sumpor. Ovaj nedostatak može se pojaviti rano u proljeće, prije nego što se organski sumpor mineralizira iz organske tvari tla i prije nego što korijen pšenice izraste u dubinu kako bi iskoristio ondje akumulirani sulfat. Nedostatke sumpora često je teže identificirati, vrlo su slični simptomima nedostatka dušika, a najčešće usjevi s nedostatkom sumpora pokazuju zaostajanje u rastu i odgođeno dozrijevanje. Osim toga, nedostatak sumpora može rezultirati slabim zametanjem sjemena i smanjenim urodom zrna, povezanim sa smanjenim brojem oplodjenih cvjetova. Također, manjak sumpora često se javlja u vlažnim tlima zbog velike pokretljivosti i redukcije sulfata u sumporovodik, koji zatim može ispariti ili reagirati s kationima željeza, bakra, mangana i cinka, stvarajući sulfide (Hussain i sur., 2022). U tlima sa suviškom vode i nedostatkom sumpora u vremenskom periodu od dvadesetak dana, mogući su gubici u urodu zrna od 32 do 94 %, a najmanji utjecaj je u fazi nalijevanja zrna, ali koliki će biti gubitak ovisi i o tolerantnosti sorte pšenice na suvišak vode. Tako je u stresnim uvjetima izloženost zrna sumporovodiku (H_2S) pokazala pozitivne učinke na klijavost, rast klijanaca, duljinu korijena i druge metaboličke procese u pšenici (Corpas i Palma, 2020).

Uslijed nedostatka sumpora povećava se količina skladišnih proteina siromašnih sumporom kao što su ω -glijadini i podjedinica glutenina visoke molekularne težine (HMW), na štetu sumporom bogatih proteina (Zhao i sur., 1999). Nedostatak sumpora najviše utječe na glijadine i glutenine, proteine odgovorne za kvalitetu tijesta (Slika 14). Naime, ravnoteža omjera dušika i sumpora ključna za osiguravanje kvalitete proteina u pšenici. Sumpor je sastavni dio aminokiselina koje sadrže SH skupinu i koje doprinose poboljšanoj kvaliteti proteina za pečenje (Zhao i sur., 1999). Međulančane disulfidne veze koje tvore podjedinice gliadina i glutenina bogate sumporom, utječu na elastičnost tijesta stabiliziranjem polimerne mreže koju tvore molekule glutena (Shewry i Tatham, 1997; Shewry et al., 2002). Smanjeni udio spojeva bogatih sumporom dovodi do tvrdog, manje elastičnog tijesta i manjeg volumena kruha čak i sa sličnim sadržajem proteina (Thomason i sur., 2007; Zörb i sur., 2009). Loša kvaliteta kruha nakon primjene dušičnih gnojiva u uvjetima nedostatka dušika može biti povezana s nedovoljnim koncentracijama sumpora u zrnu, visokim N/S omjerima i povezanim promjenama udjela proteinskih frakcija (Gooding i Davies, 1992).



Izvor: Zörb i sur. (2009)

Slika 14. Učinak različitih gnojidbi sumporom na

A) kruh kod sorte Batis; B) volumen kruha kod dvije sorte.

Mala tiskana slova označavaju statistički značajne razlike između različitih gnojidbi sumporom za jednu sortu, dok velika tiskana slova označavaju razlike između sorti za jednu razinu gnojidbe.

U slučaju da biljke pšenice imaju adekvatne rezerve sumpora, sumpor prisutan u listu zastavičaru može se mobilizirati i prenijeti u zrno pšenice u razvoju, posebno ako je opskrba sumporom u obliku sulfata ograničena tijekom cvatnje, omogućavajući održavanje potrebnog sadržaja sumpora u zrnu. Međutim, ako su biljke već od ranijih faza razvoja izložene nedostatku sumpora, akumulacija sumpora u listu zastavičaru bit će niska. To rezultira ograničenom količinom sumpora koja se može mobilizirati, što dalje utječe na smanjenje koncentracije sumpora u zrnu (Hawkesford, 2000). Prema tome, u periodu nalijevanja zrna mora biti prisutna odgovarajuća opskrba sumporom kako bi se optimizirala kvaliteta usjeva jer je remobilizacija sumpora iz vegetativnog tkiva u zrno ograničena. Smatra se da optimalna potreba pšenice za sumporom iznosi oko 15 do 20 kg po hektaru kako bi se osigurao optimalan rast, urod i kvaliteta zrna. Kako bi se zadovoljile te potrebe, razvijena su gnojiva s dodatkom sumpora, dostupna u čvrstom i tekućem obliku, često u kombinaciji s drugim elementima. Istraživanja također ukazuju na važnost sumpora u usvajanju i asimilaciji drugih elemenata, posebno u pogledu iskoristivosti dušika, sugerirajući pozitivnu interakciju između sumpora i dušika.

6.5. Kalcij (Ca) i magnezij (Mg)

Za razliku od ostalih makronutrijenata, kalcij (Ca) u biljkama ima jedinstvenu distribuciju. Većina kalcija se nalazi u staničnoj stijenci, čvrsto vezan ili izmjenjiv. Značajne količine akumuliraju se u vakuolama, dok je njegova koncentracija u citosolu relativno niska. Kalcij je ključan za održavanje stabilnosti staničnih stijenki, staničnih membrana i proteina koji se vežu na membrane te sudjeluje u regulaciji unutarstanične homeostaze (Shi i sur., 2022). Uloga kalcija kao strukturne ili regulatorne komponente makromolekula povezana je s njegovom sposobnošću koordinacije, koja osigurava stabilne, ali reverzibilne molekularne veze. Osim navedenih uloga, kalcij djeluje kao sekundarna glasnička molekula uključena u prijenos signala u biljkama (Tuteja i Mahajan, 2007). Biljke ga usvajaju korijenom te ksilemom transportiraju do izdanka, dok je njegova pokretljivost u floemu ograničena. Istraživanja na cjelokupnom genomu (eng. *genome wide association studies*, GWAS) identificirala su da kromosomi 1B, 2B, 2D, 3A, 3B, 3D, 6A, 6B i 7A kontroliraju koncentraciju kalcija u zrnu pšenice (Bhatta i sur., 2018).

Kalcijem su vrlo bogata karbonatna tla te njegova zastupljenost u tlu izravno ili neizravno utječe na raspoloživost drugih elemenata. Nedostatak kalcija se javlja u kiselim tlima na kojima je potrebno provoditi agrotehničku mjeru kalcizacije jer koncentracija kalcija utječe na pH tla (Vukadinović i Vukadinović, 2016). Prvi simptomi nedostatka kalcija su nekrotični listovi jer pektinaza (skupina enzima koji razgrađuju pektin, polisaharid koji se nalazi u staničnim stijenkama biljaka) uzrokuje autolizu staničnih stijenki i propadanje parenhima, utječući negativno na fotosintezu smanjujući koncentraciju klorofila u listovima.

Magnezij (Mg) ima ključnu ulogu u metabolizmu biljaka, posebno u sintezi klorofila te se u najvećim koncentracijama nalazi u kloroplastima gdje sudjeluje u apsorpciji svjetlosti i reakcijama asimilacije CO₂ (Tränkner i Jaghdani, 2019). Kao najzastupljeniji divalentni kation u biljnim stanicama, Mg²⁺ je uključen u regulaciju osmotskog tlaka, unutarstaničnu aktivnost enzima, sintezu proteina i nukleinskih kiselina te održavanje kationsko-anionske ravnoteže (Marschner i Marschner, 2012).

Dobro opskrbljene biljke magnezijem pokazuju povećan unos dušika, što može rezultirati povećanjem produktivnosti pšenice za 5 do 10 % (Wang i sur., 2020). U vapnenačkim i alkalnim tlima raspoloživost magnezija može biti smanjena zbog prisutnosti kalcija, bikarbonata (HCO₃⁻), magnezijevog karbonata i gipsa (Chaudhry i sur., 2021). Folijarnom primjenom magnezij se transportira floemom do korijena zbog velike pokretljivosti, a što doprinosi rastu korijena u kiselim tlima (Jezek i sur., 2014) dok gnojidba može biti manje učinkovita metoda zbog ispiranja magnezija uslijed slabijeg vezivanja za koloide tla. Osim folijarne primjene i gnojidbe, jedan od načina povećanja magnezija je genetska biofortifikacija koja uključuje stvaranje sorti s višim sadržajem Mg²⁺ i genetsku modifikaciju nekih gena povezanih s tolerancijom na nedostatak magnezija.

Nedostatak magnezija smanjuje koncentraciju klorofila, utječe na fotosintezu, aktivaciju enzima, raspodjelu i iskorištavanje fotoasimilata, te u konačnici inhibira rast i razvoj pšenice rezultirajući smanjenjem uroda zrna.

7. Mikroelementi u zrnu pšenice

Mikroelementi (mikronutrijenti ili mikrohranjiva) su vrlo važni za rast i razvoj biljaka jer su strukturne komponente enzima i proteina odgovornih za vitalne fiziološke funkcije. Pšenica na globalnoj razini doprinosi s 14 % dnevnog unosa bakra (Cu), 11 % cinka (Zn), 15 % željeza (Fe) i 13 % magnezija (Mg), pri čemu se magnezij kategorizira kao makroelement (Hao i sur., 2022). S obzirom na to da pšenica sadrži relativno niske razine esencijalnih mikroelemenata (npr. Fe, Zn, Cu i Mn) u zrnu, postoji potreba za povećanjem koncentracije ovih mineralnih hranjivih tvari u zrnu pšenice kako bi se smanjila učestalost nedostatka mikronutrijenata u ljudskoj prehrani. U posljednjih nekoliko godina fokus se, osim rada na poboljšanju uroda zrna, otpornosti na bolesti i kvaliteti prerade, proširio i na poboljšanje nutritivne vrijednosti žitarica. To uključuje biofortifikaciju, odnosno proces povećanja sadržaja minerala i vitamina u žitaricama. Agronomska biofortifikacija, koja obuhvaća tehnike poput oblaganja zrna, folijarne primjene i primjene u tlo, pokazala se učinkovitom za povećanje hranjivih tvari u zrnu pšenice. Osim što je ekonomična, omogućuje održiviji pristup u usporedbi s genetskom biofortifikacijom, koja uključuje genetske modifikacije. U ovu kategoriju pripada i tradicionalan pristup razvoja sorti pšenice kroz klasično oplemenjivanje pšenice.

Količina mikroelemenata kao što su Fe, Zn, Mn i Cu u zrnu pšenice ovisit će o količini koju korijen biljke apsorbira tijekom faze razvoja zrna i količini elemenata koja se iz vegetativnih dijelova biljke prenosi u zrno putem floema. Stupanj remobilizacije elemenata putem floema značajno ovisi o pokretljivosti svakog pojedinog elementa u floemu (Garnett i Graham, 2005).

Visoke razine željeza uočene su u sortama krušne pšenice, dok značajne razlike u sadržaju natrija nisu primijećene među različitim vrstama za sadržaj natrija (Na) (Golea i sur., 2023). Bioraspoloživost željeza i cinka povezana je s prisutnošću anti-nutrijenata, kao što je fitat, ali isto ovisi i o promotorskim tvarima u žitaricama. Na primjer, fitinska kiselina (inozitol heksakisfosfat) je skladišni oblik fosfora biljaka i ima ključnu ulogu u klijanju i rastu klijanaca. Kombinacija dušičnog gnojiva s cinkom i željezom primijenjenim u tlo ili folijarno može povećati količinu, apsorpciju i remobilizaciju ovih elemenata u biljkama (Kutman i sur., 2011). No, često se spominje i sumpor koji utječe na metabolizam željeza i cinka. Iako se mineralna hranjiva obično primjenjuju zajedno, treba voditi računa da neki elementi, poput bakra i cinka, mogu biti u tzv. inhibitornoj konkurenciji, odnosno natjecati se za ista mjesta ulaska tijekom usvajanja korijenom (Dias i Cicero, 2016). S obzirom na to da je oko 50 % svjetske populacije pogođeno nedostatkom mikroelemenata, a njihova

prehrana se u velikoj mjeri oslanja na žitarice, rad na poboljšanju nutritivne vrijednosti zrna pšenice od velikog je značaja. Također, treba naglasiti da su mikroelementi (Zn, Cu, bor (B), Fe i Mn) jednako važni za usjeve kao i makroelementi (N, P i K).

7.1. Cink (Zn)

U biljkama i drugim biološkim sustavima cink postoji samo kao Zn^{2+} i ne sudjeluje u oksidacijsko-redukcijskim reakcijama. Metaboličke funkcije cinka temelje se na njegovoj snažnoj tendenciji stvaranja tetraedarskih kompleksa s ligandima dušika, kisika i osobito sumpora. Ovi tetraedarski kompleksi omogućuju cinku da ima katalitičku i strukturnu ulogu u enzimskim reakcijama. Prema istraživanju autora Kumssa i sur. (2015) približno 20 % svjetske populacije ne unosi dovoljno cinka kroz prehranu. U svom su istraživanju prikazali da je 2011. godine 3,5 milijarde ljudi izloženo riziku od nedostatka kalcija, a 1,1 milijarda od nedostatka cinka zbog neadekvatne prehrane. Nedostatak cinka može uzrokovati razne zdravstvene komplikacije, uključujući oštećenja imunološkog sustava, deformacije fizičkog rasta, povećanje smrtnosti i različitih infekcija, oštećenja deoksiribonukleinske kiseline (DNA), i veći rizik od razvoja malignih tumora (Maxfield i sur., 2023).

U negnojenom i nekontaminiranom tlu sadržaj cinka iznosi od 10 do 300 mg/kg, s prosjekom od oko 50 do 55 mg/kg (Noulas i sur., 2018). Nedostatak cinka češće se javlja na pjeskovitim, vapnenačkim, slanim i močvarnim tlima, kao i na onima koja su zbijena i bogata organskom tvari s visokim razinama dušika i fosfata. U tlu je vrlo mali dio ukupnog cinka, manje od 1 mg/kg, dostupno biljkama kao pristupačan oblik. Koncentracija cinka u zrnu pšenice varira u rasponima od 20 do 35 mg/kg, dok se za prehranu ljudi smatra poželjnom koncentracijom 40 – 50 mg/kg (Cakmak i Kutman, 2018). Cink je slabo pokretan u biljci, a njegov se nedostatak prvo primjećuje na mladom tkivu, manifestirajući se kraćim internodijima i manjim lisnim površinama. Istraživanje Ozturk i sur. (2006) pokazuje da je nakupljanje cinka u zrnu posebno izraženo tijekom ranog razvoja zrna, a najviše je koncentriran u klici i alueronskom djelu (perifernom dijelu endosperma). Ovo je vrlo važno jer se tijekom procesa meljave značajan dio cinka gubi zbog uklanjanja dijelova zrna bogatih cinkom.

Stabljika pšenice služi kao skladište cinka, koje se može iskoristiti kada je unos cinka iz korijena nizak (Garnett i Graham, 2005). Nadalje, Rashid i sur. (2019) ističu da veće količine cinka u zrnu doprinose boljoj klijavosti, bujnijim klijancima i većim urodima zrna. Budući da su rezerve u zrnu primarni izvor hranjivih tvari tijekom ranog razvoja klijanaca, važno je da zrno sadrži dovoljne količine cinka za normalan rast klijanaca dok novorazvijeni korijen ne počne sam unositi hranjive tvari u biljku.

Jednostavan način povećanja cinka u zrnu je oblaganje zrna cinkovim sulfatom ($ZnSO_4$) što je u nekim istraživanjima rezultiralo povećanjem produktivnih vlati i boljim urodom zrna (Farooq i sur., 2018). Cink je moguće primijeniti i folijarno u

poljskim uvjetima. Istraživanje Khokhar i sur. (2020) pokazalo je da starije sorte i divlji srodnici pšenice imaju veće koncentracije cinka u odnosu na modernije sorte. Stoga je vrlo važno u programu oplemenjivanja pšenice imati što veću genetsku divergentnost kako bi se križanjima u nove linije pšenice mogla unijeti željena svojstva za određene mikroelemente. Količina cinka u zrnu standardno se utvrđuje pomoću različitih analitičkih tehnika (spektroskopija atomske emisije s induktivno spregnutom plazmom (ICP-OES) i masena spektrometrija s induktivno spregnutom plazmom (ICP-MS)) koje precizno i kvantitativno utvrđuju koncentraciju cinka u zrnu pšenice. Za vizualnu procjenu koncentracije cinka u zrnu pšenice, zrno se može obojiti difenil tiokarbazonom (Slika 15), što omogućava uočavanje varijacija u koncentraciji cinka među različitim sortama pšenice. Ova metoda također pokazuje razlike u akumulaciji cinka unutar različitih dijelova zrna, s najvećom koncentracijom u klici i alueronskom sloju (vanjski dio endosperma).



Izvor: Ozturk i sur. (2006)

Slika 15. Obojenje zrna s difenil tiokarbazonom kako bi se procijenile količine cinka u zrnu kod tri različite sorte pšenice

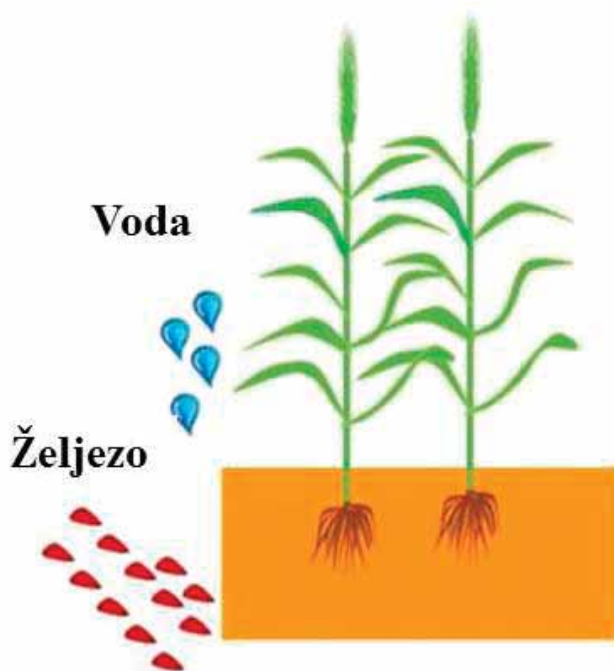
7.2. Željezo (Fe)

Željezo je biogeni element koji pripada grupi esencijalnih elemenata i ima ključnu ulogu u prijenosu kisika, što je od izuzetne važnosti za život biljaka i životinja. Sposobnost željeza da se podvrgne oksidacijsko-redukcijskim reakcijama ($\text{Fe}^{+2} \leftrightarrow \text{Fe}^{+3} + \text{elektron}$) ključna je za njegove funkcije u metabolizmu u hemskim, nehemskim ili koordiniranim proteinskim strukturama. Hem proteini sadrže željezo u kompleksu porfirinskog prstena. Dobro poznati hem proteini citokromi sudjeluju u transportu elektrona u fotosintezi između dva fotosustava u kloroplastima i u disanju u oksidativnoj fosforilaciji u mitohondrijima. Drugi proteini koji sadrže hem su katalaza, peroksidaze i leghemoglobin. Uloge željeza u ljudskom organizmu su mnogostruke jer sudjeluje u velikom broju metaboličkih procesa, uključujući transport kisika, sintezu DNA i transport elektrona. Međutim, željezo u prevelikim količinama može uzrokovati oštećenja tkiva jer može potaknuti stvaranje slobodnih radikala (Abbaspour i sur., 2014). S druge strane, nedostatak željeza utječe na više od 2 milijarde ljudi na svjetskoj razini te je i dalje je glavni uzrok anemije (Wani i sur., 2022). Prema podacima Svjetske zdravstvene organizacije, oko 25 % svjetske populacije pati od anemije.

Količina topivog i dostupnog željeza u tlu je vrlo niska, iako je četvrti po redu metal zastupljen u tlu. U tlu i biljkama nalazi se kao dvovalentni kation ili u odgovarajućim spojevima. Vrlo lako mijenja valentno stanje i može graditi složene spojeve. U procesima razgradnje minerala željezo se oslobađa te vrlo brzo obnavlja sekundarne minerale u kiselim tlima. Svježe taloženi minerali željeza su u obliku amorfnih koloida dostupni za ishranu biljaka. Nedostatak željeza najčešće je zabilježen u sušnim regijama zajedno s visokim pH i na vapnenačkim tlima (Vukadinović i Vukadinović, 2016). Biljke ga ne mogu lako usvojiti jer u alkalnom tlu najčešće poprima oblik trovalentnog oksida željeza (Fe^{3+}) koji je nepristupačan za biljke. Kada biljka usvoji željezo pomoću korijena ono se mora vezati s drugim molekulama i prenositi u obliku kompleksa u biljci. Oblik iona Fe^{3+} je slabo topljiv, a dvovalentni ion željeza (Fe^{2+}) je štetan za biljne stanice, te se nestabilniji Fe^{2+} ion u vodenoj otopini u prisutstvu kisika lako oksidira u Fe^{3+} ion (Schuler i sur., 2012).

U biljkama željezo sudjeluje kao katalitički kofaktor u nekoliko vitalnih procesa uključujući fosforilaciju, fotosintezu i biosintezu klorofila (Schmidt i sur., 2020), a njegova pokretljivost kroz floem je umjerena. Utvrđeno je da sadržaj željeza u zrnu različitih sorti pšenice i na različitim lokacijama varira od 11 do 80 $\mu\text{g/g}$, s prosječnom vrijednošću od 30 $\mu\text{g/g}$ (Velu i sur. 2014). Slično cinku, željezo se nalazi u aleuronskom sloju endosperma i klici zrelog zrna, dok je u škrobnom endospermu iz kojeg se dobiva bijelo brašno koje se najviše konzumira, prisutno u manjim količinama. Koncentracije željeza u zrnu sorti moderne tetraploidne (ssp. *durum*) i heksaploidne (ssp. *aestivum*) pšenice su znatno niže i manje varijabilne u usporedbi s divljim tetraploidnim i diploidnim pšenicama, posebno u uvjetima uzgoja na tlu s nedostatkom željeza (Cakmak i sur., 2000).

Metode oplemenjivanja pšenice pokazale su se uspješnim u uvođenju novih alela za povećanje sadržaja željeza u zrnu (Wani i sur., 2022). Osim toga, jedno istraživanje je pokazalo da navodnjavanje pšenice vodom uz prethodno oblaganje zrna pšenice s manjim količinama željeza (Slika 16) rezultira boljim klijanjem, rastom klijanaca, relativnim sadržajem vode i fotosintetskom učinkovitosti biljaka u usporedbi sa zrnima pšenice obloženim većim količinama željeza (Sumbal i sur., 2023). Iako se tijekom prerade pšenično brašno obično obogaćuje mikro ili makroelementima, biofortifikacija - razvoj novih sorti pšenice s većim sadržajem željeza u zrnu, predstavlja učinkovitije rješenje (Borrill i sur., 2014). S druge strane, gnojidba pšenice željezovim (II) sulfatom (FeSO_4) nije pokazala značajne razlike u rastu biljaka u odnosu na kontrolne biljke (Garnett i Graham, 2005).



Izvor: Sumbal i sur. (2023)

Slika 16. Navodnjavanje vodom uz sjetvu zrna pšenice obloženih željezom

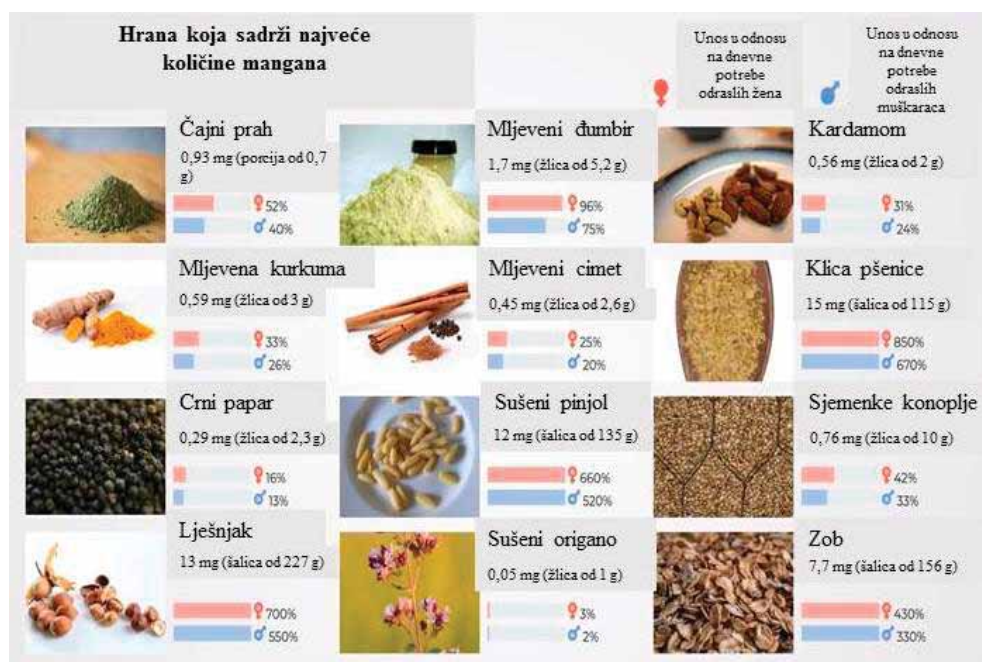
7.3. Mangan (Mn)

Mangan je važan esencijalni mikroelement čiji nedostatak može uzrokovati zdravstvene probleme kod ljudi. Kako je komponenta različitih enzima, mangan je uključen u metabolizam aminokiselina, kolesterola, glukoze i ugljikohidrata, uklanja reaktivne kisikove jedinice i sudjeluje u imunološkom odgovoru organizma, a njegov nedostatak može imati i negativne učinke na različita neurološka stanja (Li i Yang, 2018).

Dostupnost mangana u rizosferi kontrolirana je kombiniranim učincima sadržaja mangana u tlu, svojstvima tla, karakteristikama biljke i interakcijama korijena biljke s mikroorganizmima i okolnim tlom. Biogeokemija mangana u tlima je složena jer je prisutan u nekoliko oksidacijskih stanja (0, 2, 3, 4, 6 i 7), a dvovalentni mangan (Mn^{2+}) najdostupniji je oblik mangana u tlu. Mobilizacija Mn^{2+} nastaje zakiseljavanjem rizosfere otpuštanjem H^+ ili niskomolekularnih organskih kiselina iz biljaka. Biljke primarno apsorbiraju mangan kao slobodni Mn^{2+} ion iz otopine tla, a može se apsorbirati i u kompleksima, s biljnim i mikrobnim organskim ligandima ili sa sintetskim helatima. Mangan bi u tlu trebao biti u optimalnim količinama jer u višim koncentracijama smanjuje dostupnost željeza, bakra, bora i cinka u tlu (Fageria, 2009). Kod pšenice nedostatak mangana manifestira se slabijim razvojem korijena, lošijom proizvodnjom produktivnih vlati i pojavom kloroze na listovima, budući da mangan sudjeluje u biosintezi klorofila (Grundmeier i Dau, 2012). Osim toga, mangan je slabo pokretljiv kroz floem što dodatno otežava njegovu translokaciju do zrna. Postoje razlike među vrstama i genotipovima unutar vrsta u sposobnosti remobilizacije mangana iz različitih dijelova biljke. Utvrđeno je da je većina mangana iz vegetativnog tkiva pšenice mobilizirana unutar prva dva tjedna nakon cvatnje. Međutim, mangan je mobiliziran samo iz korijena i izdanaka, koji imaju izravnu ksilemsku vezu s klasom, a ne iz listova. Također, mobilizacija je bila veća u uvjetima nedostatka mangana nego u optimalnim uvjetima. Ta odsutnost mobilizacije mangana iz listova ukazuje da se mangan u listovima nalazi u netopljivim kompleksima.

Folijarno prskanje pšenice manganom može značajno povećati urod zrna za 1,44 % do 5,15 %, a koncentracija mangana u zrnu može porasti za 24,0 % do 28,3 % (Dhaliwal i sur., 2011). Također, primjena manganova sulfata ($MnSO_4$) u tlo (0,05 – 0,2 %) je značajno smanjila koncentraciju kadmija u zrnu pšenice (Wang i sur., 2021).

U zreloom zrnu, klica ima do 50 puta veću koncentraciju mangana od endosperma, što je važno za klijanje zrna i uspostavu klijanaca. No i kada je riječ o izvorima mangana u prehrani, klica pšenice je jedan od najboljih izvora. Na primjer, šalica pšeničnih klica teška 115 g sadrži 15 mg mangana, što je oko 850 % dnevnih potreba za žene i 670 % za muškarce (Slika 17). Nasuprot tome, čajna žličica integralnog pšeničnog brašna teška 2,85 g sadrži samo 0,1 mg mangana, što predstavlja oko 5 % dnevnih potreba za žene i 4 % za muškarce.



Izvor: <https://www.soupsage.com/food-groups-nutrition/food-high-in-manganese>

Slika 17. Najbolji izvori mangana u hrani

7.4. Bakar (Cu)

Dostupnost bakra je preduvjet za rast i razvoj biljaka. Sadržaj bakra u tlima kreće se od 2 do 100 mg/kg, s prosječnom vrijednošću od 30 mg/kg, ali većina ovog bakra nije dostupna biljkama. Koncentracija bakra u biljnim tkivima varira ovisno o vrsti, razvojnom stadiju i okolišnim čimbenicima kao što su opskrba dušikom i kemijska svojstva tla. Na primjer, dostupnost bakra u tlima smanjuje se iznad pH 7,0 zbog blago bazičnih pH uvjeta koji pogoduju vezanju bakra na kemijske komponente tla. Suprotno tome, dostupnost bakra povećava se u kiselim uvjetima tla zbog povećanja Cu iona u otopini tla. Nedostatak bakra najčešći je u tlima s visokim udjelom organske tvari, ali i u alkalnim tlima s pH 7,5 ili višim od toga. Kod ljudi i životinja, nedostatak bakra rezultira defektima u vezivnom tkivu koji dovode do problema u krvožilnom i koštanom sustavu, ali i anemije povezane s neispravnim metabolizmom željeza (Uauy i sur., 1998).

S obzirom na to da je bakar osnovna strukturna komponenta enzima ključnih za stanični redoks i reakcije prijenosa elektrona u biljkama, neophodan je i u metabolizmu ugljikohidrata i dušika te se u slučaju manjka bakra biljka sporije razvija (Farooq i sur., 2022). Bakar je pohranjen unutar biljnih stanica, i to u citosolu, endoplazmatskom retikulumu, unutarnjoj membrani mitohondrija, stromi kloroplasta,

lumen tilakoida i apoplastu (Yasmeen i sur., 2017). Budući da se bakar primarno akumulira u korijenu, s ograničenim prijenosom u nadzemne organe, toksičnost bakra može negativno utjecati na rast korijena, smanjiti broj i duljinu korijenovih dlačica te oštetiti kutikulu korijena (Zhang i sur., 2008). Bakar je također nužan u sintezi lignina koji je ključan za čvrstoću stanične stijenke.

Simptomi nedostatka bakra uključuju žutilo listova, reducirani rast te blijedo zelene listove koji lako otpadaju. Jedno istraživanje pokazalo je da se s povećanjem koncentracije bakra smanjuje postotak klijavosti, duljina korijena i broj bočnih korijena (Singh i sur., 2007). Neuspjeh u translokaciji bakra do reproduktivnih organa (prašnici i tučak), može negativno utjecati na plodnost oprašivanja i razvoj zrna (Rahmati Ishka i Vatamaniuk, 2020). Bakar se remobilizira iz starijeg lišća zajedno s dušikom. Iako se nedostatak bakra može nadoknaditi primjenom gnojiva na bazi bakra, ovaj pristup nije u potpunosti ekološki prihvatljiv i može povećati nakupljanje toksičnih razina bakra u tlu (Sheng i sur., 2021). Međutim, folijarna primjena bakra pokazala se korisnom za povećanje uroda zrna, posebice kada se primjenjuje u kasnijim fazama razvoja, naročito u fazama 6 i 10 po Feeke-sovoj skali (Karamanos i sur., 2004). Biljke pri nedostatku bakra mogu zaostati u razvoju, a u kasnijim fazama razvoja mogu se pojaviti simptomi venuća i uvrtnja listova (Slika 18).



Izvor: <https://brandt.co/copper-applied-to-wheat/>

Slika 18. Simptomi nedostatka bakra kod pšenice

7.5. Bor (B)

Bor je element čija je uloga u biljkama višestruka, od sudjelovanja u diobi stanica, produljenju u meristemskim tkivima, formiranju stanične stijenske, rastu listova, odnosima vode, apsorpciji iona, do sudjelovanja u metabolizmu ugljikohidrata (Abdel-Motagally i El-Zohri, 2018). Smatra se jednim od najvažnijih mikroelemenata za normalan rast i razvoj biljaka. Osim toga, pri kasnijim rokovima sjetve, može povećati tolerantnost na toplinski stres u kasnijim fazama razvoja (Ijaz i sur., 2023). pH tla je jedan od najvažnijih čimbenika koji utječu na dostupnost bora za biljke budući da je ravnoteža između borne kiseline i borata u otopini tla ovisna o pH, a samo se borna kiselina može usvajati pasivnom difuzijom. Kod pH vrijednosti tla ispod 7,99 % bora je prisutno kao borna kiselina, koja je lako dostupna, ali se lako može isprati. U alkalnim tlima, međutim, više bora je prisutno u obliku boratnog aniona, koji se može adsorbirati na organskoj tvari, oksidima i mineralima gline.

U poljskim uvjetima simptomi nedostatka bora se počinju primjećivati u reproduktivnoj fazi kada može doći do neuspjelog razvoja cvjetnih pupova tj. cvjetova, sterilnosti polena, što u konačnici rezultira smanjenim brojem zrna i nižim urodom zrna (Bell, 1997). Tijekom reproduktivne faze potrebno je osigurati 8 – 10 mg bora po kilogramu zrna kako bi se izbjegli gubici uroda zrna kao rezultat sterilnosti. Pšenica generalno neće patiti od nedostatka bora ako sadrži više od 4 mg bora po kilogramu klasova ili više od 7 mg bora po kilogramu listova zastavičara (Rerkasem i Jamjod, 2004). Istraživanje Abdel-Motagally i El-Zohri (2018) pokazalo je da primjena bora u fazi pojave lista zastavičara značajno poboljšava sva svojstva rasta i agronomskih parametara (visinu biljke, duljinu klasa, broj klasova po m², urod zrna po biljci, masu 1000 zrna i ukupan urod zrna) pri vodnom stresu (50 % od optimalne količine vode potrebne za pšenicu), u usporedbi s biljkama koje nisu tretirane borom. Nadalje, u istraživanju Zada i Afzal, (1997) primjena bora je više povećala urod zrna nego primjena željeza. Isto tako, folijarna primjena bora u količini od 2 kg/ha rezultira bujnijim rastom usjeva i boljim parametrima uroda zrna (Ijaz i sur., 2023).

8. Korisni ili beneficianalni elementi za pšenicu

8.1. Silicij (Si)

Silicij (Si) je drugi najzastupljeniji element u zemljinoj kori. Budući da silicijevi dioksidi čine više od 50 % tla, sve biljke koje se ukorjenjuju u tlu sadrže silicij u svojim tkivima. Međutim, dugo se nije obraćalo pozornost na utjecaj silicija na rast biljaka. Naime, za razliku od drugih hranjivih tvari, simptomi nedostatka silicija nisu lako uočljivi u biljkama. Iako silicij nije esencijalan element za rast biljaka, blagotvorni učinci silicija uočeni su u širokom rasponu biljnih vrsta, posebno u uvjetima stresa. Njegova primjena se pokazala pozitivnom u smislu očuvanja zdravlja pšenice, unosa hranjivih tvari, uroda i kvalitete zrna. Posebno u sušnim uvjetima, povećane koncentracije silicija u biljkama ne samo da održavaju vodni status, već i poboljšavaju otpornost na sušu regulacijom vodnog potencijala lista, što olakšava asimilaciju ugljičnog dioksida (CO₂), ali se i listovi prilagođavaju tako da smanjuju gubitak vode transpiracijom sa svoje površine (Zhu i Haijun, 2014). Utvrđeno je da se najviše silicija nalazi u glavnim transpiracijskim dijelovima biljaka (Raven, 2003). Općenito, primjena silicija ima blagotvorne učinke na proizvodnju pšenice, posebno u uvjetima suše, povećavajući učinkovitost iskorištenja vode i fotosintetsku aktivnost (Schaller i sur., 2021). Primjerice, povećanje sadržaja amorfno silicijevog dioksida od 1 % ili 5 % u tlu rezultiralo je povećanjem količine vode dostupne biljkama za više od 40 %, odnosno za više od 60 %. Također, primjena silicija u tekućem obliku pokazala se učinkovitom u povećanju broja klasova i visine biljaka u usporedbi s primjenom silicija u obliku praha, kao što je dijatomejska zemlja (Kowalska i sur., 2021).

Koncentracija silicija u tkivu pšenice ovisi o njegovoj dostupnosti u tlu, ali i genetskoj predispoziciji pojedinih genotipova pšenice za usvajanje silicija. Biljke mogu apsorbirati samo depolimerizirani topljivi oblik silicija, odnosno monosilicijevu kiselinu (H₂SiO₄). Ovaj topljivi oblik silicija biljka usvaja pomoću korijena i akumulira u biljnim tkivima, a Tubana i sur. (2016) su pokazali da je optimalan unos silicija za pšenicu približno 108 kg silicija po hektaru. Nakon apsorpcije, akumulira se u organima kao što su listovi i stabljika, formirajući dvoslojnu strukturu sastavljenu od silicijevog dioksida (SiO₂), koji se taloži u kutikuli i doprinosi strukturalnoj čvrstoći. U zrnu pšenice silicij se ne akumulira. Postoje metode folijarne primjene silicija, kao i njegovo dodavanje u zoni korijena. Istraživanja Rains i sur. (2006) su pokazala da je unos silicija u biljke pšenice osjetljiv na metaboličke inhibitore poput dinitrofenola i kalijeva cijanida. Također, apsorpciju silicija olak-

šavaju specifični nodulinu slični proteini, koji olakšavaju pasivni transport vode i/ili malih nenabijenih otopljenih tvari kao što je monosilikatna kiselina $[\text{Si}(\text{OH})_4]$ (Dallagnol i sur., 2022).

8.2. Selen (Se)

Selen (Se) je važan element u prehrani ljudi i životinja, budući da je sastavni dio brojnih enzima i proteina i ima antioksidativna, antikancerogena i antivirusna svojstva. Iako selen nije esencijalan za biljke, one ga ipak mogu metabolizirati u različite aminokiseline i proteine. U stresnim uvjetima, selen može povećati otpornost biljaka na ultraljubičasto zračenje, visoki salinitet, niske temperature i prisutnost teških metala. Selen također može usporiti proces starenja biljaka, regulirati vodni režim tijekom sušnih perioda, te potaknuti zrenje sjemena i rast biljke (Sabo i sur., 2021).

Apsorpcija selena u pšenici odvija se kroz korijen u obliku selenita (HSeO_3^-) koristeći akvaporine, koji se zatim transportiraju ksilemom do listova i floemom do zrna. Biljke asimiliraju selen koristeći transportne sustave slične onima za sumpor, kao što su SULTR1;1 i SULTR1;2 (Sabo i sur., 2021). U pšenici se selen nalazi u različitim oblicima poput aminokiselina selenometionina (56 – 100 %), selenocisteina (4 – 12 %), selenometil-selenocisteina (1 – 4 %), u obliku selenata (5 – 19 %) i drugih anorganskih oblika (4 – 26 %) (Lara i sur., 2019). Selenometionin je najučinkovitiji oblik selena za prehranu ljudi i životinja.

U Kini, koja je jedan od najvećih proizvođača pšenice, oko 63 % uzgojene pšenice ima nedostatak selena, s prosječnom koncentracijom od $64,6 \mu\text{g kg}^{-1}$ selena, što je nedovoljno za zadovoljavanje preporučenih dnevnih potreba od 50 – 55 μg selena po osobi (Wang i sur., 2022). S obzirom na važnost pšenice u svjetskoj prehrani i općeniti nedostatak selena kod 80 % svjetske populacije, agronomska biofortifikacija pšenice selenom predstavlja učinkovit način obogaćivanja prehrane ovim elementom (Wang i sur., 2021). Primjerice, dodavanje selena u tlo u količini od 2 mg kg^{-1} rezultiralo je povećanjem uroda zrna za 6 % u usporedbi s uzgojem bez dodanog selena, dok folijarna primjena nije imala značajan utjecaj na urod zrna (Wang i sur., 2022). Međutim, jedno je istraživanje pokazalo da folijarna primjena selena značajno poboljšava fotosintezu, biomasu i aktivnost antioksidativnih enzima, te istovremeno smanjuje koncentraciju kadmija u pšenici uzgojenoj na tlu kontaminiranom kadmijem (Wu, C. i sur., 2020). Također, Sabo i sur. (2021) ističu da folijarna primjena anorganskog selena može biti učinkovito rješenje jer ga biljke lako prevode u organski oblik.

9. Toksični elementi u zrnu pšenice

Onečišćenje tla teškim metalima koje biljke pšenice mogu usvojiti, predstavlja značajan ekološki problem, posebno tijekom posljednjih godina zbog ubrzanog gospodarskog razvoja i industrijalizacije. Teški metali su osobito problematični jer su nerazgradivi i mogu ostati u tlu dugi niz godina (Wade i sur., 1993). Količina teških metala koju biljka apsorbira ovisi o različitim svojstvima tla, kao što su pH, kapacitet izmjene kationa i prisutnost organske tvari. Često se događa da teški metali u tlo dospiju putem ispušnih plinova i prašine iz cestovnog prometa pa se često mogu nalaziti u nešto većim količinama uz prometnice (Suzuki i sur., 2009). Osim toga, u zemljama u razvoju nema odgovarajućeg sustava obrade industrijskog otpada, što dovodi do njegovog izravnog odlaganja u rijeke, čime se u konačnici zagađuje cijeli okoliš.

Ako se pšenica uzgaja u tlu kontaminiranom teškim metalima, postoji mogućnost da se ti metali akumuliraju u zrnu u značajnim koncentracijama. Na taj način teški metali se prenose u prehrambeni lanac što potencijalno predstavlja rizik za zdravlje potrošača i postavlja pitanje sigurnosti hrane. Prema istraživanju koje su proveli Hamid i sur. (2020) uočen je opći trend nakupljanja elemenata u tragovima u uzorcima pšenice, s kadmijem koji se pojavljuje u najvećim količinama, a slijede ga bakar, cink, kobalt i mangan, u opadajućem redoslijedu. U istraživanju je također utvrđeno da u svim testiranim uzorcima pšenice koncentracija kadmija premašuje maksimalno dopuštene koncentracije.

Neki metali u tragovima imaju određenu ulogu u biljnom metabolizmu, prvenstveno kao komponente različitih enzima. Međutim, kada su prisutni u prekomjernim količinama, mogu izazvati toksičnost koja dovodi do oksidativnog stresa, poremećaja u funkciji pigmentata i promjena aktivnosti proteina (Alemzadeh i sur., 2014). Elementi kao što su cink, željezo, bakar, krom i kobalt su vitalni nutrijenti, ali u visokim koncentracijama postaju toksični. S druge strane, elementi poput olova, kadmija i arsena nemaju poznate pozitivne učinke na biljke i smatraju se isključivo toksičnim elementima (Al-Othman i sur., 2016). Iako je u tlu arsen zastupljen u malim količinama, toksični oblici arsena, arsenat (As^{5+}) i arsenit (As^{3+}), u biljkama će inhibirati rast korijena, rast samih biljaka te negativno utjecati na različite metaboličke procese (Finnegan i Chen, 2012). Većina istraživanja teških metala koja su usredotočena na pojedinačne metale u sustavima tlo-biljka imalo je dostupnih informacija o odabiru sorti pšenice koje imaju nisku razinu akumulacije više teških metala. Prvi pokazatelj tolerantnosti biljke na teške metale može biti sposobnost klijanja zrna u tlu kontaminiranom teškim metalima (Peralta i sur., 2001).

Guo i sur. (2018) su utvrdili da se teški metali najviše akumuliraju u korijenu, zatim u listovima i stabljici, a najmanje u zrnu. Najveća akumulacija u korijenu

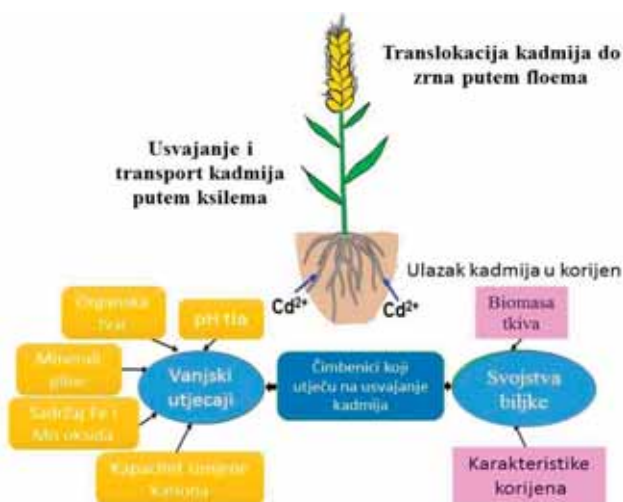
se može objasniti činjenicom da teški metali poput olova, kadmija i arsena nisu potrebni biljkama za rast. Također, različite sorte pšenice pokazuju različite razine akumulacije teških metala, odnosno imaju različite tzv. bioakumulacijske faktore.

9.1. Kadmij (Cd)

Kadmij je element koji se često oslobađa u okoliš tijekom industrijskih procesa poput rafiniranja, rudarenja i proizvodnje plastike (Dong i sur., 2019), ne samo da onečišćuje okoliš, već i negativno utječe na ljudsko zdravlje. Kadmij kod ljudi može nepovoljno utjecati na funkciju imunološkog sustava i uzrokovati nekoliko bolesti, poput osteoporoze zbog demineralizacije kostiju, oštećenja bubrega točnije ireverzibilne ozljede bubrežnih tubula, te povećava rizik od kardiovaskularnih bolesti i razvoja malignih oboljenja (Bernard, 2008).

Kadmij iz tla prvo ulazi u korijen pšenice, zatim se nakon unosa i transporta putem ksilema, nakuplja u zrnu putem floema (Slika 19). U tlu se kadmij nalazi kao dvovalentni kation kadmija (Cd^{2+}), ali i u obliku kelata (organometalnih kompleksnih spojeva), te se korijenom može usvojiti pomoću više različitih prijenosnika (Huang i sur., 2020). Pri visokim koncentracijama kadmij uzrokuje smrt stanica, tako ugrožavajući rast i razvoj biljaka, smanjujući pritom urod i kvalitetu zrna pšenice (Adrees i sur., 2020). Toksičnost kadmija može izazvati simptome poput nerazvijenosti biljnih tkiva, kloroze te u krajnjem slučaju dovode do apoptoze (programirane stanične smrti). Zbog kompetitivnog djelovanja s drugim elementima, kadmij u većim količinama u tlu može smanjiti unos cinka, mangana i željeza, esencijalnih elemenata za biljku.

Stvaranje (ili razvoj) sorti pšenice koje akumuliraju manje kadmija predstavlja jedno od najekonomičnijih i ekološki održivih rješenja za uzgoj pšenice na tlima kontaminiranim kadmijem (Zhang i sur., 2022).



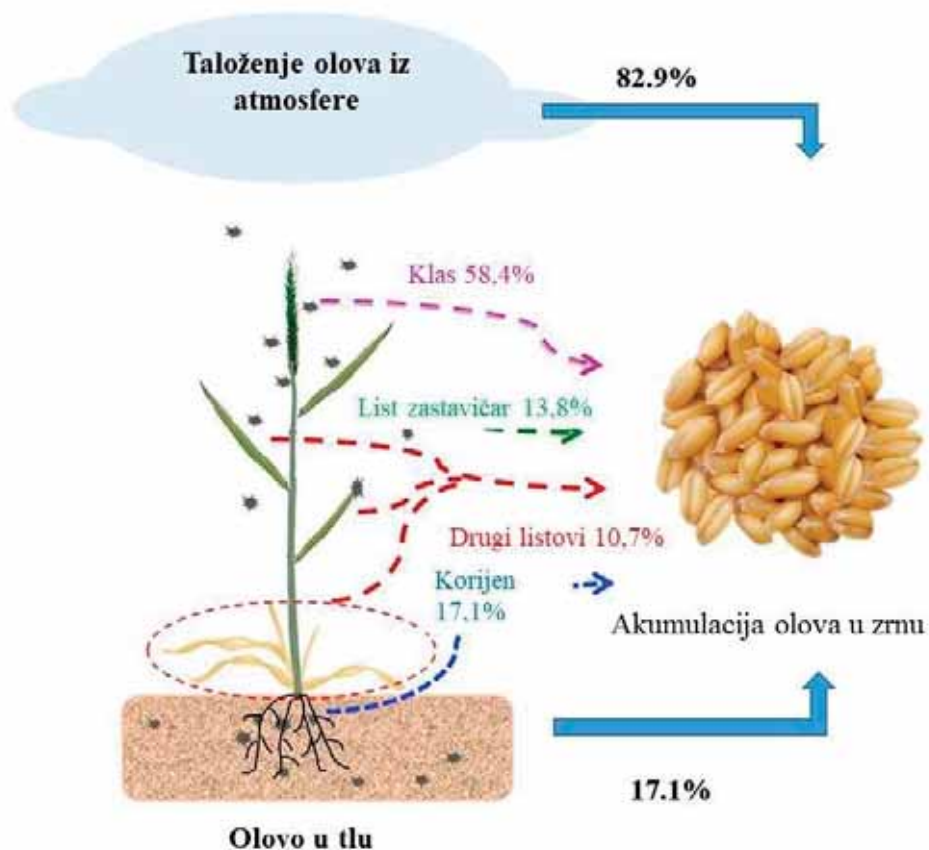
Izvor: Zhou i Li (2022)

Slika 19. Čimbenici koji utječu na apsorpciju kadmija u pšenici

9.2. Olovo (Pb)

Olovo je jedan od najzastupljenijih toksičnih elemenata. Istraživanja su pokazala da prekomjeran unos olova kroz prehranu može imati ozbiljne posljedice na ljudski živčani sustav i tjelesni razvoj, osobito kod djece i fetusa. Iako se olovo u manjim količinama može pronaći u mozgu, jetri, bubrezima i kostima kod odraslih te količine iznose 10 µg/dl, a kod djece oko 1,4 µg/dl (Collin i sur., 2022).

Nakupljanje olova u zrnu pšenice varira značajno, krećući se u rasponu od 0,015 mg/kg do 22,6 mg/kg, prema analizama uzoraka prikupljenih s različitih tala s različitim koncentracijama olova (Wu i sur., 2020). Analiza izotopa olova pokazala je da je atmosfersko taloženje glavni izvor olova u izdancima biljaka pšenice te se na ovaj način nakuplja više od 80,0 % olova u zrnu (Slika 20). Iako je korijen imao najveću koncentraciju olova, klasovi su najviše doprinijeli akumulaciji olova u zrnu pšenice s 58,4 %, slijede listovi s 24,5 %, dok je doprinos korijena bio najmanji sa 17,1 % (Ma i sur., 2022).



Izvor: Ma i sur. (2022)

Slika 20. Nakupljanje olova u zrnu pšenice

Poput drugih teških metala, olovo u visokim koncentracijama može biti štetno za biljke, izazivajući oksidativni stres i stvaranje reaktivnih kisikovih spojeva koji oštećuju biljno tkivo, dovodeći do smanjenja uroda zrna. Najčešće su narušeni klijavost zrna, rast klijanaca i druga svojstva u početnim fazama rasta, no najveći utjecaj olovo ima na izduživanje korijena zbog izravne izloženosti prilikom apsorpcije olova. Osim navedenoga, olovo kod biljaka može smanjiti fotosintetsku učinkovitost, inhibirati aktivnost određenih enzima i rezultirati poremećajem mineralne ishrane biljaka (Sharma i Dubey, 2005).

10. Upotreba pšenice u ljudskoj prehrani

Pšenica je ključna žitarica u ljudskoj prehrani, čineći 20 % ukupnog kalorijskog unosa te je istovremeno i važan izvor proteina, vitamina i minerala (Strońska i sur., 2021). Nedovoljan unos cjelovitih žitarica identificiran je kao glavni faktor rizika za razvoj bolesti u većini zemalja članica koje pripadaju Svjetskoj zdravstvenoj organizaciji (GBD, 2017). Svjetska zdravstvena organizacija izradila je smjernice za “održivu zdravu prehranu”, koja promiče sigurnost i nutritivnu vrijednost hrane uz minimalan utjecaj na okoliš (World Health Organization, 2019). Ove smjernice naglašavaju važnost prehrane u ostvarivanju ciljeva održivog razvoja na razini jedne zemlje, posebno ističući specifične ciljeve i teme: i) Bez siromaštva, ii) Bez gladi, iii) Dobro zdravlje i dobrobit, iv) Kvaliteta obrazovanja, v) Ravnopravnost spolova, vi) Odgovorna potrošnja i proizvodnja i vii) Klimatske promjene. Također, Europska komisija preporučuje održive metode proizvodnje žitarica koje potiču bioraznolikost, mikororganizme u tlu, koriste integrirano upravljanje štetocinima i smanjuju emisije stakleničkih plinova, uz održavanje proizvodnje visokokvalitetne hrane i sigurnosti opskrbe (Imadi i sur., 2016).

Zrno pšenice po svom sastavu bogato je korisnim i prehrambeno vrijednim tvarima, a sadržaj pojedinih hranjivih tvari pokazuje visoku nasljednost (Shewry i Hey, 2015). Stoga, proizvodnja pšenice treba biti usmjerena ne samo na povećanje produktivnosti, već i na zdravstvenu dobrobit za potrošače. Istraživanja o kvaliteti pšenice uglavnom su usmjerena na sastav proteina u zrnu koji utječe na tehnološku kvalitetu zrna i brašna pšenice, a time i na svojstva tijesta. Zrno pšenice je glavna sirovina u proizvodnji raznih prerađevina, uključujući brašno, krupicu, prekrupu i ostale mlinarske proizvode, kao sirovine za mnoga jela, kruh, peciva i ostale pekarske proizvode, tijesto i tjestenine, kolače i slastice, pšenične kaše i pahuljice.

10.1. Prerada

Prerada zrna pšenice može biti jednostavna i složena prerada. Kod jednostavne prerade melje se cijelo zrno, te dobiveni prehrambeni proizvodi sadrže sve dijelove zrna (endosperm, klicu i omotač). Složena prerada, s druge strane, uključuje mljevenje suhog zrna pšenice čeličnim valjcima pri čemu se uklanja omotač odnosno ljuska (drobljenjem ljuske nastaju mekinje) i klica, koji su bogati hranjivim tvarima, dok se endosperm koristi za proizvodnju brašna.

Meljava endosperma često uključuje složene postupke prosijavanja kako bi se dobila visoko prerađena brašna s minimalnim tragovima mekinja. Stoga se dobiveno

brašno prvenstveno sastoji od endosperma bogatog škrobom i uglavnom doprinosi energijom, ali s manjim količinama vitamina, minerala, vlakana i bioaktivnih fitokemikalija, koje se uglavnom nalaze u klici i mekinjama. Kao što je već navedeno, meljavom dolazi do gubitka hranjivih tvari u zrnu pšenice (Tablica 7). U prerađenom zrnu, sadržaj minerala poput kalcija, željeza, magnezija, kalija, natrija i cinka značajno se smanjuje (2,2 puta za Ca, 3,1 puta za Fe, 5,3 puta za Mg, 3,7 puta za K, 1,5 puta za Na i 4,3 puta za Zn), dok se sadržaj selena povećava u usporedbi s cjelovitim zrnom. Također, prerađeno zrno ima povećan sadržaj energije, proteina i ugljikohidrata, ali smanjen sadržaj niacina i drugih vitamina B.

Tablica 7. Prikaz komponenti u brašnu dobivenom iz cjelovitih i prerađenih zrna meke pšenice dobivenog iz 100 g zrna

	Cjelovito zrno	Prerađeno zrno
Energija (kcal)	332	364
Sadržaj proteina (g)	9,6	10,3
Ugljikohidrati (g)	74,5	76,3
Masti (g)	2,0	1,0
Vlakna (g)	13	2,7
Minerali		
Kalcij, Ca (mg)	33	15
Željezo, Fe (mg)	3,7	1,2
Magnezij, Mg (mg)	117	22
Kalij, K (mg)	394	107
Natrij, Na (mg)	3	2
Cink, Zn (mg)	3,0	0,7
Selen, Se (μ g)	12,7	33,9
B vitamini		
Tiamin (mg)	0,3	0,1
Niacin (mg)	5,3	1,3
Folat, ukupni (μ g)	28	26

Izvor: USDA, 2019

10.2. Važnost načina prerade

Povećan unos cjelovitih žitarica smatra se ključnim za smanjenje rizika od raznih bolesti, stoga je važno razviti učinkovite prehrambene preporuke za cjelovite žitarice i vlakna (Miller, 2020). Izazov u postavljanju ovih preporuka nalazi se u potrebi za jasnim definicijama hrane napravljene od cjelovitih žitarica. Primjerice, istraživanje koje je obuhvatilo 266 studija otkrilo je da samo 7,6 % odraslih konzumira 50 grama (g) cjelovitih žitarica u jednom danu (Micha i sur., 2015). Nadalje, istraživanja

su pokazala da unos od 14 g prehrambenih vlakana na 1000 kilokalorija može smanjiti rizik od kardiovaskularnih bolesti (Korczak i Slavin, 2020). Također, povećanim unosom cjelovitih žitarica rizik od smrtnosti uslijed raka smanjuje se za 6 do 12 % u grupi ispitanika s najvećim unosom u odnosu na ispitanike s najnižim unosom vlakana (Gaesser, 2020). S druge strane, visok unos prerađenih žitarica povezan je s povećanim rizikom od raka debelog crijeva i želuca. Zbog sve izraženijih problema s neuhranjenošću i povezanim kroničnim bolestima, proizvodnja i optimalan unos cjelovitih žitarica postaju sve važnija istraživačka tema (Wei i sur., 2022).

Pšenica je glavni izvor makro i mikronutrijenata te energije, doprinoseći s 15 – 20 % potrebnog unosa za svjetsku populaciju (Shiferaw i sur., 2013). Kakvoća proteina pšenice ima središnju ulogu u njenom raznovrsnom korištenju i preradi. Proteini u zrnu pšenice dijele se na metaboličko-strukturne (albumine i globuline) i rezervne (glijadine i glutenine). Albumini su topljivi u vodi i čine 10 – 12 % ukupnih proteina, dok su globulini topljivi u slanim otopinama prisutni u količini od 8 – 10 % ukupnih proteina). Obje skupine većinom su smještene u klici i aleuronskom sloju zrna. Albumini i globulini su fiziološki aktivni proteini s uravnoteženim aminokiselinskim sastavom, funkcionalno djelujući kao enzimi i inhibitori enzima, a neki mogu imati i ulogu rezervnih proteina (Hailegiorgis i sur., 2020). Međutim, ove skupine proteina ne sudjeluju značajno u formiranju tehnoloških svojstava brašna.

S druge strane, glijadini i glutenini, koji se nalaze u endospermu, čine 80 – 85 % ukupnih proteina pšeničnog brašna i ključni su za tehnološka svojstva brašna i tijesta. Formiraju veliku, fleksibilnu i polimernu mrežu (gluten ili ljepak) u tijestu, što je od velike važnosti za pekarska svojstva brašna (Wieser, 2007). Disulfid izomeraza ima važnu ulogu u stvaranju kovalentnih veza između pojedinih proteina glutena (Song i sur., 2020). Glijadini, koji čine 45 – 50 % ukupnih proteina, topljivi su u alkoholu i dijele se nadalje na α -, β -, γ - i ω -glijadine sličnih aminokiselinskih sekvenci (Španić i sur., 2019a). Glutenini, topljivi u vodi, čine 30 – 40 % ukupnih proteina i dijele se na podjedinice visoke (HMW-GS) i niske molekularne mase (LMW-GS). Geni *Glu-1A*, *Glu-1B* i *Glu-1D* koji se nalaze na kromosomima homeologne grupe 1, odgovorni su za biosintezu visoko molekularnih podjedinica glutenina (Shewry i sur., 2003), koje imaju značajan utjecaj na reološka svojstva brašna. I glutenini i glijadini imaju manje uravnotežen aminokiselinski sastav od albumina i globulina, s više od 50 % svih aminokiselina koje čine glutaminska kiselina i prolin. Brašno s većim udjelom proteina ima bolju sposobnost apsorpcije vode, što dovodi do većeg volumena kruha (Boita i sur., 2016). Sadržaj vlažnog glutena (ljepka) i proteina u pšenici važan je pokazatelj kvalitete pri prodaji i otkupu pšenice, a postoji i značajna pozitivna korelacija između njihovog sadržaja u zrnu (Španić i sur., 2016). Upravo je gluten kod pšenice najviše istražen u usporedbi s ostalim žitaricama, jer pokazuje najbolju kakvoću. Proces prerade zrna pšenice u brašno je vrlo složen i sastoji se od više koraka. Prvo se zrno temeljito čisti od raznih primjesa i nečistoća, a zatim podvrgava pranju i pripremanju, odnosno, kondicioniranju prije meljave. Prvi cilj meljave je odvojiti anatomske dijelove zrna pšenice što preciznije, nakon čega se su-

stavima za usitnjavanje endosperm drobi u finije čestice (veličine od $<1 \mu\text{m}$ do oko $200 \mu\text{m}$), pretvarajući ga u brašno. Brašno s manjom prosječnom veličinom čestica nastaje od mekih pšenica. Proces prerade može umanjiti nutritivnu vrijednost zrna uklanjanjem vitamina, minerala i dijetalnih vlakana. Na kraju se više vrsta brašna miješa i homogenizira da bi se dobila mješavina željenih svojstava. Ovaj proces osigurava da brašno sadrži sve bitne nutritivne komponente, a istovremeno postigne željenu teksturu i kvalitetu gotovih proizvoda.

10.3. Nutritivna vrijednost zrna pšenice

Kao što je već rečeno, zrno pšenice sastoji se od tri glavna dijela: omotača ploda ili ljuske (iz kojeg nastaju mekinje), endosperma (škrobni srednji sloj koji je glavni i najveći dio zrna) i klice. Omotač zrna sadrži celulozna vlakna (37 – 60 %), minerale i vitamine B skupine, te zajedno s klicom čini ukupno 12 – 18 % zrna (Brouns i sur., 2012). Tijekom obrade pšenice, klica i omotač se obično uklanjaju. Endosperm, koji čini ostatak zrna, uglavnom sadrži škrob i proteine. Količina škroba i proteina varira ovisno o sorti pšenice, vremenskim uvjetima i lokaciji uzgoja. Škrob je glavna rezerva hranjivih tvari u zreom zrnu, a zrno pšenice sadrži oko 70 % škroba i 10 % rezervnih proteina. Proteini prisutni među škrobnim zrcima (glijadini i glutenini) tvore gluten (ljepak) kada se škrob odvoji ispiranjem brašna. Ako su škrobna zrnca oštećena, smanjuje se sposobnost tijesta da zadržava plinove, a tijekom pečenja tijesta škrob upija vodu od proteina, što dovodi do njegove želatinizacije. Obično, pšenice s većim udjelom škroba imaju manji sadržaj proteina i obrnuto. Ovisno o namjeni brašna, endosperm se može samljeti i finije, što može jače oštetiti škrobne granule, ali olakšava njihovo prevođenje u glukozu potrebnu za izradu tijesta. Na temperaturama od 60 do 80 °C, škrobne granule upijaju vodu, bubre i pucaju, stvarajući škrobni gel. Starenjem pekarskih proizvoda, škrobne granule se pokušavaju ponovno povezati uz izdvajanje vode, a za ovo svojstvo je vrlo bitan količinski odnos amiloze i amilopektina u škrobu koji će odrediti brzinu starenja kruha. Razgradnja škroba osigurava energiju potrebnu za klijanje zrna i rast klice. Osim škroba, važan izvor energije su i proteini zrna, posebno rezervni proteini koji sadrže hranjive tvari potrebne za klijanje i nicanje. Ukupni sadržaj prehrambenih vlakana u staničnim stijenkama endosperma pšenice varira od 9 do oko 20 %, a sastoji se od netopivih i topivih frakcija (Gartaula i sur., 2018). Arabinoksilan i β -d-glukan čine 70 i 20 % od ukupnog sadržaja prehrambenih vlakana, dok se celuloza, hemiceluloza i glukomanani nalaze u manjim količinama.

U zrnu se nalazi klica iz koje raste nova biljka. Klica sadrži šećere, masti, proteine, i vitamine, pri čemu su najzastupljeniji vitamini E, B2 i A, dok su vitamini C i B1 prisutni u manjim količinama. Klica također sadrži male količine minerala kao što su željezo, kalcij i fosfor. Jedan od sastojaka klice su i ulja, što znači da duljom pohranom može doći do uželosti. Klica se vrlo lako odvaja od ostatka zrna, što je

korisno u složenoj (industrijskoj) meljavi gdje se zajedno s omotačem zrna uklanja i bradica, koja se nalazi na suprotnoj strani od klice. U 192 grama cjelovitog zrna pšenice, ugljikohidrati najviše doprinose ukupnim dnevnim kalorijama čineći do 48 % od ukupno 632 kalorije (Tablica 8), pri čemu se smatra da je optimalni dnevni unos kalorija 2000.

Tablica 8. Nutritivne vrijednosti u 192 grama cjelovitog zrna pšenice

Kalorije	632
	% u dnevnim vrijednostima
Ukupne masti 3,7 g	5
Zasićene masti 0,6 g	3
Polizasićene masti 1,5 g	
Monozasićene masti 0,6 g	
Kolesterol 0 mg	0
Natrij 3,8 mg	0
Ukupni ugljikohidrati 131 g	48
Prehrambena vlakna 23 g	82
Šećeri 0,8 g	
Protein 30 g	
Vitamin D 0 mcg	0
Kalcij 48 mg	4
Željezo 6,9 mg	38
Kalij 652,8 mg	14
Kafein 0 mg	

Izvor: <https://www.nutritionix.com/food/wheat>

Omotač (ljuska) zrna pšenice se sastoji od perisperma i perikarpa te uključuje hijalinski i aleuronski sloj. Aleuronski sloj, koji je snažno srastao s omotačem, ne sadrži škrobne stanice. Ovaj sloj je različitih boja, od žute do smeđe, zbog prisutnosti pigmentata, i bogat je hranjivim tvarima kao što su vlakna, vitamini B3, B2, B1, folna kiselina, bakar, kalcij, fosfor, cink i željezo. Iako se aleuron botanički smatra dijelom endosperma, veći dio ovog sloja se uklanja tijekom mljevenja valjcima i stoga često nije prisutan u prerađenom bijelom brašnu (Dexter i Wood, 1996).

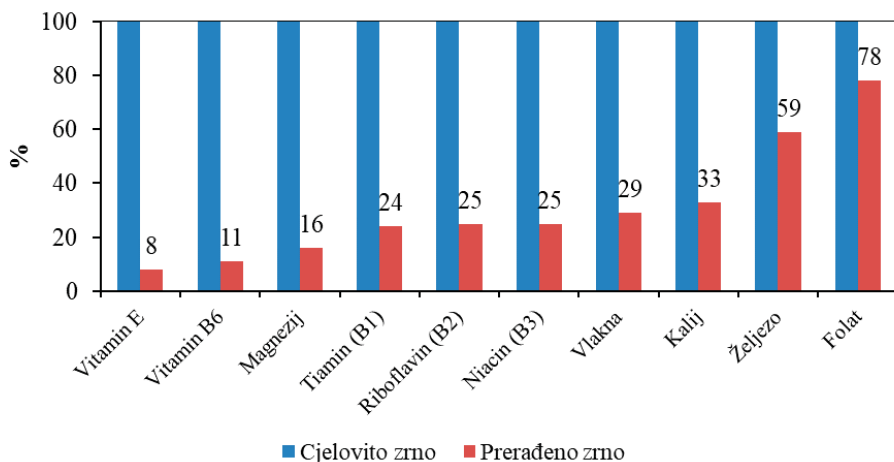
Pšenica u svom sastavu sadrži između 8 i 15 % proteina, no nedostaju joj ključne esencijalne aminokiseline poput lizina, treonina i metionina. Zbog ovog nedostatka, pšenica se smatra 'nepotpunom' namirnicom u ljudskoj prehrani. Osim toga, proces prerade pšenice u razne proizvode rezultira dodatnim gubitkom esencijalnih

aminokiselina iz zrna (Anjum i sur., 2005). U istraživanjima Anjum i sur. (2005) i Wang i sur. (2019) koncentracije aminokiselina u brašnu pšenice (u gramima na 100 g proteina) variraju: asparaginska kiselina (3,93 – 6,60), serin (3,35 – 5,69), glicin (2,81 – 6,78), alanin (0,30 – 4,02), arginin (1,55 – 7,01), tirozin (1,39 – 4,82), cistin (2,07 – 2,30), prolin (7,17 – 15,38), treonin (2,40 – 4,05), histidin (1,23 – 5,24), valin (2,99 – 6,59), metionin (0,75 – 2,70), fenilalanin (4,21 – 5,47), izoleucin (1,89 – 4,04), leucin (3,78 – 7,62) i lizin (2,05 – 3,14). Metabolomika može predvidjeti svojstva kvalitete i glavnih komponenti zrna pšenice poput proteina, lipida i škroba, te istražiti čak i manje zastupljene sekundarne metabolite (Šunić i sur., 2023). Primjerice, isti su autori identificirali 275 polarnih metabolita u zrnima pšenice koristeći separativnu analitičku tehniku (GC-MS).

Genotipovi pšenice razvijaju zrna koja se razlikuju po veličini, obliku, masi i boji. Boja zrna pšenice nastaje zbog prisutnosti tokola, antocijana i fenolnih spojeva koji mogu imati povoljan utjecaj na ljudsko zdravlje. Količina pigmentata varira ovisno o genotipovima i različitim okolišnim uvjetima što je u konačnici uzrok različite obojenosti zrna (Lachman i sur., 2018). Pigmenti, koji su većinom prisutni u aleuronskom sloju, često se uklanjaju tijekom prerade zrna.

10.4. Cjelovito zrno pšenice

Cjelovito zrno pšenice je izuzetno hranjivo jer sadrži najviše vitamina B i dijetalnih vlakana (Whole Grains Council). Zapravo, svaki dio pšeničnog zrna posjeduje određena nutritivna svojstva, a cjelovito zrno pruža uravnotežen unos topivih i netopivih vlakana. Cjelovite žitarice, uz voće i povrće, su primarni izvor prehrambenih vlakana. Proizvodi od cjelovitih zrna pšenice sadrže cijelo, netaknuto (ili neobrađeno) zrno. S druge strane, procesom prerade zrna u brašno uklanja se omotač odnosno ljuska zrna, što dovodi do gubitka vlakana, vitamina, minerala i fitokemikalija, smanjujući glikemijski indeks proizvoda (mjerna jedinica koja pokazuje stopu i količinu porasta glukoze u krvi). Pšenica, uz rižu, ima visok glikemijski indeks, što ih čini manje pogodnima za osobe s dijabetesom (Atkinson i sur., 2008). Međutim, cjelovito zrno pšenice je jedan od najboljih izvora primarnih proteina, esencijalnih minerala (fosfor, magnezij, kalcij i željezo) i vitamina (provitamin A, vitamine B kompleksa, E, D i K) u značajnim količinama. U prerađenom zrnju, u odnosu na cjelovito, dolazi do značajnog gubitka osnovnih nutrijenata, preko više od 50 %, uključujući vitamine E i B6, magnezij, tiamin (B1), riboflavin (B2), niacin, vlakana i kalij (Slika 21). Prema tome, može se zaključiti da se pšenične mekinje, koje se dobivaju iz omotača zrna, razlikuju od ostalih djelova zrna po visokom sadržaju neprobavljivih vlakana, niskom sadržaju masti i vitamina, posebno iz B skupine.



Izvor: <https://wholegrainscouncil.org/whole-grains-101/whats-whole-grain-refined-grain>

Slika 21. Udio (%) osnovnih nutrijenata prerađenog zrna u odnosu na cjelovito zrno gdje su osnovni nutrijenti izraženi u 100 % udjelu

S druge strane, klica pšeničnog zrna sadrži veći postotak masnoća, puno veći od 12 %, te obiluje vitaminom E i šećerima poput saharoze i maltoze (Evers i Millar, 2002). Nasuprot tome, endosperm koji ostaje nakon meljave, uglavnom se sastoji od ugljikohidrata i sadrži manje hranjivih tvari. Konzumacija proizvoda od prerađenog zrna pšenice može dovesti do prehrambenih problema, uključujući bolesti uzrokovane nedostatkom vitamina B1 i pelagru, bolest povezanu s nedostatkom vitamina B3.

Prema definiciji, proizvodi od cjelovitih zrna moraju sadržavati najmanje 50 % sastojaka cjelovitog zrna (Whole Grain Initiative, 2021). Naime, u današnje vrijeme često se susrećemo s proizvodima pšenice naknadno obogaćenim određenim nutrijentima. U brašno pšenice se mogu dodati željezo, tiamin (B1), riboflavin (B2), niacin (B3) i folna kiselina (B9), no važno je napomenuti da su ti dodani vitamini i minerali sintetski, a ne prirodni proizvodi.

Pri konzumaciji prerađenog brašna, probavni sustav ga brzo i lako razgrađuje i apsorbira, slično kao čisti šećer. To dovodi do brzog porasta šećera u krvi, aktivirajući inzulin, hormon koji regulira razinu šećera u krvi. Međutim, dugotrajna konzumacija može dovesti do debljanja i rezistencije na inzulin, stanja u kojem inzulin više ne može učinkovito regulirati šećer u krvi, ostavljajući opasno visoku razinu šećera u krvi. To može dovesti do oštećenja krvnih žila, povećanog oksidativnog stresa i oslabljene antioksidacijske aktivnosti, što doprinosi visokom krvnom tlaku.

Iz svega navedenoga proizlazi da cjelovito (integralno) zrno pšenice ima izuzetnu prehrambenu vrijednost. Nažalost, proizvodi od osiromašenog pšeničnog bijelog brašna, koji ne sadrže nutritivno najvažnije dijelove zrna – omotač i klicu, danas su vrlo popularni u pekarskoj industriji.

10.5. Gluten u zrnu pšenice

Zrno pšenice sadrži između 8 i 15 % proteina, pri čemu albumini i globulini čine 10 do 15 %, a preostalih 85 do 90 % otpada na gluten. Kada se brašno pomiješa s vodom, ovi proteini formiraju viskoelastično tijesto (Delcour i sur., 2010). Kvaliteta tijesta, koja utječe na volumen i strukturu kruha, uvelike ovisi o sadržaju proteina, pri čemu snažniji elastični gluten ukazuje na dobru kvalitetu (Magdić i sur., 2006). Gluten je složena mješavina dva proteina, glijadina i glutenina (Wieser, 2007), te najvećim dijelom određuje kvalitetu tijesta. Gluten tijestu daje elastičnost i čvrstoću, a predstavlja gumenastu masu koja ostaje nakon uklanjanja škroba i sastojaka topivih u vodi.

Vlažni gluten omogućava kvantitativno određivanje količine proteina koji stvaraju gluten u brašnu, a koji su prvenstveno odgovorni za reološka svojstva i pekarsku kvalitetu (Biesiekierski, 2017). Omjer vlažnog glutena i ukupnog sadržaja proteina u zrnu smatra se pokazateljem proizvodnje vlažnog glutena po jedinici proteina. Prema istraživanju Šimić i sur. (2006), genotipovi pšenice s omjerom vlažnog glutena i sadržaja proteina u rasponu od 2,7 do 3,0 imaju gluten s optimalnim svojstvima pečenja, dok genotipovi sa snažnim svojstvima glutena imaju niži omjer, bliži 2,3. U radu Španić i sur. (2017), svi genotipovi pšenice imali su omjer koji ukazuje na snažan gluten, osim jednog genotipa čiji se omjer približio vrijednosti 2,7 (Tablica 9). Sedimentacijska vrijednost po Zelenju opisuje stupanj sedimentacije brašna u otopini mliječne kiseline i pozitivno korelira sa sadržajem glutena, te uglavnom i s ukupnim sadržajem proteina.

Tablica 9. Sadržaj proteina, sadržaj vlažnog glutena, gluten indeks, omjer sadržaja proteina i sadržaja vlažnog glutena, i sedimentacijska vrijednost u šest genotipova ozime pšenice

	Sadržaj proteina (%)	Sadržaj vlažnog glutena (%)	Gluten indeks	Sadržaj proteina/Sadržaj vlažnog glutena	Sedimentacijska vrijednost (ml)
Genotip 1	13,4	30,3	88	2,3	40
Genotip 2	12,3	28,7	98	2,3	42
Genotip 3	14,2	36,3	95	2,6	49
Genotip 4	13,5	29,7	99	2,2	51
Genotip 5	15,5	33,7	98	2,2	46
Genotip 6	13,2	30,3	98	2,3	47

Izvor: Španić i sur. (2017)

Gluten u brašnu u otopini mliječne kiseline utječe na brzinu taloženja suspenzije brašna, pri čemu veća sedimentacijska vrijednost ukazuje na sporiju sedimentaciju i bolju kvalitetu glutena (Hruškova i Famera, 2003). Ovaj parametar tako-

đer se koristi u selekciji genotipova pšenice u ranim generacijama oplemenjivanja. Razlike u sadržaju glutena među genotipovima pšenice proizlaze iz genetskih faktora, agrotehničkih mjera, upotrebe gnojiva i vremenskih uvjeta. Gluten indeks ukazuje na jačinu glutena, funkcionalnost i pekarsku učinkovitost te se smatra važnim pokazateljem za određivanje ukupne učinkovitosti glutenina u brašnu (Kweon i sur., 2011).

Proteini glutena mogu se klasificirati u podskupine ovisno o ključnim razlikama u sadržaju sumpora i molekularnoj masi. Glutenini se klasificiraju na osnovu molekularne mase u dvije skupine: one s visokom molekularnom masom (HMW) i one s niskom molekularnom masom (LMW). Glijadini, s druge strane, se klasificiraju prema svojim primarnim strukturama u alfa, beta, gama i omega (α , β , γ i ω) glijadine (Wieser, 2007). Glijadini su monomerni proteini veličine 30 – 40 kDa, bogati prolinom i glutaminom u svom aminokiselinskom sastavu, i ne sadrže međulančane disulfidne mostove. U zrnu pšenice, α -, β - i γ -glijadini su obično prisutni u visokim udjelima u usporedbi s ω -glijadinom (Wieser i Kieffer, 2001). Dodavanje α -, β -, γ - i ω -glijadina u tijesto može poboljšati kvalitetu kruha, jer svaka komponenta proteina ima nešto drugačije funkcije ključne za određivanje viskoelastičnih svojstava, kao što je vezivanje ugljičnog dioksida koji se oslobađa tijekom dizanja kruha. Glijadini više pridonose viskoznosti i rastezljivosti tijesta, dok su glutenini kohezivni i odgovorni su za čvrstoću i elastičnost tijesta.

Pojedini proteini glutena vezani su jakim kovalentnim i nekovalentnim vezama, koje zajedno sa strukturom i interakcijom doprinose jedinstvenim svojstvima glutena (Shewry i Lookhart, 2003). Cistein, manja aminokiselina, je prisutna u oksidiranom stanju između disulfidne veze unutar proteina ili međulančane disulfidne veze između proteina. Genotipovi pšenice razlikuju se po sadržaju proteina i sastavu proteina u glutenu. U tablici 10 prikazan je udio proteina zrna kod šest genotipova (G) ozime pšenice, gdje je vidljiva najveća zastupljenost glijadina, a zatim glutenina i na posljetku albumina i globulina. Genotip 4, s najvećim udjelom glutenina pokazuje najbolju kvalitetu i prema farinografskoj vrijednosti pripada kvalitetnoj grupi A1, s farinografskim svojstvima upijanja vode od 56,3 %, stabilnosti tijesta od 2,5 minute, te stupnjem omekšanja od 12 FU ili BU (farinografske jedinice ili eng. *Brabender Units*) (Španić i sur., 2017). Nasuprot tome, genotip 2 je genotip s najlošijom kvalitetom, pripada kvalitetnoj grupi B1, s upijanjem vode od 56,2 %, stabilnosti tijesta od 0,4 minute i stupnjem omekšanja od 73 BU.

Reološka i funkcionalna svojstva glutena ovise o omjeru glutenina i glijadina i njihovim interakcijama (Payne, 1987). Ključni faktor u određivanju pekarske kvalitete pšeničnog brašna je upravo sastav proteina. Proteini glutenina visoke molekularne mase (HMW-GS), koji su manje zastupljeni u glutenu (čine samo 5-10 % ukupnih proteina), komponente su glutena veličine 500 000 do 10 milijuna daltona

(Da) i mogu biti odgovorni za čak 70 % varijacija u kvaliteti kruha (Wang i sur., 2013). HMW-GS su uglavnom odgovorni za elastičnost tijesta, omogućavajući zadržavanje plina koji proizvodi kvasac i time doprinoseći dizanju proizvoda tijekom fermentacije. Stoga, postoji pozitivna korelacija između HMW-GS i parametara za pripremu kruha. Također, veći omjer HMW-GS/LMW-GS povezan je s boljim reološkim svojstvima (Dhaka i Khatkar, 2015). Kod biotičkog stresa, kao što je infekcija fuzarijskom paleži klasa, dolazi do smanjenja glutenina u zrnu kod osjetljivih genotipova, dok je kod otpornih genotipova zabilježen povećan sadržaj glutenina (Španić i sur., 2019a).

Tablica 10. Udio (%) albumina i globulina, glijadina i glutenina u šest genotipova (G) ozime pšenice

G	Albumini i globulini	Glijadini	ω -	α -	γ -	Glutenini	HMW	LMW	Glijadini/ Glutenini
G 1	15,5	50,5	3,1	27,8	19,5	34,0	10,2	23,8	1,5
G 2	19,1	51,5	3,5	25,0	23,0	29,4	8,6	20,8	1,8
G 3	13,8	54,9	4,1	30,0	20,8	31,3	8,0	23,4	1,8
G 4	10,5	53,9	5,1	27,4	21,5	35,6	9,2	26,4	1,5
G 5	8,6	58,3	4,3	32,0	22,1	33,1	8,1	25,0	1,8
G 6	8,4	63,8	5,1	32,7	26,1	27,8	6,7	21,1	2,3

Izvor: Španić i sur. (2017)

U usporedbi s drugim žitaricama, pšenično brašno ima najkvalitetniji gluten zbog čega je pšenični kruh najbolje kvalitete. Raženi kruh je malo manje porozan i slabije kvalitete, dok je ječmeni kruh još slabije kvalitete. Kukuruzni i zobeni kruh su zbijeni i tvrdi, jer im nedostaje gluten, zbog čega se u brašno ovih žitarica često dodaje pšenično brašno. Riža ne sadrži gluten pa se od nje ne može peći kruh. Zrno tvrde pšenice, koje ima visok sadržaj glutena, na presjeku ima staklast sjaj, dok je zrno meke pšenice brašnasto zbog manjeg sadržaja glutena. Gluten tvrde pšenice omogućuje najveću rastezljivost tijesta, što ga čini idealnim za proizvodnju tjestenine i sličnih proizvoda koji zahtijevaju rastezljivost tijesta.

Tehnološke karakteristike kvalitete pšenice određuju njenu namjenu u proizvodnji brašna i spravljanja kruha, peciva, kekisa i drugih proizvoda. Prilikom otkupa, zrno pšenice mora biti zdravo i bez prisutnosti živih štetnika. Kriteriji za grupiranje pšenice u kvalitetnu klasu pri otkupu varira od zemlje do zemlje. U Hrvatskoj se kao kriteriji uzimaju hektolitarska masa i sadržaj proteina u zrnu (Tablica 11). Postoje i opći zahtjevi koji moraju biti zadovoljeni na tržištu EU, uključujući boju, miris, prisutnost štetnika i drugih primjesa, broj padanja po Hagbergu i sadržaj proteina (EC, 2008).

Tablica 11. Sustav klasifikacije kvalitete pšenice u RH

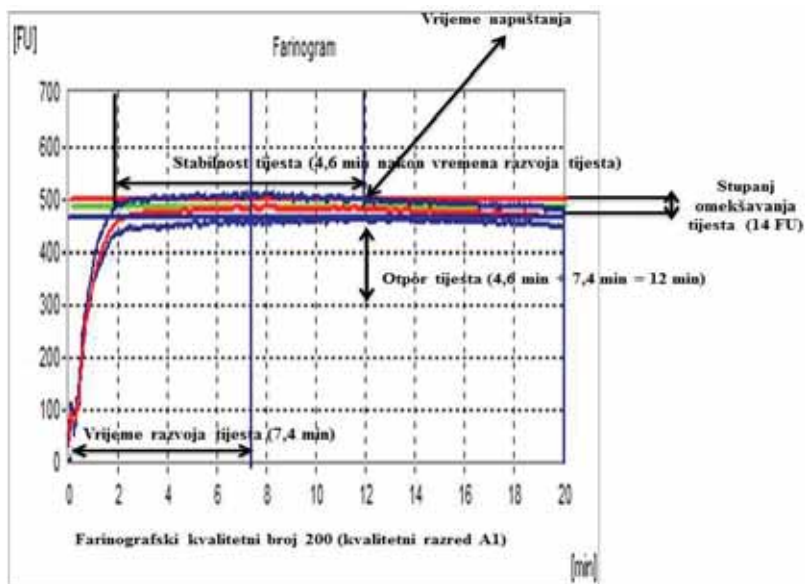
Parametri kvalitete	Kvalitativne klase				
	Premium	I. klasa	II. klasa	III. klasa	IV. klasa
Sadržaj proteina (%)	>15	13,5-14,99	12,00-13,49	10,5-11,99	<10,49
Hektolitarska masa (kg/hl)	80	78	78	74	<74
Vlaga (%)	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5
Primjese (crna) (%)	najviše 2	najviše 2	najviše 2	najviše 2	najviše 2
Ukupne primjese (%)	najviše 5	najviše 5	najviše 5	najviše 5	najviše 5

Izvor: NN 46/2018

10.6. Podjela krušne pšenice na osnovi kvalitete zrna i brašna

Pšenica se također klasificira u skupine na temelju svojstava koja utječu na krajnju kvalitetu gotovih proizvoda. Osim kriterija kao što su sadržaj proteina, u klasifikaciju su uključene i reološke karakteristike tijesta i test pečenja, pri čemu se vrste uređaja za analizu razlikuju ovisno o zemlji. Jedan od takvih uređaja je farinograf, koji daje informacije o kvaliteti glutena i tijesta, odnosno, o svojstvima i osobinama tijesta pri miješanju pšeničnog brašna na osnovi upijanja vode. Moć upijanja vode ovisi o svojstvima proteina u brašnu koji apsorbiraju vodu, stvarajući koloidni sustav. Pomoću farinografa tijesto se mehanički razvija i prekomjerno mijesi kako bi se uništila njegova struktura. Ovaj proces se bilježi kao otpor gnječenju (otpor tijesta) izražen u minutama, što se vidi na farinografskoj krivulji. Određivanje konzistencije tijesta (1 – 1000 FU) na farinografu služi za utvrđivanje upijanja vode izraženo u % (količina vode koja se dodaje da se postigne konzistencija tijesta od 500 FU). Osim upijanja vode, farinograf pruža podatke kao što su vrijeme razvoja tijesta u minutama (dostizanje vrijednosti od 500 FU), stabilnost tijesta u minutama (vrijeme tijekom kojeg struktura ostaje nepromijenjena bez pada konzistencije) i stupanj omekšavanja (smanjenje konzistencije pri kraju vremena miješanja). Tijesto bolje kvalitete zahtijeva dulje vrijeme razvoja do 500 FU i ima dulju stabilnost, nakon čega pokazuje manji pad konzistencije i manji stupanj omekšavanja u usporedbi s tijestom lošije kvalitete. Na slici 22 prikazana je farinografska krivulja s upijanjem vode od 62 %, vremenom razvoja tijesta od 7,4 minute, stabilnosti tijesta od 4,6 minuta, otporom tijesta od 12 minuta i stupnjem omekšavanja tijesta od 14 FU. Otpor tijesta izračunava se kao zbroj stabilnosti tijesta i vremena razvoja tijesta. Na temelju ovih podataka, farinografski statistički softver prema SWIS metodi je dodijelio ovom tijestu kvalitetni broj 200 (eng. *farinograph quality number*, FQN), koji predstavlja površinu ispod krivulje konzistencije i linije povučene kroz sredinu farinograma (Kljusurić 2000), svrstavajući ga u kvalitetni razred A1. Kvalitetni broj se izračunava pomoću farinografskog softvera na temelju parametara kao što su vrijeme razvoja tijesta (min), stabilnost tijesta (min), otpor tijesta (min) i stupanj omekša-

vanja (FU). Na temelju kvalitetnog broja, pšenice se dalje razvrstavaju u kvalitetne razrede. U Hrvatskoj se pšenice prema kvaliteti brašna dijele na osnovne, krušne i poboljšivače, kojima odgovaraju kvalitetni razredi A1 – A2, B1 – B2, C1 – C2. Grupe A1 – A2 označavaju skupinu sorti pšenice koje se mogu koristiti kao poboljšivači, sorte skupine B1 – B2 daju kvalitetan kruh, dok skupine C1 – C2 obuhvaćaju genotipove pšenice s lošim svojstvima kvalitete (Tablica 12).



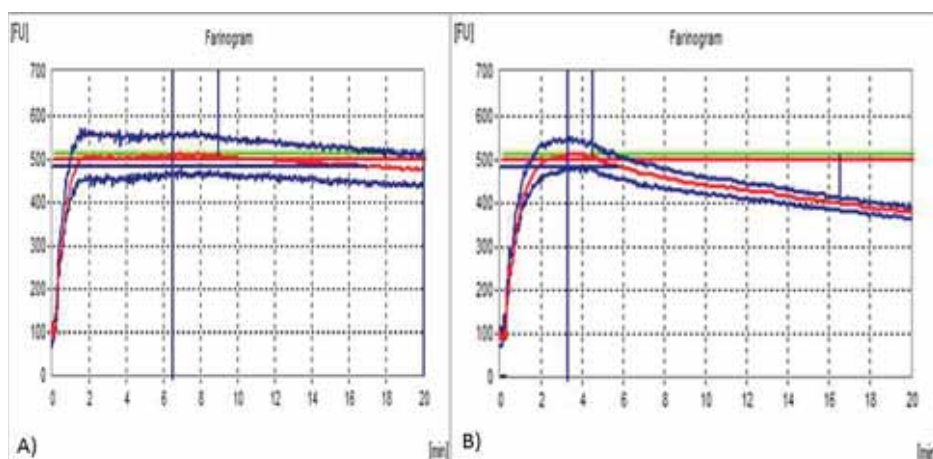
Izvor: Laboratorij za kvalitetu pšenice i ječma Poljoprivrednog instituta Osijek

Slika 22. Farinografska krivulja koja prikazuje vrijeme razvoja tijesta (min), stabilnost tijesta (min), vrijeme napuštanja, stupanj omekšavanja tijesta (FU) i otpor tijesta (min)

Tablica 12. Prikaz kvalitetnog broja (FQN) dobivenoga na temelju podataka s farinografa te pripadnost kvalitetnom razredu obzirom na kvalitetni broj

Kvalitetni broj (FQN)	Kvalitetni razredi
0 - 29,8	C2
30,1 - 44,8	C1
45,0 - 54,8	B2
55,1 - 69,9	B1
70,0 - 84,7	A2
85,3 - 100 i više	A1

Izvor: Laboratorij za kvalitetu pšenice i ječma Poljoprivrednog instituta Osijek



Izvor: Laboratorij za kvalitetu pšenice i ječma Poljoprivrednog instituta Osijek

Slika 23. Farinografske krivulje sa snažnim (kvalitetni razred A1) (A) i slabim (kvalitetni razred C1) (B) svojstvima tijesta

Genotip pšenice koji pripada u skupinu poboljšivača ima dobra svojstva prikazana farinogramom, uključujući dulje vrijeme razvoja tijesta, dulje vrijeme stabilnosti tijesta, manji stupanj omekšavanja tijesta te pripada kvalitetnom razredu A1 (Slika 23A). Nasuprot tome, genotip pšenice s lošijim parametrima kvalitete ima znatno lošiju farinografsku krivulju, obilježenu kraćim vremenom razvoja tijesta, kraćom stabilnošću tijesta, većim stupnjem omekšavanja tijesta te pripada nižem kvalitetnom razredu C1 (Slika 23B).

Farinograf je široko korišten uređaj za testiranje kvalitete, no u različitim zemljama se koriste i drugi uređaji poput alveografa, ovisno o nacionalnim standardima pojedine zemlje (Tablica 13, 14, 15).

U tablici 13 prikazani su parametri određivanja kvalitete pšenice u Njemačkoj. Brojevi prikazuju minimalnu vrijednost za svaki parametar kvalitete koju pšenica mora zadovoljiti kako bi se klasificirala u određenu kategoriju.

Tablica 13. Sustav klasifikacije kvalitete pšenice u Njemačkoj

Parametri kvalitete	Kvalitetne klase			
	Elita	Visoka kvaliteta	Normalna	Meka
	E	A	B	K
Sadržaj proteina (%)	13,8	13,2	12,8	12,4
Sedimentacijska vrijednost (ml)	47	33	26	19
Prinos brašna (%)	76	74	74	76
Upijanje vode (%)	56,9	55,9	53,7	52,6
Broj padanja (sek)	285	255	255	235
Volumen tijesta (ml/100 g)	710	650	590	560

Izvor: Lásztity i Salgó (2002)

U Italiji se primijenjuje nešto drugačiji sustav klasifikacije pšenice, prikazan u tablici 14. Ovaj sustav podrazumijeva i upotrebu alveografa, instrumenta koji mjeri otpor tijesta prilikom upuhivanja zraka ispod uzorka tijesta. Alveograf pruža informacije o otporu, rastezljivosti i elastičnosti tijesta, slično podacima koji se mjere ekstenzografom. Energija deformacije (W) odnosi se na količinu energije koju je potrebno utrošiti za potpunu deformaciju tijesta. Svojstva glutena, označena kao P/L, definiraju se kroz maksimalnu visinu krivulje, koja predstavlja omjer maksimalnog napona (P) i prosječne duljine krivulje sve do puknuća, što ukazuje na rastezljivost (L).

Tablica 14. Sustav klasifikacije pšenice u Italiji

Kvalitetne klase	Alveograf		Sadržaj proteina, $N \times 5,7$	Stabilnost tijesta (farinograf), %	Broj padanja, sek
	W	P/L			
Poboljšivač	300	1	14,5	15	250
Visoka kvaliteta	220	0,6	13,5	10	220
Normalan kruh	160	0,6		5	220
Za proizvodnju keksa	115	0,5			240

Izvor: Lásztity i Salgó (2002)

Sustav klasifikacije pšenice koji se koristi u Mađarskoj, u obzir uzima veći broj parametara, a pšenica se grupira u tri klase (Tablica 15).

Tablica 15. Sustav klasifikacije kvalitete pšenice u Mađarskoj

Parametri kvalitete	Premium	I. klasa	II. klasa
Sadržaj proteina (%)	14,0	12,5	11,5
Sadržaj vlažnog glutena (%)	34	30	26
Broj padanja (sek)	300	250	220
Sedimentacijska vrijednost (ml)	45	35	30
Grupa kvaliteta (farinograf)	A	B	B
Upijanje vode (farinograf) (%)	60	55	55
Stabilnost (farinograf) (min)	10	6	4
W (alveograf) (10^{-4} J)	280	200	150
P/L (alveograf) (maks.)	1,0	1,5	1,5

Izvor: Magyar i sur. (2021)

10.7. Negativne karakteristike glutena za ljudsko zdravlje

Gluten, zbog svojih elastičnih i stabilnih svojstava, je protein koji najviše doprinosi volumenu kruha. Ovaj protein zaostaje kada se brašno ispere od škroba dajući

tijestu gumasti karakter. Također se koristi i kao aditiv u prehrambenoj industriji za poboljšanje teksture tijesta. Prosječna dnevna konzumacija glutena iznosi 10 do 20 g (Mišak, 2014). Za veliku većinu ljudi, gluten nema nikakav štetan utjecaj, ali kod nekih može uzrokovati zdravstvene probleme kao što su celijakija, alergija na pšenicu i preosjetljivost na gluten (Ludvigsson i sur., 2013). Na iste bolesti može utjecati i način obrade hrane, poput upotrebe kvasca ili fermentacija kiselog tijesta, vrijeme fermentacije i uvjeti pečenja, a koji također mogu utjecati na prisutnost i bioaktivnost inhibitora α -amilaze i tripsina, lektina i brzo fermentirajućih ugljikohidrata (Brouns i sur., 2019). U prošlosti, problemi povezani s glutenom su bili rjeđi, što se pripisuje manjem sadržaju glutena zrnu pšenice. Međutim, u suvremenom dobu dijagnoze povezane s intolerancijom na gluten postaju sve češće, što se dovodi u vezu s povećanim sadržajem glutena u modernim sortama pšenice (Shewry i sur., 2002).

Celijakija ili glutenska enteropatija je autoimuni poremećaj koji nastaje genetskom predispozicijom, ali je i pod utjecajem okolišnih čimbenika (Green i Cellier, 2007), a gluten predstavlja toksičnu komponentu pšenice koja je glavni uzrok. Riječ je o najvažnijem proteinu pšenice koji se sastoji od aminokiselina od kojih je najvažnija prolin, ali i glutamin. Treba uzeti u obzir da glijadin sadrži peptidne sekvence (poznate kao epitopi) otporne na razgradnju crijevnim enzimima zbog visokog sadržaja prolina i glutamina koje se teže razgrađuju (Hausch i sur., 2002). Modifikacija tkivnom transglutaminazom (tTG) koja modificira glijadin reakcijom deamidacije i umreženim povezivanjem može potaknuti upalne reakcije i imunološki odgovor, što dovodi do celijakalije. Smatra se da je nekoliko stotina glutenskih peptida imunogeno i može potaknuti odgovor posredovan crijevnim T-stanicama (Arentz-Hansen i sur., 2002). Odgovor mogu potaknuti i sekvence iz α -, γ - i ω - glijadina, ali i one iz glutenina. Genetska predispozicija kod osoba koje imaju humani leukocitni antigen HLA-DQ2 i HLA-DQ8, okolišni čimbenici (unos glutena) i autoantigen tkivne transglutaminaze (tTG) su ključni za razvoj ove autoimune bolesti (Caio i sur., 2019). U probavnom sustavu gluten će izazvati oštećenja, upalu, te atrofiju crijevne sluznice te onemogućiti normalnu apsorpciju hranjivih tvari. Simptomi kod djece uključuju zastoj u razvoju, odgođeni pubertet, proljev, nadutost i bolove u trbuhu, te učestale anemije. Kod starije djece, ovisno o količini unosa glutena, osim pojave proljeva, mogu se pojaviti simptomi mučnine, povraćanje, bolovi i nadutost u trbuhu, što posljedično može rezultirati gubitkom težine i/ili zatvorom (Jericho i Guandalini, 2018; Gallegos i Merkel, 2019). Kod odraslih, osim simptoma slabosti, nadutosti, pojave kroničnog proljeva i boli u trbuhu, celijakija može uzrokovati i teške bolesti poput neplodnosti, Duhringove bolesti (kožna celijakija), osteoporoze, anemije, oštećenja jetre i neuroloških problema (Kaukinen i sur., 2002; Baydoun i sur., 2012; Pantaleoni i sur., 2014; Casella i sur., 2016). Zbog svih navedenih simptoma i bolesti koje celijakija uzrokuje potrebno ju je liječiti kao višesistemski poremećaj. Također, treba naglasiti da je rizik oboljenja od neke druge autoimune

bolesti tri do deset puta veći u bolesnika s celijakijom (Assa i sur., 2017). Jedini način liječenja ove bolesti je bezglutenska prehrana.

Preosjetljivost na gluten je još uvijek nedovoljno razjašnjen imunološki poremećaj, a nije jasno jesu li uzročnici gluten ili druge komponente pšenice, kao što su oligosaharidi, inhibitori amilaze i tripsina ili aglutinin iz pšeničnih klica (Dieterich i sur., 2022). Inhibitori amilaze i tripsina čine približno 2 – 4 % ukupnih proteina u modernoj pšenici (gdje gluten čini 80 – 90 %) (Khan i sur., 2018). Radi se o proteinima albumina koji djeluju kao obrambeni proteini biljaka pšenice, a zajedno s globulinima pripadaju skupini rezervnih proteina (Gianibelli i sur., 2001). Serološki marker koji je zabilježen kod pacijenata s osjetljivošću na gluten je pozitivan anti-glijadin AGA antitijelo - IgG AGA (Volta i sur., 2012). Slično kao kod celijakije, simptomi preosjetljivosti na gluten uključuju crijevne probleme, slabost i glavobolju (Mišak, 2014).

Alergijska reakcija na pšenicu razlikuje se od celijakije i preosjetljivosti na gluten. Proteini pšenice mogu aktivirati imunološki posredovani alergen koji aktivira imunoglobulin E (IgE) i ne-IgE posredovane imunološke odgovore (Cianferoni, 2016). Alergijske reakcije posredovane IgE protutijelima mogu u nekim slučajevima uzrokovati i anafilaktički šok, dok alergije koje nisu posredovane IgE protutijelima obično predstavljaju nepodnošljivost ili netoleranciju na gluten. Alergeni koji se nalaze u pšeničnom brašnu su alfa-purotionin, inhibitor alfa-amilaze i tripsina, peroksidaza, tioredoksin, prijenosnik lipoproteina, inhibitor serin proteinaze, protein sličan tauramatinu, gliadin, tiol reduktaza, 1-cis-peroksiredoksin i inhibitor sličan serinskoj proteazi. Procjenjuje se da je alergija na pšenicu utvrđena kod 3,6 % europskog stanovništva, i treća je najčešća alergija na hranu nakon alergija na mlijeko i jaja (Nwaru i sur., 2014). Zanimljivo je da kod nekih osoba alergičnih na pšenicu, udisanje pšeničnog brašna može izazvati alergijski rinitis ili urtikariju na koži, posredstvom nanesenih kozmetičkih proizvoda. Nekoliko glavnih proteina pšeničnog brašna netopljivih u vodi ili otopini soli (prolamini), uključujući α -, β -, γ - i ω -glijadine te pojedince glutenina niske molekularne mase (LMW) mogu se vezati za IgE i izazvati rinitis (Bittner i sur., 2008).

11 • Upotreba pšenice za ishranu stoke

Pšenica koja se koristi za stočnu hranu obično predstavlja višak u odnosu na potrebe ljudske prehrane ili se radi o pšenici niske kvalitete zrna neprikladne za ljudsku konzumaciju zbog niske hektolitarske mase ili oštećenja zrna. Najčešće je riječ o pšenici koja nije zadovoljila kontrolu kvalitete potrebne za tržište namijenjeno ljudskoj prehrani. Međutim, i pšenica namijenjena stočnoj hrani mora zadovoljiti određene standarde, uključujući maksimalnu razinu vlage od 12 %, ograničenje nečistoća zrna na najviše 15 %, te prisutnost vitamina B i E. Također, sadržaj proteina u takvoj pšenici mora biti zastupljen u rasponu od 10 do 16 %. Preporučuje se miješanje pšenice s drugim žitaricama u stočnoj hrani, zbog njenog ograničenog sadržaja vlakana i proteina. S druge strane, pšenične posije (tehnički nazvane mekinje) su proizvod namijenjen ishrani životinja zbog visokog udjela aminokiselina i visokog postotka sadržaja proteina (Debi i sur., 2019). Pšenične mekinje su uglavnom sastavljene od vanjskih dijelova pšeničnog zrna, dobivenih tijekom njegove prerade, i sadrže različite hranjive komponente (Tablica 16).

Pšenične mekinje namijenjene hranidbi preživača i svinja zahtijevaju određene uvjete i obavljenju analizu kako bi se provjerila njihova kvaliteta i hranjiva vrijednost. Prije njihove upotrebe u stočnoj hrani, važno je provesti analizu bakterijskih populacija, posebice prisutnost bakterija iz roda *Salmonella* i *Clostridium*. Također, potrebno je odrediti sadržaj vlage i lipida (masti) kako bi se spriječila užeglost, izmjeriti sadržaj škroba i vlakana te popratiti stanje uskladištenih pšeničnih posija kako bi se izbjegao rast gljivica i pojave mikotoksina zbog prekomjerne vlage (NN 84/2006).

Međutim, postoji i pšenica koja se uzgaja isključivo za stočnu hranu, bilo kao zimsku ispaša ili kao izvor krmiva (Shuja i sur, 2009). U Hrvatskoj se pšenica prvenstveno koristi kao sirovina za proizvodnju smjesa koncentrata, a rjeđe kao silaža. U nekim se zemljama pšenica uzgaja s dvostrukom namjenom – i za stočnu hranu i za proizvodnju zrna za ljudsku prehranu. Takva pšenica osigurava visoko kvalitetno krmivo tijekom vegetacijske sezone (Krenzer, 2000), obično se sije vrlo rano za ispašu tijekom zime i ranog proljeća, ali ostvaruje niže uroda zrna u usporedbi s kasnije posijanom pšenicom. U istraživanju Wintera i Musicka (1991) pokazalo se da su viši genotipovi pšenice u sustavu dvostruke namjene produktivniji od polupatuljastih genotipova koji imaju više uroda zrna kada je njihova namjena isključivo za proizvodnju zrna. Kod pšenice dvostruke namjene važno je osigurati gušću sjetvu kako bi se postigla veća lisna masa prije zime, uz jači porast u ranoj jeseni.

Tablica 16. Komponente pšeničnih posija (mekinja)

Komponenta	Količina	Jedinica
Sadržaj proteina	9,9-18,6	% (p/p)
Vlaga	11,6-12,0	
Lipidi	5,0-6,3	
Pepeo	5,7-6,5	
Ukupna prehrambena vlakna	36-63	
Sadržaj škroba	21,1-38,9	g/100 g
Ukupna vlakna	35,7-53,4	
Celuloza	6,5-9,9	
Hemiceluloza	20,8-33,0	
Lignin	2,2-9,0	mg/100 g
Željezo	2,5-19,0	
Magnezij	390-640	
Cink	2,5-14,1	
Mangan	4,0-14,0	
Fosfor	900-1500	
Kalcij	24-500	
Natrij	2-41	
Kalij	1182-1900	

Izvor: Chaquilla-Quilca i sur. (2018)

U Europskoj uniji uspostavljene su regulative koje se odnose na potrošnju stočne hrane, s obzirom na utjecaj konzumacije mesa na zdravlje i okoliš te na rastuću zabrinutost za dobrobit životinja (Guyomard i sur., 2021). U svakom slučaju, preporuka za ishranu mladih životinja je koristiti gotove smjese čije su sirovine tehnološki obrađene i laboratorijski provjerene.

12. Mikotoksini/metaboliti narušavaju kvalitetu zrna pšenice

12.1. Trihoteceni i njihove maskirane forme te zearelenon

Sigurnost i zdravstvena ispravnost hrane među glavnim su globalnim izazovima, osobito u svjetlu rastućeg svjetskog stanovništva. Prehrambena sigurnost hrane (eng. *food security*) koja uključuje i sigurnost hrane (eng. *food safety*) je određena trima ključnim aspektima, koji uključuju dostupnost hrane, pristup sigurnoj hrani i upotrebu kvalitetne hrane koja doprinosi zdravom načinu života (Mahato i sur., 2019). Jedan od glavnih problema su nepovoljni vremenski uvjeti koji pogoduju razvoju plijesni i mikotoksina, štetnih kako za zdravlje ljudi, tako i za životinje. Mikotoksini i plijesni se najčešće unose hranom u organizam, ali mogu se unijeti i udisanjem ili preko kože. Dosad je poznato više od 400 različitih mikotoksina/metabolita, a neki od njih uzrokuju teška oboljenja domaćih životinja kroz kontaminaciju hrane (Berthiller i sur., 2007). Ako su prisutni u stočnoj hrani, mikotoksini se mogu naći i u životinjskim proizvodima, mlijeku i mesu.

Rodu *Fusarium* pripadaju najvažnije patogene vrste gljiva koje inficiraju žitarice u poljskim uvjetima tijekom vegetacije i proizvode mikotoksine. Posebno su značajni genotipovi pšenice koji su razvili genetsku tip III otpornost, ključnu u borbi protiv fuzarijske paleži klasa (Španić i sur., 2019a). Osim što fuzarijska palež klasa može smanjiti kvalitetu i urod zrna, još veću opasnost za ljude i životinje predstavlja kontaminacija pšenice štetnim mikotoksinima od kojih je najzastupljeniji deoksinivale-nol (DON). Općenito, različite *Fusarium* vrste, njihova učestalost te vrsta i količina sekundarnih metabolita koji se nakupljaju u zrnu ovise o vremenskim uvjetima, osobito tijekom cvatnje pšenice (Kelly i sur., 2015). Vrijeme infekcije određuje i vrstu simptoma pa će tako infekcija prašnika rezultirati nepotpunim ili izostankom razvoja zrna, dok kasnije infekcije uzrokuju razvoj smežuranih zrna koja sadrže mikotoksine (Slika 24).



Izvor: https://www.gospodarstvo-petricevic.hr/kor/picture.php/219/tags/67-fusarium_graminearum

Slika 24. Zaražena zrna *Fusarium* vrstama u odnosu na zdrava normalna zrna

Međutim, zrno može izgledati i potpuno zdravo, a istovremeno sadržavati i mikotoksine (Del Ponte i sur., 2007). Smanjenje rizika od nakupljanja mikotoksina postiže se primjenom preventivnih mjera poput plodoreda i obrade tla, ali najvažnije, uzgojem otpornih sorti na fuzarijsku palež klasa (Blandino i sur., 2012). Također, primjena fungicidnih pripravaka može djelomično smanjiti infekciju i nakupljanje mikotoksina (Ransom i McMullen, 2008). Dvije najčešće vrste u svijetu i u RH su *F. graminearum* i *F. culmorum* (Španić i sur., 2010; Pasquali i sur., 2016) i glavni su proizvođači trihotecena tipa B, odnosno DON-a (Scarpino i sur., 2015). Utvrđeno je da *F. graminearum* dominira u područjima s toplim i vlažnim uvjetima, dok je *F. culmorum* u većim količinama detektiran u hladnijim i vlažnim uvjetima (Bottalico i Perrone, 2002). DON, nivalenol, 3 acetil-deoksinivalenol, 15 acetil-deoksinivalenol i fusarenon-X pripadaju trihotecenima tipa-B, dok skupinu tipa-A čine T-2 i HT-2 toksin, diacetoksicirpenol i neosolaniol.

DON, nazvan i vomitoksin, izaziva povraćanje pa životinje odbijaju takvu hranu što smanjuje iskorištenje hrane za 30 do 50 %, što dovodi i do slabljenja imunološkog sustava životinja (Woelflingseder i sur., 2019). Komisija Europske unije regulirala je maksimalne dopuštene razine za DON (EC 1881/2006), pri čemu neprerađena pšenica, brašno, kruh i hrana na bazi pšenice za dojenčad i malu djecu ne smiju sadržavati više od 1250, 750, 500, odnosno 200 µg/kg DON-a. Istraživanja pokazuju da venuće vršnog dijela klasa pšenice može biti indikator otpornosti tipa III, budući da postoji značajna korelacija između ovog simptoma i DON-om izbijeljenih klasića (Španić i sur., 2013). Kod genotipova otpornih na fuzarijsku palež klasa, akumulacija DON-a je znatno manja, nego kod osjetljivih genotipova, što je

u korelaciji s količinom glutena koja je kod otpornih genotipova nepromijenjena (Španić i sur., 2020a). S obzirom da su mikotoksini i intezitet zaraze u visokoj pozitivnoj korelaciji, stvaranjem otpornih genotipova na fuzarijsku palež klasa smanjuje se i nakupljanje mikotoksina u zrnu (Bai i sur., 1994). No, u iznimnim slučajevima, sadržaj DON-a nije uvijek u korelaciji sa zarazom fuzarijskom paleži klasa jer ta svojstva mogu biti regulirana i neovisnim genskim lokusima (Somers i sur., 2003). Otpornost na širenje bolesti duž klasa (tip II otpornost) kod pšenice je usko povezana s metabolizmom DON-a u deoksinivalenol-3-glukozid (D3G) (Lemmens i sur., 2005). Na primjer, prekomjerna ekspresija uridin difosfat glukoziltransferaze rezultirala je povećanom otpornošću na fuzarijsku palež klasa (Li i sur., 2015). Konverzija DON-a u D3G je bila uspješnija kod genotipova otpornih na fuzarijsku palež klasa (Španić i sur., 2019b). D3G, kao maskirani mikotoksin, se hidrolizira u probavnom traktu sisavaca, doprinoseći ukupnoj izloženosti DON-u kroz hranu (Španić i sur., 2020b). Maskirane forme mikotoksina teško se detektiraju jer se kemijski razlikuju od roditeljskih mikotoksina i trenutno ne postoje propisi koji ih reguliraju. Osim DON-a, i nivalenol i zearalenon imaju maskirane forme. Veliki rizik kod maskiranih formi predstavlja njihova prisutnost čak i kod genotipova koji su otporniji na fuzarijsku palež klasa (Ovando-Martínez i sur., 2013). Osim DON-a i D3G-a, opasni mikotoksini u pšenici uglavnom su toksini iz roda *Fusarium*, poput acetiliranih oblika DON-a (15 acetil-deoksinivalenol i 3 acetil-deoksinivalenol), zearalenona (ZEN), nivalenola (NIV), fumonizina (FB), T-2 i HT-2 toksina i njihovih modificiranih oblika (Rodrigues i Naehrer, 2012).

Dominantni kemotip kojega stvara vrsta *F. graminearum* u Europi je 15-acetil-deoksinivalenol, dok je dominantni kemotip vrste *F. culmorum* 3-acetil-deoksinivalenol (Alisaac i sur., 2019). Nivalenol je također vrlo opasan mikotoksin zbog svojih imunotoksičnih i hemotoksičnih učinaka na sisavce (Zingales i sur., 2021), a njegova maskirana forma je nivalenol-3-glukozid (Bryła i sur., 2022). U hladnijim i vlažnim uvjetima, *F. langsethiae*, *F. poae* i *F. sporotrichioides* su dominantne vrste koje proizvode T2 i HT2 toksine (Krska i sur., 2014). Ovi toksini inhibiraju sintezu proteina i proliferaciju stanica u biljkama, te mogu uzrokovati akutnu ili kroničnu intoksikaciju kod ljudi i životinja (Rocha i sur., 2005). Preporuka Europske komisije (EC, 2013/165/EU) za ukupnu količinu ova dva toksina u žitaricama i proizvodima od žitarica varira, od 15 µg/kg za hranu na bazi žitarica za dojenčad i malu djecu, do 2000 µg/kg za zob koja se proizvodi za meljavu. *F. graminearum* je među glavnim vrstama koje proizvode zearalenon u pšenici (Beev i sur., 2013). Zearalenon je estrogenski mikotoksin koji može ugroziti reproduktivne funkcije kod životinja, a kod preživača do trovanja zearalenonom obično dolazi nakon dugotrajnog unosa malih količina koje se akumuliraju u organizmu.

12.2. Novonastali (eng. *emerging*) mikotoksini/metaboliti

Osim poznatih mikotoksina, postoji i skupina tzv. "novonastalih" (eng. *emerging*) mikotoksina. Najčešće, neke *Fusarium* vrste, poput *F. poae*, mogu proizvesti

nivalenol i druge novonastale mikotoksine, kao što su beauvericin, eniatini i fuzarin (Jestoi, 2008). Tijekom trogodišnjeg istraživanja, moniliformin, beauvericin i eniatini su se pojavili u visokom postotku između 27 i 100 % (Španić i sur., 2023). Međutim, za novonastale mikotoksine iz roda *Fusarium*, uključujući eniatine, beauvericin, fuzaproliferin i moniliformin, unatoč sve većoj učestalosti još uvijek nisu zakonski propisane maksimalne granice u zrnu i prerađenim proizvodima (Jestoi, 2008). Više od 20 *Fusarium* vrsta može sintetizirati eniatine i beauvericin, ali u proizvodnji ovih mikotoksina prevladava vrsta *F. poae* (Jestoi, 2008). Koncentracije eniatina u inficiranim zrnima rangirane su kako slijedi: eniatin B > eniatin B1 > eniatin A1 > eniatin B2 > eniatin A > eniatin B3 (Španić i sur., 2020b). Slična istraživanja su pokazala da je eniatin B najzastupljeniji između svih eniatina u različitim vrstama žitarica, a za njim slijede eniatin B1, eniatin A1 i eniatin A (Orlando i sur., 2019).

F. proliferatum je jedan od najčešćih uzročnika kontaminacije zrna pšenice mikotoksinom beauvericinom (Guo i sur., 2016). Beauvericin je pokazao toksičnost za nekoliko vrsta ljudskih limfoblastoidnih stanica, potičući apoptozu i fragmentaciju DNA (Ojcius i sur., 1991). Jedan od novonastalih mikotoksina je i kulmorin, koji proizvode vrste *F. culmorum*, *F. graminearum* i *F. venenatum* (Langseth i sur., 2001). Uočeno je da kulmorin i DON često imaju pozitivnu korelaciju u prirodno inficiranim uzorcima (Khaneghah i sur., 2019). Osim što su DON i kulmorin često povezani, pozitivna korelacija je zabilježena i s hidroksikulmorinom (Šunić i sur., 2021). U istraživanju Španić i sur. (2020b) potvrđena je prisutnost kulmorina i različitih hidroksi-kulmorina (5- i 15-hidroksi-kulmorin) u koncentracijama sličnim onima DON-a. Međutim, u nekim je slučajevima, količina kulmorina premašila 2 do 3 puta vrijednosti koncentracije DON-a (Uhlig i sur., 2013).

12.3. Fumonizini i multitoksini

Fumonizini su skupina mikotoksina koje uglavnom proizvode vrste *F. verticillioides* i *F. proliferatum*, pri čemu je fumonizin B1 najznačajniji zbog svoje toksičnosti i učestalosti (Cendoya i sur., 2018). Na fumonizine su posebno osjetljivi konji kod kojih ovi mikotoksini mogu izazvati leukoencefalomalaciju, bolest od koje se konji vrlo rijetko oporavljaju (Vendruscolo i sur., 2016). Kod peradi i svinja, fumonizini utječu na limfocite i smanjuju imunitet, a kod svinja se povezuju i s razvojem edema pluća (Pierron i sur., 2016). Europska unija je 2007. godine postavila maksimalne granice fumonizina za ljudsku prehranu u žitaricama i hrani na bazi žitarica (EC 1126/2007EU), ali specifične granice za pšenicu ili proizvode na bazi pšenice još nisu utvrđene. Iako se fumonizini najčešće pojavljuju u zrnu kukuruza, istraživanja su pokazala da su nađeni i u pšenici (Kushiro i sur., 2009). Primjerice, moniliformin nađen u pšenici proizvodi vrsta *F. avenaceum* (Golinski i sur., 1997). Kontaminacija pšenice moniliforminom i drugim mikotoksinima može biti podcijenjena, s obzirom na to da je je *F. avenaceum* široko rasprostranjen uzročnik fuzarijske paleži klasa pšenice i može proizvesti visoke razine moniliformina. Moniliformin može imati

aditivni učinak s beauvericinom i eniatinima koji se također mogu akumulirati u pšenici (Logrieco i sur., 2002).

Sekundarni postupci obrade brašna, poput fermentacije i toplinske obrade, mogu uzrokovati transformacije određenih mikotoksina/metabolita. Mikotoksini koji pripadaju tipu B trihotecena su postojani pri meljavi, obradi i zagrijavanju što dovodi do njihovog ulaska u prehrambene proizvode (Sugita-Konishi i sur., 2006). Također je zabilježeno povećanje koncentracija 3-acetildeoksinivalenola (3-AcDON) i nivalenola (NIV) u inokuliranom pšeničnom sladu u usporedbi sa neprerađenim zrnima, zbog kombinacije biljnog metabolizma i *de novo* sinteze plijesni tijekom proizvodnje slada (Španić i sur., 2019b). Zearalenon (ZEN) je, s druge strane, bio sintetiziran u sladu, iako nije detektiran u samim zrnima.

Dosta je značajna i pojavnost multimikotoksina, odnosno istovremena prisutnost više mikotoksina (Streit i sur., 2012). Umjetna inokulacija genotipova pšenice *Fusarium* vrstama i procjena otpornosti genotipova prvi su korak u poboljšanju otpornosti na fuzarijsku palež klasa. Drugi korak u programu oplemenjivanja uključuje korištenje otpornih genotipova kao roditeljskih linija u križanjima. Treći korak obuhvaća uvođenje novih otpornih izvora, koji nisu nužno prilagođeni lokalnim uvjetima, u program oplemenjivanja. Tehnike umjetne inokulacije ne koriste se samo za ispitivanje opće otpornosti na *Fusarium spp.*, već se mogu prilagoditi za procjenu pojedinačnih komponenti otpornosti na fuzarijsku palež klasa, poput otpornosti na mikotoksine. Međutim, mnogi mikotoksini/metaboliti koje proizvode *Fusarium* vrste još uvijek nisu regulirani od strane Europske komisije, a utjecaj drugih sekundarnih metabolita na zdravlje potrošača ostaje još uvijek neistražen i nejasan.

12.4. Mikotoksini/metaboliti *Alternaria*, *Penicillium* i *Aspergillus* vrsta

Vrste iz rodova *Alternaria*, *Penicillium* i *Aspergillus* predstavljaju visoku razinu opasnosti za sigurnost hrane jer kontaminiraju žitarice mikotoksinima (Pitt i sur., 2012). Osim *Fusarium* mikotoksina/metabolita, u istraživanjima zrna pšenice su identificirani i *Alternaria* mikotoksini kao što su alternariol, alternariolmethileter, altersetin, infektopiron, tentoksin, tenuazonska kiselina; *Aspergillus* mikotoksin kojična kiselina; i neki nespecifični metaboliti butenolid, brevianamid F, ciklo(L-Pro-L-Tyr), ciklo(L-Pro-L-Val), i triptopol (Španić i sur., 2020b). Među najvažnijim kancerogenim mikotoksinima su aflatoksini, koje proizvode vrste *Aspergillus flavus* i *A. parasiticus* (Del Palacio i sur., 2016). Aflatoksin B1 je posebno kancerogen i Međunarodna agencija za istraživanje malignih tumora ga je svrstala u 1. skupinu kancerogena za ljude (IARC, 2002). Europska unija je regulirala maksimalne dopuštene razine za aflatoksin B1 i ukupne aflatoksine, koje ne smiju prelaziti 2 µg/kg, odnosno 4 µg/kg u bilo kojem proizvodu namijenjenom izravnoj potrošnji (EC, 2010). Dodatnu opasnost predstavlja i termostabilnost aflatoksina, zbog čega se oni ne mogu ukloniti iz konačnih prehrambenih proizvoda procesom obrade (Medina et al., 2017).

12.5. Sustav brzog uzbunjivanja za hranu i hranu za životinje (RASFF)

Mikotosini/metaboliti različitih vrsta su vrlo stabilni tijekom prerade pšeničnog zrna, što predstavlja problem za prehrambenu industriju te se lako mogu naći na policama trgovačkih lanaca u gotovim proizvodima. Osim, konzumacijom hrane, mikotoksini se u organizam unose udisanjem i putem kože pa tako predstavljaju dodatni rizik za ljudsko zdravlje. Da bi se spriječili mogući rizici te omogućila sigurnost hrane, na razini EU-a organiziran je Sustav brzog uzbunjivanja za hranu i hranu za životinje (RASFF). Ovaj sustav omogućava brzu razmjenu informacija među državama članicama o potencijalnim zdravstvenim rizicima, te omogućava brzo poduzimanje mjera u slučaju utvrđivanja takvih rizika uključujući obavještanje javnosti i povlačenje proizvoda s tržišta. U RH, provedba ovog sustava regulirana je Zakonom o hrani, dok je njegova organizacija, komunikacija i način upravljanja istim određena Pravilnikom o sustavu brzog uzbunjivanja za hranu i hranu za životinje. Kako bi se izbjegli mogući zdravstveni rizici povezani s mikotoksinima/metabolitima ključno je provoditi već spomenute preventivne mjere zaštite ne samo u proizvodnji, nego i u skladištenju proizvoda pšenice.

13. Zrna oštećena kukcima

Štetnici mogu nanijeti značajnu štetu biljkama tijekom njihova rasta u poljskim uvjetima, a ta šteta može nastaviti narušavati kvalitetu zrna i tijekom skladištenja. Nakon žetve, glavni izvori zaraze su stare vreće, skladišta, stari spremnici i drugi uređaji koji se koriste pri radu sa zrnima. Zrno s udjelom vlage od 14 – 15 % može se skladištiti do 2 – 3 godine na temperaturi od $\pm 5^{\circ}\text{C}$, pod uvjetom da nema skladišnih štetnika. Prisutnost kukaca u skladištu uzrokuje gubitke u količini i kvaliteti komponenti zrna, jer se kukci hrane zrnom smanjujući njegovu masu. Osim toga, mogu kontaminirati zrno izmetom (toksičnost), tjelesnim fragmentima i kemijskim izlučevinama koje kvare okus i miris brašna. Osim toga, kukci povećavaju temperaturu i vlažnost zrna svojom metaboličkom aktivnošću. Enzimi koje proizvode kukci negativno utječu na kvalitetu mljevenja i pečenja (Brabec i sur., 2015). Procjenjuje se da svake godine oko jedne trećine ukupno proizvedene hrane u svijetu bude izgubljeno zbog infestacije skladišnim štetnicima, što predstavlja materijalnu štetu od otprilike 1,3 bilijuna tona godišnje (Gustavsson i sur., 2011). Kukci pri skladištenju pšenice mogu uzrokovati ozbiljne gubitke nakon žetve, od 9 % u razvijenim zemljama do gotovo 20 % ili više u zemljama u razvoju (Pimentel, 1991).

Primarni štetnici napadaju zdrava zrna, dok sekundarni štetnici mogu napasti samo oštećena i napuknuta zrna ili mljevene proizvode (Ahmad i sur., 2022). Primarni štetnici obično su destruktivniji od sekundarnih, posebno kod kratkotrajnog skladištenja zrna. Ovi štetnici se mogu hraniti kako unutar zrna, tako i na njegovoj površini. Jedan od takvih kukaca je žitni žižak (*Sitophilus granarius*) (Gałęcki i sur., 2019) (Slika 25). Ženke žitnog žižka polažu mnoštvo jajašaca (između 36 i 254), pri čemu svako jajašce polažu u pojedinačno zrno. Ličinke se zatim hrane unutrašnjošću zrna pšenice, gdje mogu ostati do pet tjedana pri višim temperaturama, ili do 20 tjedana u hladnijim uvjetima. Žitni žižak je tamnosmeđe do crne boje i ne može letjeti.



Izvor: <https://extension.umd.edu/resource/rice-and-granary-weevils>

Slika 25. Žitni žižak na zrnima pšenice

Osim žiška u primarne štetnike ubrajaju se i neki tvrdokrilci poput hrđave žitne zlatice (*Cryptolestes ferrugineus*) (Slika 26) i svrdlaši kao što su žitni kukuljičar (*Rhyzopertha dominica*). Hrđava žitna zlatica polaže od 200 do 500 jajašaca, odlažući ih na zrna i među zrna pšenice ili na ostatke zrna. Nakon izlijeganja, ličinke odmah počinju tražiti hranu, ciljajući na klicu zrna. Također je opasan i žitni kukuljičar jer oštećuje zrno i u stadiju ličinke.



Izvor: <https://www.grainscanada.gc.ca/en/grain-quality/manage/identify-an-insect/primary-insect-pests/rusty-grain-beetle.html?wbdisable=true>

Slika 26. Hrđava žitna zlatica na zrnju pšenice

Sekundarni štetnici se obično hrane zrnima koja su već oštećena djelovanjem primarnih štetnika. Oni također mogu nastanjivati prerađene proizvode poput brašna ili zrna koja su oštećena lošom vršidbom, sušenjem ili mehaničkim oštećenjem. Sekundarni štetnici koji mogu narušiti klijavost ili se nastaniti u brašnu su grinje (*Lepidoglyphus destructor* i *Acarus siro*) ili neke vrste moljaca poput (*Sitotroga cerealella*), ali i neki tvrdokrilci (*Cryptophagus* species) te mauritanski brašnar (*Tenebriooides mauritanicus*) koji nagriza klicu. U ovoj skupini se nalaze i veliki brašnar (*Tenebrio molitor*) i mali brašnar (*Tribolium confusum* i *T. castaneum*). Mali brašnari jedni su od najčešćih štetnika žitarica. Tijelo im je dugo 3-4 mm, smeđe ili crvenkaste je boje (Slika 27). Mogu oštetiti i neoštećeno zrno ako je dovoljno vlažno. Vrlo je opasan *T. confusum* koji proizvodi benzokinone. Kada se benzokinoni progutaju, akumuliraju se u tijelu i ljudi i životinja te mogu uzrokovati histopatološke promjene, disfunkciju jetre i karcinogenezu (Lis i sur., 2011). Moljci se mogu hraniti zrnom, ostavljajući iza sebe samo prah i ljuskice, a gusjenice se ubušuju u zrno i tako se hrane. Kada im ponestane hrane u jednom zrnju prelaze na drugo. Postoje i vrste moljaca koje zapređaju gustom predom hrpice brašna.



Izvor: https://www.grainscanada.gc.ca/en/grain-quality/manage/identify-an-insect/primary-insect-pests/_images/cfb-tbf-lateral_b.jpg

Slika 27. Mali brašnar na zrnju pšenice

Za očuvanje zdravstvene ispravnosti pšeničnog zrna ključno je održavati skladišta čistima i po potrebi koristiti zaštitna sredstva. Također, treba izbjegavati miješanje staroga zrna s novim te skladištiti samo čisto i suho zrno. Redovita prozračivanja zrna i redoviti pregledi su neophodni za sprječavanje infestacija štetnicima. Jedna od učinkovitih metoda suzbijanja kukaca u skladištima je fumigacija prostora. Ovaj postupak uključuje korištenje plina ili pare u strogo kontroliranim uvjetima uz educirane djelatnike i zaštitnu opremu, a osobito je korisno jer može prodrijeti u teško dostupna mjesta i učinkovito eliminirati štetnike.

14. Literatura

- Abbaspour N, Hurrell R, Kelishadi R. 2014. Review on iron and its importance for human health. *Journal of Research in Medical Sciences* 19:164-174.
- Abdel-Motagally FMF, El-Zohri M. 2018. Improvement of wheat yield grown under drought stress by boron foliar application at different growth stages. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences* 17:178-185.
- Adrees M, Khan ZS, Ali S, Hafeez M, Khalid S, Ur Rehman MZ, Hussain A, Hussain K, Shahid Chatha SA, Rizwan M. 2020. Simultaneous mitigation of cadmium and drought stress in wheat by soil application of iron nanoparticles. *Chemosphere* 238, 124681.
- Ahmad R, Hassan S, Ahmad S, Nighat S, K. Devi Y, Javeed K, Usmani S, Javed Ansari, M, Erturk S, Alkan M, Hussain B. 2022. Stored Grain Pests and Current Advances for Their Management. *Postharvest Technology - Recent Advances, New Perspectives and Applications*. IntechOpen. Dostupno online: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.101503> (Datum pristupa 6. svibnja 2023.).
- Alemzadeh A, Rastgoo L, Tale A, Tazangi S, Eslamzadeh T. 2014. Effects of copper, nickel and zinc on biochemical parameters and metal accumulation in govan, *Aeluropus littoralis*. *Plant Knowledge* 3:31-38.
- Alisaac E, Behmann J, Rathgeb A, Karlovsky P, Dehne HW, Mahlein AK. 2019. Assessment of *Fusarium* infection and mycotoxin contamination of wheat kernels and flour using hyperspectral imaging. *Toxins* 11, 556.
- Al-Othman ZA, Ali R, Al-Othman AM, Ali J, Habila MA. 2016. Assessment of toxic metals in wheat crops grown on selected soils, irrigated by different water sources. *Arabian Journal of Chemistry* 9:S1555-S1562.
- Alpuerto JB, Brasier KG, Griffey CA, Thomason WE, Fukao T. 2021. Accelerated senescence and nitrogen remobilization in flag leaves enhance nitrogen use efficiency in soft red winter wheat. *Plant Production Science* 24:490-504.
- Anandan A, Sabesan T, Eswaran R, Rajiv G, Muthalagan N, Suresh R. 2009. Appraisal of environmental interaction on quality traits of rice by additive main effects and multiplicative interaction analysis. *Cereal Research Communications* 37:131-140.

- Anjum FM, Ahmad I, Butt MS, Sheikh MA, Pasha I. 2005. Amino acid composition of spring wheats and losses of lysine during chapati baking. *Journal of Food Composition and Analysis*. 18:523-532.
- Assa A, Frenkel-Nir Y, Tzur D, Katz LH, Shamir R. 2017. Large population study shows that adolescents with celiac disease have an increased risk of multiple autoimmune and nonautoimmune comorbidities. *Acta Paediatrica* 106:967-972.
- Arentz-Hansen H, McAdam SN, Molberg O, Fleckenstein B, Lundin KEA, Jørgensen TJD, Jung G, Roepstorff P, Sollid LM. 2002. Celiac lesion T cells recognize epitopes that cluster in regions of gliadins rich in proline residues. *Gastroenterology* 123:803-809.
- Atkinson FS, Foster-Powell K, Brand-Miller JC. 2008. International tables of glycemic index and glycemic load values: 2008. *Diabetes Care* 31:2281-2283.
- Bai G, Shaner G. 1994. Scab in wheat: Prospects for control. *Plant Disease* 78:760-766.
- Bainotti C, Cuniberti M, Masiero B, Donaire G, Gómez D, Reartes F, Salines J, Formica M, Fraschina J, Nisi J, Mir y L, Berra O. 2009. Caracterización de cultivares de trigo por brotado en precosecha. *Agriscientia* 24:29-33.
- Batten GD. 1992. A review of phosphorus efficiency in wheat. *Plant and Soil* 146:163-168.
- Baydoun A, Maakaron JE, Halawi H, Abou Rahal J, Taher AT. 2012. Hematological manifestations of celiac disease. *Scandinavian Journal of Gastroenterology* 47:1401-1411.
- Beev G, Denev S, Bakalova D. 2013. Zearalenone—Producing activity of *Fusarium graminearum* and *Fusarium oxysporum* isolated from Bulgarian wheat. *Bulgarian Journal of Agricultural Science* 19:255-259.
- Bell RW. 1997. Diagnosis and Prediction of Boron Deficiency in Plant Production. U: Boron in Soil and Plant. Dell B, Brown PH, Bell RW. (Ur.). Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Nizozemska.
- Benech-Arnold RL, Rodriguez MV, Batlla D. 2013. Seed dormancy and agriculture, physiology. U: Sustainable Food Production. Christou P, Savin R, Costa-Pierce BA, Misztal I, Whitelaw CBA (Ur.). Springer, New York, SAD.
- Bentley AR, Horsnell R, Werner CP, Turner AS, Rose GA, Bedard C, Howell P, Wilhelm EP, Mackay IJ, Howells RM, Greenland A, Laurie DA, Gosman N. 2013. Short, natural, and extended photoperiod response in BC2F 4 lines of bread wheat with different Photoperiod-1 (*Ppd-1*) alleles. *Journal of Experimental Botany* 64:1783-1793.

- Beral A, Rincent R, Le Gouis J, Girousse C, Allard V. 2020. Wheat individual grain-size variance originates from crop development and from specific genetic determinism. *PLoS One* 15:e0230689.
- Bernard A. 2008. Cadmium & its adverse effects on human health. *Indian Journal of Medical Research* 128:557-564.
- Berthiller F, Sulyok M, Krska R, Schuhmacher R. 2007. Chromatographic methods for the simultaneous determination of mycotoxins and their conjugates in cereals. *International Journal of Food Microbiology* 119:33-37.
- Bhatta M, Baenziger PS, Waters BM, Poudel R, Belamkar V, Poland J, Morgounov A. 2018. Genome-wide association study reveals novel genomic regions associated with 10 grain minerals in synthetic hexaploid wheat. *International Journal of Molecular Sciences* 19:3237.
- Bhatta M, Regassa T, Wegulo SN, Baenziger PS. 2018. Foliar Fungicide effects on disease severity, yield, and agronomic characteristics of modern winter wheat genotypes. *Agronomy Journal* 110:602-610.
- Biddulph TB, Plummer JA, Setter TL, Mares DJ. 2007. Influence of high temperature and terminal moisture stress on dormancy in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Field Crops Research* 103:139-153.
- Biesiekierski JR. 2017. What is gluten? *Journal of Gastroenterology and Hepatology* 32:78-81.
- Bittner C, Grassau B, Frenzel K, Baur X. 2008. Identification of wheat gliadins as an allergen family related to baker's asthma. *Journal of Allergy and Clinical Immunology* 121:744-749.
- Blandino M, Haidukowski M, Pascale M, Plizzari L, Scudellari D, Reyneri A. 2012. Integrated strategies for the control of Fusarium head blight and deoxynivalenol contamination in winter wheat. *Field Crops Research* 133:139-149.
- Böhmdorfer S, Oberlerchner JT, Fuchs C, Rosenau T, Grausgruber H. 2018. Profiling and quantification of grain anthocyanins in purple pericarp × blue aleurone wheat crosses by high-performance thin-layer chromatography and densitometry. *Plant Methods* 14, 29.
- Boita ER, Oro T, Bressiani J, Santetti GS, Bertolin TE, Gutkoski LC. 2016. Rheological properties of wheat flour dough and pan bread with wheat bran. *Journal of Cereal Science* 71:177-182.
- Borrill P, Connorton JM, Balk J, Miller AJ, Sanders D, Uauy C. 2014. Biofortification of wheat grain with iron and zinc: integrating novel genomic resources and knowledge from model crops. *Frontiers in Plant Science* 5, 53.

- Bottalico A, Perrone G. 2002. Toxigenic *Fusarium* species and mycotoxins associated with head blight in small-grain cereals in Europe. *European Journal of Plant Pathology* 108:611-624.
- Brabec DL, Pearson TC, Maghirang EB, Flinn PW. 2015. Detection of fragments from internal insects in wheat samples using a laboratory entoleter. *Cereal Chemistry* 92:8-13.
- Brites CM, Santos CALD, Bagulho AS, Beirão-Da-Costa ML. 2008. Effect of wheat puroindoline alleles on functional properties of starch. *European Food Research and Technology* 226:1205-1212.
- Brouns F, Hemery Y, Price R, Anson NM. 2012. Wheat aleurone: separation, composition, health aspects, and potential food use. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 52:553-568.
- Brouns F, van Rooy G, Shewry P, Rustgi S, Jonkers D. 2019. Adverse reactions to wheat or wheat components. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 18:1437-1452.
- Bryła M, Stępniewska S, Modrzewska M, Waśkiewicz A, Podolska G, Ksieniewicz-Woźniak E, Yoshinari T, Stępień Ł, Urbaniak M, Roszko M, Gwiazdowski R, Kanabus J, Pierzgałski A. 2022. Dynamics of deoxynivalenol and nivalenol glucosylation in wheat cultivars infected with *Fusarium culmorum* in field conditions—A 3 year study (2018-2020). *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 70:4291-4302.
- Caio G, Volta U, Sapone A, Leffler DA, De Giorgio R, Catassi C, Fasano A. 2019. Celiac disease: a comprehensive current review. *BMC Medicine* 17:142.
- Cakmak I, Ozkan H, Braun HJ, Welch RM, Romheld V. 2000. Zinc and iron concentrations in seeds of wild, primitive, and modern wheats. *Food and Nutrition Bulletin* 21:401-403.
- Cakmak I, Kutman UB. 2018. Agronomic biofortification of cereals with zinc: a review. *European Journal of Soil Science* 69:172-180.
- Casella G, Bordo BM, Schalling R, Villanacci V, Salemme M, Di Bella C, Baldini V, Bassotti G. 2016. Neurological disorders and celiac disease. *Minerva Gastroenterologica e Dietologica* 62:197-206.
- Cendoya E, Chiotta ML, Zchetti V, Chulze SN, Ramirez ML. 2018. Fumonisin and fumonisin-producing *Fusarium* occurrence in wheat and wheat by products: A review. *Journal of Cereal Science* 80:158-166.
- Challinor A, Watson J, Lobell D, Howden SM, Smith DR, Chhetri N. 2014. A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation. *Nature Climate Change* 4:287-291.

- Chaquilla-Quilca G, Balandrán-Quintana RR, Huerta-Ocampo JÁ, Ramos-Clamont Montfort G, Luna-Valdez JG. 2018. Identification of proteins contained in aqueous extracts of wheat bran through a proteomic approach. *Journal of Cereal Science* 80:31-36.
- Chaudhry AH, Nayab S, Hussain SB, Ali M, Pan Z. 2021. Current understandings on magnesium deficiency and future outlooks for sustainable agriculture. *International Journal of Molecular Sciences* 22, 1819.
- Chen YH, Carver BF, Wang SW, Zhang F, Yan L. 2009. Genetic loci associated with stem elongation and winter dormancy release in wheat. *Theoretical and Applied Genetics* 118:881-889.
- Chen L, Du Y, Lu Q, Chen H, Meng R, Cui C, Lu S, Yang Y, Chai Y, Li J, Liu L, Qi X, Li H, Mishina K, Yu F and Hu Y-G. 2018. The Photoperiod-Insensitive Allele *Ppd-D1a* Promotes Earlier Flowering in *Rht12* Dwarf Plants of Bread Wheat. *Frontiers in Plant Science* 9, 1312.
- Cianferoni A. 2016. Wheat allergy: diagnosis and management. *Journal of Asthma and Allergy* 9:13-25.
- Commission Recommendation 2013/165/EU of 27 March 2013 on the presence of T-2 and HT-2 toxin in cereals and cereal products. *European Journal of Communication* L 91:12-15.
- Commission Regulation (EC) No 1881/2006 of 19 December 2006 Setting Maximum Levels for Certain Contaminants in Foodstuffs; Consolidated Version from 28.07.2017 Including Amendments; European Union (EU): Brussels, Belgium, 2017. Dostupno online: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:02006R1881-20170728> (Datum pristupa 2. veljače 2023.).
- Commission Regulation (EC) No 1126/2007 of 28 rujna 2007 promjenjeno Regulation (EC) No 1881/2006.
- Commission regulation (EC) No 687/2008. Dostupno online: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:192:0020:0048:EN:PDF> (Datum pristupa 8. travnja 2023.).
- Commission Regulation (EC) No 165/2010 of 26 February 2010 amending Regulation (EC) No 1881/2006 setting maximum levels for certain contaminants in foodstuffs as regards aflatoxins. *Official Journal of the European Union* 50:8-12.
- Collin MS, Venkatraman SK, Vijayakumar N, Kanimozhi V, Arbaaz SM, Stacey RGS, Anusha J, Choudhary R, Lvov V, Tovar GI, Senatov F, Koppala S, Swamiappan S. 2022. Bioaccumulation of lead (Pb) and its effects on human: A review. *Journal of Hazardous Materials Advances* 7, 100094.
- Corpas FJ, Palma JM. 2020. H₂S signaling in plants and applications in agriculture. *Journal of Advanced Research* 24:131-137.

- Dallagnol LJ, Ramos AER, Dorneles KR. 2022. Silicon use in the integrated disease management of wheat: Current knowledge. *Current Trends in Wheat Research*. IntechOpen. Dostupno online: <https://www.intechopen.com/chapters/74509> (Datum pristupa: 9. srpnja 2023).
- Debi MR, Wichert BA, Liesegang A. 2019. Method development to reduce the fiber content of wheat bran and rice bran through anaerobic fermentation with rumen liquor for use in poultry feed. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences* 32:395-404.
- Del Palacio A, Bettucci L, Pan D. 2016. *Fusarium* and *Aspergillus* mycotoxins contaminating wheat silage for dairy cattle feeding in Uruguay. *Brazilian Journal of Microbiology* 47:1000-1005.
- Del Ponte EM, Fernandes JMC, Bergstrom C. 2007. Influence of growth stage on Fusarium Head Blight and deoxynivalenol production in wheat. *Journal of Phytopathology* 155:577-581.
- Delcour JA, Bruneel C, Derde LJ, Gomand SV, Pareyt B. 2010. Fate of starch in food processing: from raw materials to final food products. *Annual Review of Food Science and Technology* 1:87-111.
- Dexter JE, Wood PJ. 1996. Recent applications of debranning of wheat before milling. *Trends in Food Science and Technology* 7:35-41.
- Dhaka V, Khatkar BS. 2015. Effects of gliadin/glutenin and HMW-GS/LMW-GS ratio on dough rheological properties and bread-making potential of wheat varieties. *Journal of Food Quality* 38:7182.
- Dhaliwal SS, Sadana US, Manchanda JS. 2011. Relevance and essentiality of ferti-fortification of wheat grains with manganese and copper. *Indian Journal of Fertilisers* 7:48-55.
- Dias AS, Lidon FC. 2009. Evaluation of grain filling rate and duration in bread and durum wheat, under heat stress after anthesis. *Journal of Agronomy and Crop Science* 195:137-147.
- Dias MAN, Cicero, SM. 2016. Effect of copper carbonate and zinc oxide applied to seeds on copper and zinc uptake by maize seedlings. *Bragantia* 75:286-391.
- Dieterich W, Schuster C, Gundel P, Scherf KA, Pronin D, Geisslitz S, Börner A, Neurath MF, Zopf Y. 2022. Proteins from Modern and Ancient Wheat Cultivars: Impact on Immune Cells of Healthy Individuals and Patients with NCGS. *Nutrients* 14, 4257.
- Distelfeld A, Avni R, Fischer AM. 2014. Senescence, nutrient remobilization, and yield in wheat and barley. *Journal of Experimental Botany* 65:3783-3798.
- Dolferus R, Thavamanikumar S, Sangma H, Kleven S, Wallace X, Forrest K, Rebetzke G, Hayden M, Borg L, Smith A, Cullis B. 2019. Determining the genetic archite-

- cture of reproductive stage drought tolerance in wheat using a correlated trait and correlated marker effect model. *G3: Genes, Genomes, Genetics* 9:473-489.
- Dong Q, Fang J, Huang F, Cai K. 2019. Silicon amendment reduces soil Cd availability and Cd uptake of two *Pennisetum* species. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 16, 1624.
- Dreisigacker S, Burgueño J, Pacheco A, Molero G, Sukumaran S, Rivera-Amado C, Reynolds M, Griffiths S. 2021. Effect of Flowering Time-Related Genes on Biomass, Harvest Index, and Grain Yield in CIMMYT Elite Spring Bread Wheat. *Biology (Basel)* 10, 855.
- Državni zavod za statistiku (DZS). 2022. Hrvatska u brojkama 2022. Dostupno online: https://podaci.dzs.hr/media/l2wkiv1a/croinfig_2022.pdf (Datum pristupa 3. ožujka 2023.).
- Duan X, Yu H, Ma W, Sun J, Zhao Y, Yang R., Ning T, Li Q, Liu Q, Guo T, Yan M, Tian J, Chen J. 2020. A major and stable QTL controlling wheat thousand grain weight: identification, characterization, and CAPS marker development. *Molecular Breeding* 40, 68.
- Duncan EG, O'Sullivan CA, Roper MM, Biggs JS, Peoples MB. 2018. Influence of co-application of nitrogen with phosphorus, potassium and sulphur on the apparent efficiency of nitrogen fertiliser use, grain yield and protein content of wheat: review. *Field Crops Research* 226:56-65.
- El-Feki WM, Byrne PF, Reid SD, Lapitan NL, Haley SD. 2013. Quantitative trait locus mapping for end-use quality traits in hard winter wheat under contrasting soil moisture levels. *Crop Science* 53:1953-1967.
- El Mazlouzi M, Morel C, Robert T, Yan B, Mollier A. 2020. Phosphorus uptake and partitioning in two durum wheat cultivars with contrasting biomass allocation as affected by different P supply during grain filling. *Plant and Soil* 449:179-192.
- El Mazlouzi M, Morel C, Robert T, Chesseron C, Salon C, Cornu JY, Mollier A. 2022. The dynamics of phosphorus uptake and remobilization during the grain development period in durum wheat plants. *Plants* 11, 1006.
- Eltaher S, Baenziger PS, Belamkar V., Emara HA, Nower AA, Salem KFM, Alqudah AM, Sallam A. 2021. GWAS revealed effect of genotype × environment interactions for grain yield of Nebraska winter wheat. *BMC Genomics* 22, 2.
- Erenstein O, Jaleta M, Mottaleb KA, Sonder K, Donovan J, Braun HJ. 2022. Global trends in wheat production, consumption and trade. U: *Wheat Improvement*. Reynolds MP, Braun HJ. (Ur.) Springer, Cham, Švicarska.
- Etienne P, Diquelou S, Prudent M, Salon C, Maillard A, Ourry, A. 2018. Macro and micronutrient storage in plants and their remobilization when facing scarcity: The case of drought. *Agriculture* 8, 14.

- Evers T, Millar S. 2002. Cereal grain structure and development: Some implications for quality. *Journal of Cereal Science* 36:261-284.
- Fageria N.K. 2009. *The Use of Nutrients in Crop Plants*. CRC Press, Florida, SAD.
- Fan X, Xu Z, Wang F, Feng B, Zhou Q, Cao J, Ji G, Yu Q, Liu X, Liao S, Wang T. 2020. Identification of colored wheat genotypes with suitable quality and yield traits in response to low nitrogen input. *PLoS One*. 15, e0229535.
- FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2020. Dostupno online na: <http://www.fao.org/faostat/en/#data> (Datum pristupa 8. ožujka 2023.)
- FAO Statistics 2022. Food and Agriculture Organization of United Nations. Dostupno online (<https://www.fao.org/3/cc3233en/cc3233en.pdf>) (Datum pristupa 9. veljače 2023.)
- Farooq M, Ullah A, Rehman A, Nawaz A, Nadeem A, Wakeel A, Nadeem F, Siddique KHM. 2018. Application of zinc improves the productivity and biofortification of fine grain aromatic rice grown in dry seeded and puddled transplanted production systems. *Field Crops Research* 216:53-62.
- Farooq T, Nisa ZU, Hameed A, Ahmed T, Hameed A. 2022. Priming with copper-chitosan nanoparticles elicit tolerance against PEG-induced hyperosmotic stress and salinity in wheat. *BMC Chemistry* 16, 23.
- Feuillet C, Langridge P, Waugh R. 2008. Cereal breeding takes a walk on the wild side. *Trends Genet.* 24:24-32.
- Finnegan PM, Chen W. 2012. Arsenic toxicity: the effects on plant metabolism. *Frontiers in Physiology* 3, 182.
- Flintham JE. 1993. Grain colour and sprout-resistance in wheat. U: Pre-harvest sprouting in cereals 1992. Walker-Simmons MK, Reed JL. (Ur.) American Association of Cereal Chemists St Paul, Minnesota, SAD.
- Flintham JE. 2000. Different genetic components control coat-imposed and embryo-imposed dormancy in wheat. *Seed Science Research* 10:43-50.
- Frankel R, Galun E. 1977. *Pollination mechanisms, reproduction and plant breeding*. Springer-Verlag. Berlin, Njemačka.
- Gaesser GA. 2020. Whole Grains, Refined Grains, and Cancer Risk: A Systematic Review of Meta-Analyses of Observational Studies. *Nutrients*. 12, 3756.
- Gaju O, Allard V, Martre P, Snape JW, Heumez E, Le Gouis J, Bogard M, Griffiths S, Orford S, Hubbart S, Foulkes MJ. 2011. Identification of traits to improve the nitrogen-use efficiency of wheat genotypes *Field Crops Research* 123:139-152.

- Gaju O, Allard V, Martre P, Le Gouis J, Moreau D, Bogard M, Hubbart S, Foulkes MJ. 2014. Nitrogen partitioning and remobilization in relation to leaf senescence, grain yield and grain nitrogen concentration in wheat cultivars, *Field Crops Research* 155:213-223.
- Gałęcki R, Bakula T, Wojtacki M, Żuk-Gołaszewska K. 2019. Susceptibility of ancient wheat species to storage pests *Sitophilus granarius* and *Tribolium confusum*. *Journal of Stored Products Research* 83:117-122.
- Gallegos C, Merkel R. 2019. Current evidence in the diagnosis and treatment of children with celiac disease. *Gastroenterology Nursing* 42:41-48.
- Gao F, Ayele BT. 2014. Functional genomics of seed dormancy in wheat: advances and prospects. *Frontiers in Plant Science* 5, 458.
- Garnett TP, Graham RD. 2005. Distribution and remobilization of iron and copper in wheat. *Annals of Botany* 95:817-826.
- Gartaula G, Dhital S, Netzel G, Flanagan BM, Yakubov GE, Beahan CT, Collins HM, Burton RA, Bacic A, Gidley MJ. 2018. Quantitative structural organization model for wheat endosperm cell walls: Cellulose as an important constituent. *Carbohydrate Polymers* 196:199-208.
- GBD 2017 Diet Collaborators. 2019. Health effects of dietary risks in 195 countries, 1990–2017: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017. *Lancet* 393:1958-1972.
- Gianibelli MC, Larroque OR, MacRitchie F, Wriegly CW. 2001. Biochemical, genetic and molecular characterization of wheat-glutenin and its component subunits. *Cereal Chemistry* 78:635-646.
- Golea CM, Stroe SG, Gâtlan AM, Codină GG. 2023. Physicochemical characteristics and microstructure of ancient and common wheat grains cultivated in Romania. *Plants (Basel)* 12, 2138.
- Golinski P, Kostecki M, Kaptur P, Wojciechowski S, Kaczmarek Z, Wisniewska H, Chelkowski J. 1997. Fusarium head blight and moniliformin accumulation in kernels of 18 winter wheat cultivars inoculated with *Fusarium avenaceum* (3 years study). *Cereal Research Communications* 25:673-675.
- Gooding MJ, Davies WP. 1992. Foliar urea fertilization of cereals: A review. *Fertilizer Research* 32:209-222.
- Grant CA, Flaten DN, Tomasiewicz DJ, Sheppard SC. 2001. The importance of early season phosphorus nutrition. *Canadian Journal of Plant Science* 81:211-224.
- Green PHR, Cellier C. 2007. Celiac Disease. *The New England Journal of Medicine* 357:1731-1743.

- Greenblatt GA, Bettge AD, Morris CF. 1995. Relationship between endosperm texture and the friabilin and bound polar lipids on wheat starch. *Cereal Chemistry* 72:172-176
- Gregersen P., Holm PB, Krupinska K. 2008. Leaf senescence and nutrient remobilisation in barley and wheat. *Plant Biology* 10:37-49.
- Gregersen PL, Holm PB. 2007. Transcriptome analysis of senescence in the flag leaf of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant Biotechnology Journal* 5:192-206.
- Groos C, Gay G, Perretant M R, Gervais L, Bernard M, Dedryver F, Charmet G. 2002. Study of the relationship between pre-harvest sprouting and grain color by quantitative trait loci analysis in a whitexred grain bread-wheat cross. *Theoretical and Applied Genetics* 104:39-47.
- Grundmeier A, Dau H. 2012. Structural models of the manganese complex of photosystem II and mechanistic implications. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics* 1817:88-105.
- Gualano NA, Del Fueyo PA, Benech-Arnold RL. 2014. Potential longevity (Ki) of malting barley (*Hordeum vulgare* L.) grain lots relates to their degree of pre-germination assessed through different industrial quality parameters. *Journal of Cereal Science* 60:222-228.
- Guo Z, Pfohl K, Karlovsky P, Dehne HW, Altincicek B. 2016. Fumonisin B1 and beauvericin accumulation in wheat kernels after seed-borne infection with *Fusarium proliferatum*. *Agricultural and Food Science* 25:138-145.
- Guo G, Lei M, Wang Y, Song B, Yang J. 2018. Accumulation of As, Cd, and Pb in sixteen wheat cultivars grown in contaminated soils and associated health risk assessment. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 15, 2601.
- Gupta PK, Balyan HS, Sharma S, Kumar R. 2020. Genetics of yield, abiotic stress tolerance and biofortification in wheat (*Triticum aestivum* L.): A review. *Theoretical and Applied Genetics* 133:1569-1602.
- Gustavsson J, Cederber C, Sonesson U. 2011. Global food losses and food waist. Swedish Institute for Food and Biotechnology. Food and agriculture organization of the United Nations. Dostupno online: <http://www.fao.org/3/a-i2697e.pdf> (Datum pristupa 05. travnja 2023.)
- Guyomard H, Bouamra-Mechemache Z, Chatellier V, Delaby L, Détang-Dessendre C, Peyraud JL, Réquillart V. 2021. Why and how to regulate animal production and consumption: The case of the European Union. Dostupno online: <https://doi.org/10.1016/j.animal.2021.100283> (Datum pristupa 18. siječnja 2023.).

- Hailegiorgis D, Mekonnen F, Hailu F, Lee C, Yun S. 2020. Composition and molecular weight distribution of albumin and globulin protein isolates from durum wheat genotypes. *American Journal of Plant Sciences* 11:137-147.
- Hamid A, Wasim A, Azfar, A, Amjad R, Nazir R. 2020. Monitoring and health risk assessment of selected trace metals in wheat rice and soil samples. *Food Science and Technology* 40:917-923.
- Hao B, Ma J, Si L, Jiang L, Wang X, Yao C, Ma S, Li C, Gao Z, Wang Z. 2022. Did wheat breeding simultaneously alter grain concentrations of macro- and micro-nutrient over the past 80 years of cultivar releasing in China? *Frontiers in Plant Science* 13, 872781.
- Hasan MM, Hasan MM, Teixeira da Silva JA, Li X. 2016. Regulation of phosphorus uptake and utilization: transitioning from current knowledge to practical strategies. *Cellular & Molecular Biology Letters* 21, 7.
- Hausch F, Shan L, Santiago NA, Gray GM, Khosla C. 2002. Intestinal digestive resistance of immunodominant gliadin peptides. *American Journal of Physiology, Gastrointestinal and Liver Physiology* 283:G996-G1003.
- Hawkesford MJ. 2000. Plant responses to sulphur deficiency and the genetic manipulation of sulphate transporters to improve S-utilization efficiency. *Journal of Experimental Botany* 51:131-138.
- Hawkesford MJ, Riche AB. 2020. Impacts of G x E x M on nitrogen use efficiency in wheat and future prospects. *Frontiers in Plant Science* 11, 1157.
- Herrera J, Calderini DF. 2020. Pericarp growth dynamics associate with final grain weight in wheat under contrasting plant densities and increased night temperature. *Annals of Botany* 126:1063-1076.
- Himi E, Noda K. 2005. Red grain colour gene (R) of wheat is a Myb-type transcription factor. *Euphytica* 143:239-242.
- Hoang HH, Sotta B, Gendreau E, Bailly C, Leymarie J, Corbineau, F. 2013. Water content: a key factor of the induction of secondary dormancy in barley grains as related to ABA metabolism. *Physiologia Plantarum* 148:284-296.
- Hoang HH, Sechet J, Bailly C, Leymarie J, Corbineau F. 2014. Inhibition of germination of dormant barley (*Hordeum vulgare* L.) grains by blue light as related to oxygen and hormonal regulation. *The Plant Cell and Environment* 37:1393-1403.
- Hussain MA, Naeem A, Sulieman S, Pitann B, Mühling KH. 2022. Sulfur uptake and distribution, grain yield, and quality of hybrid and inbred winter wheat (*Triticum aestivum* L.) varieties under early and late waterlogging. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 185:622-631.

- Hourston J.E., Ignatz M., Reith M., Leubner-Metzger G., Steinbrecher T. 2016. Biomechanical properties of wheat grains: The implications on milling. *Journal of the Royal Society Interface* 14, 20160828.
- Hrušková M, Famera O. 2003. Prediction of wheat and flour Zeleny sedimentation value using NIR technique. *Czech Journal of Food Sciences* 21:91-96.
- Hrušková M, Švecc I. 2009. Wheat hardness in relation to other quality factors. *Czech Journal of Food Sciences* 27:240-248.
- Huang M, Cabrera A, Hoffstetter A, Griffey C, Van Sanford D, Costa J, McKendry A, Chao S, Sneller C. 2016. Genomic selection for wheat traits and trait stability. *Theoretical and Applied Genetics* 129:1697-1710.
- Huang X, Duan S, Wu Q, Yu Mm Shabala, S. 2020. Reducing Cadmium accumulation in plants: Structure–function relations and tissue-specific operation of transporters in the spotlight. *Plants* 9, 223.
- Hucl P, Matus-Cadiz M. 2002. W98616, a white seeded spring wheat with increased preharvest sprouting. *Canadian Journal of Plant Science* 82:129-131.
- Ijaz M, Ul-Allah S, Sher A, Sattar A, Mahmood K, Alamri S, Ali Y, Rafiq F, Sharyar SM, Ijaz B, Ijaz H. 2023. Boron fertilization alleviates the adverse effects of late sowing in wheat under different tillage systems. *Agriculture* 13, 1229.
- International Agency for Research on Cancer (IARC) 2002. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans 56:171-176.
- Imadi SR, Shazadi K, Gul A. 2016. Sustainable crop production system. U: Plant, Soil, and Microbes. Hakeem KR, Akhtar MS, Abdullah SNA. (Ur.) Springer International Publishing, Cham, Švicarska.
- International Grains Council: Grain Market Report. 2010. Dostupno online: www.igc.int/downloads/gmrsummary/gmrsumme.pdf (Datum pristupa 13. veljače 2023.)
- Iwańska M, Paderewski J, Stępień M, Rodrigues PC. 2020. Adaptation of winter wheat cultivars to different environments: A case study in Poland. *Agronomy* 10, 632.
- Jacobsen JV, Gubler F, Chandler PM. 1995. Gibberellin action in germinated cereal grains. U: Plant hormones: Physiology, biochemistry and molecular biology. Davies PJ (Ur.). Dordrecht: Academic, Dordrecht, Nizozemska.
- Jestoi M. 2008. Emerging Fusarium-mycotoxins fusarproliferin, beauvericin, enniatins and moniliformin: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 48:21-49.
- Jericho H, Guandalini S. 2018. Extra-intestinal manifestation of celiac disease in children. *Nutrients* 10, 755.

- Jezeck M, Geilfus CM, Bayer A, Muhling KH. 2014. Photosynthetic capacity, nutrient status, and growth of maize (*Zea mays* L.) upon MgSO₄ leaf-application. *Frontiers in Plant Science* 5, 781.
- Kadariya M, Glover K, Wu J, Gonzalez J. 2011. Multi-parental mating design analysis: Model evaluation and application in spring wheat. Conference on Applied Statistics in Agriculture. Dostupno online: <https://doi.org/10.4148/2475-7772.1050> (Datum pristupa 3. travnja 2023.).
- Kang CS, Kim KH, Park J, Kim KH, Park KG, Cheong YK, Yoon SJ, Park CS. 2011. Relationship between polyphenol oxidase activity and color of white salted noodles prepared from Korean wheat cultivar. *Korean Journal of Breeding* 43:470-478.
- Karamanos RE, Pomarenski Q, Goh TB, Flore NA. 2004. The effect of foliar copper application on the grain yield and quality of wheat. *Canadian Journal of Plant Science* 84:47-56.
- Kaukinen K, Halme L, Collin P, Färkkilä M, Mäki M, Vehmanen P, Partanen J, Höckerstedt K. 2002. Celiac disease in patients with severe liver disease: gluten-free diet may reverse hepatic failure. *Gastroenterology* 122:881-888.
- Kelly AC, Clear RM, O'Donnell K, McCormick S, Turkington TK, Tekauz A, Gilbert J, Kistler HC, Busman M, Ward TJ. 2015. Diversity of *Fusarium* head blight populations and trichothecene toxin types reveals regional differences in pathogen composition and temporal dynamics. *Fungal Genetics and Biology* 82:22-31.
- Kent NL, Evers AD. 1994. *Technology of cereals: An introduction for students of food science and agriculture*. Woodhead Publishing, Cambridge, Engleska.
- Khaneghah AM, Kamani MH, Fakhri Y, Coppa CFSC, de Oliveira CAF, Sant'Ana AS. 2019. Changes in masked forms of deoxynivalenol and their co-occurrence with culmorin in cereal-based products: A systematic review and meta-analysis. *Food Chemistry* 294:587-596.
- Khatiwada A, Neupane I, Sharma B, Bhetwal N, Pandey B. 2020. Effects of drought stress on yield and yield attributing characters of wheat: A review. *Agriways* 8:115-121.
- Khan S, Khaskheli MH, Nabi G, Deverajani BR, Memon N, Shar GA. 2018. Report- Immunological study of different fraction of wheat proteins. *Pakistan Journal of Pharmaceutical Sciences* 31:1437-1440.
- Khlestkina E, Shoeva O, Börner A, Gordeeva E. 2014. Purple grain colour genes in wheat. U: Proceedings of the International Symposium on Genetics and breeding of durum wheat. International Symposium : Genetics and Breeding of Durum Wheat. Porceddu E, Damania AB, Qualset CO. (Ur.) Dostupno onli-

ne: <https://om.ciheam.org/article.php?IDPDF=00007113> (Datum pristupa 4. travnja 2023.).

- Khokhar JS, King J, King IP, Young SD, Foulkes MJ, De Silva J, Weerasinghe M, Mossa A, Griffiths S, Riche AB, Hawkesford M, Shewry P, Broadley MR. 2020. Novel sources of variation in grain Zinc (Zn) concentration in bread wheat germplasm derived from Watkins landraces. *PLoS One* 15, e0229107.
- Kichey T, Hirel B, Heumez E, Dubois F, Le Gouis J. 2007. In winter wheat (*Triticum aestivum* L.), post-anthesis nitrogen uptake and remobilisation to the grain correlates with agronomic traits and nitrogen physiological markers. *Field Crops Research* 102:22-32.
- Kim KH, Feiz L, Martin JM, Giroux MJ. 2012. Puroindolines are associated with decreased polar lipid breakdown during wheat seed development. *Journal of Cereal Science* 52:142-146.
- Kim J, Savin R, Slafer GA. 2021. Weight of individual wheat grains estimated from high-throughput digital images of grain area. *European Journal of Agronomy* 124, 126237.
- Kljusurić S. 2000. Uvod u tehnologiju mljevenja pšenice, Prehrambeno-tehnološki fakultet, Metković, Hrvatska.
- Kniewel DC, Abdel-Aal E, Rabalski I, Nakamura T, Hucl P. 2009. Grain color development and the inheritance of high anthocyanin blue aleurone and purple pericarp in spring wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Cereal Science* 50:113-120.
- Komyshv E, Genaev M, Afonnikov D. 2017. Evaluation of the SeedCounter, a mobile application for grain phenotyping. *Frontiers in Plant Science* 7, 1990.
- Korczak R, Slavin JL. 2020. Definitions, regulations, and new frontiers for dietary fiber and whole grains. *Nutrition Reviews* 78:6-12.
- Kovačević V, Rastija M. 2014. Žitarice. Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Poljoprivredni fakultet u Osijeku, Osijek, Hrvatska.
- Kowalska J., Tyburski J., Jakubowska M, Krzysińska J. 2021. Effect of different forms of silicon on growth of spring wheat cultivated in organic farming system. *Silicon* 13:211-217.
- Krenzer EG. 2000. Wheat as forage. U: Wheat management in Oklahoma. Royer TA, Krenzer EG. (Ur.) Oklahoma Cooperative Extension Service i Oklahoma Agricultural Experiment Station. Oklahoma, SAD.
- Krska R, Malachova A, Berthiller F, van Egmond H. P. 2014. Determination of T-2 and HT-2 toxins in food and feed: an update. *World Mycotoxin Journal* 7:131-142.

- Kuchel H, Williams KJ, Langridge P, Eagles HA, Jefferies SP. 2007. Genetic dissection of grain yield in bread wheat. I. QTL analysis. *Theoretical and Applied Genetics* 115:1029-1041.
- Kumssa DB, Joy EJ, Ander EL, Watts MJ, Young SD, Walker S, Broadley MR. 2015. Dietary calcium and zinc deficiency risks are decreasing but remain prevalent. *Scientific Reports* 5, 10974.
- Kumar N, Kiszonas AM, Ibba MI, Morris CF. 2019. Identification of loci and molecular markers associated with Super Soft kernel texture in wheat. *Journal of Cereal Science* 87:286-291.
- Kushihiro M, Zheng Y, Nagata R, Nakagawa H, Nagashima H. 2009. Limited surveillance of fumonisins in brown rice and wheat harvested in Japan. *Journal of Food Protection* 72:1327-1331.
- Kutman UB, Yildiz B, Cakmak I. 2011. Improved nitrogen status enhances zinc and iron concentrations both in the whole grain and the endosperm fraction of wheat. *Journal of Cereal Science* 53:118-125.
- Kweon M, Slade L, Levine H. 2011. Solvent retention capacity (SRC) testing of wheat flour: principles and value in predicting flour functionality in different wheat-based food processes and in wheat breeding—a review. *Cereal Chemistry* 88:537-552.
- Lachman J, Hejtmánková A, Orsák M, Popov M, Martinek P. 2018. Tocotrienols and tocopherols in colored-grain wheat, tritordeum and barley. *Food Chemistry* 240:725-735.
- Langseth W, Ghebremeskel M, Kosiak B, Kolsaker P, Miller JD. 2001. Production of culmorin compounds and other secondary metabolites by *Fusarium culmorum* and *F. graminearum* strains isolated from Norwegian cereals. *Mycopathologia* 152:23-34.
- Lara TS, de Lima Lessa JH, de Souza KRD, Branco Corguinha AP, Dias Martins FA, Lopes G, Guimarães Guilherme LR. 2019. Selenium biofortification of wheat grain via foliar application and its effect on plant metabolism. *Journal of Food Composition and Analysis*, 81:10-18.
- Lásztity R, Salgó A. 2002. Quality assurance of cereals-past, present, future. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering* 46:5-13.
- Lee KP, Piskurewicz U, Tureckova V, Strnad M, Lopez-Molina L. 2010. A seed coat bedding assay shows that RGL2-dependent release of abscisic acid by the endosperm controls embryo growth in Arabidopsis dormant seeds. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 107:19108–19113.

- Lemmens M, Scholz U, Berthiller F, Dall'Asta C, Koutnik A, Schuhmacher R, Ruckebauer P, Adam G, Buerstmayr H, Krska R, Ruckebauer P. 2005. The ability to detoxify the mycotoxin deoxynivalenol colocalizes with a major quantitative trait locus for *Fusarium* head blight resistance in wheat. *Molecular Plant-Microbe Interactions* 18:1318-1324.
- Li X, Shin S, Heinen S, Dill-Macky R, Berthiller F, Nersesian N, Muehlbauer GJ, Clemente N, McCormick S. 2015. Transgenic wheat expressing a barley UDP-glucosyltransferase detoxifies deoxynivalenol and provides high levels of resistance to *Fusarium graminearum*. *Molecular Plant-Microbe Interactions* 28:1237-1246.
- Li L, Yang X. 2018. The Essential Element Manganese, Oxidative Stress, and Metabolic Diseases: Links and Interactions. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity* 7580707.
- Li LF, Zhang ZB, Wang ZH, Li N, Sha Y, Wang XF, Ding N, Li Y, Zhao J, Wu Y, Gong L, Mafessoni F, Levy AA, Liu B. 2022. Genome sequences of five *Sitopsis* species of *Aegilops* and the origin of polyploid wheat B subgenome. *Molecular Plant* 15:488-503.
- Li L, Zhang H, Liu J, Huang T, Zhang X, Xie H, Guo Y, Wang Q, Zhang P, Qin P. 2023. Grain color formation and analysis of correlated genes by metabolome and transcriptome in different wheat lines at maturity. *Frontiers in Nutrition* 10, 1112497.
- Lin M, DD Zhang, SB Liu, GR Zhang, JM Yu, AK Fritz, GH Bai. 2016. Genome-wide association analysis on pre-harvest sprouting resistance and grain color in US winter wheat. *BMC Genomics* 17, 794.
- Lis ŁB, Bakula T, Baranowski M, Czarnewicz A. 2011. The carcinogenic effects of benzoquinones produced by the flour beetle. *Polish Journal of Veterinary Sciences* 14:159-164.
- Liu Q, Qiu Y, Beta T. 2010. Comparison of antioxidant activities of different colored wheat grains and analysis of phenolic compounds. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 58:9235-9241.
- Logrieco A, Rizzo A, Ferracane R, Ritieni A. 2002. Occurrence of beauvericin and enniatins in wheat affected by *Fusarium avenaceum* head blight. *Applied and Environmental Microbiology* 68:82-85.
- Ludvigsson JF, Leffler DA, Bai JA, Biagi F, Fasano A, Green PHR, Hadjivassiliou M, Kaukinen K, Kelly CP, Leonard JN, Lundin KEA, Murray JA, Sanders DS, Walker MM, Zingone F, Ciacci C. 2013. The oslo definitions for coeliac disease and related terms. *Gut* 62:43-52.
- Lukow OM, Adams K, Suchy J, DePauw RM, Humphreys G. 2013. The effect of the environment on the grain colour and quality of commercially grown Canada

- hard white spring wheat, *Triticum aestivum* L. 'Snowbird'. Canadian Journal of Plant Science 93:1-11.
- Ma CY, Zhou JW, Chen GX, Bian YW, Lv DW, Li XH, Wang ZM, Yan YM. 2014. iTRAQ-based quantitative proteome and phosphoprotein characterization reveals the central metabolism changes involved in wheat grain development. BMC Genomics 15:1029-1048.
- Ma C, Xie P, Yang J, Liu F, Hu H, Du J, Zhang K, Lin L, Zhang H. 2022. Relative contribution of environmental medium and internal organs to lead accumulation of wheat grain. Science of The Total Environment 818, 151832.
- Magdić D, Horvat D, Drezner G, Jurković Z, Šimić G. 2006. Image analysis of bread crumb structure in relation to gluten strength of wheat. Poljoprivreda 12:58-62.
- Magyar Z, Pepó P, Gyimes E. 2021. Comprehensive study on wheat flour quality attributes as influence by different agrotechnical factors. Agronomy 19:1-24.
- Mahato DK, Lee KE, Kamle M, Devi S, Dewangan KN, Kumar P, Kang SG. 2019. Aflatoxins in food and feed: An overview on prevalence, detection and control strategies. Frontiers in Microbiology 10, 2266.
- Marschner H, Marschner P. 2012. Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants (Third Edition), Academic Press, eBook ISBN: 9780123849069.
- Masclaux C, Quillere I, Gallais A, Hirel B. 2001. The challenge of remobilisation in plant nitrogen economy. A survey of physio-agronomic and molecular approaches. Annals of Applied Biology 138:69-81.
- Maathuis F. 2013. Plant Mineral Nutrients : Methods and Protocols. Humana Press. New York, SAD.
- Maxfield L, Shukla S, Crane JS. 2023. Zinc Deficiency. StatPearls. Dostupno online: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK493231/> (Datum pristupa 12.06.2023.).
- Medina A, Gilbert MK, Mack BM, OBrian GR, Rodriguez A, Bhatnagar D, Payne G, Magan N. 2017. Interactions between water activity and temperature on the *Aspergillus flavus* transcriptome and aflatoxin B1 production. International Journal of Food Microbiology 256: 36-44.
- Micha R, Khatibzadeh S, Shi P, Andrews KG, Engell RE, Mozaffarian D. 2015. Global burden of diseases nutrition and chronic diseases expert group (NutriCoDE). Global, regional and national consumption of major food groups in 1990 and 2010: a systematic analysis including 266 country-specific nutrition surveys worldwide. BMJ Open 5, e008705.

- Miki Y, Ikeda TM, Yoshida K, Takumi S. 2020. Identification of a hard kernel texture line of synthetic allohexaploid wheat reducing the puroindoline accumulation on the D genome from *Aegilops tauschii*. *Journal of Cereal Science* 93, 102964.
- Milec Z, Strejčková B, Šafář J. 2023. Contemplation on wheat vernalization. *Frontiers in Plant Science* 13, 1093792.
- Miller KB. 2020. Review of whole grain and dietary fiber recommendations and intake levels in different countries. *Nutrition Reviews* 78:29-36.
- Mikulikova D. 2007. The effect of friabilin on wheat grain hardness. *Czech Journal of Genetics and Plant Breeding* 43, 35.
- Mišak Z. 2014. Gluten u prehrani: Uzrok celijakije ili nešto više. *Paediatrica Croatica* 58:175-179.
- Nadolska-Orczyk A, Gasparis S, Orczyk W. 2009. The determinants of grain texture in cereals. *Journal of Applied Genetics* 50:185-197.
- Nakamura S, Abe F, Kawahigashi H, Nakazono K, Tagiri A, Matsumoto T, Ustugi S, Ogawa T, Handa H, Ishida H, Mori M, Kawaura K, Ogihara Y, Miuraf H. 2011. A wheat homolog of Mother of FT and TFL1 acts in the regulation of germination. *Plant Cell* 23:3215-3229.
- Nakamura S. 2018. Grain dormancy genes responsible for preventing pre-harvest sprouting in barley and wheat. *Breed Science* 68:295-304.
- Narayan OP, Kumar P, Yadav B, Dua M, Johri AK. 2022. Sulfur nutrition and its role in plant growth and development. *Plant Signaling & Behavior* 7, 2030082.
- Narodne novine (NN) 84/2006. Dostupno online: https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2006_07_84_2002.html (Datum pristupa 8. veljače 2023.).
- Narodne novine (NN) 46/2018. Dostupno online: https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2018_05_46_881.html (Datum pristupa 21. veljače 2023.).
- Nornberg R, de Souza Luche H, Gonzalez da Silva JA, Zimmer CM, Cima FF, Olivo M, de Oliveira AC. 2016. The challenge of finding high grain yield and pre-harvest sprouting tolerant genotypes in Brazilian wheat germplasm. *Australian Journal of Crop Science* 10:977-984.
- Noulas C, Tziouvalekas M, Karyotis T. 2018. Zinc in soils, water and food crops. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology* 49:252-260.
- Nuttall JG, O'Leary GJ, Panozzo JF, Walker CK, Barlow KM, Fitzgerald GJ. 2017. Models of grain quality in wheat—A review. *Field Crops Research* 202:136-145.
- Nwaru BI, Hickstein L, Panesar SS, Roberts G, Muraro A, Sheikh A. 2014. EAACI Food allergy and anaphylaxis guidelines Group. Prevalence of common food allergies in Europe: a systematic review and meta-analysis. *Allergy* 69:992-1007.

- Ojcious M, Zychlinsky A, Zheng LM, Young JDE. 1991. Ionophore-induced apoptosis: role of DNA fragmentation and calcium fluxes. *Experimental Cell Research* 197:43-49.
- Okada T, Jayasinghe J E A RM, Nansamba M, Baes M, Warner P, Kouidri A, Correia D, Nguyen Vy, Whitford R, Baumann U. 2018. Unfertilized ovary pushes wheat flower open for cross-pollination, *Journal of Experimental Botany* 69:399-412.
- Onipe OO, Jideani AIO, Daniso Beswa. 2015. Composition and functionality of wheat bran and its application in some cereal food products. *International Journal of Food science+Technology* 50:2509-2518.
- Orlando B, Grignon G, Vitry C, Kasheffard K, Valade R. 2019. *Fusarium* species and enniatin mycotoxins in wheat, durum wheat, triticale and barley harvested in France. *Mycotoxin Research* 35:69-380.
- Ovando-Martínez M, Ozsisi B, Anderson J, Whitney K, Ohm JB, Simsek S. 2013. Analysis of deoxynivalenol and deoxynivalenol-3-glucoside in hard red spring wheat inoculated with *Fusarium graminearum*. *Toxins* 5:2522-2532.
- Ozturk L, Yazici MA, Yucel C, Torun A, Cekic C, Bagci A, Ozkan H, Braun HJ, Sayers Z, Cakmak I. 2006. Concentration and localization of zinc during seed development and germination in wheat. *Physiologia Plantarum* 128:144-152.
- Pantaleoni S, Luchino M, Adriani A, Pellicano R, Stradella D, Ribaldone DG, Saponi N, Isaia GC, Di Stefano M, Astegiano M. 2014. Bone mineral density at diagnosis of celiac disease and after 1 year of gluten-free diet. *Scientific World Journal* 2014, 173082.
- Pasquali M, Beyer M, Logrieco A, Audenaert K, Balmas V, Basler R, Boutigny AL, Chrpová J, Czembor E, Gagkaeva T, González-Jaén MT, Hofgaard IS, Köycü ND, Hoffmann L, Lević J, Marin P, Miedaner T, Migheli Q, Moretti A, Müller ME, Munaut F, Parikka P, Pallez-Barthel M, Pic J, Scauflaire J, Scherm B, Stanković S, Thrane U, Uhlig S, Vanheule A, Yli-Mattila T, Vogelgsang S. 2016. A European database of *Fusarium graminearum* and *F. culmorum* trichothecene genotypes. *Frontiers in Microbiology* 7, 406.
- Payne PI. 1987. Genetics of wheat storage proteins and the effect of allelic variation on breadmaking quality. *Annual Review of Plant Biology* 38:141-153.
- Peralta JR, Torresday G, Tiemann JL, Gomez KJE, Arteaga S, Rascon E. 2001. Uptake and effects of five heavy metals on seed germination and plant growth in alfalfa (*Medicago sativa* L.) *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 66:727-734.
- Peršić V, Božinović I, Varnica I, Babić J, Španić V. 2023. Impact of Fusarium Head Blight on wheat flour quality: Examination of protease activity, technological quality and rheological properties. *Agronomy* 13, 662, 23.

- Pierron A, Alassane-Kpembi I, Oswald, IP. 2016. Impact of two mycotoxins deoxynivalenol and fumonisin on pig intestinal health. *Porcine Health Management* 2, 21.
- Pimentel D. 1991. World resources and food losses to pests. U: *Ecology and Management of Food Industry Pests*. Gorham JR. (Ur.) Association of Official Analytical Chemists, Arlington, Virginia, SAD.
- Pitt J, Wild C, Baan R, Gelderblom W, Miller J, Riley R, Wu F. 2012. Fungi producing significant mycotoxins. U: *Improving Public Health Through Mycotoxin Control*. Pitt J, Wild, C, Baan R, Gelderblom W, Miller J, Riley R, Wu F. (Ur.) IARC Scientific Publication, Lyon, Francuska.
- Posner ES, Hibbs AN. 2005. *Wheat flour milling*. Second Edition. American Association of Cereal Chemists, Inc. St. Paul, Minnesota, SAD.
- Projekt (2020) Određivanje područja sa prirodnim ograničenjima ili ostalim posebnim ograničenjima s kalkulacijama uz utvrđivanje vrijednosti kontekst indikatora broj 41 „Organska tvar u tlu“ i broj 42 „Erozija tla vodom“ za programsko razdoblje 2021.-2027. Ugovor EV. BR. 2/2018/VV. Dostupno online: https://ruralnirazvoj.hr/files/STUDIJA_3Final_20211127.pdf (Datum pristupa 18. srpnja 2023.).
- Protić R, Zorić M, Todorović G, Protić N. 2010. Seed size of wheat variety grown in multi-environment. *Romanian Biotechnological Letters* 15:5745-5753.
- Raghothama KG, Karthikeyan AS. 2005. Phosphate acquisition. *Plant and Soil* 274, 37.
- Rahmati Ishka M, Vatamaniuk OK. 2020. Copper deficiency alters shoot architecture and reduces fertility of both gynoecium and androecium in *Arabidopsis thaliana*. *Plant Direct* 4, e00288.
- Rains DW, Epstein E, Zasoski RJ, Aslam M. 2006. Active Silicon Uptake by Wheat. *Plant and Soil* 280:223-228.
- Ransom JK, McMullen MV. 2008. Yield and disease control on hard winter wheat cultivars with foliar fungicides. *Agronomy Journal* 100:1130-1137.
- Rashid A, Ram H, Zou CQ, Rerkasem B, Duarte AP, Simunji S, Yazici A, Guo S, Rizwan M, Bal RS, Wang Z, Malik SS, Phattarakul N, de Freitas RS, Lungu O, Barros VLNP, Cakmak I. 2019. Effect of zinc-biofortified seeds on grain yield of wheat, rice, and common bean grown in six countries. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* (1999) 182:791-804.
- Raven JA. 2003. Cycling silicon—the role of accumulation in plants. *New Phytologist* 158:419-421.
- Rerkasem B, Jamjod S. 2004. Boron deficiency in wheat: a review. *Field Crops Research* 89:173-186.

- Rizwan S, Ahmad I, Ashraf M, Mirza JI, Sahi GM, Rattu AR, Mujeeb-Kazi A. 2007. Evaluation of synthetic hexaploid wheats and their durum parents for stripe rust resistance. *Revista mexicana de fitopatología* 25:152-160.
- Rocha O, Ansari K, Doohan FM. 2005. Effects of trichothecene mycotoxins on eukaryotic cells: a review. *Food Additives & Contaminants* 22:369-378.
- Rodrigues I, Naehrer K. 2012. A three-year survey on the worldwide occurrence of mycotoxins in feedstuffs and feed. *Toxins* 4:663-675.
- Rodríguez M, Barrero J, Corbineau F, Gubler F, Benech-Arnold R. 2015. Dormancy in cereals (not too much, not so little): About the mechanisms behind this trait. *Seed Science Research* 25:99-119.
- Ruan L, Zhang J, Xin X, Zhang C, Ma D, Chen L, Zhao B. 2015. Comparative analysis of potassium deficiency-responsive transcriptomes in low potassium susceptible and tolerant wheat (*Triticum aestivum* L.). *Scientific Reports* 5, 10090.
- Rutter M, Moffitt TE, Caspi A. 2006. Gene-environment interplay and psychopathology: multiple varieties but real effects. *Journal of Child Psychology and Psychiatry* 47:226-261.
- Sabo N, Vuković R, Vuković A, Štolfa Č, Magajevac I. 2021. Biofortifikacija selom. *Glasnik zaštite bilja* 6:101-108.
- Saini P, Kumar N, Kumar S, Mwaurah PW, Panghal A, Attkan AK, Garg MK, Singh V. 2020. Bioactive compounds, nutritional benefits and food applications of colored wheat: a comprehensive review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 61:3197-3210.
- Salih RF, Abdan K, Wayayok A, Hashim N, Rahman KA. 2016. Improve quality and quantity of plant products by applying Potassium nutrient (A Critical Review). *Journal of Zankoy Sulaimani* 18:197-208.
- Sano N, Marion-Poll A. 2021. ABA Metabolism and homeostasis in seed dormancy and germination. *International Journal of Molecular Sciences* 22, 5069.
- Scarpino V, Reyneri A, Sulyok M, Krska R, Blandino M. 2015. Effect of fungicide application to control Fusarium head blight and 20 *Fusarium* and *Alternaria* mycotoxins in winter wheat (*Triticum aestivum* L.). *World Mycotoxin Journal* 8:499-510.
- Schachtman DP, Reid RJ, Ayling SM. 1998. Phosphorus uptake by plants: From soil to cell. *Plant Physiology* 116:447-453.
- Schaller J, Scherwies E, Gerber L, Vaidya S, Kaczorek D, Pausch J, Barkusky D, Sommer M, Hoffmann M. 2021. Silica fertilization improved wheat performance and increased phosphorus concentrations during drought at the field scale. *Scientific Reports* 11, 20852.

- Schmidt W, Thomine S, Buckhout TJ. 2020. Editorial: iron nutrition and interactions in plants. *Frontiers in Plant Science* 10, 1670.
- Schuler M, Rellán-Álvarez R, Fink-Straube C, Abadía J, Bauer P. 2012. Nicotianamine functions in the phloem-based transport of iron to sink organs, in pollen development and pollen tube growth in Arabidopsis. *The Plant Cell* 24:2380-2400.
- Sears ER. 1966. Nullisomic-tetrasomic combinations in wheat. U: Chromosome Manipulation and Plant Genetics. Riley R, Lewis KR. (Ur.) Oliver and Boyd, Edinburgh, Škotska.
- Seibel W, Chung OK, Weipert D, Park SH. Cereals. 2012. U: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Njemačka.
- Sgaramella N, Nigro D, Pasqualone A, Signorile MA, Laddomada B, Sonnante G, Blanco E, Simeone R, Blanco A. 2023. Genetic mapping of flavonoid grain pigments in durum wheat. *Plants (Basel)* 12, 1674.
- Sharma P, Dubey R.S. 2005. Lead toxicity in plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology* 17:35-52.
- Sharma K, Costa NL, Kim YA, Muramatsu H, Barbosa Neto NM, Martins LGP, Kong J, Paschoal AR, Araujo PT. 2022. Reply. *Physical review letters* 128, 219602.
- Sheng H, Jiang Y, Rahmati M, Chia JC, Dokuchayeva T, Kavulych Y, Zavodna TO, Mendoza PN, Huang R, Smieshka LM, Miller J, Woll AR, Terek OI, Romanyuk ND, Piñeros M, Zhou Y, Vatamaniuk OK. 2021. YSL3-mediated copper distribution is required for fertility, seed size and protein accumulation in *Brachypodium*. *Plant Physiology* 186:655-676.
- Shewry PR, Tatham AS. 1997. Disulphide bonds in wheat gluten proteins. *Journal of Cereal Science* 25:207-227.
- Shewry PR, Halford NG, Belton PS, Tatham AS. 2002. The structure and properties of gluten: an elastic protein from wheat grain. *Philosophical Transactions of the Royal Society* 357:133-42.
- Shewry PR, Lookhart GL. 2003. Wheat Gluten Protein Analysis. American Association of Cereal Chemists. St Paul, Minnesota, SAD.
- Shewry PR, Halford NG, Lafiandra D. 2003. Genetics of wheat gluten proteins. *Advanced Genetics* 49:111-184.
- Shewry PR, Hey SJ. 2015. The contribution of wheat to human diet and health. *Food and Energy Security* 4:178-202.

- Shi X, Zhou Z, Li W, Qin M, Yang P, Hou J, Huang F, Lei Z, Wu Z, Wang J. 2022. Genome-wide association study reveals the genetic architecture for calcium accumulation in grains of hexaploid wheat (*Triticum aestivum* L.). *BMC Plant Biol* 22, 229.
- Shiferaw B, Smale M, Braun HJ, Duveiller E, Reynolds M, Muricho G. 2013. Crops that feed the world 10. Past successes and future challenges to the role played by wheat in global food security. *Food Security* 5:291-317.
- Shuja MN, Nayab D, Ali M, Iqbal A, Khalil IH. 2009. Evaluating the response of wheat genotypes to forage clipping. *International Journal of Agriculture And Biology* 12:111-114.
- Singh D, Nath K, Sharma YK. 2007. Response of wheat seed germination and seedling growth under copper stress. *Journal of Environmental Biology* 28:409-414.
- Singh P, Saini SP, Matharu GS. 2011. Effect of potassium application on yield, efficiency and economics in irrigated sub-tropical soils under rice-wheat cropping sequence-An on-farm experience. *Research on Crops (An International Journal)* 12:263-268.
- Singh KA, Knox RE, Clarke JM, Clarke FR, Singh A, DePauw RM, Cuthbert RD. 2014. Genetics of pre-harvest sprouting resistance in a cross of Canadian adapted durum wheat genotypes. *Molecular Breeding* 33:919-929.
- Slafer GA, Andrade FH. 1993. Physiological attributes related to the generation of grain yield in bread wheat cultivars released at different aeras. *Field Crops Research* 31:351-367.
- Slafer GA, Savin R, Sadras VO. 2014. Coarse and fine regulation of wheat yield components in response to genotype and environment. *Field Crops Research* 157:71-83.
- Smith FW, Ealing PM, Hawkesford MJ, Clarkson DT. 1995. Plant members of a family of sulfate transporters reveal functional subtypes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 92:9373-9377.
- Song L, Li L, Zhao L, Liu Z, Xie T, Li X. 2020. Absence of Dx2 at Glu-D1 locus weakens gluten quality potentially regulated by expression of nitrogen metabolism enzymes and glutenin-related genes in wheat. *International Journal of Molecular Sciences* 21, 1383.
- Somers DJ, Fedak G, Savard M. 2003. Molecular mapping of novel genes controlling Fusarium head blight resistance and deoxynivalenol accumulation in spring wheat. *Genome* 46:555-564.
- Sorenson B, Wiersma J. 2004. Sprout damaged wheat, crop insurance and quality concerns. 2004. Minnesota Crop News Archives. Dostupno online: <http://>

- www.extension.umn.edu/crop Enews/2004/04MNCN31.htm (Datum pristupa 2. travanj 2023.).
- Statista. Global wheat production from 1990/1991 to 2022/2023. Dostupno online: <https://www.statista.com/statistics/267268/production-of-wheat-worldwide-since-1990/> (Datum pristupa 12. ožujka 2023.).
- Steinbach HS, Benech-Arnold RL, Kristof G, Sanchez RA, aMarcucci-Poltri S. 1995. Physiological basis of pre-harvest sprouting resistance in *Sorghum bicolor* (L.) Moench. ABA levels and sensitivity in developing embryos of sprouting resistant and susceptible varieties. *Journal of Experimental Botany* 45:701-709.
- Streit E, Schatzmayr G, Tassis P, Tzika E, Marin D, Taranu I, Tabuc C, Nicolau A. 2012. Aprodu, I.; Puel, O.; et al. Current situation of mycotoxin contamination and co-occurrence in animal feed—Focus on Europe. *Toxins* 4:788-809.
- Strońska A, Pluta W, Lalko A, Lubkowska A. 2021. Gluten and gluten-dependent diseases. *Journal of Education, Health and Sport* 11:26-33.
- Suchila U, Sansanee J, Sittisavet L, Chanakan PUT. 2022. Improve anthocyanin and zinc concentration in purple rice by nitrogen and zinc fertilizer application. *Rice Science* 29:435-450.
- Sumbal S, Ali A, Binjawhar DN, Ullah Z, Eldin SM, Iqbal R, Sher H, Ali I. 2023. Comparative effects of hydropriming and iron priming on germination and seedling morphophysiological attributes of stay-green wheat. *ACS Omega* 8:23078-23088.
- Snape J, Butterworth K, Whitechurch E, Worland AJ. 2001. Waiting for fine times: Genetics of flowering time in wheat. U: Wheat in a global environment. Bedö Z, Láng L. (Ur.) Springer Netherlands, Dordrecht, Nizozemska.
- Sugita-Konishi Y, Park BJ, Kobayashi-Hattori K, Tanaka T, Chonan T, Yoshikawa K, Kumagai S. 2006. Effect of cooking process on the deoxynivalenol content and its subsequent cytotoxicity in wheat products. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry* 70:1764-1768.
- Suzuki K, Yabuki T, Ono Y. 2009. Roadside *Rhododendron pulchrum* leaves as bioindicators of heavy metal pollution in traffic areas of Okayama, Japan. *Environmental Monitoring and Assessment* 149:133-141.
- Šimić G, Horvat D, Jurković Z, Drezner G, Novoselović D, Dvojković K. 2006. The genotype effect on the ratio of wet gluten content to total wheat grain protein. *Journal of Central European Agriculture* 7:13-18.
- Španić V, Lemmens M, Drezner G. 2010. Morphological and molecular identification of *Fusarium* species associated with head blight on wheat in East Croatia. *European journal of plant pathology* 128:511-516.

- Španić V, Lemmens M, Drezner G. 2013. Variability of components of fusarium head blight resistance among wheat genotypes. *Cereal research communications* 41:420-430.
- Španić V, Drezner G, Dvojković K, Horvat D. 2016. Traits of 25 winter wheat varieties grown in Croatia in the last 100 years. *Agronomski glasnik* 78:3-16.
- Španić V. 2016. Pšenica. Poljoprivredni institut Osijek, Osijek, Hrvatska.
- Španić V, Horvat D, Lutrov K, Tucak M, Drezner G. 2017. Quality characteristics of some winter wheat varieties in 2014/2015. *Agronomski glasnik* 78:271-280.
- Španić V, Horvat D, Drezner G, Zdunić, Z. 2019a. Changes in protein composition in the grain and malt after *Fusarium* infection dependently of wheat resistance. *Pathogens* 3, 112, 12.
- Španić V, Zdunić Z, Drezner G, Šarkanj B. 2019b. The pressure of *Fusarium* disease and its relation with mycotoxins in the wheat grain and malt. *Toxins* 4, 198, 16.
- Španić V, Viljevac Vuletić M, Horvat D, Šarkanj B, Drezner G, Zdunić Z. 2020a. Changes in antioxidant system during grain development of wheat (*Triticum aestivum* L.) and relationship with protein composition under FHB stress. *Pathogens* 9, 17, 1-15.
- Španić V, Katanić Z, Sulyok M, Krska R, Puskas K, Vida G, Drezner G, Šarkanj B. 2020b. Multiple fungal metabolites including mycotoxin formation in naturally infected and *Fusarium* inoculated wheat samples. *Microorganisms* 8, 578, 17.
- Španić V, Maričević M, Ikić I, Sulyok M, Šarcević H. 2023. Three-year survey of *Fusarium* multi-metabolites/mycotoxins contamination in wheat samples in potentially epidemic FHB conditions. *Agronomy* 13, 805.
- Šunić K, Kovač T, Lončarić A, Babić J, Sulyok M, Krska R, Drezner G, Španić V. 2021. *Fusarium* secondary metabolite content in naturally produced and artificially provoked FHB pressure in winter wheat. *Agronomy*, 11, 2239, 19.
- Šunić K, D'Auria JC, Šarkanj B, Španić V. 2023. Metabolic profiling identifies changes in the winter wheat grains following *Fusarium* treatment at two locations in Croatia. *Plants* 12, 911.
- Taiz L, Zeiger E, Moller IM, Murphy A. 2015. *Plant Physiology and Development*. 6th Edition, Sinauer Associates. Sunderland, CT, SAD.
- Thomason WE, Phillips SB, Pridgen TH, Kenner JC, Griffey CA, Beahm BR, Seabourn BW. 2007. Managing nitrogen and sulfur fertilization for improved bread wheat quality in humid environments. *Cereal Chemistry* 84:450-462.
- Torada A, Amano Y. 2002. Effect of seed coat color on seed dormancy in different environments. *Euphytica* 126:99-105.

- Torada A, Koike M, Ikeguchi S, Tsutsui I. 2008. Mapping of a major locus controlling seed dormancy using backcrossed progenies in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Genome* 51:426-432.
- Tränkner M, Jaghdani SJ. 2019. Minimum magnesium concentrations for photosynthetic efficiency in wheat and sunflower seedlings. *Plant Physiology and Biochemistry* 144:234-243.
- Tu M, Li Y. 2020. Toward the genetic basis and multiple QTLs of kernel hardness in wheat. *plants (Basel)* 24, 9, 1631.
- Tuan PA, Kumar R, Rehal PK, Toora PK, Ayele BT. 2018. Molecular mechanisms underlying abscisic acid/gibberellin balance in the control of seed dormancy and germination in cereals. *Frontiers in Plant Science* 9, 668
- Tubana B., Babu T, Datnoff LE. 2016. A review of silicon in soils and plants and its role in US agriculture: history and future perspectives. *Soil Science* 81:393-411.
- Tuteja N, Mahajan S. 2007. Calcium signaling network in plants: an overview. *Plant Signaling & Behavior* 2:79-85.
- Uauy R, Olivares M, Gonzalez M. 1998. Essentiality of copper in humans. *The American Journal of Clinical Nutrition* 67:952S-959S.
- Ugarčić Ž, Koceva Komlenić D, Jukić M, Kosović I, Kuleš A. 2016. Upute za laboratorijske vježbe na kolegiju „Sirovine biljnog podrijetla“. Prehrambeno-tehnološki fakultet Osijek, Osijek. Dostupno online: <http://sierkybema.co.za/hectoliter-mass-unit/> i https://www.researchgate.net/figure/Light-microscopy-images-of-cross-cut-sections-of-vitreous-left-and-starchy-kernels_fig1_281573534 (Datum pristupa: 28. rujan 2023.).
- Uhlig S, Eriksen GS, Hofgaard IS, Krska R, Beltran E, Sulyok M. 2013. Faces of a changing climate: semi-quantitative multi-mycotoxin analysis of grain grown in exceptional climatic conditions in Norway. *Toxins* 5:1682-1697.
- USDA (U.S. Department of Agriculture). 2019. Wheat flour, whole-grain, soft wheat. FoodData Central. Dostupno online: <https://fdc.nal.usda.gov/fdc-app.html#/food-details/168944/nutrients> (Datum pristupa 29. ožujak 2023.).
- Vasilis C, Aida Nazari G, Griffiths S, Simmonds J, Fish L, Orford S, Sayers L, Doonan JH, Snape JW, 2010. A genetic framework for grain size and shape variation in wheat. *The Plant Cell* 22:1046-1056.
- Velu G, Ortiz-Monasterio I, Cakmak I, Hao Y, Singh RP. 2014. Biofortification strategies to increase grain zinc and iron concentrations in wheat. *Journal of Cereal Science* 59:365-372.
- Vendruscolo CP, Frias NC, de Carvalho CB, de Sá LR, Belli CB, Baccarin RY. 2016. Leukoencephalomalacia outbreak in horses due to consumption of contaminated Hay. *Journal of Veterinary Internal Medicine* 30:1879-1881.

- Vetch JM, Stougaard RN, Martin JM, Giroux MJ. 2019. Review: Revealing the genetic mechanisms of pre-harvest sprouting in hexaploid wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant Science* 281:180-185.
- Volta U, Tovoli F, Cicola R, Parisi C, Fabbri A, Piscaglia M, Fiorini E, Caio G. 2012. Serological tests in gluten sensitivity (nonceliac gluten intolerance). *Journal of Clinical Gastroenterology* 46:680-685.
- Vukadinović V, Vukadinović V. 2016. Tlo, gnojidba i prinosi. Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Poljoprivredni fakultet u Osijeku, Osijek, Hrvatska.
- Zhao FJ, McGrath SP, Crosland AR, Salmon SE. 1995. Changes in the sulphur status of British wheat grain in the last decade, and its geographical distribution. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 68:507-514.
- Zörb CD, Steinfurth S, Seling S, Langenkämper G, Koehler P, Wieser H, Lindhauer MG, Mühling KH. 2009. Quantitative protein composition and baking quality of winter wheat as affected by late sulfur fertilization. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 57:3877-3885.
- Wade MJ, Davis BK, Carlisle JS, Klein AK, Valoppi LM. 1993. Environmental transformation of toxic metals. *Occupational Medicine* 8:574-601.
- Wan Y, Wang Y, Shi Z, Rentsch D, Ward JL, Hassall K, Sparks CA, Huttly AK, Buchner P, Powers S, Shewry PR, Hawkesford MJ. 2021. Wheat amino acid transporters highly expressed in grain cells regulate amino acid accumulation in grain. *PLoS ONE* 16, e0246763.
- Wang S, Yu Z, Cao M, Shen X, Li N, Li X, Ma W, Weißgerber H, Zeller F, Hsam S, Yan Y. 2013. Molecular mechanisms of HMW glutenin subunits from 1SL genome of *Aegilops longissima* positively affecting wheat breadmaking quality. *PLoS ONE* 8, e0058947.
- Wang W, Simmonds J, Pan Q, Davidson D, He F, Battal A, Akhunova A, Trick HN, Uauy C, Akhunov E. 2018. Gene editing and mutagenesis reveal inter-cultivar differences and additivity in the contribution of TaGW2 homoeologues to grain size and weight in wheat. *Theoretical and Applied Genetics* 131:2463-2475.
- Wang Z, Hassan MU, Nadeem F, Wu L, Zhang F, Li X. 2020. Magnesium fertilization improves crop yield in most production systems: A meta-analysis. *Frontiers in Plant Science* 10, 1727
- Wang J, Hasegawa T, Li L, Lam SK, Zhang X, Liu X, Pan G. 2019. Changes in grain protein and amino acids composition of wheat and rice under short-term increased [CO₂] and temperature of canopy air in a paddy from East China. *New Phytologist* 222:726-734.
- Wang Y, Xu Y, Liang X, Wang L, Sun Y, Huang Q, Qin X, Zhao L. 2021. Soil application of manganese sulfate could reduce wheat Cd accumulation in Cd

- contaminated soil by the modulation of the key tissues and ionic of wheat. *Science of The Total Environment* 770, 145328.
- Wang M, Li B, Li S, Song Z, Kong F, Zhang X. 2021. Selenium in wheat from farming to food. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 69:15458-15467.
- Wang M, Zhou F, Cheng N, Chen P, Ma Y, Zhai H, Qi M, Liu N, Liu Y, Meng L, Bañuelos GS, Liang D. 2022. Soil and foliar selenium application: Impact on accumulation, speciation, and bioaccessibility of selenium in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Frontiers in Plant Science* 13, 988627.
- Wani SH, Gaikwad K, Razzaq A, Samantara K, Kumar M, Govindan V. 2022. Improving Zinc and Iron biofortification in wheat through genomics approaches. *Molecular Biology Reports* 49:8007-8023.
- Wania SH, Kumar V, Shriram V, Sah SK. 2016. Phytohormones and their metabolic engineering for abiotic stress tolerance in crop plants. *The Crop Journal* 4:162-176.
- Waters BM, Uauy C, Dubcovsky J, Grusak MA. 2009. Wheat (*Triticum aestivum*) NAM proteins regulate the translocation of iron, zinc, and nitrogen compounds from vegetative tissues to grain. *Journal of Experimental Botany* 60:4263-4274.
- Wei X, Yang W, Wang J, Zhang Y, Wang Y, Long Y, Tan B, Wan X. 2022. Health effects of whole grains: A bibliometric analysis. *Foods* 11, 4094.
- Whittall A, Kaviani M, Graf R, Humphreys G, Navabi A. 2018. Allelic variation of vernalization and photoperiod response genes in a diverse set of North American high latitude winter wheat genotypes. *PLoS One* 13, e0203068.
- Whole Grains Council. Dostupno online: <https://wholegrainscouncil.org/whole-grains-101/whats-whole-grain-refined-grain> (Datum pristupa 12. ožujka 2023.).
- Whole Grain Initiative. Dostupno online: https://www.wholegraininitiative.org/media/attachments/2021/05/18/whole-grain-food-definition_v-2020-11-8_incladdinfo.pdf (Datum pristupa 17. ožujka 2023.).
- Wieser H. 2007. Chemistry of gluten proteins. *Food Microbiology* 24:115-119.
- Wieser H, Kieffer R. 2001. Correlations of the amount of gluten protein types to the technological properties of wheat flours determined on a micro-scale. *Journal of Cereal Science* 34:19-27.
- Winter SR, Musick JT. 1991. Grazed wheat grain yield relationships. *Agronomy Journal* 83: 130-135.
- Wise IL, Lamb RJ, McKenzie RIH, Whistlecraft JW. 2006. Resistance to Hessian fly (*Diptera: Cecidomyiidae*) in a Canadian spring wheat cultivar1. *Canadian Entomologist* 138:638-646.

- Woelflingseder L, Warth B, Vierheilig I, Schwartz-Zimmermann H, Hametner C, Nagl V, Novak B, Šarkanj Š, Berthiller F, Adam G, Marko D. 2019. The *Fusarium* metabolite culmorin suppresses the in vitro glucuronidation of deoxynivalenol. *Archives of Toxicology* 93:1729-1743.
- World Bank. World Development Indicators: Data Bank. Data Bank, World Development Indicators. 2022. Dostupno online: <https://databank.worldbank.org/reports.aspx?source=World-Development-Indicators> (Datum pristupa 25. siječanj 2023.).
- World Health Organization, Food and Agriculture Organization of the United Nations. Sustainable healthy diets: guiding principles. 2019. Dostupno online: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241516648>. (Datum pristupa 2. veljače 2023.).
- Wu X, Cai Q, Xu Q, Zhou Z, Shi J. 2020. Wheat (*Triticum aestivum* L.) grains uptake of lead (Pb), transfer factors and prediction models for various types of soils from China. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 206, 111387.
- Wu C, Dun Y, Zhang Z, Li M, Wu G. 2020. Foliar application of selenium and zinc to alleviate wheat (*Triticum aestivum* L.) cadmium toxicity and uptake from cadmium-contaminated soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 190, 110091.
- Xu H, Hassan MA, Sun D, Wu Z, Jiang G, Liu B, Ni Q, Yang W, Fang H, Li J, Chen X. 2022. Effects of low temperature stress on source–sink organs in wheat and phosphorus mitigation strategies. *Frontiers in Plant Science* 13, 807844.
- Yan D, Duermeyer L, Leoveanu C, Nambara E. 2014. The functions of endosperm during seed germination. *Plant and Cell Physiology* 55:1521-1533.
- Yan L, Li G, Yu M, Fang T, Cao S, Carver BF. 2015. Genetic mechanisms of vernalization requirement duration in winter wheat cultivars. U: *Advances in wheat genetics: From genome to field*. Ogihara Y, Takumi S, Handa H. (Ur.) Springer, Tokyo, Japan.
- Yasmeen F, Raja NI, Razzaq A, Komatsu S. 2017. Proteomic and physiological analyses of wheat seeds exposed to copper and iron nanoparticles. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Proteins and Proteomics*. 1865:28-42.
- Zada K, Afzal M. 1997. Effects of boron and iron on yield and yield components of wheat. U: *Developments in Plant and Soil Sciences*. Boron in Soils and Plants. Bell RW, Rerkasem B. (Ur.) Springer, Dordrecht, Nizozemska.
- Zahra M, Azimi MR, Guzman C, Dreisigacker S, Najafan G. 2020. Puroindoline (*Pina-D1* and *Pinb-D1*) and waxy (*Wx-1*) genes in Iranian bread wheat (*Triticum aestivum* L.) landraces. *Biotechnology & Biotechnological Equipment* 34:1019-1027.

- Zeven AC. 1991. Wheats with purple and blue grains: A review. *Euphytica* 56:243-258.
- Zhang H, Hu LY, Hu KD, He YD, Wang SH, Luo JP. 2008. Hydrogen sulfide promotes wheat seed germination and alleviates oxidative damage against copper stress. *Journal of Integrative Plant Biology* 50:1518-1529.
- Zhang C, Zheng B, He Y. 2021. Improving grain yield via promotion of kernel weight in high yielding winter wheat genotypes. *Biology (Basel)* 11, 42.
- Zhang DZ, Zhou H, Shao LL, Wang HR, Zhang YB, Zhu T, Ma LT, Ding Q, Ma LJ. 2022. Root characteristics critical for cadmium tolerance and reduced accumulation in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Environmental Management* 305, 114365.
- Zhao FJ, Hawkesford MJ, McGrath SP. 1999. Sulphur assimilation and effects on yield and quality of wheat. *Journal of Cereal Science* 30:1-17.
- Zhou M, Li Z. 2022. Recent Advances in minimizing cadmium accumulation in wheat. *Toxics* 10, 187.
- Zhu Y, Haijun G. 2014. Beneficial effects of silicon on salt and drought tolerance in plants. *Agronomy for Sustainable Development* 34:455-472.
- Zingales V, Fernández-Franzón M, Ruiz MJ. 2021. Occurrence, mitigation and in vitro cytotoxicity of nivalenol, a type B trichothecene mycotoxin—Updates from the last decade (2010–2020). *Food and Chemical Toxicology* 152:112182.

Kratice

ATP – adenzin trifosfat

B – bor

Ba – geni odgovorni za plavu boju zrna

°C – celzijev stupanj

Ca – kalcij

Cd – kadmij

Cd^{2+} – dvovalentni kadmij

Co – kobalt

CO_2 – ugljični dioksid

Cu – bakar

Da – dalton

dl – decilitar

DNA – deoksiribonukleinska kiselina

DON – deoksinivalenol

d.o.o. – društvo s ograničenom odgovornošću

D3G – deoksinivalenol-3-glukozid

Eng. – engleski

Eps – gen odgovoran za ranozrelost

EU – Europska unija

Fe – željezo

Fe^{2+} – dvovalentno željezo

Fe^{3+} – trovalentno željezo

$FeSO_4$ – željezo (II) sulfat

g – gram

Glu – gen odgovoran za biosintezu visokomolekularnih podjedinica glutenina

HMW – podjedinica glutenina visoke molekularne težine

H_2SiO_4 – monosilicijeva kiselina

K – kalij

Kcal – kalorija

kDa – kilodalton

Kg – kilogram

Km – kilometar

LMW – podjedinica glutenina visoke molekularne težine

mcg – milicentigram

mg – miligram

Mg – magnezij

ml - mililitar

mm – milimetar

Mn – mangan

m^2 – metar kvadratni

N – dušik

Na – natrij

NH_4^+ – amonij

NIV – nivalenol

NO_3^- – nitrat

P – fosfor

Pb – olovo

pH – broj koji služi kao mjera kiselosti, odnosno lužnatosti

Pin – gen odgovoran za tvrdoću zrna

Phs – gen odgovoran za dormantnost zrna

Pp – gen odgovoran za ljubičastu boju zrna
Ppd – gen odgovoran za osjetljivost na dužinu dana
Psy – gen odgovoran za žutu boju zrna
QTL – lokus za kvantitativno svojstvo
RH – Republika Hrvatska
ROS – reaktivne kisikove jedinice (eng. *reactive oxygen species*)
R-1 – gen odgovoran za regulaciju boje zrna
S – sumpor
sek – sekunda
Si – silicij
SiO₂ – silicijev dioksid
SO₄²⁻ – sulfat
τTG – autoantigen tkivne transglutaminaze
Vrn – gen odgovoran za jarovizaciju
ZEN – zearalenon
Zn – cink
ZnSO₄ – cinkov sulfat
μg – mikrogram
% – postotak

Životopis

Valentina Španić

Rođena je 1981. godine u Osijeku. Jezičnu gimnaziju završila je u Osijeku. Diplomirala je 2005. godine na Poljoprivrednome fakultetu u Osijeku Sveučilišta J.J. Strossmayera s odličnim uspjehom. Iste godine je provela na Poljoprivrednom istraživačkom institutu u Martonvasaru (Mađarska) dva mjeseca, u sklopu međunarodne razmjene studenata (IAESTE). Tijekom studiranja dobila je dvije Rektorove nagrade Sveučilišta J.J. Strossmayera u Osijeku (2003./04. i 2004./05. godine), te stipendiju Ministarstva znanosti i tehnologije (2002.-2005.). Od 2006. godine zaposlena je na Poljoprivrednom institutu Osijek. Na interdisciplinarnom doktorskom studiju „Molekularne bioznanosti“ Sveučilišta u Osijeku, Instituta Ruđer Bošković i Sveučilišta u Dubrovniku stekla je akademski stupanj doktora biotehničkih znanosti 2010. godine. Od 2013. godine prelazi na radno mjesto znanstvenog suradnika i stiće znanstveno zvanje znanstvenog savjetnika, kada je proglašena među 20 najizvrsnijih znanstvenih novaka u RH od strane Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta RH. Od 2019. je na radnom mjestu višeg znanstvenog suradnika sa zvanjem znanstvenog savjetnika u trajnom zvanju. U 2021. dobitnica je Državne nagrade za znanost od strane Ministarstva znanosti i obrazovanja.

Do sada je sudjelovala na četiri znanstvena/istraživačka projekta, a od 2015.-2018. godine je i sama bila voditelj uspostavnog istraživačkog projekta (HRZZ), nadalje bila je voditeljica dva bilateralna projekta, s Mađarskom i Kinom, te dva EPPN2020 projekta s Danskom i Njemačkom (Obzor2020). Također, bila je voditeljica EU projekta (Ulaganje u znanost i inovacije) (2019.-2022.), a od 2019. i voditelj projekta Karijera mladih istraživača (HRZZ). U 2023. postaje član upravnog odbora COST akcije. Organizator je više međunarodnih skupova te je član i/ili komentor završnih/diplomskih/doktorskih radova.

Redovito se znanstveno i stručno usavršava van zemlje (>2,5 godine): u Tullnu (Austrija), na Institute for Plant Production Biotechnology (studeni 2007., lipanj-srpanj 2008., studeni 2008. i ožujak-lipanj 2009.). 2008. godine dobila je stipendiju Sveučilišta u Beču „Die Stipendien des Vereins der Freunde der Universität für Bodenkultur Wien“. Dobitnica je i 2X stipendije Ceepus programa. Boravila je kao Fulbright stipendist na University of Minnesota, Department of Agronomy and Plant Genetics od rujna 2012. do svibnja 2013. godine (St. Paul, Minnesota, SAD). U Njemačkoj, u vremenu od 1. ožujka do 31. kolovoza 2015. godine boravila je kao KWS-Borlaug stipendist na KWS LOCHOW GmbH, te na University of Sydney, Plant Breeding Institute kao Go8 stipendist od rujna 2015. do siječnja 2016. godine.

Član je društva European association for research on plant breeding (EUCARPIA), Društva agronoma Osijek te svjetske grupe Wheat initiative. Aktivno sudjeluje na skupovima, radionicama ili kongresima u i izvan zemlje (>50), te je recenzent radova ili projekata (>60). Do sada je autor ili koautor 70tak znanstvenih radova, autor je jednog sveučilišnog udžbenika iz 2016. godine pod nazivom 'Pšenica', autor je jednog poglavlja 'Wheat breeding efforts toward improvement of grain yield related to the new challenges for photosynthesis research' u monografiji 'Chlorophyll *a* fluorescence measurements in Croatia' iz 2023. godine te je koautor 24 novopriznate sorte i prvi autor dvije novopriznate sorte ozime pšenice u RH (dvije priznate u inozemstvu). Služi se engleskim (aktivno) i njemačkim (pasivno) jezikom.