

AKADÉMIAI DOKTORI ÉRTEKEZÉS TÉZISFÜZETE

**TERMÉSZETES BIOAKTÍV KOMPONENSEK VIZSGÁLATA ÉS
AZOK DÚSÍTÁSA GABONAFÉLÉKBEN**

Dr. RAKSZEGI MARIANNA

AGRÁRTUDOMÁNYI KUTATÓKÖZPONT, MEZŐGAZDASÁGI INTÉZET
MARTONVÁSÁR

2021

BEVEZETÉS

Az elmúlt húsz évben jelentősen megnőtt az érdeklődés az egészségesebb étrendhez hozzájáruló élelmiszerek előállítására és feldolgozására. Ennek számos oka volt, melyek között szerepelt a különböző emésztőrendszeri megbetegedések és az élelmiszerek fogyasztásával kapcsolatos túlérzékenységi és allergiás reakciók számának ugrásszerű megnövekedése.

A gabonafélék egészséges táplálkozáshoz való hozzájárulását és annak elősegítését kétféle szempontból közelíthetjük meg. Vizsgálhatjuk egyrészt azon gabonakomponensek jelenlétét és mennyiségét, melyek tüneteket idéznek elő az arra érzékeny fogyasztók esetén. Ebben az esetben a komponensek mennyiségének csökkentésére kell törekednünk. Másik megközelítésben vizsgálhatjuk azokat a gabona komponenseket (pl. rostanyagok, antioxidánsok), amelyek a gabonafélékben természetes állapotukban is jelen vannak és fogyasztásuk köztudottan pozitív élettani hatású és szerepet játszik a betegségek megelőzésében. Munkánk során ez utóbbi utat választottuk.

A gabonafélék a humán táplálkozás jelentős hányadát teszik ki, így szénhidrát fogyasztásunknak is jelentős részét adják. A gabonaalapú szénhidrátok (rostok) fontos sajátossága az is, hogy kevésbé érzékenyek más bioaktív komponensekhez képest (pl. antioxidánsok), így a feldolgozóipari folyamatok során is képesek megőrizni biológiai aktivitásukat.

A gabonafélék, így a búza szénhidrát tartalmának jelentős részét az endospermiumban található keményítő és a sejtfalalkotó rostanyagkomponensek teszik ki (mint az arabinoxilán és a β -glükán). A keményítő egy része ellenáll az emberi emésztőenzimeknek, így a keményítő rezisztens részét is a rostanyagok közé sorolják, és mennyisége nagyban függ az amilóz mennyiségétől. A rostanyagok fogyasztása számos pozitív hatással bír az emberi egészségre, azon túl, hogy segíti a bélmozgást, közvetve csökkenti a glikémiás indexet és a vér koleszterin szintjét. Egyértelmű összefüggést állapítottak meg a teljes kiőrlésű gabonarost fogyasztása és egyes krónikus betegségek (nevezetesen az elhízás és a 2-es típusú cukorbetegség) és rákfajták (nevezetesen a vastagbélrák) csökkent mértékű előfordulása között. Vizsgálataink központjában ezért ezek a komponensek álltak.

A búzaszem 85% szénhidrátot tartalmaz érett állapotban, amelynek 80%-át a búza endospermiumában megtalálható keményítő alkotja. A búzaszem ezen túl 7%-ban tartalmaz az aleuronban, az endospermiumban és a gyököcskében koncentrálódó mono-, di- és oligoszacharidokat, valamint az endospermiumban és a gyököcskében koncentrálódó fruktánokat. A teljes gabonaszem körülbelül 12%-át a sejtfalalkotó poliszacharidok teszik ki, melyek valamennyi szövetben megtalálhatók. A keményítő és a fruktánok funkcionálisan a szénhidrátok tárolt formái, amelyek a csírázás során mobilizálhatók, hogy szén- és energiaforrásként szolgáljanak az embrió számára. A sejtfalalkotó poliszacharidok (mint például az

arabinoxilán [AX] és a β -glükán) a sejtfa fő szerkezeti elemei, melyek a protoplasztot veszik körül.

A keményítő két glükózipolimert tartalmaz, melyek közül az amilóz alkotja a keményítő 25–28%-át, míg az amilopektin a 72–75%-át teszi ki. Ezek a molekulák a polimerizáció mértékében (DP) és az elágazás gyakoriságában különböznek egymástól. Az amilóz alacsony DP (<3000) értékkel rendelkezik és benne az α -(1,6) kötések száma is alacsony (<1%), ugyanakkor az amilopektin-molekulákban magas a DP (> 5000) és az α -(1,6) kötések gyakorisága (3- 4%). Az amilóz-molekulákat főleg a keményítő szemcsékhez kötött keményítő-szintáz enzim három izoformja szintetizálja (GBSSI-k, 59–60 kDa), amelyeket a 7AS, 4AL és 7DS kromoszómákon található három homeológ waxy lokuszon (Wx-A1, Wx-B1 és Wx-D1) elhelyezkedő gének kódolják. A három gén teljes inaktiválása olyan waxy vonalak előállítását eredményezi, amelyek nagyon alacsony amilóztartalommal (0–2%) és sajátos funkcionális tulajdonságokkal rendelkeznek. Az amilopektin előállítása ennél jóval bonyolultabb, szintézisében részt vesznek keményítő-szintázok (SS), elágazásokat létrehozó (BE) és elágazásokat bontó (DBE) enzimek. Ezen enzimek egy része keményítőhöz kötött fehérje, ~ 60 és 149 kDa közötti molekulatömeggel. Funkciójuk elvesztése drasztikus változásokat eredményez a keményítőszemcsék alakjában és összetételében, ideértve a csökkentett keményítőtartalmat és duzzadási tulajdonságokat, a megnövekedett amilóztartalmat, a módosult amilopektin lánchosszat és a szemcsék csökkent gélesedési hőmérsékletét. Bár a waxy búza eredetét, tulajdonságait és felhasználását széles körben tanulmányozták már, csak néhány tanulmány foglalkozik a nagy amilóztartalmú búza jellemzésével és felhasználásával. A nagy amilóztartalmú liszt különleges tulajdonságokkal rendelkezik. Nagy élelmirost- és rezisztenskeményítő- (RS) tartalmának köszönhetően pozitív hatással van az emberi egészségre. Noha önmagában a nagy amilóztartalmú liszt gyenge tésztát és kenyérminőséget eredményez, javítani lehet a normál liszt egyes táplálkozási és funkcionális tulajdonságait, ha nagy amilóztartalmú liszttel keverjük össze.

A búzaszem fő rost komponensei a sejtfaalkotó poliszacharidok, az arabinoxilán (AX) és az (1-3)(1-4)- β -D-glükán (β -glükán), melyek az endospermium (és ezáltal a liszt) sejtfaalkotó poliszacharidjainak a 70% illetve 20%-át teszik ki. Az AX- és a β -glükán-molekuláknak oldható és oldhatatlan formái vannak, melyeknek különböző a hatása az egészségre. Az oldhatatlan rostok csökkentik a bélrendszerben a tápanyagok szállítási idejét és növelik a széklet mennyiségét, valamint megkötik a karcinogéneket. Az oldható rostok ugyanakkor közvetve csökkentik a koszorúér-betegségek és a 2-es típusú cukorbetegség kockázatát. A rostanyagkomponensek, különösen az AX, szintén befolyásolja a búza feldolgozóipari minőségét, többek között a sütőipari minőségét, a siker-keményítő elválaszthatóságát, a takarmány minőségét és az alkoholos italok vagy bioetanol előállítására során a fermentációs folyamatokat. Az AX – a búza fő pentozánkomponense – (1-4)-glikozidos kötésekkel kapcsolódó

β -D-xilopiranozil (Xylp) egységekből felépülő vázzal rendelkező molekula. Néhány Xylp egységet α -L-arabinofuranozil (Araf) helyettesít a 3. pozícióban, de a 2. és 3. pozícióban is létrejöhet diszubsztitúció. A magház másodlagos sejt falában és a korpa maghéj szöveteiben található AX tartalmazhat 4-O-metil α -D-glükuronsavat is szubsztituensként a 2. pozícióban. Az (1-3,1-4)- β -D-glükán (β -glükán) lineáris, elágazás nélküli polimer, melyben a β -D-glükopiranozil egységek (1-3) és (1-4) glikozidos kötéssel kapcsolódnak össze. Egy (1-3)-as kötést két vagy több (1-4)-es kötés választ el egymástól, de leginkább a két vagy három (1-4) kötés egymásutánja dominál. Az AX-molekulák szerkezete, melyet meghatároz az arabinóz helyettesítés nélküli, a monosubsztituált és a diszubsztituált xilóz láncok aránya és eloszlása, igen változatos. E szerkezeti különbségekről információt nyerhetünk a molekulák endoxilánáz enzimes emésztésével, amelynek során a felszabaduló AX-oligoszacharidokat (AXOS) HP-AEC módszerrel választhatjuk el és mennyiségileg értékelhetjük. Az elválasztott AXOS-molekulák szerkezetét Ordaz-Ortiz és mtsai (2005) módszerével jellemeztük és a kapott mintázatot az adott minta „ujjlenyomatának” tekinthetjük. Mivel az így elválasztott AXOS szerkezetét már meghatározták (Ordaz-Ortiz és mtsai, 2005), a csúcsterületek felhasználhatók a szubsztituálatlan, az egyszeresen szubsztituált és a diszubsztituált xilóz-egységeket tartalmazó AXOS arányának összehasonlítására (Rakszegi és mtsai, 2017). A β -glükán jelentősége kisebb búzában, mivel jóval kisebb arányban van jelen, mint az AX. A β -glükán szerkezetének különbségeit licsenáz enzimes emésztéssel határozzák meg. A licsenáz emésztéssel kapott glükooligoszacharidok (GOS) polimerizációs foka (DP) akár 10 is lehet, de a legnagyobb mennyiségben előforduló formái a DP3 és a DP4. E fragmentek mennyiségi aránya az (1-3) és (1-4) kötések eloszlását jellemzi a polimerben (Stone és Morell, 2009).

Célunk mindezen háttérismeret tükrében a búza rostanyagtartalmának növelése volt különböző megközelítések alkalmazásával, a hagyományos nemesítés eszközeivel. Ennek megvalósításához fontos volt a megfelelő génforrások azonosítása, valamint annak vizsgálata, hogy az adott tulajdonság örökölhetősége milyen mértékű, vagyis hogy a genotípus hatása erősebb-e a környezeti tényezők hatásánál. A környezeti tényezők vizsgálatánál szintén szempont volt a Magyarországon is egyre gyakrabban előforduló szárazság- és hőstressz tényezők rostanyagok mennyiségére és összetételére kifejtett hatásának vizsgálata is. Kutatásaink fontos szempontja volt továbbá, hogy a nagy mennyiségben fogyasztott lisztfrakcióban történjen a rostanyagtartalom növelése a búza héjrészének felhasználása nélkül abból a célból, hogy a feldolgozóipari tulajdonságok és a fogyasztói elfogadottság drasztikus megváltozását elkerüljük.

Kísérleteinkben ezért többféle módon terveztük meg a búzaliszt rostanyagtartalmának növelését. Egyrészt nagy amidóztartalmú búza genotípusokat állítottunk elő SGP-1 mutáns (SGP-A1B1D1 null) búzatörzsek

felhasználásával, mellyel növeltük a rezisztens keményítő mennyiségét a lisztben. Másrészt keresztezéseket végeztünk nagy vízoldható (WE) AX-tartalmú búzafajtával a liszt vízoldható rosttartalmának növelésére. Harmadrészt vizsgáltuk a környezeti tényezők, ezen belül egyes környezeti stresszhatások (hő, szárazság) hatását a búza rostanyagtartalmára és összetételére. Végezetül lehetséges génforrásokat kerestünk és azonosítottunk a búza rokon fajai között a búza rostanyagtartalmának és -összetételének javítására, változatosságának növelésére.

Mindezek alapján kutatásaink célkitűzései a következők voltak:

1. Nagy amilóztartalmú búza genotípusok előállítása és jellemzése.
2. A környezet és a genotípus hatásának vizsgálata az amilóztartalomra és az általa meghatározott tulajdonságokra.
3. Nagy arabinoxilán (AX) -tartalmú búza genotípusok előállítása és jellemzése.
4. A környezet és a genotípus hatásának vizsgálata az AX-tartalomra és az általa meghatározott tulajdonságokra.
5. Extrém környezeti hatások (elsősorban hő- és szárazságstressz) rostanyagtartalomra kifejtett hatásának vizsgálata.
6. Egyes búzával rokon fajok génforrásként való alkalmazhatóságának vizsgálata a búza rostanyagtartalmának növelésére.

ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

Anyagok

A rezisztens keményítő mennyiségének, valamint az amilóz:amilopektin tipikus arányának (1:3) variabilitása növelése céljából mindhárom SGP-1 (*Sgp-A1B1D1 null*) allélra mutáns vonalat kereszteztünk három regisztrált búzafajtával, az 'Ukrainka', 'Lona' és 'Solstice' fajtákkal. Ilyen típusú mutáns törzseket először Yamamori és mtsai (2000) azonosítottak. Az SGP-1 fehérjecsoport megegyezik az SSIIa enzimek csoportjával és három izoform formában (SGP-A1, -B1, -D1) létezik. Ezen enzimek funkciójának elvesztése drasztikus változásokat okoz a keményítő-tartalomban és a gélesedési tulajdonságokban, miközben az amilóztartalom megnövekedését eredményezik. Három visszakereszteztést végeztünk úgy, hogy minden visszakeresztezés előtt molekuláris markerszelekciót (Shimbata és mtsai, 2005) alkalmaztunk populációnként megközelítőleg 300 növényen (380, 324 és 223 növény). Csak azokat a törzseket kereszteztük vissza az apai szülőkkel, amelyeknek mindhárom allélje mutáns volt. A szelektált 20 BC₃ (8 db 999-22/'Lona' és 12 db 1061-26/'Ukrainka') és 4 C₃ (4 db 999-20/'Solstice') törzset az F₃, F₄ és F₅ generációkban részletesen vizsgáltuk

(2012–2014). Kontrollként két kis amilóztartalmú búzafajtát (waxy D-null ‘Bai-Huo’ és waxy ‘Nuo-Maizi’), egy nagy amilóztartalmú szülőt (N11) és a három apai fajtát (‘Ukrainka’, ‘Lona’, ‘Solstice’) használtunk (összesen 30). Ezekből további 10 törzset szelektáltunk a részletes adatok bemutatására.

A liszt WE-AX-tartalmának növelése céljából keresztezéseket végeztünk a nagy WE-AX- és TOT-AX-tartalmú ‘Yumai-34’ és négy, az európai környezeti körülményekhez jól adaptálódott fajta és egy törzs között (‘Lupus’, ‘Mv-Mambo’, ‘Mv-Emese’, ‘Ukrainka’ és ‘1061-26’). Többéves szelekció után 36, az átlagosnál nagyobb WE-AX-tartalmú és jó agronómiai és feldolgozóipari tulajdonságokkal rendelkező törzs (kilenc ‘Lupus/Yumai-34’, egy ‘Mv-Mambo/Yumai-34’, tizennégy ‘Ukrainka/Yumai-34’, egy ‘Mv-Emese/Yumai-34’, tizenegy ‘1060-26/Yumai-34’) tulajdonságait vizsgáltuk az F₇–F₁₁ generációkban (2013–2017). Kontrollként a szülői genotípusokat használtuk (‘Yumai-34’, ‘Lupus’, ‘Mv-Mambo’, ‘Mv-Emese’ és ‘Ukrainka’) illetve az ‘Mv-Nádor’-t.

Három, különböző genetikai háttérrel rendelkező őszi búzafajtát választottunk ki a szárazság- és a hőstressz beltartalmi paraméterekre kifejtett hatásának vizsgálatára: ‘Plainsman V’ (USA), ‘Fatima 2’ (Magyarország) és az ‘Mv Magma’ (Magyarország) fajtákat. A piros, keményszemű ‘Plainsman V’ fajtának nagy a fehérjetartalma és jó a szárazságtűrése. A középkorai érésű ‘Fatima 2’ kiváló termés potenciáljáról és jó malom- és sütőipari minőségéről ismert. Az ‘Mv Magma’ középkésői érésű, kenyérbélesztésre alkalmas malmi minőségű fajta, jó betegség ellenállósággal és fagyállósággal. A növényeket Convicon PGV-36 klímakamrában neveltük fel a martonvásári fitotronban. Négy csíráztatott búzaszemet palántáztunk 3500 cm³-es cserepekbe, termőföld, Vegasca (komposzt) és homok 3:2:1 arányú keverékébe. Hat hét 4 °C-os vernalizáció után a növényeket kontrollált hőmérsékleten neveltük T2NY2 klímaprogrammal (Tischner és mtsai, 1997) a stresszkezelés kezdetéig. A kísérlet négy kezelésből állt: kontroll (C), hőstressz (H), szárazságstressz (D), és hő+szárazságstressz (H+D). Minden fajtából összesen 16 cserepünk volt kezelésként négy csereppel és minden cserepben négy növényel. A kezelés a kalászosítás utáni 12. napon kezdődött (Zadoks-75 fejlődési stádiumban, Tottman és Makepeace, 1979) és 15 napig tartott. A hőmérséklet a kontroll kamrában 24/20 °C (nappali/éjszakai, fokozatosan növekvő 12,5–16,0 órás nappalhosszal) (Tischner és mtsai, 1997) és 35/20 °C (8 órás kezelés) volt a hőstresszkezelésnél. A talajnedvességet a természetes nedvesség 60–70%-ra állítottuk (NWC – natural water capacity jelenti a 100%-ot) a kontroll kísérletben, míg 40–45%-ra a szárazságstressz-kezelésnél. A vizet tömegalapon adagoltuk. A fényintenzitást 350 μmol/m²/s –ra állítottuk a stresszkezelés alatt.

A vad fajok hasznosíthatóságának vizsgálatát a gabona beltartalmi értékeinek növelésére az 1U^g, 2U^g, 3U^g, 4U^g, 5U^g, 6U^g, 7U^g, 1M^g, 2M^g, 3M^g, 5M^g

6M^g és 7M^g 'búza ('Chinese Spring') / *Ae. geniculata* (TA2899)' kromoszóma addíciós vonalak és néhány 'búza ('Mv9kr1') / *Ae. biuncialis* (MvGB642)' kromoszóma addíciós vonal (1U^b, 1U^b6U^b, 3U^b, 2M^b, 3M^b és 7M^b) (Molnár-Láng és mtsai, 2002; Schneider és mtsai, 2005) felhasználásával végeztük el. A *kr1* recesszív keresztezhetőségi allélt átvitték a 'Chinese Spring' (CS) búzából a 'Martonvásári 9' (Mv9) búzába úgy, hogy az 'Mv9' × 'CS' hibridet visszakeresztették az 'Mv9' búzával. Az 'Mv9 *kr1*' törzs hordozza a *Kr1* és *Kr2* recesszív keresztezhetőségi alléleket, miközben a genotípus genomja 93,75%-ban megegyezik az 'Mv9' genomjával (Molnár-Láng és mtsai, 1996).

Módszerek

A teljes szem beltartalmi vizsgálatához minden mintából 50 g gabonaszemet őröltünk le Perten Laboratory Mill 3100 malommal, majd a teljesőrleményt azonnal lehűtöttük és -20 °C-on tároltuk. Ennél kisebb mintamennyiségek esetén (pl. üvegházi kísérletek) minden mintából négy gramm szemet őröltünk le teljesőrleménnyé Retsch Mixer Mill MM 400 golyós malommal. Az így keletkezett teljesőrleményt -20 °C-on tároltuk a laboratóriumi vizsgálatokig. A liszt jellemzőinek és a tészta reológiai tulajdonságainak vizsgálatához mintánként 500–800g szemet kondicionáltunk 15,5% nedvesség tartalomra, majd Chopin CD1 labormalommal állítottuk elő a lisztet. Kisebb mintamennyiségek esetén minden mintából 100g szemet őröltünk Brabender Junior labormalommal, és az így kapott lisztfrakciót vizsgáltuk.

A fizikai tulajdonságok közül mértük a hektolitersúlyt (TW, g szem/100 liter) (Foss Tecator 1241), az ezerszemtömeget (TKW, g/1000 szem) (MSZ 6367/4-86, Budapest: Magyar Szabadalmi Hivatal, 1986) valamint a szemkeménység indexet (HI) (AACC method 55-31, Perten SKCS 4100).

A nyersfehérjetartalmat Kjeldahl módszere alapján mértük az ICC 105/2 szabványnak (1995) megfelelően Kjeltec 1035 Analyzer készülékkel. A sikértartalmat és a sikerindexet (GI) Glutomatic 2200 készülékkel határoztuk meg (ICC 137/1, 155, 1995). A sikerterületet az MSZ 6369/5-87 (1987) magyar szabvány szerint mértük.

Méretkizárásos, nagyhatékonyságú, folyadékkromatográfiát (SE-HPLC) használtunk a minták glutenin-, gliadin- és albumin+globulin-tartalmának, valamint oldhatatlan polimer fehérjetartalmának (UPP% = oldhatatlan glutenin / oldható+oldhatatlan glutenin) meghatározására (Batey és mtsai, 1991).

A keményítőtartalmat Foss Tecator 1241 készülékkel, NIR módszerrel egész szemből határoztuk meg, míg a keményítő amilóztartalmát Megazyme módszerével (Yun és Matheson, 1990) mértük.

A kevert kötésű β -glükán teljes mennyiségét teljesőrleményben a Megazyme módszerével (Megazyme, Bray, Ireland) (ICC Standard No 166, AACC Method 32-23) határoztuk meg.

A pentozánok – melyeknek a fő összetevő komponense az AX – teljes és vízdoldható frakciójának mennyiségét kolorimetriás módszerrel határoztuk meg Douglas (1981), valamint Finnie és mtsai (2006) módszere szerint.

Az AX és a β -glükán enzimikus elbontásával keletkező „ujjlenyomatot” Ordaz-Ortiz és mtsai (2004, 2005) módszerével határoztuk meg HP-AEC (nagyhatékonyságú anioncserélő kromatográfia) módszerrel.

A tézta tulajdonságait Brabender Farinográfival, az ICC 115/1 (1995) standard módszerrel határoztuk meg (vízfelvétel, téztaalakulási idő, tézta stabilitás, téztaellágyulás). A sikérindexet az ICC 155 szabvány (1995) szerint számoltuk, míg a kenyértérfogattal összefüggő Zeleny-féle szedimentációs értékét az ICC116/1 (1997) módszerével, SediCom System készülékkel mértük (Tömösközi és mtsai, 2009). A liszt szuszpenzió gélesedés közbeni viszkozitásváltozásait adott hőmérsékletprofil mellett Rapid Visco Analyser (RVA-3D, Newport Scientific Pty. Ltd., Warriewood, NSW, Australia) készülékkel határoztuk meg (AACC 76-21, Batey és mtsai, 1997). Az enzimek hatásának kizárása érdekében enziminhibitoroként ezüst-nitrátot használtunk (Merck, 101510, 12 mM).

A genomi DNS-t levélből extraháltuk AquaGenomic kit felhasználásával a gyártó használati utasítása szerint (MultiTarget Pharmaceuticals LLC, Colorado Springs, USA). Az SGP-1 mutáns allélek markerszelekcióját az A, B és D genomon Shimbata és mtsai (2005) módszere szerint végeztük.

A statisztikai értékeléshez két technikai ismétlésben mértük minden minta ezerszemtömegét (TKW), fehérje-, β -glükán-, pentozán- és arabinoxilán-tartalmát (AX). Ha a két ismétlés közötti különbség 10%-nál nagyobb volt, akkor a mérést megismételtük további két ismétlésben. Három technikai ismétlést mértünk a kromatográfiai módszerek esetén, vagyis az SE-HPLC és a HP-AEC módszereknél. Az átlagértékek, a szórás (SD), valamint a korreláció-, a regresszió-analízis és a legkisebb szignifikáns differencia (LSD) számítását Microsoft Excel programmal végeztük. A főkomponens-analízist (PCA) Statistica 6.0 szoftverrel végeztük. A törzsek diszkriminancia-analízisét, az egytényezős varianciaanalízist (ANOVA) és a Tukey-féle *post hoc* tesztet SPSS 16.0 szoftverrel (SPSS Rt., Chicago, IL, USA) készítettük el.

Az üvegházi kísérletet a környezeti hatások minimalizálása céljából random blokk elrendezésben végeztük. Az analízishez három biológiai ismétlést használtunk minden genotípusból és minden kezelés esetén, ahol három vagy négy növény szemtermésének keveréke jelentett egy ismétlést.

A szántóföldi ismétlések terméscsökkentését először SPSS 16.0 szoftverrel értékeltük lineáris kevert modell analízissel, ahol a genotípus volt a rögzített faktor, míg az évet tekintettük véletlen faktornak, ahol nem állt rendelkezésre ismétlés, majd kéttényezős varianciaanalízist (ANOVA) is végeztünk, valamint páronkénti összehasonlítást. A minőségi tulajdonságok vizsgálatánál a genotípus és az évjárat voltak a rögzített faktorok, míg az ismétlés volt a véletlen faktor. A Lineáris kevert modell analízist (REML analízis – REstricted Maximum

Likelihood algorithm [korlátozott valószínűségű algoritmus] használatával) Virk és mtsai (2009) munkája alapján végeztük. Az analízisben a vizsgálat különböző évjáratait tekintettük különböző környezeteknek (E) valamennyi genotípus vizsgálata esetén (G). A G, az E és a GxE (vagyis a genotípus, a környezet és a kettő kölcsönhatásának) variancia komponenseit értékeltük valamennyi tulajdonságra. Ezeket a varianciaértékeket használtuk a tágabb értelemben vett örökölhetőség számításához is, melyet a genotípusos és fenotípusos variancia hányadosaként határoztunk meg.

A szárazságstressznek kitett minták elemzését és a kontroll genotípusokkal való összehasonlításukat SPSS 16.0 szoftverrel (SPSS Inc., Chicago, IL, USA) végeztük. Az első modell, amit alkalmaztunk, a lineáris kevert modell analízis volt (REML használatával) Virk és mtsai (2009) módszere szerint, ahol a genotípus (G) és a kezelés (T) jelentették a rögzített faktorokat, míg az ismétlés (R) a véletlen faktorokat. Amikor az adatokat a kezelés (T) alapján két csoportra osztottuk, akkor a G és az R voltak a rögzített faktorok. A stresszelt és kontroll minták mért átlagértékeinek összehasonlítására a Tukey-tesztet használtuk a *post hoc* többváltozós páronkénti összehasonlítás keretében, ahol a lineáris modellben a G volt a rögzített faktor.

A törzsek stabilitásának vizsgálatát a variációs együttható (CV) értékének meghatározásával, valamint GGE biplot elemzéssel végeztük. A CV a szórás százalékos aránya az átlaghoz viszonyítva. A GGE biplot elemzést GenStat 17.0 szoftver (VSN Nemzetközi Kft., Hemel Hemstead, UK) használatával végeztük. A GGE biplot a főkomponens-analízis eredménye alapján ábrázolja a genotípus (G), valamint a genotípus és környezet kölcsönhatásának (G×E) variabilitását, de a környezeti hatásokat figyelmen kívül hagyja. A Ranking biplottal (rangsoroló) (átlagos környezet függvény [AEC nézet]) vizsgálható az összes genotípus teljesítménye egy specifikus környezeten belül. Az ábrán a legjobb teljesítményű és legstabilabb genotípusok azok, amelyek a biplot tengelyre vetítve legközelebb esnek az átlagkörnyezethez és a tengelyhez. A nyíllal ellátott vonal az AEC abszcissza, ami az adott tulajdonság nagyobb átlagértékeinek irányába mutat. Az AEC ordináta a nagyobb variabilitás (kisebb stabilitás) felé mutat mindkét irányban (Yan és Tinker, 2006).

EREDMÉNYEK

A keményítő amilóztartalmának növelése búzában:

- Hagyományos pedigrenemesítéssel előállítottunk tíz, az SGP-1/SSIIa mindhárom alléljére mutáns, nagy amilóztartalmú búza törzset, melyeknek az amilóztartalma 29 és 43% között változott, ami 16–72%-os növekedést jelentett a búza normál amilóztartalmához képest.
- Kimutattuk, hogy az amilóztartalom SGP-1 mutáció következtében bekövetkező növekedése szignifikánsan kisebb ezerszemtömeget,

keményítőtartalmat és viszkozitásértékeket eredményezett (sorrendben $r_{5\%} = -0,659, -0,833, -0,474 - 0,943$), mely a feldolgozóipari (malom- és sütőipari) tulajdonságok negatív irányú változását jelentette.

- Kimutattuk, hogy az amilóztartalom mérsékeltebb növekedése mellett a keményítő tulajdonságai ugyan módosulnak (csúcsviszkozítás ~1800–1900 cP), ugyanakkor a hagyományos sütőipari termékek előállításához kulcsfontosságú siker jó minősége megőrizhető (GI ~80), ezért egy vagy két allélre mutáns törzsek feltehetőleg jobban hasznosíthatók feldolgozóipari célra.
- A nagy amilóztartalmat a nagy ezerszemtömeeggel és lisztkihozattal nem volt lehetséges kombinálni, ezért ezek a tulajdonságok a szelekció kritikus limitáló tényezői.
- Megállapítottuk, hogy az egy-egy SGP-1 allélre mutáns törzsek többségében nem stabilak, előállításuk nagyobb kihívást jelent, a markerszelekción túl több öntermékenyítési ciklusra vagy dihaploid törzsek előállítására is szükség van a visszakereszteзések után.
- A környezet és a genotípus hatásának vizsgálatával megállapítottuk, hogy a keményítő vizsgált tulajdonságait (amilóztartalom, viszkozitás) a genotípus határozta meg elsősorban, a környezet hatása jóval kisebb volt, és ezzel a nemesítés relevanciáját megerősítettük.
- Harminc változatos amilóztartalmú törzs és fajta három évjáratban kivitelezett szántóföldi kísérletében kimutattuk, hogy a növényfejlődés utolsó 100 napjában mért átlaghőmérséklet, illetve a 25 °C-nál melegebb napok számának növekedésével az amilóztartalom csökkent ($r = -0,9841$), míg az abszolút minimum hőmérséklet csökkenésével az amilóztartalom nagyobb lett ($r = -0,9639$). Az utolsó 100 nap átlaghőmérsékletének növekedésével a viszkozitásértékek és a gélesedési hőmérséklet is nőttek ($r = 0,9286$). A kumulált csapadékösszeg nagysága a keményítőtartalommal mutatott pozitív korrelációt (Rakszegi és mtsai, 2015).

A sejtfalalkotó komponensek (AX) mennyiségének növelése búzában:

- Létrehoztunk tíz, lisztjében nagy WE-AX-tartalmú törzset (9–10 mg/g), melyekben a rostanyagtartalom növekedése a szülői kontrollokéhoz képest 49,25% maximális és 16,3% átlagos növekedést jelentett a WE-AX míg 21,5% maximális és 6,7% átlagos növekedés a TOT-AX-tartalomban.
- A nagy AX-tartalmú törzsek többségének 60–62% volt a vízfelvétele, 40–45 g az ezerszemtömege, 30% feletti a sikértartalma, tézstabilitása pedig 12 perc feletti, azaz e törzsek feldolgozóipari minősége messzemenően megfelel a hagyományos sütőipari elvárásoknak.
- Kimutattuk, hogy a nagy AX-tartalmat lehetséges kombinálni a jó agronómiai tulajdonságokkal, valamint a nagy ezerszemtömeggel és a jó sütőipari tulajdonságokkal.

- Ötéves szántóföldi kísérletben kimutattuk, hogy mind a teljes, mind a WE-AX mennyiségét szignifikánsan befolyásolták a G, E és a G×E tényezők, de mindkét tulajdonság tágabb értelemben vett örökölhetősége jelentős (sorban 0,66 és 0,77 értékekkel).
- Kísérletünkben a WE-AX-tartalom teljes fenotípusos varianciájának 23,88%-át határozta meg a genotípus, de a genotípus és az évjárat kölcsönhatásának is volt 25,18% hozzájárulása a teljes varianciához.
- Megállapítottuk a vízfelvétel szoros összefüggését a TOT-AX-tartalommal. A vízfelvétel teljes fenotípusos varianciájának 21%-át határozta meg a genotípus, a tulajdonság örökölhetősége 0,74 volt.
- Az ezerszemtömeg, a TOT- és WE-AX-tartalom, valamint a keményítőtartalom a legerősebb mértékben az abszolút maximum hőmérséklettől, a 30 °C-nál melegebb napok számától és az utolsó 100 napban leesett csapadék mennyiségétől függött. (Tremmel-Bede és mtsai, 2017, 2020; Rakszegi és mtsai, 2008)

Az abiotikus stressz hatásai a búza rostanyagkomponenseire:

- A kalászolás utáni tizenkettedik naptól tizenöt napon át tartó hő- és szárazságstressz hatását vizsgáltuk három búzafajta AX- és β -glükán-komponenseinek mennyiségére és szerkezetére, és szignifikáns különbségeket találtunk a genotípusok abiotikus stresszekkel szembeni toleranciájában.
- Megállapítottuk, hogy általánosságban a hő- és a szárazságstressz csökkentette az ezerszemtömeget, a szem β -glükán-tartalmát és benne a DP3+DP4 egységek mennyiségét, miközben a fehérje- és az AX-tartalom nőtt egységnyi tömegben. A legnagyobb AX- és fehérjetartalmat a kombinált stressznek (H+D) kitett mintákban mértük, miközben a hőstressz az AX vízdoldhatóságát (WE) is növelte.
- Az AX-molekula szerkezetét jellemző nem szubsztituált (US) AXOS aránya és a hosszabb β -glükán láncok aránya (DP3-4/DP5-10) is nőtt stresszkörülmények között, ugyanakkor a mono- és di-szubsztituált (M/D) AXOS aránya a kombinált stressz hatására szignifikánsan csökkent.
- Kimutattuk, hogy az ezerszemtömeg figyelembevételével egy szemre vetítve valamennyi fő komponens (fehérje, AX, β -glükán) mennyisége csökkent hő-, szárazság- és a kettő stressz kombinációja hatására ennek megfelelő sorrendben, növekvő mértékben.
- Kimutattuk, hogy míg az AX-tartalom általánosságban nőtt valamennyi stresszhatásra, ugyanakkor a szárazságstressznek negatív volt a hatása a szárazságtűrő 'Plainsman V' fajta AX-tartalmára.
- A rostanyag tartalmát tekintve a 'Fatima 2' hasonlóképp viselkedett, mint a 'Plainsman V' a szárazság hatására, ugyanakkor nagyon érzékeny volt a hőre.

- A beltartalmi tulajdonságok stabilitása alapján a hőre legellenállóbb fajta az 'Mv Magma' volt (Rakszegi és mtsai, 2014, 2019)

Az *Aegilops* kromoszóma addícióinak hatása a búza rostanyagtartalmára és -összetételére:

- Kimutattuk, hogy az *Aegilops geniculata* és az *Aegilops biuncialis* szignifikánsan nagyobb β -glükán-tartalommal rendelkeznek, mint a búza (*Triticum aestivum* L.) (9–10mg/g), valamint azt, hogy az *Aegilops* fajon belül nagymértékben diverz a β -glükán mennyisége (30–50 mg/g).
- Az *Aegilops* fajokban a TOT- és WE-AX mennyisége a búzáéhoz volt hasonló, de fajon belül jelentős volt a variabilitás (30–60 mg/g és 8–14 mg/g között volt a teljesőrlemény TOT-AX- illetve WE-AX-tartalma).
- A WE-AX aránya az oldhatatlanhoz képest szignifikánsan nagyobb *Aegilops*-ban, mint búzában. Viszonylag nagyobb WE-AX-tartalmat mértünk az 5M^s, 2M^b és 7M^b búza–*Aegilops* addíciós vonalakban is.
- Kimutattuk, hogy az *Aegilops* kromoszómák közül az 5U^s, 7U^s, 7M^s és 7M^b kromoszómák addíciója képes növelni a búza β -glükán-tartalmát, míg az 5U^s, 5M^s és 7M^b kromoszómák a WE-AX-tartalmat növelték búzában.
- A DP3:DP4 glükánegységek aránya, mely a polimer β -(1-3) és β -(1-4) kötéseinek arányát, azaz a β -glükán szerkezetét jellemzi, szignifikánsan kisebb volt mindkét *Aegilops* fajban, mint a búzában. A DP3 és DP4 egységek arányát a legnagyobb mértékben az 5U kromoszóma addíciója csökkentette.
- Megállapítottuk, hogy az AX szerkezetét jellemző tulajdonságok, azaz a szubsztituált xilóz láncok aránya szignifikánsan alacsonyabb volt *Aegilops*ban, mint búzában, ugyanakkor a mono- és di-szubsztituált xilóz láncok (AXOS) egymáshoz képest mért aránya majdnem kétszer akkora volt *Aegilops*ban, mint búzában.
- Az 5U^s és 7M^b kromoszómák addíciója az AX szerkezetére is hatással volt búzában. Az arabinóz-szubsztitúció nélküli AXOS-molekulák aránya a teljes AXOS-hoz képest megnőtt az addíció hatására (Rakszegi és mtsai, 2017, 2019).

A búza rostanyagtartalmával összefüggő gének homológjainak azonosítása *Aegilops*ban:

- Az *Aegilops umbellulata* U genomszekvenciájának felhasználásával kerestük az árpa és búza ismert β -glükán- és AX-bioszintézisben részt vevő géneivel homológ gének kromoszomális elhelyezkedését *Aegilops*ban. Megállapítottuk, hogy a β -glükán-szintézisben résztvevő gének esetén (OsCslF1-F2, HvCslF3-4, HvCslF6-10, HvCslF12-13, HvCslH1) az *Aegilops* homológokat ugyanazon a homeológ kromoszóma csoporton (1, 2, 5 és 7) találjuk, mint a búzábanál.

- Az AX bioszintéziséért felelős gének többsége ugyanazon kromoszómacsoporton helyezkedett el, mint búzában, azaz a 4-es és 7-es (TaGT43 család), valamint a 3-as (TaGT47 család) és a 2-es (TaGT75 család) kromoszómákon.
- Néhány homeológot azonban más kromoszómákon találtunk, mint búzában (TaGT47, HvCslF11, TaGT61-1, TaGT61-2 és TaGT75-4) (Rakszegi és mtsai, 2017).

ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. Elsők között hoztunk létre Európában lisztjükben nagy amilóz- és nagy AX-tartalmú búzatörzseket. Kimutattuk e tulajdonságok örökölhetőségét és nemesítési célra való hasznosíthatóságát.
2. Kimutattuk, hogy lehetséges a nagy amilóztartalmat determináló mutáns SGP-1 allélek átvitele búzába hagyományos nemesítési módszerekkel, de annak kombinálhatósága a nagy ezerszemtömeggel és lisztkihozattal nehézségekbe ütközik mindhárom allélre mutáns törzsekben. A keményítő összetételének drasztikus megváltoztatása ugyanis a keményítő mennyiségét a búzaszemben oly mértékben csökkentette, mely a gyakorlati hasznosíthatóságot nem teszi lehetővé.
3. Megállapítottuk, hogy a nagy WE-AX-tartalmú genotípusok jó fizikai és sütőipari tulajdonságokkal, többek között nagy ezerszemtömeggel és vízfelvétellel rendelkezhetnek, valamint bizonyítottuk a stabil jó minőség és az egészségügyi előnyöket eredményező nagyobb rostanyagtartalom kombinálhatóságát.
4. Kimutattuk, hogy mind az amilóztartalmat, mind az AX-tartalmat szignifikánsan befolyásolja a tenyészidejük utolsó 100 napjában előforduló hőségnapok száma. A TOT- és a WE-AX esetén kimutattuk az utolsó 100 napban kapott csapadék mennyiségének szignifikáns hatását.
5. Vizsgáltuk és kimutattuk a szárazság- és a hőstressz szignifikáns hatását a búza rostanyagtartalmára. Megállapítottuk, hogy a β -glükán-tartalom csökken, míg az AX-tartalom nő a búza egységnyi tömegében. Emellett elsőként mutattuk ki mennyiségi elemzéssel, hogy a nem szubsztituált AXOS aránya és a hosszabb β -glükán láncok (DP3-4/DP5-11) aránya stressz hatására nő, míg a mono- és di-szubsztituált (M/D) AXOS arány csökken búzában. A legnagyobb hatása a két stressztényező kombinált alkalmazásának volt. A rostanyagok szerkezetében bekövetkező változások

a rostanyagok oldhatóságát is befolyásolhatják. Ez lehet az oka, hogy a hőstressz növelte az AX vízoldhatóságát.

6. Kimutattuk, hogy az *Aegilops* kromoszómák ígéretes forrásai lehetnek a kromoszóma-mediált génátvitelnek és azon kromoszóma mérnökségi programoknak, melyeknek célja a búza rostanyag-, elsősorban β -glükán-tartalmának növelése. Ebben segít a β -glükán- és az AX-tartalmat meghatározó gének ortológjainak azonosítása és kromoszomális lokalizációjának megismerése is. Az 5U és a 7M kromoszómák addíciójának szignifikáns hatását mutattuk ki a búza rostanyagtartalmára.

EREDMÉNYEK GYAKORLATI HASZNOSÍTHATÓSÁGA

Nemesítés és feldolgozóipari hasznosítás

A búzanemesítés fő célja alapvetően a termés, a betegségekkel szembeni ellenállóság és/vagy a sütőipari minőség javítása, hiszen ez mutat a fajtabejelentési lehetőség és a várható gazdasági hasznosulás irányába. Ez azt jelenti, hogy a nemesítők elsősorban a termelők és a feldolgozóipar érdekeit tartják szem előtt és általában nem veszik figyelembe a gabonafélék egészséges táplálkozásban betöltött szerepének fontosságát. Egyre nő azonban a fogyasztói érdeklődés a gabonalapú funkcionális élelmiszerek iránt, amelyek fontos szerepet játszhatnak bizonyos betegségek megelőzésében is. Ennek köszönhetően mára már a feldolgozóipar és a termelők figyelmének középpontjába került a téma.

Célunk volt ezért a búza egészségmegőrző tulajdonságának fokozása a rostanyagtartalom növelésével, mellyel nemcsak a fogyasztók érdekeit szolgálhatnánk, de az előállított „prebreeding” anyagok felhasználása a nemesítési programokban reményeink szerint végül olyan továbbfejlesztett fajták nemesítését tenné lehetővé, melyek nem csak a fogyasztók, de a nemesítők, az agronómusok és a feldolgozóipar érdekeinek is megfelelnek.

Miközben a bioaktív komponensek egészségügyi előnyeiről egyre több információ áll rendelkezésünkre, addig ezen összetevők technológiai paraméterekre gyakorolt hatása csak részben ismert. A lisztminősítő analitikai módszerek elsősorban a fehérje, siker, valamint a szénhidrátok közül a keményítő mennyiségi és minőségi tulajdonságainak jellemzését tartják szem előtt. A kisebb mennyiségben jelen lévő összetevők, ezen belül is a rostalkotó, nem keményítő jellegű komponensek hatásával azonban nem vagy csak kevésbé számolnak. A rostanyagok feldolgozóipari minőségre kifejtett hatásának vizsgálata ezért szintén gyakorlati jelentőséggel bír. A nagy rostanyagtartalmú genotípusok tulajdonságainak jellemzése hozzájárulhat annak megértéséhez, hogy a rostanyagok miként befolyásolják a búza különböző feldolgozóipari tulajdonságait.

Klímaváltozás hatásainak megértése

A klímaváltozás várhatóan jelentős hatással lesz a növénytermesztésre. A légkör hőmérséklete szignifikánsan nőtt az elmúlt évtizedekben, amit globális szinten a levegő és az óceánok melegedése, a gyorsabb ütemben olvadó hó- és jégtakaró, valamint az emelkedő tengerszint is bizonyít. A klímátrendek azt mutatják, hogy Európa hőmérsékletének emelkedése nagyobb lesz, mint a globális átlag. Közép-Európa területein várhatóan nő a nyári szárazság kockázata, valamint a késő tavaszi szokatlanul magas hőmérséklet is egyre gyakoribb lesz, ez pedig a növényeket már korai fenofázisban fogja érinteni. Magyarországon az átlagos mértéknél nagyobb hőmérséklet-emelkedés várható, amely főleg nyáron és őszelel érezteti majd hatását. A lehullott csapadék mennyisége és eloszlása is változni fog: az esős teleken árvízveszélyre, a száraz, forró nyarakon pedig aszályra kell felkészülnünk. Az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) által az elmúlt 30 év időjárási adatai alapján végzett elemzés szerint a tavaszi középhőmérséklet jelentősen, 1,75 °C-kal, a nyári 2 °C-kal nőtt. A súlyos és rendkívül súlyos aszályoknak a 20. század vége felé tapasztalható gyakoribbá válása a 21. században is folytatódott, mint ahogyan azt a 2002, 2003, 2007, 2011 és 2012-es esztendő adatai bizonyítják.

A klímaváltozással várható hő- és szárazságstressz hatásainak vizsgálata a növények fejlődésére és a gabonaszemek beltartalmi összetételére fontos információkkal szolgálhatnak a kutatóknak, a nemesítőknek és a termesztőknek a jövő kilátásairól és segítik a felkészülést a klímabeli változásokra például stressztűrő fajták nemesítésével, szelekciójával, az abiotikus stressztűrő képesség fokozására alkalmas génforrások kiválasztásával.

A genetikai erőforrások hasznosítása

A nagy rostanyagtartalmú sütőipari termékek és száraztészta az egészséges táplálkozás fontos alappilléret jelentik. Pozitív egészségügyi hatásai motiválták olyan genetikai allélek keresését és azonosítását búzával rokon fajokban, melyek alkalmasak lehetnek a búza, de különösen a *Triticum* nemzetség rostanyagtartalmának növelésére. E törekvések azonban eddig nem érintették a búza rokonai közé tartozó *Aegilops* fajokat, pedig ezek fontos forrásai lehetnek más új géneknek és alléleknek a búzanemesítési programokban. Az *Aegilops*, a *Triticum* nemzetség legközelebbi rokona, mely tizenegy diploid, tíz tetraploid és két hexaploid fajt tartalmaz igen változatos genommal. Nagymértékű környezeti adaptációs képességüknek köszönhetően ezek a fajok ígéretes betegségrezisztencia-források, de az abiotikus stresszekkel szemben – mint például a só-, a szárazság-, a fagy- és a hőstressz – is hordoznak ellenállóságot javító géneket. A stressztolerancián túl az *Aegilops* fajok szintén gazdag forrásai olyan géneknek, melyek a búza táplálkozási értékének javítására alkalmasak lehetnek. A mikro- és makroelem-tartalmat összehasonlítva a réz-, a cink-, a kalcium- és a magnéziumtartalom szignifikánsan nagyobb volt az *Aegilops*

fajokban, mint a búzában. Ezen kívül két-háromszor annyi vasat és cinket, valamint másfél–kétszer több káliumot és mangánt is kimutattak több *Aegilops* faj szemtermésében, mint a kenyér- vagy a durumbúzáéban. A búza feldolgozóipari minőségének fő meghatározói a sikér tartalékfehérjék, melyekből 27 különböző glutenin allélt azonosítottak *Aegilopsban*, melyek összesen 29 féle fehérjemintázatot képesek létrehozni, ami nagy változatosságot eredményezhet a sikér térhálószerkezetében és ezáltal a sütőipari minőségben.

Vizsgálatainkban a rostanyagkomponensek jelentős variabilitását mutattuk ki *Aegilopsban* és a β -glükán kiemelkedő mennyiségét. Azonosítottunk továbbá néhány rosttartalommal összefüggő, a búzagenommal homológ génszakaszt. Eredményeink hozzájárulnak azon gének azonosításához, melyek az *Aegilops* fajok étkezésirost-tartalmát meghatározzák és hozzájárulnak a vad allélek hatékony átviteléhez búza introgressziós vonalakba és egészségre jótékony hatású gabonafélék előállítását teszik lehetővé. Megállapítottuk továbbá, hogy a búza beltartalmi összetételének stabilitása javítható szárazságnak kitett környezetben a búza és vad fajainak interspecifikus hibridizációjával.

IRODALOMJEGYZÉK

- AACC Approved Methods of Analysis, 11th Edition (2009): AACC 32-23.01 β -Glucan Content of Barley and Oats, Rapid Enzymatic Procedure, American Association of Cereal Chemists, St Paul, MN, USA.
- AACC Approved Methods of Analysis, 11th Edition (2009): AACC 55-31.01 Single-Kernel Characterization System for Wheat Kernel Textur, American Association of Cereal Chemists, St Paul, MN, USA.
- AACC Approved Methods of Analysis, 11th Edition (2009): AACC 76-21, Starch. General pasting. (2000) American Association of Cereal Chemists, St Paul, MN, USA.
- Batey I.L., Curtin B.M., Moore S.A. (1997). Optimization of rapid-visco analyser test conditions for predicting Asian noodle quality. *Cereal Chemistry*, 74, 497-501.
- Batey I.L., Gupta R.B., MacRitchie F. (1991). Use of size-exclusion high performance liquid chromatography in the study of wheat flour proteins: an improved chromatographic procedure. *Cereal Chemistry*, 68, 207–209.
- Douglas S.G. (1981). A rapid method for the determination of pentosans in wheat flour. *Food Chemistry*, 7, 139–145.
- Finnie S.M., Bettge A.D., Morris C.F. (2006). Influence of cultivar and environment on water-soluble and water-insoluble arabinoxylans in soft wheat. *Cereal Chemistry*, 83, 617–623.
- International Association for Cereal Science and Technology ICC 105/2. (1995). Determination of Crude Protein in Cereals and Cereal Products for Food and

- for Feed. International Association for Cereal Science and Technology, Vienna, Austria
- International Association for Cereal Science and Technology ICC 137/1. (1995). Mechanical Determination of the Wet Gluten Content of Wheat Flour (Glutomatic). International Association for Cereal Science and Technology, Vienna, Austria.
- International Association for Cereal Science and Technology ICC 155. (1995). Determination of Wet Gluten Quantity and Quality (Gluten Index ac. to Perten) of Whole Wheat Meal and Wheat Flour (*Triticum aestivum*). International Association for Cereal Science and Technology, Vienna, Austria.
- International Association for Cereal Science and Technology ICC 166. (1998). Determination of β -glucan in barley, oat and rye, Vienna, Austria.
- International Association for Cereal Science and Technology ICC 115/1. (1995). Method for using Brabender Farinograph. International Association for Cereal Science and Technology, Vienna, Austria.
- International Association for Cereal Science and Technology ICC 116/1. (1997). Determination of the Sedimentation Value (according to Zeleny) as an Approximate Measure of Baking Quality. International Association for Cereal Science and Technology, Vienna, Austria.
- Molnár-Láng M., Linc G., Nagy E.D., Schneider A. et al. (2002). Molecular cytogenetic analysis of wheat-alien hybrids and derivatives. *Acta Agronomica Hungarica*, 50, 303–311.
- Molnár-Láng M., Linc G., Sutka J. (1996). Transfer of the recessive crossability allele *kr1* from Chinese Spring into the winter wheat variety Martonvásári 9. *Euphytica*, 90, 301-305.
- MSZ 6367/4-86. (1986). Edible, fodder and industrial seeds and husked products. Determination of test weight, thousand kernel weight and classification grade, Hungary.
- MSZ 6369/5-87. (1987). Flour Testing Methods. Testing of Gluten, Hungary.
- Ordaz-Ortiz J.J., Devaux M.F., Saulnier L. (2005). Classification of wheat varieties based on structural features of arabinoxylans as revealed by endoxylanase treatment of flour and grain. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53, 8349-8356.
- Ordaz-Ortiz J.J., Guillon F., Tranquet O., Dervilly-Pinel G. et al. (2004). Specificity of monoclonal antibodies generated against arabinoxylans of cereal grains. *Carbohydrate Polymers*, 57, 425–433.
- Schneider A., Linc G., Molnár I., Molnár-Láng M. (2005). Molecular cytogenetic characterization of *Aegilops biuncialis* and its use for the identification of five derived wheat-*Aegilops biuncialis* disomic addition lines. *Genome*, 48, 1070–1082.

- Shimbata T., Nakamura T., Vrinten P., Saito M. et al. (2005). Mutations in wheat starch synthase II genes and PCR-based selection. *Theoretical and Applied Genetics*, 111, 1072-1079.
- Tischner T., Rajkaine Vegh K., Kőszegi B. (1997). Effect of growth medium on the growth of cereals in the phytotron. *Acta Agronomica Hungarica*, 45, 187–193.
- Tottman D.R., Makepeace R.J. (1979). An explanation of the decimal code for the growth stages of cereals, with illustrations. *Annals of Applied Biology*, 93, 221-234.
- Tömösközi S., Nádoszi M., Balázs G., Cavanagh C. et al. (2009). Revival of sedimentation value – method development, quality prediction and molecular background. In: Branlard G (ed) *Gluten Proteins. Proc 10th Int Gluten Workshop*, INRA, Clermont-Ferrand, France, pp.104-108.
- Virk D.S., Pandit D.B., Sufian M.A., Ahmed F. et al. (2009). REML is an effective analysis for mixed modelling of unbalanced on-farm varietal trials. *Experimental Agriculture*, 45, 77–91.
- Yamamori, M., Fujita, S., Hayakawa, K., Matsuki, J., et al. Genetic elimination of starch granule protein, SGP-1, of wheat generates and altered starch with apparent high amylase. *Theoretical and Applied Genetics*, 2000, 101, 21–29.
- Yan, W., Tinker, N.A. 2006. Biplot analysis of multi-environment trial data: Principles and applications. *Canad. J. of Plant Sci.* 86:623–645.
- Yun S.H., Matheson N.K. (1990). Estimation of Amylose Content of Starches after Precipitation of Amylopectin by Concanavalin-A. *Starch/Starke*, 42, 229-235.

Dolgozatban kiemelt eredményekhez kapcsolódó saját irodalmak

- Rakszegi M., Boros D., Kuti Cs., Láng L., Bedő Z., Shewry P.R. (2008). Composition and end-use quality of 150 wheat lines selected for the HEALTHGRAIN diversity screen. *Journal of Agricultural Food Chemistry*, 56, 9750–9757. IF.: 2,562.
- Rakszegi M., Darkó É., Lovegrove A., Molnár I., Láng L., Bedő Z. et al. (2019). Drought stress affects the protein and dietary fiber content of wholemeal wheat flour in wheat/*Aegilops* addition lines. *PlosOne*, 14: 2 Paper: e0211892. IF.: 2,766.
- Rakszegi M., Kisgyörgy N.B., Kiss T., Sestili F., Láng L., Lafiandra F., et al. (2015). Development and characterization of high-amylose wheat lines. *Starch/Stärke*, 67, 247-254. IF.: 1,523.
- Rakszegi M., Lovegrove A., Balla K., Lang L., Bedo Z., Veisz O. et al. (2014). Effect of heat and drought stress on the structure and composition of arabinoxylan and β -glucan in wheat grain. *Carbohydrate Polymers*, 102, 557– 565. IF.: 4,074.

- Rakszegi M., Molnár I., Lovegrove A., Darkó É., Farkas A., Láng L. et al. (2017). Addition of Aegilops U and M chromosomes affects protein and dietary fiber content of wholemeal wheat flour. *Frontiers in Plant Science* 8, Paper: 1529. IF.: 3,678.
- Tremmel-Bede K., Láng L., Török K., Tömösközi S., Vida Gy., Shewry P.R. et al. (2017). Development and characterization of wheat lines with increased levels of arabinoxylan. *Euphytica*, 213, 291. IF.: 1,546.
- Tremmel-Bede K., Szentmiklóssy M., Tömösközi S., Török K., Lovegrove A., Shewry P.R., et al. (2020). Stability analysis of wheat lines with increased level of arabinoxylan. *PlosOne*, 15: 5 Paper: e0232892. IF.: 2,74.