

AKADÉMIAI DOKTORI ÉRTEKEZÉS

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

Dr. RAKSZEGI MARIANNA

AGRÁRTUDOMÁNYI KUTATÓKÖZPONT, MEZŐGAZDASÁGI INTÉZET

MARTONVÁSÁR

2021

Tartalomjegyzék

| | |
|---|-----------|
| 1 BEVEZETÉS ÉS CÉLKITŰZÉSEK | 8 |
| 2 IRODALMI ÁTTEKINTÉS | 12 |
| 2.1 A búzaszem összetétele | 12 |
| 2.1.1 Szénhidrátok..... | 13 |
| 2.1.2 Fehérje | 18 |
| 2.1.3 Ásványi anyagok és antioxidánsok | 19 |
| 2.2 A búzaszem komponenseinek genetikája | 24 |
| 2.2.1 A keményítő genetikája | 24 |
| 2.2.2 A fehérjék genetikája | 27 |
| 2.2.3 A rostanyagok genetikája | 28 |
| 2.3 A genotípus és a környezet hatása a búzaszem összetételére | 30 |
| 2.3.1 Örökölhetőség | 30 |
| 2.3.2 Környezeti stresszhatások | 32 |
| 2.4 A nemesítés törekvései a búza bioaktív komponens-összetételének megváltoztatására | 34 |
| 2.5 A búzaszem komponenseinek egészségmegőrző hatása | 35 |
| 2.6 A búzaszem komponenseinek hatása a feldolgozóipari tulajdonságokra | 37 |
| 3 ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK | 42 |
| 3.1 Növényi anyagok és kísérleti körülmények..... | 42 |
| 3.1.1 Nagy amilóztartalmú búzatörzsek előállítása | 42 |
| 3.1.2 Nagy arabinoxilán-tartalmú búzatörzsek előállítása..... | 43 |
| 3.1.3 Szárazság- és hőstressz hatásának vizsgálatához használt növényi anyag és termesztési körülmények..... | 44 |
| 3.1.4 Vad fajok hasznosítása a beltartalmi értékek növelésére és/vagy stabilitásának megőrzésére | 46 |
| 3.2 Módszerek..... | 47 |
| 3.2.1 Őrlés | 47 |
| 3.2.2 A búzaszem fizikai tulajdonságainak vizsgálata..... | 47 |
| 3.2.3 Beltartalmi tulajdonságok vizsgálata..... | 47 |
| 3.2.4 A tészta tulajdonságainak vizsgálata | 49 |
| 3.2.5 DNS-alapú markerszelekció és szekvenciaelemzés | 50 |
| 3.2.6 Statisztikai elemzések..... | 50 |
| 4 EREDMÉNYEK..... | 52 |
| 4.1 Nagy amilóztartalmú búza genotípusok előállítása és jellemzése | 52 |
| 4.1.1 Nagy amilóztartalmú búzatörzsek létrehozása | 52 |

| | |
|---|-----------|
| 4.1.2 A nagy amilóztartalmú búzatörzsek jellemzése | 53 |
| 4.2 A környezet és a genotípus hatása az amilóztartalomra..... | 57 |
| 4.2.1 A genotípus és az évjárat hatásának vizsgálata | 57 |
| 4.2.2 A nagy amilóztartalmú törzsek tulajdonságainak stabilitásvizsgálata..... | 58 |
| 4.3 Nagy arabinoxilán-tartalmú búza genotípusok előállítása és jellemzése | 61 |
| 4.3.1 Nagy arabinoxilán-tartalmú búzatörzsek létrehozása | 61 |
| 4.3.2 A nagy arabinoxilán-tartalmú búzatörzsek jellemzése | 61 |
| 4.4 A környezet és a genotípus hatása az arabinoxilán-tartalomra | 65 |
| 4.4.1 A genotípus és az évjárat hatásának vizsgálata | 66 |
| 4.4.2 A beltartalmi tulajdonságok és a minőség stabilitásának vizsgálata..... | 68 |
| 4.4.3 Az időjárási körülmények hatásának vizsgálata | 70 |
| 4.5 A hő- és a szárazságstressz hatása a búzaszem arabinoxilán és β-glükán rostanyag-összetételére és molekulaszervezetére..... | 73 |
| 4.5.1 A búzaszem összetételének változásai..... | 73 |
| 4.5.2 Az arabinoxilán mennyiségének és összetételének változásai | 76 |
| 4.5.3 A β -glükán mennyiségének és összetételének változásai | 78 |
| 4.6 Az <i>Aegilops</i> U és M kromoszómáinak hatása a búza fehérje- és rostanyagtartalmára, valamint összetételére | 80 |
| 4.6.1 Az <i>Ae. biuncialis</i> és az <i>Ae. geniculata</i> beltartalmi összetételének fajon belüli variabilitása..... | 80 |
| 4.6.2 Az <i>Aegilops</i> kromoszómák hatása a búza ezerszemtömegére és fehérjetartalmára . | 81 |
| 4.6.3 Az <i>Aegilops</i> kromoszómák hatása a β -glükán- és az AX-tartalomra..... | 82 |
| 4.6.4 Az <i>Aegilops</i> kromoszómák hatása a β -glükán és az AX polimerek szerkezetére | 84 |
| 4.6.5 A tartalékfehérje, a β -glükán és az AX bioszintézisében résztvevő gének kromoszomális lokalizációja <i>Aegilops</i> -ban..... | 85 |
| 5 MEGVITATÁS | 86 |
| 5.1 Nagy amilóz tartalmú búza törzsek előállításának és jellemzésének megvitatása | 86 |
| 5.1.1 Megvitatás..... | 86 |
| 5.1.2 Következtetések | 88 |
| 5.2 A környezet és a genotípus amilóztartalomra kifejtett hatásának megvitatása | 88 |
| 5.2.1 Megvitatás..... | 88 |
| 5.2.2 Következtetések | 91 |
| 5.3 Nagy arabinoxilán-tartalmú búza genotípusok előállításának és jellemzésének megvitatása.... | 91 |
| 5.3.1 Megvitatás..... | 91 |
| 5.3.2 Következtetések | 95 |
| 5.4 A környezet és a genotípus arabinoxilán-tartalomra kifejtett hatásának megvitatása | 95 |
| 5.4.1 Megvitatás..... | 95 |
| 5.4.2 Következtetések | 97 |

| | |
|--|------------|
| 5.5 A hő- és a szárazságstressz búzaszem rostanyag-összetételre kifejtett hatásának megvitatása | 97 |
| 5.5.1 Megvitatás..... | 97 |
| 5.5.2 Következtetések | 99 |
| 5.6 Az U és M kromoszómák búza rostanyagtartalomra kifejtett hatásának megvitatása | 100 |
| 5.6.1 Megvitatás..... | 100 |
| 5.6.2 Következtetések | 102 |
| 6 ÖSSZEFOGLALÁS | 103 |
| 7 ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK | 107 |
| 8 EREDMÉNYEK GYAKORLATI HASZNOSÍTHATÓSÁGA | 108 |
| 9 KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS | 110 |
| 10 IRODALOMJEGYZÉK | 111 |
| 11 MELLÉKLETEK | 132 |

Rövidítések jegyzéke

| Rövidítés | Angol kifejezés | Magyar megfelelő |
|-------------|---|---|
| AEC | Average Environmental Coordinate | átlag környezet koordinátája |
| AGP | Glucose-1-Phosphatase | glükóz-1-foszfátáz |
| ANOVA | Analysis of Variance | varianciaanalízis |
| Araf | α -L Arafuranosyl | α -L-arabinofuranozil |
| AX | Arabinoxylan | arabinoxilán |
| AXOS | Arabinoxylan Oligosaccharides | arabinoxilán oligoszacharidok |
| A:X | ratio of the arabinose and xylose | arabinóz és xilóz aránya |
| BC | backcross | visszakeresztezés |
| BEI és BEII | Branching Enzyme I. and II. | elágazásokat létrehozó enzimek a keményítő szintézisekor |
| cP | centipoise | centipoise |
| CRT | Carotene Desaturase | karotén deszaturáz |
| Csl | Cellulose synthase-like | cellulóz-szintázszerű |
| CV | Coefficient of Variation | variációs együttható |
| D | drought stress | szárazságstressz |
| DAP | Days After Pollination | virágzás után eltelt napok száma |
| D AXOS | disubstituted arabinoxylan oligosaccharide | diszubsztituált arabinoxilán-oligoszacharid = (XA2+3XX) + (XA3A2+3X) + (XA3XA2+3XX) |
| DP | Degree of Polimerization | polimerizáltsági fok |
| DSC | Differential Scanning Calorimetry | differenciális pásztázó kalorimetria |
| E | Environment | környezet |
| EUFIC | The European Food Information Council | Európai Élelmiszer-információs Bizottság |
| EURESTA | European Food- Linked Agro-Industrial Research-Concerted Action on Resistant Starch | európai élelmiszerekhez kapcsolódó agrár- ipari kutatással összehangolt összefogás a rezisztens keményítővel kapcsolatban |
| FLD | Fluorescence Detector | fluoreszcens detektor |
| FODMAP | Fermentable Oligosaccharides, Disaccharides, Monosaccharides, and Polyols | fermentálódó oligo-, di-, és monoszacharidok, valamint poliolok |
| FOS | Fructooligosaccharides | oligofruktózok |
| FT-IR | Fourier-transform infrared spectroscopy | Fourier-transzformációs infravörös spektroszkópia |
| GAX | Glucuronoarabinoxylan | glükuronoarabinoxilán |
| GBSS | Granule Bound Starch Synthase | keményítőhöz kötött keményítő-szintáz |
| GC | Gas Chromatography | gázkromatográfia |
| GGE | G and GxE effects | genotípus és G×E kölcsönhatást foglalja magában |
| GI | Gluten Index | sikéindex |
| Gli | gliadin proteins | gliadin fehérjék |
| Glu | glutenin proteins | glutenin fehérjék |

| | | |
|------------------|---|--|
| GMO | Genetically Modified Organisms | genetikailag módosított szervezet |
| GMP | Glutenin Macropolymer | glutenin makropolimerek |
| GOS | Gluco-oligosaccharides | glüko-oligoszacharidok |
| GSP | Grain Softness Protein | szemkeménységgel összefüggő fehérje |
| GT | Glikozyl Transzferase | glikozil-transzferáz |
| GxE | interaction of the genotype and the environment | genotípus és a környezet kölcsönhatása |
| GWAS | Genome Wide Association Studies | teljes genomra kiterjedő asszociációs térképezés |
| H | heat stress | hőstressz |
| HI | Hardness Index | szemkeménység index |
| HMW | High Molecular Weight | nagy molekulatömegű |
| HP-AEC | High-Performance Anion Exchange Chromatography | nagyhatékonyságú anioncserélő kromatográfia |
| IBS | Irritable Bowel Syndrome | irritábilis bélszindróma |
| LMW | Low Molecular Weight | kis molekulatömegű |
| LSD | Least Significant Difference | legkisebb szignifikáns differencia |
| M AXOS | monosubstituted arabinoxylan oligosaccharide | monoszubsztituált arabinoxilán-oligoszacharid = (XA3XX) + 2(XA3A3XX) + 2(XA3XA3XX) + (XA3A2+3X) + (XA3XA2+3XX) |
| MT | mixing time | tésztakialakulási idő |
| NÉBIH | National Food Chain Safety Office | Nemzeti Élelmiszerlánc-biztonsági Hivatal |
| NP-HPLC | Normal Phase-High Performance Liquid Chromatography | normál fázisú, nagyhatékonyságú folyadékkromatográfia |
| NSP | Non-Starch Polysaccharides | nem keményítő szénhidrátok |
| NWC | Natural Water Capacity means the 100% soil moisture | természetes vízkapacitás, mely a 100% talajnedvességet jelenti |
| PAD | Pulsed Amperometric Detection | impulzusos amperometrius érzékelés |
| PCA | Principal Component Analysis | főkomponens-analízis |
| PR | Peak Resistance | tésztarezisztencia |
| PSY | Phytoene Synthase | fitoén-szintáz |
| QTL | Quantitative Trait Locus | menyiségi tulajdonsággal összefüggő lokusz |
| R | Replication | ismétlés |
| REML | REstricted Likelihood algorithm | korlátozott valószínűségű algoritmus |
| RFLP | Restriction Fragment Length Polymorphism | restrikciós fragmenthossz-polimorfizmus |
| RIL | Recombinant Inbred Lines | rekombináns öntermékenyülő vonalak |
| R _{max} | Maximum resistance of dough | a tészta nyújtással szembeni maximális ellenállása |
| RS | Resistant Starch | rezisztens keményítő |
| RVA | Rapid Visco Analyser | gyors viszkoanalizátor |
| SBE | Starch Branching Enzyme | keményítő elágazásait létrehozó enzimek |
| SD | Significant Difference | szórás |

| | | |
|--------------|--|--|
| SE-HPLC | Size-Exclusion- High Performance Liquid Chromatography | méretkizárásos nagyhatékonyságú folyadékkromatográfia |
| SGP | Starch Granule (Associated) Protein | keményítőhöz kötött fehérjék |
| SIBO | Small Intestinal Bacterial Overgrowth | kontaminált vékonybél |
| SSI and SSII | Stach Synthase I és II | keményítő-szintáz I és II |
| SSD | Single Seed Descent | egymagszármazék módszer |
| sz.a. | related to dry matter | szárazanyag tartalomra vonatkoztatva |
| T | Treatment | kezelés |
| TDF | Total Dietary Fiber | teljes ételmirost-tartalom |
| TKW | Thousand Kernel Weight | ezerszemtömeg |
| TOT-AX | Total-Arabinoxylan | arabinoxilán teljes mennyisége |
| UPP | Unextractable Polymeric Proteins | nem extrahálható polimer fehérjék |
| US AXOS | Unsubstituted Arabinoxylan Oligosaccharide | szubsztitúció nélküli arabinoxilán-oligoszacharid = X+XX+XXX |
| VSMC | Volumetric Soil Moisture Content | talaj térfogati nedvességtartalma |
| WE-AX | Water-Extractable Arabinoxylan | vízoldható arabinoxilán |
| WU-AX | Water Unextractable Arabinoxylan | vízben oldhatatlan arabinoxilán |
| Wx | Waxy | waxy, alacsony amilóztartalmú |
| Xylp | β -D-xylopiranozil | β -D-xilopiranozil |

1 BEVEZETÉS ÉS CÉLKITŰZÉSEK

A szénhidrátok egészségügyi vonatkozásai

A szénhidrátok fontos szerepet töltenek be táplálkozásunkban. Alapvetően a szénhidrátok fedezik kalóriabevitelünk 25–60%-át. Ideális esetben ennek 85–90%-át glükóz, míg 15%-át gyümölcscukrokból álló szénhidrátok alkotják. A szénhidrátok hozzájárulnak olyan rövid szénláncú zsírsavak termeléséhez, melyek az agy energiaforrásaként szolgálnak. A szénhidrátok ezen felül az immunrendszer működését is befolyásolják: szükség esetén egyes szénhidrátok erősítik, mások gyengítik a szervezet immunválaszát. Gyulladáscsökkentő hatásuk is ismert, továbbá fontosak lehetnek a székletképződés és a normál bélműködés elérésében (pl. diétás rostok). Bizonyos szénhidrátok – mint például a rostok – szelektíven táplálják a vastagbél jótékony bélbaktériumait (pl. bifidobaktériumok, Lactobacillusok), azaz prebiotikumként működnek, ezért fontos szerepet töltenek be az emberi egészség megőrzésében.

Az édes íz kedvelése már a rómaiakat is arra készítette, hogy mesterségesen, ólom(II)-acetáttal édesítsék a mustot, nem ismerve annak káros mellékhatásait. Mára többek között a kukorica- és agavé szirup nagymértékű használata terjedt el az élelmiszeriparban. A hozzáadott cukor nagymértékű elterjedésének következtében 1910 óta mintegy 15%-kal nőtt a cukorbetegség száma Magyarországon. Gyermekünk 60%-a mára már túlsúlyos, továbbá megjelentek olyan új civilizációs betegségek, mint az irritábilis bélszindróma (IBS), a kontaminált vékonybél (SIBO) vagy a Crohn-betegség.

A szénhidrátok negatív hatásáról először az 1980-as, '90-es években számoltak be gyermekeknél hasmenést okozó gyümölcslevek kapcsán. Az 1990–2000-es években megállapították a fruktóz és más fermentábilis szénhidrátok szerepét a tünetek kialakulásában. Végül 2005-ben Gibson és Sepherd bizonyították a fruktóz és a fruktánok emésztőrendszeri panaszokat kiváltó hatásait, majd 40 év kutatás után lefektették az alacsony FODMAP-étrendi protokoll hipotézisét és alapjait. A FODMAP a fermentálódó oligo-, di-, és monoszacharidok, valamint polioloik csoportját foglalja magában. Olyan erjedő szénhidrátokat takar, melyek bizonyos esetekben bélpanaszokat okozhatnak az arra érzékenyek számára. Felszívódásuk a vékonybél második szakaszának falában zajlik cukorszállító egységek segítségével, de mivel nem a teljes mennyiségük szívódik fel, ezért a vastagbélbe jutva fermentálódnak és bélpanaszokat okoznak (bélgázok, hasmenés). Ma a lakosság minimum 10–15%-át érinti ez a probléma.

A fentiek rávilágítanak arra, hogy a szénhidrátok közül a rostok bevitelének milyen nagy jelentősége van a humán táplálkozásban. A hazai lakosság rostfogyasztása ma 10–25 g, melynek ideális esetben el kellene érnie a 30–60 g-ot. Ez a mennyiség így is messze alulmarad az Észak-Közép Tanzániában ma is élő, ősi táplálkozási szokásokkal és bélflorával rendelkező hadzák napi rostbevitelétől, mely elérheti akár a 200 g-ot is. Különösen fontos a prebiotikus hatású, szelektív rostok bevitelének, melyek a szervezetünkre kedvező hatású bélbaktériumok szaporodását segítik elő, szinergikusan és szelektíven táplálják a probiotikus baktériumtörzseket. Ilyen rostok a rezisztens keményítő (RS), a galakto-oligoszacharidok, az inulin és az oligofruktózok (FOS), valamint a pektin vagy a cellulóz is (Bartha és Mezei 2019).

Oldhatóságuk alapján megkülönböztetünk vízben oldható és oldhatatlan rostokat. Az oldható rostok csökkentik a bél pH-ját, ezzel megváltoztatva a bélfloóra összetételét. Közvetve csökkentik a vér koleszterinszintjét és a glükóz abszorpcióját a vékonybélben, mellyel végeredményben csökken az érrendszeri betegségek és a 2-es típusú cukorbetegség kialakulásának kockázata. Az oldhatatlan rostok a bél megfelelő működéséhez (széklet mennyisége, gyakorisága) járulnak hozzá, és képesek megkötni bizonyos karcinogéneket.

Egészségügyi jelentőségük és betegségmegelőzésben betöltött szerepük tehát több oldalról is bizonyított.

A funkcionális élelmiszer és a fogyasztók preferenciái

Az egészséges étrend kialakításához az élelmiszeripar is igyekszik hozzájárulni különböző, úgynevezett funkcionális élelmiszerek gyártásával. A fogalmat az 1980-as évek elején Japánban alkották meg, majd 2006-ban az EUFIC (Európai Élelmiszer-információs Bizottság) definiálta azt. Eszerint funkcionális élelmiszernek számít az olyan természetes vagy feldolgozott élelmiszer, amely ismert biológiailag aktív vegyületeket (ásványi anyag, antioxidáns, rost, probiotikum) tartalmaz, illetve meghatározott mennyiségben és minőségben adagolva klinikailag bizonyított és dokumentált egészségügyi hatása kimutatható (Herdon és Nábrádi, 2014). A funkcionális élelmiszerek egészségvédő hatásukkal megelőzik, lassítják a civilizációs betegségek terjedését. Négy csoportját különböztetik meg (EC2010:7): 1. természetes élelmiszerek, 2. speciális hozzáadott komponensekkel rendelkező élelmiszerek, 3. ételek, amelyekből valamilyen komponenst kivontak, 4. ételek, amelyekben bizonyos komponenseket módosítottak vagy helyettesítettek. A gabonaalapú termékeket elsősorban rostanyagokkal, esetleg antioxidánsokkal próbálják dúsítani (Barcs és Jenes, 2017).

Felmérések szerint az egészséges gabonaalapú termékek (pl. müzli, gabonapehely stb.) kapcsán a negyedik legfontosabb dolog, ami a fogyasztónak eszébe jut, az a „teljes kiőrlés”. Ennél csak a termék ára és íze foglalt el előkelőbb helyet. A teljes kiőrlésű kenyeret az egészségessége miatt választják elsősorban a fogyasztók. A vásárlási döntéseket azonban elsősorban a termék íze és az ára határozza meg más termékek esetén (Barcs és Jenes, 2017). Vásárláskor az egészséges megítélésű élelmiszerek esetében az átlagos vásárlási hajlandóság nagyobb, mint a normál élelmiszerek esetében. A dúsítás azonban kevésbé növeli az egészséges megítélésű élelmiszerek iránti vásárlási hajlandóságot, mint az átlagosnak ítélt élelmiszerek dúsítása, mivel az önmagában is egészséges élelmiszerek mesterséges dúsítását nem tartják indokoltnak a fogyasztók. A fogyasztók által egészséges megítélésű alapélelmiszerek (pl. teljes kiőrlésű gabonapehelyek, joghurt, narancslé) mégis nagyobb valószínűséggel lehetnek a funkcionális termékek alapélelmiszerei. A fogyasztók azonban csak olyan dúsító összetevőt fogadnak el, amit az alapélelmiszer már természetes állapotában is tartalmazott (pl. rost a rozskenyérben, kalcium a tejben). Továbbá a célközönségnek ismernie kell a dúsító komponens pozitív hatásait, valamint fontos, hogy ne társítson hozzá negatív, mesterséges jelentést. A dúsítás elfogadása nagyban függ tehát az alapélelmiszertől és a feldúsításra használt komponenstől (Vonyó és Temesi, 2018). Az élvezeti termékek dúsításával kapcsolatban (cukorka, rágó) a vásárlók általában elutasítóak. A teljes kiőrlésű kenyér esetén a dúsítás szintén nagymértékben csökkentette a vásárlási hajlandóságot Magyarországon, ez azonban bekövetkezhetett a magasabb ár, az egészséghatás rossz definiálása, vagy az egyéb termékjellemzők negatív változásának a hatására is.

A magyar fogyasztók számára az „egészség” kevésbé lényeges tényező mint az „íz”. Magyarországon elsősorban a nők, a közép- és időskorúak, valamint a beteg családtaggal rendelkezők körében találtak nagyobb érdeklődést az „egészséges termékek” iránt. Az egészséges étkezés ugyanis azt jelenti számukra, hogy az érzékszervi örömeiket fel kell áldozni. A rossz íz viszont a funkcionális termékeknél sem elfogadható a fogyasztók számára, kivéve, ha a termék a fizikális vagy mentális teljesítmény javulásához járul hozzá. Maga a funkcionális kenyér elfogadott mind az egészségesség, mind az érzékszervi tulajdonságok szempontjából – a különbséget a fehér kenyér és a teljes kiőrlésű lisztből készült kenyér között nem az ízben érzékelik a fogyasztók (Kontor és mtsai, 2018). Az „egészség” és az „íz” általánosan így sem helyettesíthetik egymást, a gyártónak mindkettőt el kell érnie (Vonyó és Temesi, 2018).

Rostanyagtartalom növelése gabonafélékben

A gabonaalapú termékek rostanyagtartalmának növelését általában a korpafrakció liszthez keverésével vagy teljes kiőrlésű liszt előállításával érik el. Ez az eljárás azonban a termék minőségének és élvezeti értékének csökkenésével jár. Hatásukra többek között csökken a kenyér térfogata, a tészta nyújthatósága, ugyanakkor nő a morzsalékosság és a tészta kialakulási idő. A termék színe sötét, íze fanyar lesz a korpában található egyéb komponenseknek köszönhetően (fenolos komponensek, aminosavak, kisméretű peptidek, zsírsavak, cukrok).

Erre egy részleges megoldás lehet a korpafrakció szemcseméretének csökkentése vagy a gabona koptatása és az aleuronréteg visszakeverése a lisztbe. A feldolgozóipari tulajdonságok és a termék ízének drasztikus megváltozása a gabona rostanyagtartalmának genetikai úton történő növelésével lenne elkerülhető a leghatékonyabban. A búza rostanyagtartalma többek között növelhető a rezisztens, emésztésnek ellenálló keményítő vagy a sejtfalalkotó rostanyagkomponensek (arabinoxilán, β -glükán) mennyiségi arányának növelésével. Mivel a normál kenyérbúza-keményítő amidóztartalmában nincs jelentős variabilitás (csak az alacsonyabb amidóztartalom irányába waxy búza esetén), ezért búzában az amidóztartalom (és ezzel a rezisztenskeményítő-tartalom) növelését mutáns törzsek előállításával érték el. Ilyen jellegű pontmutációk a természetben is előfordulnak spontán módon. A mutációt az amilopektin szintézisében részt vevő enzimek génjeiben hozták létre, ezáltal csökkentve vagy gátolva azok működését. Az így előállított Sgp-1, SsII és SbeIIa génekre (sorrendben keményítőhöz kötött fehérjék, keményítő-szintáz, keményítő szintézisekor elágazásokat létrehozó enzim) mutáns genotípusok felhasználhatók előnemesítési célokra (Yamamori és mtsai 2000).

Az egészséges humán táplálkozás fontos elemét képezik a gabonafélékben található sejtfalalkotó poliszacharidok. Ezek közül búzában (*Triticum aestivum* L.) és rozsbán (*Secale cereale* L.) elsősorban arabinoxilán (AX), míg zabban (*Avena sativa* L.) és árpában (*Hordeum vulgare* L.) β -glükán található meg nagyobb mennyiségben. Az arabinoxilán-tartalmat meghatározó tényezők vizsgálatára ezidáig elsősorban térképezési céllal állítottak elő nagy AX-tartalmú búzapolulációkat (Cadalen és mtsai, 1997), míg a β -glükán mennyiségét és genetikai hátterét főként árpában és zabban vizsgálták.

A rostanyagok és egyéb bioaktív komponensek elsősorban a búzaszem héjrészében vannak jelen, a lisztben jóval kisebb mennyiségben fordulnak elő, azonban még mindig a fehér lisztből készült termékek képezik az emberi tápanyagforrás jelentős hányadát. A fehér liszt rostanyagtartalmának növelése ezért különös jelentőséggel bírhat. Ez a cél elérhető lenne mind a rezisztens keményítő, mind a sejtfalalkotó komponensek mennyiségének növelésével. Ehhez azonban olyan génforrások azonosítása szükséges, melyek kiemelt mennyiségben tartalmazzák az említett komponenseket. Fontos továbbá, hogy a megváltoztatni kívánt tulajdonságok kialakításában a genetikai tényezők nagyobb súllyal játszanak szerepet, mint a környezeti hatások és ezáltal alkalmassá váljanak a nemesítési célokra. Mindezen túl fontos a célkomponensek genetikai hátterének megismerése, valamint olyan molekuláris markerek kifejlesztése, melyek a nemesítés során hatékonyabbá és genetikai alapúvá tehetik a nemesítést.

Nemesítési törekvések

A 20. század második felétől a gabonanemesítők folyamatos célja a búza produktivitásának növelése. Emellett az 1970-es, '80-as évektől a jó sütőipari minőség elérése szintén fontos szemponttá vált. Ehhez társult az elmúlt 20 évben a jobb táplálkozási értékű, egészségesebb étrendet biztosító gabonafélék iránti igény és kereslet megnövekedésének felismerése. Ez magával hozta az új típusú búza genotípusok előállításának igényét: olyan

genotípusokét, melyek termésében nagyobb arányú a biológiailag aktív vegyületek mennyisége (pl. rostanyag, antioxidáns).

Világszerte számos nemesítési program ismert, mellyel javítani próbálják a gabonafélék táplálkozási minőségét. Ezek a nemesítési programok azonban elsősorban a gabonaszemek mikroelem-tartalmát (Zn, Fe stb.) vagy antioxidáns-tartalmának növelését célozzák meg (pl. megnövelt A-vitamin-tartalmú rizs, GMO). A gabonaszemek rostanyag-tartalmának növelésére vonatkozó törekvésekről hagyományos nemesítési módszerek használata mellett még nem számol be az irodalom, különösen nem a liszt rostanyag-tartalmára vonatkozóan, mely a fogyasztók által jobban kedvelt termékek gyártásának alapanyaga.

Kísérleteinkben ezért többféle módon terveztük meg a búzaliszt rostanyag-tartalmának növelését. Egyrészt nagy amilóztartalmú 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 rostanyag-tartalmára és összetételére. Végezetül lehetséges génforrásokat kerestünk és azonosítottunk a búza rokon fajai között a búza rostanyag-tartalmának és -összetételének javítására, változatosságának növelésére.

Mindezek alapján kutatásunk célkitűzései a következők voltak:

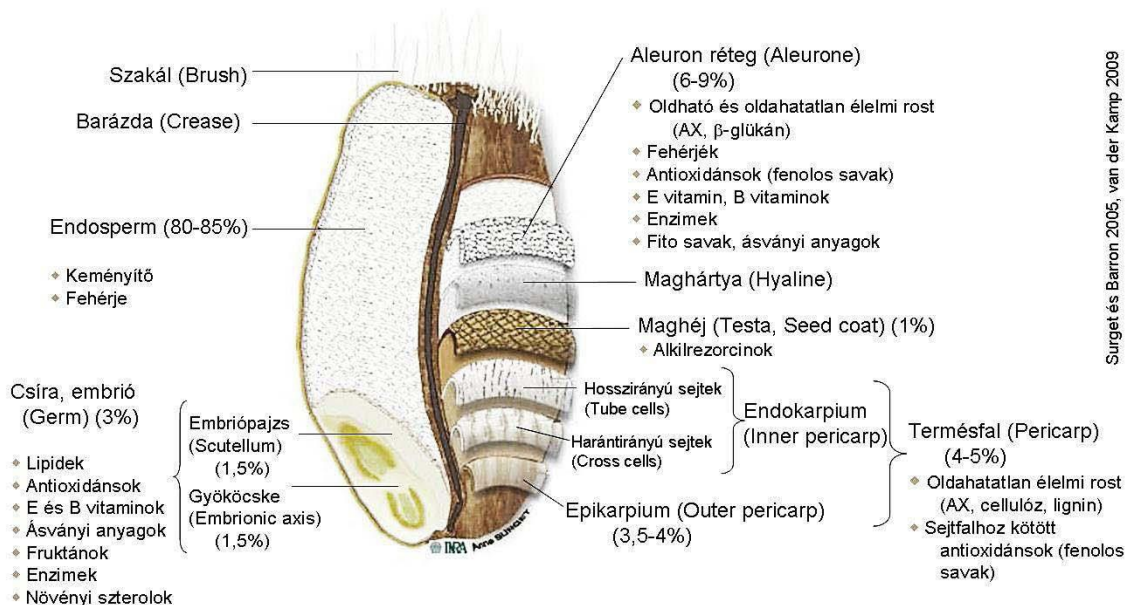
1. Nagy amilóztartalmú búza genotípusok előállítása és jellemzése.
2. A környezet és a genotípus hatásának vizsgálata az amilóztartalomra és az általa meghatározott tulajdonságokra.
3. Nagy arabinoxilán (AX) -tartalmú búza genotípusok előállítása és jellemzése.
4. A környezet és a genotípus hatásának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

2 IRODALMI ÁTTEKINTÉS

2.1 A búzaszem összetétele

Érett állapotban a búzaszem (*Triticum aestivum* L.) átlagosan 75–80% (w/w) szénhidrátot, 9–14% fehérjét, 1–2% lipidet és 1,5–3% hamut tartalmaz. A szénhidrátok 75–80%-a keményítő, melynek teljes mennyisége a búzaszem endospermiumában található (Pomeranz, 1988) (1. ábra). Ezen kívül 7%-ban megtalálhatók még a növényben kis molekulatömegű szénhidrátok (úgy mint mono-, di- és oligoszacharidok, fruktánok), valamint 12%-ban sejtfalalkotó poliszacharidok. Ez utóbbiak valamennyi szövetben előfordulnak, míg a kis molekulatömegű szénhidrátok az aleuron rétegben, az endospermiumban és az embriócsúcsban vannak jelen. A nagy mennyiségű szénhidrát mellett a búzaszem endospermiuma tartalmazza a sütőipari minőséget meghatározó fontos tartalékfehérjekomponenseket. A fehér búzalisztnek, mely a teljes búzaszem tömegének 60–85%-át teszi ki, nagy hányada (10–15%) ebből a komponensből áll. A korpafrakciót alkotó maghéjat 80%-ban olyan nem keményítő jellegű poliszacharidok alkotják, mint a cellulóz, a hemicellulóz és a pentozánok (főként arabinoxilán). A maghéj alatt elhelyezkedő aleuron és szubaleuron rétegek is 30%-ban tartalmaznak élelmi rostot, de ezen felül gazdag forrásai a fehérjéknek, lipideknek, ásványi anyagoknak és antioxidánsoknak. A csírában található a szem csírázásához szükséges tápanyagok, de enzimekben, lipidekben és antioxidánsokban is gazdag.

A búza szöveteit őrléssel részben el lehet választani egymástól. Így kapjuk a lisztet, melynek fő alkotóeleme a búzaszem tárolószövege, azaz az endospermium. Ez a szem tömegének 90%-át teszi ki (Barron és mtsai, 2007). Az endospermium 83–84%-a alkotja valójában a fehér lisztet, míg körülbelül 6,5%-a az aleuron réteg sejtfalalkotó komponenseit tartalmazza, ám ez a rész őrlés után a korpába kerül. A korpában a búzaszem összes külső rétege megtalálható (perikarpium, hialin réteg, testa), összességében a szem tömegének 7–8%-át teszi ki. Szintén a korpafrakcióban jelenik meg az embrió (csíra), mely a szem tömegének 3%-át alkotja.



1. ábra. A búzaszem alkotóelemei és komponensei (Surget és Barron, 2005; van der Kamp, 2009).

2.1.1 Szénhidrátok

A gabonaszemek szénhidrátkomponensei a növény klorofillt tartalmazó sejtjeiben, a fotoszintézis útján képződő prekursor vegyületekből jönnek létre, majd a vaszkuláris rendszeren keresztül jutnak el az érésben lévő szembe. Érett állapotban a búza (*Triticum aestivum* L.) 75–80% (w/w) szénhidrátot tartalmaz, melynek legnagyobb része, a keményítő, a búzaszem endospermiumában található. A búzaszem a keményítő mellett tartalmaz még kis molekulatömegű szénhidrátokat (mono-, di- és oligoszacharidokat, valamint fruktánokat) és sejtfalalkotó poliszacharidokat (1. táblázat).

1. táblázat. Az érett búzaszem szénhidrát-összetétele (Stone és Morell, 2009).

| Szénhidrát komponensek | | Mennyiség (% sz.a.) |
|-------------------------------|-----------------|---------------------|
| Monoszacharidok | Glükóz | 0,03–0,09 |
| | Fruktóz | 0,06–0,15 |
| Diszacharidok | Szacharóz | 0,54–1,55 |
| | Maltóz | 0,05–0,18 |
| Oligoszacharidok | Raffinóz | 0,19–0,68 |
| | Oligofruktózok | 0,14–0,41 |
| Fruktánok | | 0,5–2,5 |
| Keményítő | | 63,2–75,0 |
| Sejtfalalkotó poliszacharidok | Cellulóz | 2,0 |
| | Arabinoxilán | 5,8–6,6 |
| | β -glükán | 0,55–1,0 |
| | Glükomannán | <1,0 |
| Arabinogalaktán peptidek | | 0,27–0,38 |
| Fitinsav | | 0,6–1,0 |

sz.a. – szárazanyagra vonatkoztatva

Keményítő

A keményítő, mely a búzaszem szárazanyag-tartalmának 65–70%-át alkotja és egyben a búzaliszt fő alkotóeleme is, tartalék tápanyagként szolgál a gazdanövény csírázásakor. Kémiai összetételét tekintve a búzakeményítő α -D-glükóz egységekből épül fel, melyek elsősorban α -1,4 kötésekkel kapcsolódnak össze, hogy létrehozzák az amilóz el nem ágazó, spirális láncát. Az amilózmolekula polimerizációs foka kicsi (<3000), molekulatömege (MW) átlagosan $2,2 \times 10^5$ Da. Jellegzetes tulajdonsága, hogy képes lipidekkel kölcsönhatásba lépni és komplexet képezni (Berry és mtsai, 1971). Ha az α -1,4 kötésű gerincen α -1,6 kötésekkel lánc-elágazások jönnek létre, akkor kialakul az erősen elágazó óriásmolekula, az amilopektin, melynek polimerizáltsági foka (DP, degree of polymerization) 3×10^5 – 3×10^6 (>5000), molekulatömege pedig 10^7 – 10^9 Da (Zobel, 1988). Az α -1,6 kötések aránya az amilopektinben 3–4%. Hexaploid búzában a két polimer közül az amilóz a keményítő 25–28%-át alkotja, az amilopektin ennek megfelelően 72–75%-ot tesz ki. Az úgynevezett waxy típusú búza gyakorlatilag nem tartalmaz amilózt (Nakamura és mtsai, 1995).

A keményítő a búza endospermiumában szemcsék formájában raktározódik, melyeket sűrűségük ($1,5$ – $1,6$ g/cm³), a polarizált fény alatt kimutatható kettős törésük, valamint félkristályos szerkezetük jellemez (Gallant és mtsai, 1997). A keményítőszemcséket koncentrációs körökbe rendeződött amorf és félkristályos állapotú gyűrűk építik fel. Az amorf részeket amilóz-molekulák, míg a félkristályos részeket párhuzamosan rendeződött amilopektin kettős hélixek alkotják (Jenkins és mtsai, 1993). Búzában a keményítőszemcsék képződésének két periódusa van. Az első periódus 3–7 nappal virágzás után indul, melynek

során nagyméretű, úgynevezett A-típusú szemcsék keletkeznek. A második periódus az endospermium fejlődésének középső szakaszában van: ekkor jelennek meg a kisebb méretű, B-típusú keményítőszemcsék (Briarty és mtsai, 1979). Számos tanulmány vizsgálja egy harmadik típus, az úgynevezett C-típus jelentőségét is (Bechtel és mtsai, 1990), mely a megfigyelések szerint hosszú, hideg szemtelítődési időszakok esetén képződik. Az A- és a B-típusú szemcsék szorosan kapcsolódnak egymáshoz a búza endospermiumában. Alakjuk általában gömb alakú 0,5–1 μm átmérővel, de sugárirányban 2–4 μm -esre is megnőhet az átmérőjük. Az A-típusú szemcsék átmérője 15–30 μm (Evers, 1971), míg a B-típusú szemcsék mérete 10 μm alatt marad (Parker, 1985). A keményítőszemcsék hierarchikus anyagnak tekinthetők, melynél az egyik szint szerkezetének rendezettsége meghatározza a következő, magasabb szintű szerkezeti rendeződést (Myers és mtsai, 2000).

A keményítőszemcsék más további komponenseket is tartalmaznak. A szemcsék belsejében egyrészt megtalálhatók a keményítősintézis enzimek (mint a GBSS, SSI, SSII, BEI, BEII [Granule Bound Starch Synthase – keményítőhöz kötött keményítő-szintáz, Starch Synthase I és II – keményítő-szintáz I és II, Branching Enzyme I és II – elágazásokat létrehozó enzim a keményítő szintézisekor]) (Denyer és mtsai, 1995; Rahman és mtsai, 1995; Peng és mtsai, 2000), másrészt egyéb felülethez kötődő fehérjék mint a puroindolinek, a friabilin, és a GSP fehérjék (Grain Softness Protein – szemkeménységgel összefüggő fehérje) (Greenwell és Schofield, 1986; Darlington és mtsai, 2000; Baldwin, 2001), valamint a foszfátok és az amilózzal komplexet képző lipidek (Morrison és Gadan, 1987). A keményítő gélesedése során ezeknek a lipideknek fontos szerepük van a kölcsönhatások kialakításában. A foszfátok főként az amilopektin glükóz egységeihez tudnak kovalens kötéssel kapcsolódni (Blennow és mtsai, 2002), emellett foszfolipidekként az amilóz zárványkomplexeiben fordulnak elő (Morrison és Gadan, 1987).

A keményítő funkcionális tulajdonságait a száraz endospermiumban meghatározzák a keményítőszemcse-típusok tulajdonságai és mennyiségi arányai, a keményítőtartalom, a keményítőszemcsék méreteloszlása és alakja, az amilopektin szerkezete, az amilóz–amilopektin aránya, valamint a szemkeménység, a lipidek jelenléte, sőt a keményítőmátrixot közrefogó más komponensek jellemző tulajdonságai is. A szem keménysége például meghatározza a keményítőszemcsék és az endospermium törését az őrlés során, ily módon befolyásolja a búzaliszt felhasználhatóságát.

Megfigyelték, hogy a keményítő egy része ellenáll a humán emésztőenzimeknek, pontosabban a vékonybélben nem képes megemésztődni, hanem onnan a vastagbélbe továbbjutva az ott élő mikroflórát táplálja és segíti a jótékony baktériumok szaporodását, azaz prebiotikumként működik (Berry, 1986). A keményítő ezen részét **rezisztens keményítőnek (RS)** nevezték el. A rezisztens keményítőnek több típusát különböztetik meg. A növényi sejtből zárt, fizikailag hozzáférhetetlen keményítő alkotja az RS 1. típusát. A részlegesen őrölt gabona vagy hüvelyes termés gazdag ebben a típusú keményítőben. A natív, ép, főzés nélküli keményítőszemcsék alkotják az RS 2. típusát. Ilyen található például a banánban, melyben a nagy sűrűség és a részleges kristályosság csökkenti az enzimek hozzáférhetőségét, gátolva ezáltal az emésztést. Az RS 3. típusát a nedves hőkezelés során keletkező emésztetetlen keményítő jelenti. Olyan termékekben van jelen, mint a főzött és lehűtött burgonya vagy a konzerv bab és borsó. Végezetül a kémiai vagy termikus módosított keményítő adja az RS 4. típusát (Brown és mtsai, 2001). Az RS-hozam és az amilóztartalom pozitívan korrelál egymással (Berry, 1986; Sievert és Pomeranz, 1990), mivel az amilóz kristályosodásával nagyobb mértékű rezisztens keményítő keletkezik. Hetven százalék amilóztartalmú kukoricakeményítő autoklavozásával 20% RS-tartalmat értek el, ami a klávozási és lehűtési ciklusok növelésével 40%-ra is megnőtt. Mivel az amilóz a csirizesedési hőmérséklet fölött kristályosodik, ezért valamennyi komponens (polimer fehérjék, cukrok, sók), melynek hatása

van az csirizesedési hőmérsékletre, befolyásolja az RS3 kialakulását is. A feldolgozóipari folyamatoknak és egyes komponensek jelenlétének tehát szignifikáns hatása van az RS mennyiségére.

Nem keményítő szénhidrátok (NSP)

A búzaszem teljes rostanyagtartalma (TDF) – beleértve a lignint is – 9,6 és 14,4% között változik (Gebruers és mtsai, 2008). Egy 150 búzafajtát magában foglaló tanulmány szerint ebből a nem keményítő szénhidrátok mennyiségi aránya 7,7 és 11,4% között mozog a szem teljes szárazanyag-tartalmára vonatkoztatva (Gebruers és mtsai, 2008). A búzaszem azonban különböző szöveteket tartalmaz, amelyek rostanyagtartalma és összetétele szignifikánsan eltérhet egymástól. Különböző tanulmányokban átlagosan közel 10–15% TDF-et találtak teljesörleményben és 2–6%-ot lisztben (2. táblázat). Ebben jelentős volt az arabinoxilán teljes mennyisége, mely közel 9%-os értéket ért el őrleményben és 3,5%-ot lisztben, míg a β -glükán mennyisége az 1,1% és a 0,6%-os értéket közelítette őrleményben és lisztben (Shewry és mtsai, 2013; Shewry és Hey, 2015).

2. táblázat. A teljesörlemény-, a liszt- és a korpafrakciók arabinoxilán- és β -glükán-tartalmának mért szélső értékei (% sz.a.) (Shewry és mtsai, 2013; Shewry és Hey, 2015).

| | Őrlemény (%) | Liszt (%) | Korpa (%) |
|------------------------|---------------------|------------------|------------------|
| TDF | 10,26–15,5 | 1,94–6,27 | – |
| Teljes β -glükán | 0,29–1,10 | 0,24–0,63 | – |
| TOT-AX | 5,53–8,88 | 1,88–3,58 | 12,1–22,6 |
| WE-AX | 0,29–1,62 | 0,30–0,91 | 0,27–0,92 |
| WU-AX | 5,87–8,16 | 1,52–2,93 | – |

TDF – teljes étkezési rosttartalom, TOT – teljes, WE – vízzoldható, WU – vízben oldhatatlan, AX – arabinoxilán

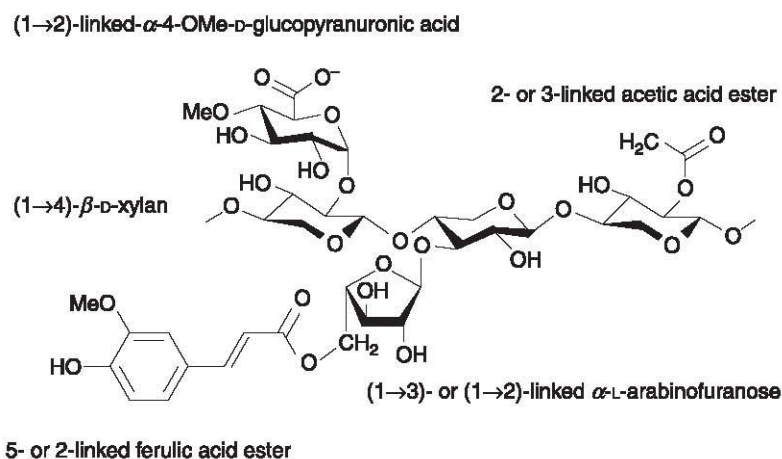
A **liszt (endospermium)** 2–3%-a sejtfalalkotó poliszacharid, amelynek két fő összetevője az arabinoxilán (AX) és az (1-3, 1-4)- β -D-glükán (β glükán). Ezen felül kisebb mennyiségben jelen van még cellulóz és glükomannán. A négy komponens a búza endospermium sejtfalalkotó komponenseinek 70, 20, 2 és 7%-át teszik ki sorban (Mares and Stone, 1973).

Az **arabinoxilán (AX)**, a búzaszem fő pentozán komponense, (1-4)-glikozidos kötésekkel kapcsolódó β -D-xilopiranozil (Xylp) egységekből áll. Néhány Xylp egység α -L-arabinofuranozil (Araf) egységekkel monoszubsztituált a 3. pozícióban vagy diszubsztituált ugyanazon Xylp egység 2-es és 3-as pozíciójában (Perlin, 1951; Renard és mtsai, 1990; Hoffmann és mtsai, 1991; Izydorczyk és Biliaderis, 1994) (2. ábra). Az AX a perikarpium másodlagos sejtfalában és a korpa maghéjszöveteiben további szubsztituensként 4-O-metil α -D-glükuronsavat is tartalmaz a Xylp egység 2. pozíciójában (Schooneveld-Bergmans és mtsai, 1999). Néhány Araf is helyettesíthető ferulasavval a xilán 3. pozíciójában. A ferulasav bekötése keresztkötések kialakulását eredményezi, mely az AX láncon jelen lévő szomszédos ferulátok oxidációjával jön létre és dehidrodimereket képez (diferulátok). Az AX keresztkötéseinek száma fontos tényező, mivel ez befolyásolja az AX fiziko-kémiai tulajdonságait (nevezetesen az oldhatóságot és a viszkozitást), ezáltal a feldolgozóipari tulajdonságait és az egészségre kifejtett hatásait is. Az endospermium arabinoxilánja kis mennyiségű ferulasavat tartalmaz, mely becslések szerint 0,2–0,4% a liszt vízzoldható AX-jában és 0,6–0,9% az oldhatatlanban (Bonnin és mtsai, 1998).

A búza-AX szignifikánsan különböző szerkezetű polimerek komplex keveréke. A szerkezetet meghatározza a xilóz–arabinóz és az arabinóz–ferulasav monoszubsztitúció

mértéke. Az AX szerkezetének diverzitását elsősorban az arabinóz/xilóz (A/X) aránnyal jellemzik. Az oldhatatlan rostkomponenseket általában nagyobb mértékű szubsztituáltság (0,3–1,1) és nagyobb molekulatömeg (100–120 kDa és 300–600 kDa) jellemzi, mint az oldható rostot (sorrendben 0,5–0,6 illetve 2–20 kDa). A búzaliszt WE-AX-jában 0,39–0,57 A/X arányt állapítottak meg, míg TOT-AX-ban 0,49 és 0,71 között változott ez az arány. Korpában ezek az arányok sorrendben 0,71–1,63 illetve 0,53–0,71 voltak (Saulnier és mtsai, 2007; Ordaz-Ortiz és Saulnier, 2005).

Az arabinoxilánt oldhatósága alapján két csoportra oszthatjuk: megkülönböztetünk vízoldható (WE) és vízben oldhatatlan (WU) arabinoxilánt, melyek élettani hatásai is különbözőek. A búza teljes arabinoxilán-tartalma (TOT-AX) átlagosan 5–9%, míg ebből a vízoldható frakció 0,3–1,6%-ot tesz ki. Ez azt jelenti, hogy a búza nem keményítő szénhidrát-tartalmának 30–40%-a arabinoxilán (2. táblázat).



2. ábra. Az arabinoxilán szerkezete (Shewry, 2013).

Az **(1-3, 1-4)- β -D-glükán (β -glükán)** egyszerűbb szerkezetű, mint az AX. A lineáris, elágazás nélküli polimerben a β -D-glükóz egységek (1-3) és (1-4) glükozidos kötésekkel kapcsolódnak össze (3. ábra). Molekulatömege jellemzően 300–600 kDa, polimerizáltsági foka DP3-11. Egy darab (1-3) kötést két vagy több (1-4) kötés követ, melynek eredményeként specifikus licsenáz enzim emésztés (1-3, 1-4 endohidroláz) hatására triszacharid (DP3) és tetraszacharid (DP4) egységek keletkeznek. Búzakorpában azonban hosszabb, akár 14 egységnyi hosszú 1-4 kötésű β -glükán láncot is megfigyeltek (Li és mtsai, 2006). Az ilyen típusú régiót „cellulózszerű”-nek nevezik, mivel a cellulóz csak 1-4 kötésű β -glükánt tartalmaz, 1-3 kötést nem. A különböző gabonafajokat tekintve az oligoszacharidok eloszlása a β -glükánban eltérő (Cui és mtsai, 2000; Lazaridou és mtsai, 2004). A triszacharidok (DP3) relatív mennyisége a búzától (67–72%) az árpaán át (52–69%) a zabig (53–61%) csökken, míg a tetraszacharidok relatív mennyisége ezzel ellentétes tenenciát mutat. A DP3:DP4 aránya fajon belül a fajták között is különbözhet, mely egyaránt tulajdonítható genetikai és környezeti hatások következményének (Jiang és Vasanthan, 2000; Miller és mtsai, 1993; Storsley és mtsai, 2003; Wood és mtsai, 2003). Nagyobb DP3:DP4 arány kisebb oldhatóságot eredményez (Izydorzycyk és Dexter, 2008; Wood, 2010). A teljes búzaszem viszonylag kis mennyiségű β -glükánt tartalmaz (0,4–1%), a korpa 2–3%-ot, míg az aleuron 4–5%-ot (Rakha, 2013; Amrein és mtsai, 2003).

szövetalkotó eleme a perikarpium, mely sejtfal-összetételben inkább a szárhoz hasonlít, mint a búzaszemhez: 30% cellulózt, 60% arabinoxilánt és 12% lignint tartalmaz (Stone és Morell, 2009). Az itt található AX szerkezete sokkal komplexebb és jóval nagyobb mértékben elágazó, mint az endospermiumban. Kémiailag galaktózból és glükuronsavból áll, ezért gyakran hívják glükuronoarabinoxilánnak (GAX). Nagy mennyiségű ferula- és diferulasavat, acetyl csoportot és ferulasav-trimert tartalmaz (Barron és mtsai, 2007).

2.1.2 Fehérje

A búzaszem összfehérjetömegének legnagyobb része, azaz 74–75%-a az endospermiumban található (3. táblázat). A búza őrlésével kapott liszt ennél fogva 10–15% fehérjét tartalmaz, melyek nagy része tartalékfehérje, így fontos szerepe van a funkcionális tulajdonságok meghatározásában. Osborne (1907, 1924) a növényi szövetekben előforduló egyszerű fehérjék négy fő csoportját különböztette meg oldhatóságuk alapján: az albuminok, a globulinok, a prolaminok és a glutelinek csoportját. Számos glutelin fehérje szerkezete hasonló a prolaminokéhoz, de ezek alkoholban nem oldható, diszulfidhidakkal stabilizált, nagy molekulatömegű polimereket képeznek (Shewry és Tatham, 1990). A búzasiker fehérjei (gliadinok és gluteninek, körülbelül 50 komponens) többségében alkoholban oldható tartalékfehérjék, ezeket hívjuk prolaminoknak. Mind a gliadinok, mind a glutenin fehérje-alegységek alkohol-víz (70% etanol, 50% i-propanol) elegyben oldódnak, vagy természetes állapotukban vagy a molekulákat összekötő diszulfid hidak redukálása után. A prolaminok mellett kisebb mennyiségben megtalálhatók a víz- és sóoldható albuminok és globulin fehérjék is.

3. táblázat. A búzaszem fehérjetartalmának eloszlása (Bradley, 1967).

| | Szem össztömegének %-os eloszlása | Fehérjetartalom (g/100 g sz.a.) | Szem összfehérje- tömegének %-os eloszlása |
|---------------------------|---|------------------------------------|---|
| Terméscsész (Perikarpium) | 5,0 | 5,1 | 2,3 |
| Maghéj (Testa) | 3,0 | 5,7 | 1,5 |
| Aleuron | 7,0 | 22,9 | 14,2 |
| Endospermium | 82,5 | 10,2 | 74,5 |
| Csira | 2,5 | 34,1 | 7,5 |

A legtöbb gabonaféle prolaminjai kénben szegény és kénben gazdag fehérjéket tartalmaznak. A búza kénben szegény prolaminjai az ω -gliadinok, melyek az összes prolaminfrakciónak mintegy 10%-át teszik ki. Az ω -gliadinok egy kis csoportja egyes genotípusokban monomerként, másokban LMW alegységként viselkedik, mivel egy pontmutáció révén rendelkezik egy ciszteinnel, így képes diszulfid hidak kialakítására. Ezt a csoportot LMW-D alegységeknek nevezik (Payne és mtsai, 1988; Masci és mtsai, 1993). Molekulatömegük 44–78 kDa között változik, aminosav-összetételük alapján jellemzően glutaminból, glutaminsavból, prolinból és fenilalaninból állnak. Másodlagos szerkezetét tekintve a molekula kompakt szerkezetű, a szerkezeti vizsgálatok főleg β -fordulatok (β -turn) jelenlétére utalnak a repetitív régióban.

A kénben gazdag tartalékfehérjék az összes prolaminfrakció körülbelül 80%-át teszik ki. Molekulatömegük 36 és 44 kDa között változik. Szerkezetbeli különbségeik alapján három csoportba oszthatóak: γ -gliadinok, α -gliadinok és aggregált, S-ben gazdag prolaminok (kis molekulatömegű [LMW] gluteninek) (Shewry és Tatham, 1999). A γ -gliadinok legtöbbje

monomer, molekuláikat 4 belső diszulfid híd stabilizálja. C-terminális doménjük α -hélix szerkezettel rendelkezik, de a repetitív régió β -fordulatokból álló laza spirálja (β -spirál) következtében a molekula pálca alakú. Az α -gliadinok szintén monomerek, melyek a γ -gliadinokhoz hasonló másodlagos szerkezeti elemekkel rendelkeznek, de a molekulák annál sokkal kompaktabb szerkezetűek (Popineau és Pineau, 1988). Az aggregált, S-ben gazdag prolaminok képezik az LMW gluteninek B csoportját. Ezek olyan polimer molekulák, melyeket intra- és intermolekuláris diszulfid hidak stabilizálnak. A szerkezeti vizsgálatok alapján a C-terminális rész α -hélix szerkezettel rendelkezik, míg a repetitív régió β -spirálja a többi S-ben gazdag prolaminhoz viszonyítva kevésbé egységes (Shewry és Tatham, 1990). A búza endospermium nagy molekulatömegű prolaminfrakciója – a HMW-gluteninek – szintén csak polimer formában találhatóak meg a búzaszemben. Kenyérbúzában általában 3–5 fehérjealegységből felépülő polimerek figyelhetők meg, melyek stabilitását intra- és interspecifikus S–S hidak biztosítják (Lawrence és Shepherd, 1980). A fehérjealegységek molekulatömege 67–88 kDa között változik. Aminosav-összetételük alapján nagy glicin-, glutamin- és prolintartalommal jellemezhetőek (Shewry és Tatham, 1990). Molekulatömegük és aminosav szekvenciájuk alapján két csoportra oszthatók: az x-típusú alegységek molekulatömege 83–88 kDa, az y-típusú alegységek mérete pedig 67–74 kDa között változik (Payne és mtsai, 1981). Másodlagos szerkezetük a többi kénben gazdag prolaminhoz hasonló. A terminális domének α -hélix szerkezettel rendelkeznek, míg a repetitív szakasz β -spirál szerkezetű, melynek megfelelően a HMW-glutenin alegységek is pálca alakúak.

A tészta dagasztása során a kenyérminőség kialakulásában szerepet játszó prolaminok olyan összefüggő fehérjemátrixot hoznak létre a keményítőszemcsék körül, mely víz hatására térhálósodik és létrehozza a sikért. A tészta körülbelül 10%-át kitevő sikér közel 80%-a (szárazanyagra vonatkoztatva) fehérje, a többi része főként keményítőtől és lipidekből áll. Víz hozzáadásakor a liszt komponensei között versengés alakul ki, melynek eredményeként a fehérjék mellett a keményítő a hozzáadott vízmennyiség mintegy 46%-át köti meg, de jelentősen hozzájárulnak a víz abszorpciójához a pentozánok is, melyek saját tömegük tízszeresének megfelelő vízmennyiséget képesek megkötni. A keverésnek fontos szerepe van a homogenitás és a hidratáció kialakulásában, mivel általa folyamatosan új felületek jönnek létre és közben különböző fizikai és kémiai kölcsönhatások alakulnak ki. A sikermátrixban alapvetően három kölcsönhatás-típust különböztethetünk meg. Ezek a fehérje–fehérje, fehérje–lipid és a fehérje–szénhidrát között kialakult kölcsönhatások. A búza funkcionális tulajdonságai nemcsak az egyes sikérfehérje-típusok jelenlététől és az általuk kialakított szerkezetétől, hanem ezek egymással és az egyéb komponensekkel (lipidekkel, szénhidrátokkal) kialakított kölcsönhatásaitól is függenek (Lásztity, 1996; Payne, 1987; Shewry és mtsai, 1992).

2.1.3 Ásványi anyagok és antioxidánsok

Az emberi szervezetnek vitaminokra és ásványi anyagokra van szüksége ahhoz, hogy enzimek, hormonok és egyéb kémiai anyagok ezrei kifejthessék hatásukat. Ezen felül a vitaminoknak és ásványi anyagoknak van még egy kulcsfontosságú szerepük: antioxidánsként viselkednek, vagyis lekötik a szabad gyököket a szervezetben. Csak a 2000-es évek előtti néhány évtizedben kezdték megismerni a szabad gyökök káros hatását és felismerni, hogy mennyire fontos ezeket antioxidánsok segítségével semlegesíteni.

A gabonafélék fontos forrásai az ásványi anyagoknak és nyomelemeknek, mivel az emberi szervezet számára fontos mangán és vas 50%-át, a réz és magnézium 30%-át, valamint a cink és foszfor 20%-át a gabonafélék és a belőlük készült termékek fogyasztásával visszük be szervezetünkbe.

A gabonaszem átlagosan 1,5–3,0% **ásványi anyagot** tartalmaz (Fišteš és mtsai, 2014), melynek nagyrésze a búzaszem héjrészében található. Ezzel összefüggésben 1,17–2,96% hamutartalmat mértek búzában (Obert és mtsai, 2004). A búza ásványianyag-összetételének legfontosabb összetevői a foszfor és a kálium, de emellett nagyobb mennyiségben található benne magnézium és kalcium is (Shenoy és Prakash, 2007). Az említett négy komponens az aleuron rétegben található meg a legnagyobb koncentrációban (Brouns és mtsai, 2012), de az endospermiumban is jelen van kisebb mennyiségben (4. táblázat). A mikroelemek közül a vas, a cink, a mangán és a réz jelenléte bír még különös jelentőséggel búzában a humán táplálkozás tekintetében. A fehér liszthez képest a teljes szem 2,7-szer több káliumot, 2,3-szor több kalciumot, 2,4-szer több rezet, ötször több magnéziumot és kilenceszer annyi mangánt tartalmaz. Ezeknek az elemeknek a biológiai hasznosulása az emberi szervezetben nagyban függ a rostanyagok jelenlététől, mivel ezek képesek megkötni a fémionokat és ezáltal akadályozzák a felszívódást.

4. táblázat. A búzaszem ásványianyag-tartalma (Piironen és mtsai, 2009).

| | Mennyiség szemben (mg/g) sz.a. | Mennyiség aleuronban (mg/g) sz.a. | Mennyiség endospermiumban (mg/g) sz.a. |
|--------|---|--|---|
| Hamu % | 1,17–2,96 | – | 0,5–0,7 |
| K | 2,8–7,3 | 1,0–2,2 | 0,3–0,4 |
| P | 2,2–9,1 | 1,3–2,5 | 0,1–0,4 |
| Mg | 0,2–2,2 | 0,5–1,0 | 0,01–0,04 |
| Ca | 0,1–0,8 | 0,05–0,10 | 0,05–0,15 |
| | Mennyiség (µg/g) | | |
| Fe | 16,0–163,0 | – | – |
| Zn | 15,0–102,0 | – | – |
| Mn | 10,0–90,0 | – | – |
| Cu | 1,0–12,0 | – | – |

A **vitamin** olyan szerves vegyület, amely kismennyiségben ugyan, de nélkülözhetetlen az emberi szervezet számára, viszont az előállítására nem mindig képes kellő mennyiségben, ezért tápanyag formájában kénytelen hozzájutni. A vitaminokat nem kémiai szerkezetük, hanem biokémiai aktivitásuk alapján osztályozzák, ezért egy bizonyos vitaminnak akár több azonos hatású vegyületet is tekinthetünk. Erre jó példa az A-vitamin hat vitamereje. Van olyan vitamin, amit bizonyos feltételek mellett a szervezet képes előállítani; jó példa erre ember esetében a D-vitamin és a napsütés kapcsolata.

A vitaminok közül gabonafélékben említésre méltó a **B-vitamin** mennyisége, melynek nyolc vízoldható komponense ismert, melyek kémiaiag tekintve igen változatosak. Ezen belül a tiamin (B₁), niacin (B₃), piridoxin (B₆) és a folátok (B₉) mennyisége a jelentősebb. Száz gramm teljesőrlemény fogyasztása biztosítja egy felnőtt férfi napi szükségletének 40, 9, 23 és 14%-át ezekből a komponensekből (National Research Council, 1998). A komponensek mennyisége igen széles határok között változik, ráadásul örlési frakciónként eltérő arányban vannak jelen (5. táblázat). Az endospermium kis mennyiségben tartalmazza a tiamin- (>5%), a niacin- (12%) és B₆-vitamint (6%), de jelentős arányban van benne riboflavin (32%) és pantoténsav (40%) (Pomeranz, 1988; Betschart, 1988). Az aleuron réteg tartalmazza a niacin 80%-át, a B₆ vitamin 60%-át, valamint a tiamin 32%-át mindamelllett, hogy jelentős mennyiségeket tartalmaz az összes többi vitaminból is. A folát és a biotin feltehetőleg hasonló arányban oszlik meg a frakciók között. A korpa és a csíra a B-vitamin leggazdagabb forrása. Korpában a teljes foláttartalom négyszer akkora, mint lisztben és kétszer akkora, mint a

szemben. A csírában a tiamin-, a riboflavin- és a foláttartalom kétszer akkora, mint a korpában és 10–17-szer több, mint a lisztben. Megjegyzendő azonban, hogy mivel a B-vitamin jelentős része a korpában és a csírában található, őrléssel eltávolítjuk a tiamin 68%-át, a riboflavin 58–65%-át és a piridoxin 85%-át (Keagy és mtsai, 1980). Mindezzel együtt a gabonafélék, valamint a belőle készült termékek még így is a humán táplálkozás jelentős B-vitamin-forrásainak számítanak. A különböző gabonafélék közül durumbúzában mérték a legnagyobb foláttartalmat (0,64–0,89 µg/g), de egyéb tetraploid fajokban is nagy átlagértéket mutattak ki (0,69 µg/g).

5. táblázat. A búzaszem B-vitamin-tartalma (Piironen és mtsai, 2009).

| Vitamin | Mennyiség szemben (µg/g) sz.a | Mennyiség korpában (µg/g) sz.a | Mennyiség csírában (µg/g) sz.a | Mennyiség lisztben (µg/g) sz.a |
|-------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Tiamin (B ₁) | 1,3–9,9 | 5,2–8,9 | 15,0–20,0 | 0,8–2,6 |
| Riboflavin (B ₂) | 0,5–5,5 | 3,2–5,8 | 5,0–10,0 | 0,3–0,6 |
| Niacin (B ₃) | 20,0–11,0 | 136,0–296,0 | 38,0–68,0 | 7,0–15,0 |
| Piridoxin (B ₆) | 0,8–7,9 | 7,3–16,0 | 4,9–33,0 | 0,4–2,8 |
| Pantoténsav (B ₅) | – | 22,0–25,0 | 10,0–23,0 | 3,0–6,3 |
| Biotin (B ₇) | – | 0,2–0,5 | 0,2–0,3 | 0,01–0,03 |
| Folát (B ₉) | 0,16–1,10 | 0,8–2,6 | 1,9–5,2 | 0,2–0,3 |
| Kobalamin (B ₁₂) | – | – | – | – |

Búzában a B-vitamin mellett jelentősebb mennyiségű **E-vitamin** is található. Az E-vitaminnak nyolc vitaminerje van, ezek az α -, β -, γ - és δ -tokoferol, valamint az α -, β -, γ - és δ -tokotrienol – közös csoportnevükön a „tokolok”. Ezek közül a legnagyobb biológiai aktivitással az α -tokoferol egyik sztereoiszomerje rendelkezik. Ehhez képest a β -, γ - és δ -tokoferol és az α -, β -tokotrienol biológiai aktivitása csupán 50, 10, 3, 30 és 5%-os. A tokolok fontos zsírban oldódó antioxidánsok, melyek poláris kromanolgyűrűt és egy 16 szénatomszámú oldalláncot tartalmaznak (Stone és Papas, 2003). Hidrogénatomjaikat a lipidek peroxidgyökeinek adva gátolják a lipidek oxidációját. E funkciójukat a növény fotoszintetikus membránjaiban és a magban töltik be. Az α -tokoferol a fő lánctörő antioxidáns a biológiai rendszerekben és egyben egy antioxidáns-hálózat része olyan vitaminokkal együtt, mint az aszkorbinsav, a glutation és az ubikinol. A tokolok a szabad oxigén- és a nitrogén-oxid-gyököket is lekötik. Mivel a tokolok lokalizáltan helyezkednek el a búzaszem egyes részeiben, őrlés után nagy részük abba a frakcióba kerül, mely a búzaszem külső rétegeit és a csírat tartalmazza, azaz a korpába. Az endospermium tokoltartalma ebből következően jóval kisebb (6. táblázat). A csírában főként α - és β -tokoferol található, míg a tokotrienolok mennyisége itt elhanyagolható (Bramley és mtsai, 2000). A búzaszemben a tokotrienolok a perikarpium, a magháj (testa) és az aleuron rétegekben található meg koncentráltabb mennyiségben (a szem összes tokotrienol-tartamának 85%-a), de az endospermiumban is jelentős mennyiségben (15%) fordulnak elő (Morrison és mtsai, 1982) főként β -formában. A tokolok γ - és δ -formáit csupán árpában találták meg jelentősebb mennyiségben, míg zabban a tokol valamennyi formájából kis mennyiség található. Az olajokhoz képest a gabonafélék ugyan mérsékelt forrásai a tokoloknak, ugyanakkor a búzacsírából kinyert olaj E-vitamin-aktivitását nagyobbak találták a legtöbb más forrásból származó olajénál (Piironen és mtsai, 1986).

6. táblázat. A tokoferol és tokotrienol mennyisége a búza őrlési frakcióiban
(Piironen és mtsai, 2009).

| | Mennyiség teljesőrleményben ($\mu\text{g/g}$) sz.a | Mennyiség lisztben* ($\mu\text{g/g}$) sz.a. | Mennyiség korpában ($\mu\text{g/g}$) sz.a. | Mennyiség csírában ($\mu\text{g/g}$) sz.a. |
|-----------------------|--|---|--|--|
| α -tokoferol | 9,8–10,0 | 2,0–16,0 | 13,0–16,0 | 104,0–221,0 |
| α -tokotrienol | 4,0–4,5 | 1,0–2,5 | 11,0–15,0 | 1,6–3,0 |
| β -tokoferol | 5,1–5,4 | 1,0–8,0 | 6,6–8,0 | 67,0–86,0 |
| β -tokotrienol | 21,0–24,0 | 11,0–17,0 | 44,0–56,0 | 8,2–10,0 |
| Összes tokol | 40,0–44,0 | 17,0–44,0 | 76,0–95,0 | 181,0–320,0 |

*különböző hamutartalmú lisztek mérésével kapott eredmények

A gabonaszemek színét meghatározó és **A-vitamin** aktivitással rendelkező **karotinok** fontos minőségmeghatározói a gabonaféléknek. Kémiailag a karotin egy terpén, mely nyolc darab izoprén egységből biokémiai úton szintetizálható. Két fő formája az α -karotin és a β -karotin, de létezik γ -, δ - és ϵ -karotin változata is. A búza sárgapigment-molekulái elsősorban a xantofil nevű karotinmolekulából származnak. Búzában azonosítottak három molekulát – a luteint, a β -kriptoxantint és a zeaxantint –, melyek a xantofilek közé tartoznak és hidroxilált karotinok. A β -karotin ugyanakkor egy hidrokarbon karotin. Az α - és β -karotinnak, valamint a β -kriptoxantinnak A-provitamin aktivitása van. A többi karotin feltehetőleg antioxidánsként működik (Zhou és mtsai, 2004). A karotinok szerepe a növényben az energia megkötése és klorofillhoz szállítása, a fotoszintézisben résztvevő szervek védelme a reaktív oxigénradikáloktól, illetve sárga–vörös színeivel az állatok vonzása (van den Berg és mtsai, 2000). Bár a gabonaféléknek mérsékelt a karotintartalma, mivel nagy mennyiségben fogyasztjuk, ezért a karotinfogyasztás szignifikáns hányadát adják. A búza összes karotintartalmának több mint 90%-a xantofil, melynek legnagyobb része lutein (van den Berg és mtsai, 2000; Chung és Ohm, 2000). A gabonafélék közül a kukoricaszem a leggazdagabb luteinben (USDA, 2005). Nem áll rendelkezésünkre kielégítő mennyiségű információ arról, hogy hogyan oszlanak el a karotinok a búzaszemben; az ismert adatok is mintegy 60 évesek. Ezek szerint a teljes búzaszem körülbelül 15%-kal több karotint tartalmaz, mint az endospermium és 25%-kal többet, mint az embrió (Kruger és Reed, 1988). Az eredmények azonban nagyban függenek a mérési módszerektől.

A **fitoszterolok** terpenoid vegyületek, melyek szkvalénből szintetizálódnak. Mintegy 15 különböző **szterol**molekula fordul elő a különböző gabonafajokban (pl. kampesterol, szitoszterol, szigmatzterol, avenaszterolok, sztanolok), melyek közül búzában a szitoszterolok (40–61%) és a sztanolok (11–29%) fordulnak elő a legnagyobb arányban (Nurmi és mtsai, 2008). Ezeknek típusonként és fajonként változó lehet a jellemző koncentrációtartományuk (7. táblázat). Búzában az összes szteroltartalom 450 és 960 $\mu\text{g/g}$ d.m. között változik (Piironen és mtsai 2009). Legnagyobb mennyiségben a csíra- és a korpafrakció tartalmazza (Nyström és mtsai, 2007). A spelta (893–963 $\mu\text{g/g}$ d.m.), durum (871–1106 $\mu\text{g/g}$ d.m.) és einkorn (976–1187 $\mu\text{g/g}$ d.m.) fajokban a búzáénál nagyobb koncentrációt állapítottak meg, míg a zabban kisebbet (Nurmi és mtsai, 2008). A szterolok jól ismertek a vérszérum koleszterincsökkentő hatásokról, mivel gátolják a koleszterin abszorpcióját a vékonybélben.

A **fenolos komponensek** egy vagy több aromás fenolgyűrűből állnak, melyekhez egy vagy két hidroxilcsoport kapcsolódik (Gross, 1981) Több mint 8.000 ilyen természetes vegyület létezik. Az egy gyűrűt tartalmazó fenolok közé tartozik a fenolsav és az alkilrezorcin, míg többgyűrűs polifenol a lignán vagy a flavonoidok. Ezeket a komponenseket már azonosították búzában is (Penalvo és mtsai, 2005).

7. táblázat. A búzaszem fitoszterol-tartalma (Piironen és mtsai, 2009).

| | Mennyiség szemben µg/g sz.a. | Mennyiség csírában µg/g sz.a. | Mennyiség korpában µg/g sz.a. | Mennyiség aleuronban µg/g sz.a. |
|----------------|------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| Kampeszterol | 110–270 | – | – | – |
| Szitoszterol | 290–530 | – | – | – |
| Sztigmaszterol | 3–24 | – | – | – |
| Avenoszterolok | 0–22 | – | – | – |
| Sztanolok | 14–260 | – | – | – |
| Összes szterol | 450–960 | 3440–4490 | 1480–2000 | 2190 |

A fenolos komponensek közül a **fenolos savak** fordulnak elő a legnagyobb mennyiségben a gabonaszemekben (329–1171 µg/g d.m.). A fenolos savak három formában léteznek: egyrészt oldható savak formájában, másrészt konjugált oldható formában, észterkötéssel cukrokhoz és más kis molekulatömegű komponensekhez kötődve, harmadrészt pedig oldhatatlan kötött formában. Ez utóbbi a búzában jellemzően megjelenő forma, mely részt vesz a polimerek keresztkötéseinek kialakításában főként a sejtfal arabinoxilánjai között. Más fitokemikáliákhoz hasonlóan ezek a komponensek is a korpában koncentrálnak, míg lisztben kevés található belőlük. A fenolos savak két csoportra oszthatók: egyik a hidroxifahéjsav, míg a másik a hidroxibenzoésav származéka. A hidroxibenzoésav származékai a p-hidroxi- és dihidroxi-benzo-, vanilin-, sziringin- és galluszsavak. Ezek a savak általában oldhatatlan kötött formában vannak jelen és tipikus komponensei a sokkal komplexebb tannin- és ligninmolekuláknak. A hidroxifahéjsav származékai a p-kumár-, kávé-, ferula- és szinapinsavak. Ezek a savak is főként kötött formában vannak jelen és olyan sejtfal struktúrákhoz kötődnek észter kötéssel, mint a cellulóz, a lignin és a fehérje. A legelterjedtebb fenolos sav a ferulasav, a vanilin-, a p-kumár- és a sziringinsavak. Búzában a legnagyobb mennyiségben előforduló fenolos sav a **ferulasav**, melynek nagy részét (98%) a héj közeli rétegek, így az aleuron réteg és a héjrész tartalmazza (Anson és mtsai, 2008). Számszerűen, a teljes búzaszem 1500–2500 µg/g, a korpafrakció 4000–5000 µg/g koncentrációban tartalmaz fenolos komponenseket, melyből 400–800 µg/g szabad formában van jelen (Li és mtsai, 2008).

Az **alkilrezorcín (AR)** fenolos lipid, amfifil 1,3-dihidroxibenzén származék, melynek molekulaláncai 15–25 szénatomszámúak és többségében telítettek. Az AR leginkább a gabonaszem külső héjrészeiben van jelen és a pozitív élettani hatása mellett a teljes őrlésű lisztfogyasztás biomarkereként használják. Biológiai és fiziológiai hatása is lehet – például antimikrobiális hatás –, továbbá hat a biológiai membránokra. Emellett erős antimutagén hatással rendelkezik. A búzához képest (220–652 µg/g d.m.) kiemelkedően nagy mennyiségben tartalmazza a rozs (797–1231 µg/g d.m.) és a különböző búza vadfajok, mint például a *Triticum monococcum* L. (545–654 µg/g d.m.), a *Triticum dicoccum* L. (531–714 µg/g d.m.) és a spelta (490–741 µg/g d.m.). Árpában kis mennyiségben található meg, míg zabban egyáltalán nincs jelen. A zab tartalmaz azonban egyéb olyan komponenseket, melyeket más gabonafélék nem tartalmaznak, mint például avenantramid fenolos komponenseket. Ezek olyan N-fahéj-antranilát alkaloidok, melyek p-kumár-, kávé- és ferulasavból származnak (Andersson és mtsai, 2008; Nyström és mtsai, 2008).

A **lignánok** fitoösztrogének, melyeknek nagy része mikrobiális fermentáció során enterolaktonná alakul a vékonybélben, ami egészségvédő hatást fejthet ki különböző mechanizmusok útján (Milder és mtsai, 2004; Penalvo és mtsai, 2004).

A fenolos komponensek közé tartoznak az olyan **flavonoidok** is, mint az **antocianin**, mely élénk színt ad egyes növényi részeknek, például a gabonaszemek maghéjának.

Feltehetően kifejt hormonális, antioxidáns és gyulladáscsökkentő hatást is (Wende és mtsai, 2005).

Mivel az ásványi anyagok és antioxidánsok nem képezik e dolgozatban közölt vizsgálataink tárgyát ezért a továbbiakban nem kerülnek részletesebb tárgyalásra.

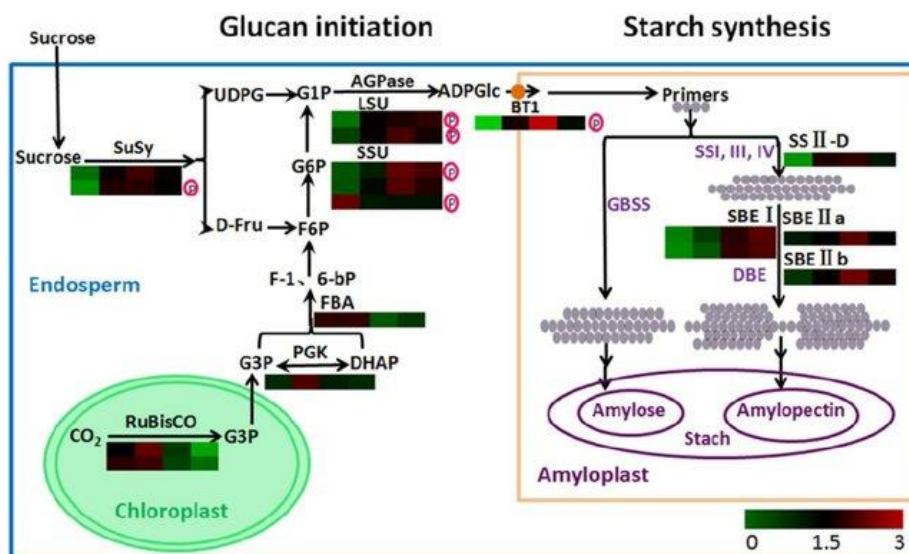
2.2 A búzaszem komponenseinek genetikája

Az egyes komponensek bioszintézisének útvonala számos lépést tartalmaz, melyek mindegyikében egy vagy több fontos enzim vesz részt. Ezen enzimek megfelelő működése alapvetően meghatározza a búzaszem beltartalmi összetételét. A búza beltartalmi összetételének hátterében rendkívül bonyolult és összetett genetikai tényezők állnak.

2.2.1 A keményítő genetikája

A keményítőtartalom és -összetétel mennyiségi tulajdonság, így a genotípus és a környezet egyaránt hatással vannak rá. Számos tanulmány vizsgálta a keményítő tulajdonságait meghatározó genetikai régiókat QTL (quantitative trait locus) térképezéssel. Több populáció QTL elemzésével elsősorban az 1A, 1D, 2A, 2D, 7A, 7B és a 7D kromoszómákon azonosítottak QTL régiókat a keményítőtartalommal összefüggésben (McCartney és mtsai, 2006; Sun és mtsai, 2008). A Zhu (1995) által kidolgozott QTL térképezés módszere a kapcsolt tulajdonságok hatását ki tudta zárni. Így sikerült a keményítőtartalomra (*Qgsc7B-15*) egy olyan QTL-t azonosítani, mely független a fehérjetartalomtól (Deng és mtsai, 2015). A fehérje- és keményítőtartalomra és -összetételre a szemfejlődés folyamatában is végeztek QTL elemzést, melynek eredményeként a 4A kromoszómán találtak egy QTL-t a keményítőtartalommal összefüggésben (Tian és mtsai, 2011, 2015; Zhu és mtsai, 2011). Deng és mtsai (2018) átfogó tanulmányában összesen 24 additív QTL-t azonosítottak a liszt amilóz-, amilopektin- és összkeményítő-tartalmával összefüggésben, melyek közül 10 volt stabil és jelent meg több termőhely vizsgálata esetén is. Ezek a QTL-ek a 3B, 4A, 5A és a 7D kromoszómákra térképeződtek. A legnagyobb kimutatott fenotípusos varianciaérték 54,31% volt. Mindkét vizsgált populációban a 3B, 4A és a 7A kromoszómákon helyezkedtek el a fontosabb QTL-ek, míg a 4A, 3B, 7A, 7D és 5A kromoszómákon QTL klasztereket is azonosítottak, jelezve, hogy ezek a régiók igen fontosak a keményítő bioszintézisében.

A keményítő két glükóz polimerből épül fel: 25–28%-át amilóz alkotja, míg 72–75%-a amilopektinből áll. Az amilóz-molekulák szintéziséért elsősorban a keményítőhöz kötött keményítő-szintáz enzim három izoformja felelős (GBSSIs, 59–60 kDa) (Nakamura és mtsai, 1993), melyek a 7AS, 4AL és 7DS kromoszómákon elhelyezkedő, három homeológ waxy lokuszon (Wx-A1, Wx-B1 és Wx-D1) található gének által kódoltak (Nakamura és mtsai 1993; Chao és mtsai 1989; Fujita és mtsai, 1996). A három gén teljes inaktiválása waxy törzsek előállítását eredményezi, melyeket nagyon alacsony amilóztartalmú keményítő (0–2%) és eltérő funkcionális tulajdonságok jellemeznek (4. ábra).



4. ábra. A keményítő bioszintézis folyamata a búza endospermiumban (Ma és mtsai, 2014).

ADP: adenzin difoszfát; AGPase LSU: ADP-glükóz pirofoszforiláz nagy alegysége; AGPase SSU: ADP-glükóz pirofoszforiláz kis alegysége; DBE: elágazásbontó enzim; GBSS: keményítőszemcséhez kötött keményítő-szintáz; PGK: foszfoglicerát kináz; RuBisCO: ribulóz biszfoszfát karboxiláz; SBE: keményítő elágazási szintáz; SuSy: szukróz-szintáz; SS: keményítő-szintáz. A fehérjeszintet színes négyzetek jelölik, mutató az expresszió változását a különböző fejlődési stádiumokban.

Az amilopektin szintézise ennél komplexebb (4. ábra). A nagy glükán polimerek az ADP-glükóz szubsztrátból keletkeznek az amiloplastban. Közben kétféle kötés jön létre: α -(1-4) és α -(1-6) glükozidos kötés, melyből az utóbbi hozza létre a molekula elágazásait, azaz az amilopektin-molekulákat. A kötések létrejötte és felbomlása elsősorban három enzimtípusnak köszönhető: a keményítő-szintázoknak (SSs), az elágazásokat létrehozó keményítő enzimeknek (SBE-k) és az elágazásokat bontó enzimeknek (DBE-k). Az SS-ok katalizálják a glükán lánc meghosszabbítását, azáltal hogy α -(1-4) glikozidos kötések hoz létre a nemredukáló láncvégen. Az SBE elhasít egy internális α -(1-4) glikozidos kötetést és a vágott láncvéget α -(1-6) kötéssel hozzákötöti egy másik α -(1-4)- kötéttől molekulához. Az elágazási mintázatot és a különböző hosszúságú láncok eloszlását több SBE együtt határozza meg (Bertoft, 2013; Hanashiro és mtsai, 1996). A DBE-nek (mint amilyen az izoamiláz vagy a pullulanáz) vágó funkciója van, amely elősegíti az amilopektin-molekulák megfelelő kristályosodását (Myers és mtsai, 2000). Az úgynevezett D-enzimek, amelyek elhasítják a glükán láncokat és elszállítják egy másik lánc nemredukáló végéhez, szintén hozzájárulhatnak a nagy amilóztartalmú keményítő keletkezéséhez (Tetlow, 2011; Tetlow és mtsai, 2004b). Enzimhiányos mutáns és/vagy transzgenikus vonalak *in vitro* vizsgálatával megállapították, hogy az SS és SBE enzimek jellemzően egy bizonyos polimerizációs fokkal rendelkező lánchossztartományban működnek (Nakamura, 2018; Tetlow, 2011). Megállapították azt is, hogy az amilopektin szintézisében részt vevő különböző enzimek fehérjekomplexet hozhatnak létre egymással, mely megváltoztatja eredeti tulajdonságaikat és ezáltal az amilopektin-szintézis folyamatát. Kukoricában és búzában is kimutatták, hogy elég csak egy enzim izoformot mutálni és máris egy vagy több másik enzim is elveszítheti aktivitását (Colleoni és mtsai, 2003; Dinges és mtsai, 2003; Tetlow és mtsai, 2004a). A fehérjekomplexek *in vitro* működése azonban még nem ismert.

Élettani hatás szempontjából az amilóztartalom növelésének gyakorlati jelentősége van, hiszen a nagyobb amilóztartalom nagyobb mennyiségű rezisztens keményítőt eredményez a gabonaszemben. A bioszintézis enzimeit és az amilóztartalom közötti összefüggéseket számos áttekintő cikk tárgyalta már (Bird és Regina, 2018; Nakamura, 2018; Regina és mtsai, 2015; Tetlow, 2011; Wang és mtsai, 2017).

Ezek szerint az amilóztartalom növelésének eddig alapvetően három módja ismert :

1. a keményítőhöz kötött keményítő-szintáz (GBSS) enzimaktivitásának növelése,
2. az SS enzimek működésének gátlása, mely csökkenti az amilopektin relatív mennyiségét,
3. az SBE enzim működésének gátlása, mely csökkenti az amilopektin-molekula elágazásainak számát.

Megállapították, hogy az SS gátlása az SBE gátlásához képest kevésbé változtatja meg az amilopektin elágazásainak szerkezetét, ugyanakkor növeli a lineáris láncok arányát (amilóz) az amilopektin-szintézis gátlásával. Ezzel ellentétben az SBE gátlása több amilopektint eredményez. A lineáris láncok aránya ugyan kevésbé változik meg az SBE mutánsokban, mint az SS mutánsokban, azonban az amilopektin megnövekedett mennyisége az amilóz-elágazások kialakulásának gátlásáról tanúskodik (Jobling és mtsai, 1999; Morell és mtsai, 2003).

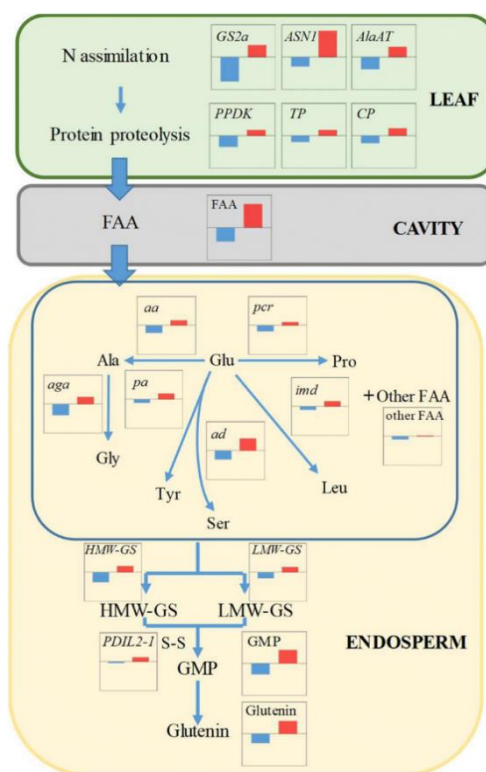
A keményítőmolekulák szerkezetét különböző módszerekkel próbálták meg módosítani annak érdekében, hogy a kívánt keményítőtulajdonságokat elérjék: 1. az SBE enzimek, 2. az SS enzimek, illetve 3. a GBSS enzimek működésének módosításával (Li és mtsai, 2019).

1. Az SBE enzimek két fő típusa az SBEI és az SBEII. Gabonafélékben az SBEII van szignifikáns hatással az amilóztartalomra, míg az SBEI mutáció kismértékű fenotípusos változást eredményez (Blauth és mtsai, 2002; Regina és mtsai, 2004; Satoh és mtsai, 2003). Az SBEII-nek két izoformja létezik (IIa és IIb), melyeknek a szekvenciája és a molekulatömege hasonló. Az SBEIIb-nek megfelelő amilóz-extender (*ae*) gén mutációja nagyobb amilóztartalmat és hosszabb amilopektinlánc-elágazásokat hoz létre kukoricában és rizsben (Jane és mtsai, 1999; Nishi és mtsai, 2001). Búza és árpa esetében az SBEIIa ugyanakkor sokkal fontosabb szerepet tölt be az amilóztartalom és a glükán láncok elágazásának kialakításában, mint az SBEIIb (Regina és mtsai 2006, 2010). A két izoform (SBEIIa és b) együttes inaktiválása nagyobb csökkenést eredményez az amilóztartalomban, mint ha külön-külön inaktiváljuk őket (Regina és mtsai, 2010; Zhu és mtsai, 2012; Carciofi és mtsai, 2012). Az SBEII izoformjai inkább az amilopektinre hatnak és rövidebb elágazásokat hoznak létre (SBEIIa DP6-15, SBEIIb DP6-7), míg az SBEI az amilózt használja szubsztrátként és így hosszabb láncokat képez (DP10-13, de DP30-ig) (Tetlow és mtsai, 2004b; Tetlow és Emes, 2014; Nakamura, 2010, 2018).
2. Az SS enzimek konzervált, elsődleges aminosav-szekvenciájuk alapján öt osztályba sorolhatók. Az egyik osztályba tartoznak a keményítőhöz kötött keményítő-szintázok (GBSS), amelyek kizárólag a szemcséken belül, kötött formában találhatók meg. A másik négy SS osztály (SSI, SSII, SSIII, SSIV), melyek oldható szintázokként is ismertek, vagy az amiloplaszt támasztószövetében találhatók meg oldott formában vagy részlegesen oldva a szemcsékkel asszociálnak (Zeeman és mtsai, 2010). Az oldható SS-ek elsősorban az amilopektin szintézisében vesznek részt vagy az amilopektin lánchosszabbításában van kulcsfontosságú szerepük. A GBSS ugyanakkor az amilóz szintézisében kulcsfontosságú. Az SSI, SSII és SSIII osztályok sorrendben a rövid a közepes és a hosszú láncok lánchosszabbításában vesznek részt (Tomlinson és Denyer, 2003). Fujita és mtsai (2006) megállapították, hogy az SSI a DP6-7 hosszú láncokból DP8-12 hosszú láncokat képez rizsben. Az SSII ugyanakkor búzában DP6-10 hosszú láncokból hozott létre DP11-25 hosszú láncokat (Yamamori és mtsai, 2000). Megállapították továbbá, hogy az SS enzimek elégtelen működése kevésbé növelte az amilóztartalmat, mint az SBE enzimeké.
3. A GBSS működésének elégtelensége csökkent amilóztartalmú, „waxy” keményítőt eredményez. Az enzim azonban feltehetőleg részt vesz a hosszú láncú amilopektin-

molekulák lánchosszabbításában is (Yoo és Jane, 2002). Érdekes ugyanakkor, hogy a kísérletek, melyekben a GBSS gén expresszióját növelték, nem eredményezett szignifikáns növekedést az amilóztartalomban (Flipse és mtsai, 1996). A GBSS-fehérje mennyisége feltehetőleg nem kulcsfontosságú az amilóztartalom növelésében, ha a szintézist más faktorok gátolják, például a fizikai hely hiánya az amilopektin-mátrixon belül vagy az ADP-glükóz és a malto-oligo-szacharidok jelenléte (Sestili és mtsai, 2012).

2.2.2 A fehérjék genetikája

A tartalékfehérjék szintézise rendkívül összetett folyamat. A fehérjék szintéziséhez szabad aminosavakra van szükség, melyet a növény a zászlós levélben lezajló fehérjebontásból szerez meg. Ezek a szabad aminosavak ezután a levélből az endospermiumba szállítódnak, a fehérjék szintéziséhez ott kerülnek felhasználásra (5. ábra).



5. ábra. A nitrogén-asszimiláció szabályozásának sematikus ábrája (Zhong és mtsai, 2018).

A piros és kék oszlopok az aminosav-metabolizmusban részt vevő gének expressziójának mértékét mutatják a háromleves állapothoz képest (folyékony N-műtrágya kijuttatás egy- és ötlevelű állapotban), ahol a levél (LEAF) vizsgált génei: a) *GS2a*; b) *aszparagin-szintetáz (ASN1)*; c) *alanin-aminotranszferáz (AlaAT)*; d) *piruvát-foszfát dikináz szabályozó fehérje (PPDK)*; e) *tiol-proteáz (TP)*; f) *cisztein-proteáz (CP)*; g) szabad aminosavtartalom (FAA); míg az endospermium (ENDOSPERM) vizsgált génei: h) *pirrolin-5-karboxilát-reduktáz (pcr)*; i) *foszfoserin aminotranszferáz (pa)*; j) *arogenát dehidrogenáz (ad)*; k) *iszpropil-malát dehidrogenáz (imd)*; l) *alanin-aminotranszferáz (aa)*; m) *alanin-glioxilát-aminotranszferáz (aga)*; n) más szabad aminosavtartalom (FAA); o) nagy molekulatömegű gluteninek (HMW-GS); p) kis molekulatömegű gluteninek (LMW-GS); q) *fehérje-diszulfid-izomeráz szerű 2-1 (PDIL2-1)*; r) *glutenin makropolimer fehérjetartalom (GMP)*; s) *glutenintartalom*. Aminosavak: Ala – alanin; Glu – glutaminsav; Pro – prolin; Gly – glicin; Tyr – tirozin; Ser – szerin; Leu – leucin (Zhong és mtsai, 2018).

A búza komponensei közül a fehérjék mennyiségét és összetételét meghatározó genetikai háttér megértése nagy kihívás, mivel a fehérjetartalom környezetfüggősége igen jelentős (beleértve a talajösszetételt vagy az időjárási körülményeket is). Turner és mtsai (2004) szerint nem azonosíthatók a fehérjetartalmat meghatározó domináns gének, míg

Rousset és mtsai (1992) három fő HMW glutenin alegység-gént azonosított, amely az összfehérje-tartalmat alapvetően meghatározza. A három gén kombinációja azonban csak 13%-ban határozta meg a sütőipari minőséget. Számos tanulmány az 5-ös kromoszóma hatását mutatta ki (Snape és mtsai, 1993; Blanco és mtsai, 2002), amelyen a Pro1 és Pro2 géneket azonosították. További QTL-eket azonosítottak még a 2D, 6B, 3A és a 7D kromoszómákon (Groos és mtsai, 2004). Ezek a gének és QTL-ek azonban összefüggésben állnak a szemkeménységet meghatározó génekkel és QTL-ekkel is.

A búza sütőipari minőségét elsősorban az endospermiumban található tartalékfehérje-összetétel határozza meg. Az őket alkotó HMW és LMW gluteninek, valamint -gliadinok szintézisében részt vevő gének nagy része már jól ismert. A klasszikus és molekuláris genetikai vizsgálatok alapján a búza prolaminok génjei az 1-es és 6-os homeológ kromoszómacsoport komplex lokuszain, géncsaládokban kódoltak (Shewry és mtsai, 1984; Payne és mtsai, 1984). A géncsaládok jelenléte a prolaminok nagy változatosságát, polimorfizmusát vonja maga után. Különböző gabonafélék S-ben gazdag prolaminjainak C-terminális szekvenciáit vizsgálva Kreis és munkatársai (1985a,b) megállapították, hogy ezeknek a fehérjéknek a kialakulása több egymást követő evolúciós folyamat eredménye. A kénben szegény prolaminokat kódoló gének az 1-es kromoszóma rövid karján a Gli-1 (ω -gliadinok), Gli-A3 és Gli-B3 lokuszban lokalizáltak (ω -gliadinok és LMW glutenin D-alegységek). A kénben gazdag prolaminokat kódoló gének az 1-es kromoszóma rövid karján, valamint a 6-os kromoszómán helyezkednek el. A Gli-1 lokuszban lokalizáltak a γ -gliadinokat, a Glu-3 lokuszban az LMW glutenin B- és C-alegységeket, valamint a 6-os kromoszóma Gli-2 lokuszán az α -gliadinokat kódoló géneket (8. táblázat). A HMW glutenin fehérjealegység-gének az 1 homeológ kromoszóma hosszú karján, három különböző lokuszban kódoltak (Glu-A1, Glu-B1, Glu-D1), és minden lokusz két különböző szorosan kapcsolt gént tartalmaz (x, y típus) (Harberd és mtsai, 1986). Ennek megfelelően a hexaploid búzában hat HMW glutenin gén van jelen, melyből az 1Bx, az 1Dx és az 1Dy minden búzafajtában kifejeződik, míg az 1Ax és az 1By alegységek csak egyes genotípusokban expresszálódnak (Shewry és Tatham, 1997). Az 1Ay alegységek aestivum genotípusokban nem mutathatók ki, de más vad búzafajokban, pl. *T. dicoccoides* vagy *T. urartu* fajtákban expresszálódnak. A Glu-A1y gén működőképes változatát megtalálták néhány svéd hexaploid nemesítési törzsben (Margiotta és mtsai, 1996), melyekbe valószínűleg a nemesítés folyamata során keresztezésre használt vad fajból került be a gén.

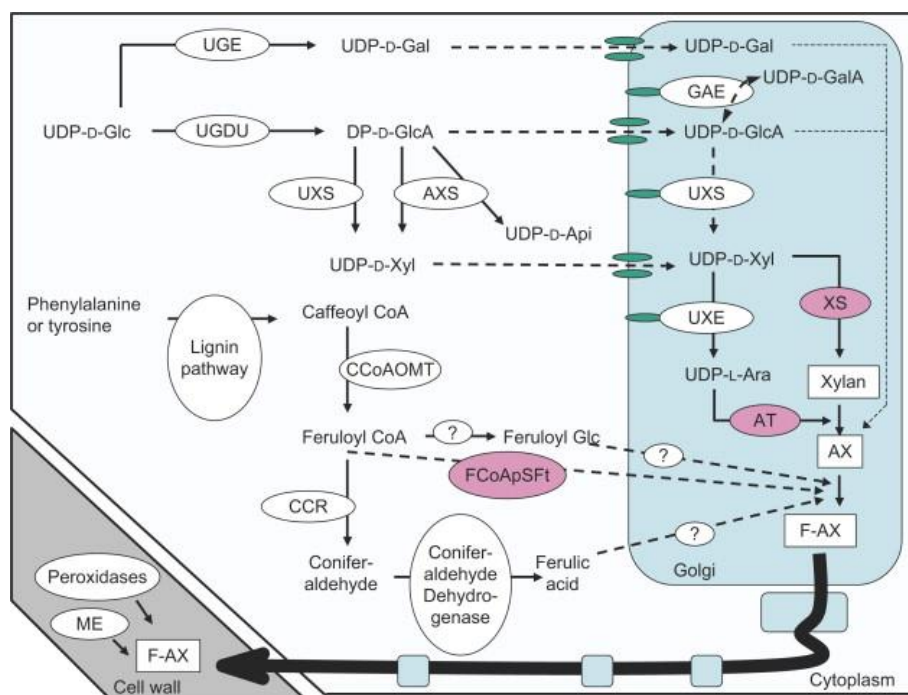
8. táblázat. A búza tartalékfehérje génjeinek kromoszomális elhelyezkedése.

| Géncsalád | Lokusz | Kromoszóma | Kódolt fehérjék |
|---------------------------|-------------------------|--|---|
| Kénben szegény prolaminok | Gli-1 Gli-A3, Gli-B3 | 1A, 1B, 1D rövid kar 1A, 1B rövid kar | ω -gliadinok ω -gliadinok/ LMW glutenin – D alegységek |
| Kénben gazdag prolaminok | Gli-1 Glu-3 Gli-2 | 1A, 1B, 1D rövid kar 1A, 1B, 1D rövid kar 6A, 6B, 6D | γ -gliadinok LMW glutenin B- és C alegységek α -gliadinok |
| HMW prolaminok | Glu-1 | 1A, 1B, 1D hosszú kar | HMW glutenin alegységek |

2.2.3 A rostanyagok genetikája

A rostanyagok mennyisége és összetétele gabonafajonként változó. Búzában a legfontosabb sejtfalalkotó rostkomponens az arabinoxilán. Építőelemei a Golgi-készülékben

szintetizálódnak vagy oda szállítódnak (6. ábra). Ezek felhasználásával a molekula xilán váza a xilán-szintáz (XS) enzim közreműködésével szintetizálódik, majd feltehetőleg különböző arabinozil-transzferáz (AT) enzimek segítségével néhány xilán egység arabinózzal helyettesítődik. Más transzferázok galaktóz (Gal) és glükuronsav (GlcA) oldalláncokat adnak a xilán vázhoz. Ezen kívül ferulasav-molekulák kapcsolódhatnak néhány arabinozil egységhez, melyek létrehozzák a ferulált arabinoxilánt (F-AX). Az F-AX ezután a sejtfalba szállítódik és ott a ferulasav peroxidázok hatására térhálósodik. Végül még más módosító enzimek (ME) is közreműködnek az arabinoxilán végső összetételének és szerkezetének kialakításában.



6. ábra. Az arabinoxilán bioszintézis sematikus ábrája (Saulnier és mtsai, 2007).

(Az arabinoxilán bioszintézisében részt vevő prekursorok és a különböző enzimek kör alakú szövegdobozzal vannak jelölve. A cukor- és ferulasav-transzferázokat pirossal jelöltük. A ferulasav szintézis és arabinoxilán vázba történő beépülésének elmélete szintén megjelenik az ábrán. A cukor építőelemei: UDP-d-Glc (glükóz); UDP-d-GlcA (glükuronsav); UDP-d-Xyl (xilóz); UDP-d-Api (apióz); UDP-I-Ara (arabinóz); és UDP-d-Gal (galaktóz). Enzimek: UGD: UDP-d-glükóz dehidrogenáz; UXS: UDP-d-xilóz-szintáz; AXS: UDP-d-apióz/UDP-d-xilóz-szintáz; UXE: UDP-d-xilóz 4-epimeráz; GAE: UDP-d-glükuronsav 4-epimeráz; UGE: UDP-d-glükóz 4-epimeráz; FCoApSfT: feruloil-CoA, poliszacharid feruloiltranszferáz; CCR: cinnamoil CoA redukáz; CCoAOMT: caffeoil koenzim A O-metiltranszferáz; XS: xilán-szintáz; AT: arabinoziltranszferázok; és ?: ismeretlen enzimek.

Komoly erőfeszítéseket tesznek a kutatók a mai napig annak érdekében, hogy azonosítsák azokat a géneket, melyek az AX bioszintézisét kontrollálják búzában és számos térképező populációt hoztak létre azért, hogy az AX-tartalommal összefüggő QTL-eket azonosítsák. A fő QTL-t az 1B kromoszómán azonosították (Martinant és mtsai, 1999), mely QTL a vízoldható arabinoxilán-tartalom (WE-AX) és a viszkozitás fenotípusos varianciájának 59%-át magyarázta (Charmet és mtsai, 2009). Quraishi és mtsai (2011) hét lokuszt azonosítottak (az 1B, 3A, 3D, 5B, 6B, 7A és 7B kromoszómákon) asszociációs genetikával, melyek közül három (1B, 3D és 6B kromoszóma) egyezik a konszenzus meta-QTL elemzés eredményeivel, melynek alapjául hét populáció adata szolgált. Ugyanezen szerzők egyedi géneket is azonosítottak a szem rostanyagtartalmának jövőbeli javítására. Mitchell és mtsai (2007) bioinformatikai módszerekkel azonosították az AX szintéziséért felelős géneket a glikozil-transzferáz (GT) családból (43, 47 és 61), míg Zeng és mtsai (2010) a GT75 gént azonosították proteomikai és transzkriptomikai módszerek kombinálásával. Búzában a

legtöbb GT gén összetett formában jelenik meg, minden formából három homeoallél van jelen az A, a B és a D genomon (Mitchell és mtsai, 2007; Wan és mtsai, 2008; Pellny és mtsai, 2012). Ezen gének kifejeződésének RNSi szupressziójával kimutatták, hogy a GT43 és GT47 gének kódolják a β -1,4-xilán-szintáz alegységeit, és hogy a GT61 kódolja az α -(1,3)-arabinozil-transzferázt (Anders és mtsai, 2012; Lovegrove és mtsai, 2013). Mind a TaGT43_2, mind a TaGT47 gének elcsendesítése 40–50%-os csökkenést eredményezett a teljes AX-tartalomban, de közben nőtt az Araf (α -L-arabinofuranozil egységek) szubsztitúció mértéke, 50%-kal csökkentve ezzel a sejtfal vastagságát (Lovegrove és mtsai, 2013). Hasonlóképpen a GT61 elcsendesítése (új nevén TaXAT1) 70–80%-os csökkenést eredményezett az α -(1,3) kötéssel kötött Araf mennyiségében az érett endospermiumban található AX-ban (Anders és mtsai, 2012). Valamennyi transzgenikus vonal extraktumának viszkozitásában csökkenést tapasztaltak, de a hatás nagyobb volt a TaGT43_2 és a TaGT47_2 RNSi vonalakban (melyek a búza 4ABD és 3ABD kromoszómáin helyezkednek el), mint a TaXAT1 RNSi vonalakban (Freeman és mtsai, 2016). Ez a hatás a WE-AX mennyiségének és lánchosszának csökkenésével magyarázható.

Az arabinoxilán mellett kisebb mennyiségben β -glükán is megtalálható a búzaszemben. A szintéziséért felelős géneket azonban elsősorban árpában vizsgálták, mivel az árpa domináns rostalkotó komponense a β -glükán. Legnagyobb valószínűséggel a cellulóz-szintázszerű (*Csl*) gének kódolják a különböző, nem cellulóz alapú sejtfalalkotó poliszacharidok szintézisében résztvevő enzimeket (Doblin és mtsai, 2009). Ezek a gének kilenc géncsaládba sorolhatók, melyeket *CslA*-tól *CslJ*-ig neveztek el és amelyek közül a *CslF*, a *CslH* és a *CslJ* családok kifejezetten gabonafélékben található meg (Doblin és mtsai, 2010). Transzgenikus *Arabidopsis thaliana* L. növényekben kimutatták, hogy az árpa *CslF* és *CslH* családok feltehetőleg részt vesznek a β -glükán szintézisében (Burton és mtsai, 2006; Doblin és mtsai, 2009). Összehasonlító genomikai tanulmányok kimutatták, hogy a *CslF* géncsaládnak tíz tagja van árpában, melyek közül a *HvCslF3*, *HvCslF4*, *HvCslF8*, *HvCslF10*, *HvCslF12* és *HvCslF13* gének a 2H kromoszómán csoportosulnak, a *HvCslF9* az 1H-n helyezkedik el, a *HvCslF7* az 5H-n míg a *HvCslF6* és *HvCslF11* gének a 7H kromoszómán lokalizáltak (Burton és mtsai, 2008; Schreiber és mtsai, 2014). Az árpa *HvCslF* génjei közül a *HvCslF6* és *HvCslF9* gének mRNS transzkripciója a legintenzívebb a fejlődő árpa endospermiumban (Burton és mtsai, 2008). Ezek a 7H és 1H kromoszómák centromerjéhez közel eső lokuszra térképeződnek és az árpa β -glükán-tartalmának QTL-éhez (quantitative trait loci) is közel esnek (Burton és mtsai, 2008; Igartua és mtsai, 2002; Molina-Cano és mtsai, 2007). Taketa és mtsai (2012) β -glükánt nem tartalmazó árpa mutánsokat vizsgálva kimutatták, hogy a β -glükán bioszintézisének fő meghatározója a *HvCslF6*. Eközben Németh és mtsai (2010) a *CslF6* gén β -glükán szintézisben betöltött szerepét transzgenikus búza növényekben is bizonyították RNSi szupresszióval.

2.3 A genotípus és a környezet hatása a búzaszem összetételére

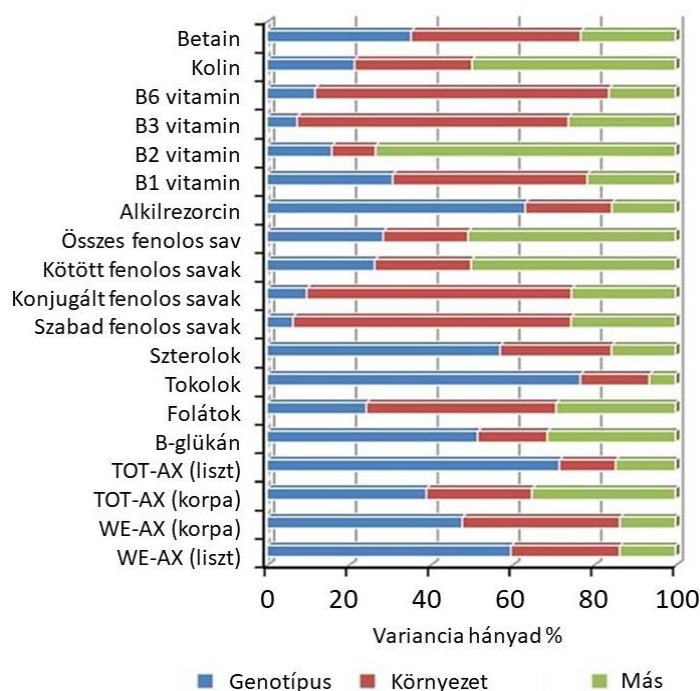
2.3.1 Örökölhetőség

Fajon belül jelentős variabilitás figyelhető meg a búzaszem összetételi tulajdonságaiban. Ez a változatosság három tényező hatásának tulajdonítható: a genotípusok közötti genetikai különbségeknek, a környezeti körülményeknek (beleértve az időjárást, a talaj összetételét vagy az agrotechnikát), illetve a genotípus és a környezet kölcsönhatásának. Amennyiben a genotípus hatása kiemelkedőnek mutatkozik egy adott tulajdonságra, úgy ez a tulajdonság jól öröklődik és ezért hatékonyan hasznosítható nemesítési programokban. A

tágabb értelemben vett örökölhetőség a teljes genotípusos és a teljes fenotípusos variancia hányadosaként értelmezhető és akkor határozható meg, ha sok mintát vizsgálunk több környezetben (termőhely, évjárat). A szűkebb értelemben vett örökölhetőség az additív genotípusos variancia és a teljes fenotípusos variancia hányadosa, azaz nem veszi figyelembe a nem-additív (GxE) hatásokat. A búza teljes fehérjetartalmát, annak variabilitását és a tulajdonság örökölhetőségét számos kutató tanulmányozta már, de a többi búzskomponens örökölhetőségéről kevés tanulmány áll rendelkezésünkre. Megállapították, hogy a búza összfehérje-tartalma egy többgénés tulajdonság, mennyiségét a környezet nagymértékben befolyásolja, ennél fogva örökölhetősége igen kis mértékű (0,2–0,3) (Branlard és mtsai, 1991, 2001; Martinant és mtsai, 1999). Mára azonban már jól ismertek a búza tartalékfehérje-alegységeit kódoló gének, sőt a búza más fehérjekomponensének genetikai háttere is ismert. Ezek együttesen járulnak hozzá a búzaszemek összfehérje-tartalmához (Appels és mtsai, 2018). A keményítőtartalom örökölhetősége még ennél is kisebb. Tekintve hogy önmagában a mérése is nehézkes, általában indirekt módon, visszaszámolással határozzák meg. A rezisztens keményítő szűkebb értelemben vett örökölhetőségét Pang és mtsai (2010) 36,5%-ban állapították meg. A rezisztens keményítő össz mennyiségének, valamint a lassan és a gyorsan emészthető rezisztens keményítőnek a tágabb értelemben vett örökölhetősége sorrendben 93,3%, 82,1% és 84,5% voltak (Zhang és mtsai, 2020).

A búza és más gabonafélék bioaktív komponenseinek örökölhetőségvizsgálatáról szóló legátfogóbb tanulmány az EU-FP6 Healthgrain pályázatban készült. Ebben 26 búzafajtát vizsgáltak 4–6 környezetben. (Shewry és mtsai, 2010, 2011; Corol és mtsai, 2012) (7. ábra). A rostanyagkomponensek nagy örökölhetőséget mutattak mind a fehér lisztben, mind a korpafrakcióban, teljesörleményre viszont nincs adat. A fehér liszt TOT-AX-, WE-AX- és β -glükán-tartalmának örökölhetőségei 70%, 60% illetve 50% voltak (Gebruers és mtsai, 2010). Az arabinoxilán-tartalom örökölhetőségét sok más tanulmány is bizonyította már. Hong és mtsai (1989) kimutatták 18 fajta 2 termőhelyes vizsgálatával, hogy a WE-pentozán (WE-AX) genotípusos varianciája a környezeti variancia 1,6-szorosa, míg a teljes pentozán esetén 2,4-szerese. Martinant és mtsai (1999) 19 fajta 3 termőhelyes vizsgálatával megállapították, hogy a liszt WE-AX örökölhetősége 0,75 volt, míg a liszt vizes extraktum viszkozitásának örökölhetősége 0,80. Tizennégy fajta hároméves adataiból Dornez és mtsai (2008) 0,53 örökölhetőséget számítottak TOT-AX, valamint 0,96-ot WE-AX esetén teljesörleményben. Ezen felül Lempereur és mtsai (1997) négy agrotechnikai kezeléssel származó durum búza teljesörlemény vizsgálatával 4,5 és 4,9 G/E arányt állapítottak meg sorban a TOT-AX és a WE-AX tartalomra. A liszt TOT-AX- és a WE-AX-tartalmának nagy örökölhetőségét Finnie és mtsai (2006) is bizonyították 7 tavaszi és 20 őszi búza 10 és 12 környezetben kivitelezett vizsgálatával. Li és mtsai (2009) azonban ellentétes eredményeket kaptak teljesörleményre 25 őszi és 25 tavaszi búza 3 termőhelyes vizsgálata esetén. Kimutatták, hogy a környezetnek jóval nagyobb a hatása az őszi búzák TOT-AX- és WE-AX-tartalmára, illetve a tavaszi fajták WE-AX-tartalmára, mint a genotípusnak. A környezet erősebb hatását mutatták ki Török és mtsai (2019) is egy 41 búzafajtát magában foglaló hároméves kísérletben. Az eredmények nagyobb részt a WE-AX nemesítési célokra történő jó hasznosíthatóságát bizonyították, míg a TOT-AX esetén az eredmények kevésbé voltak konzisztensek.

Shewry és mtsai (2010) vizsgálatában a tokol-, a szterol- és az alkilrezorcin-tartalom nagymértékű (50% fölötti) örökölhetőséget mutatott, míg a B-vitamin, a metil-donorok (kolin, betain) és a ferulasav alacsony örökölhetőséggel rendelkeznek, nagy környezeti vagy G×E hatással.



7. ábra. A búzaszem rostanyag- és más bioaktív komponenseinek örökölhetősége (Shewry és Hey, 2015).

kék: genotípus hatás (G), piros: környezeti hatás (E), zöld: G×E kölcsönhatás, a „Más” a G×E kölcsönhatásra, valamint a hibakomponensre utal.

2.3.2 Környezeti stresszhatások

A genetikai tényezők mellett a környezet hatása is jelentős lehet a búza beltartalmi összetételére. Az éghajlati tényezőknél túl (csapadékmennyiség, hőmérséklet stb.) a talaj minőségének, az alkalmazott agrotechnikának, a növényvédőszernek és műtrágyának a hatásával is számolni kell. A természetes környezeti stressztényezők közül a legintenzívebb hatása a szárazságnak és a hőstressznek lehet.

A szárazság az egyik legsúlyosabb abiotikus környezeti stressztényező, mely a növényeket érheti. Gyakoriságától, időtartamától és a növény fejlődési fázisától függően a búza termését több mint 50%-kal lecsökkentheti (Reynolds és mtsai, 2007; Shamsi és mtsai, 2011). A szárazságstressz termés csökkentő hatása különösen jelentős a virágzás és a szemtelítődés időszakában, ugyanis ekkor a két fő terméskomponens – a szemszám és a szemméret – együttes csökkenését eredményezi (Samshi és mtsai, 2011). A szárazságstressznek azonban a szem kémiai összetételére is jelentős hatása van, így például a tartalékfehérje (gliadinok, gluteninek) és a rostanyagkomponensek (arabinoxilán, β -glükán) mennyiségére és összetételére (Jiang és mtsai, 2009; Ashraf, 2014; Rakszegi és mtsai, 2014a).

Általánosságban a szárazságstressz csökkenti a szem szénhidrát tartalmát (beleértve a szacharózt és a keményítőt) (Barnabás és mtsai, 2008; Balla és mtsai, 2011), ugyanakkor növeli annak fehérjetartalmát (Flagella és mtsai, 2010). Az összhatás azonban nagyban függ a szárazság mértékétől, idejétől és más környezeti stresszekkel való kölcsönhatásától.

A legfontosabb komponensek, melyek meghatározzák a búza sütőipari minőségét, a tartalékfehérjék, vagyis a gluteninek és a gliadinok. Kimutatták, hogy a hosszas vízhiány a növény növekedés időszakában a tartalékfehérjék mennyiségét növeli (Flagella és mtsai, 2010). Később konkrétan kimutatták azt is, hogy a szárazságstressz a gliadin és glutenin gén expressziójára már három nappal a virágzás után hatással van (Begcy és Walia, 2015). Mindkét fehérjecsoport mennyisége csökken a szárazságstressz hatására, de eltérő mértékben,

melynek eredményeként a glutenin-gliadinarány, valamint az oldhatatlan polimer fehérjék aránya (UPP%) végeredményben csökken (Balla és mtsai, 2011; Gupta és mtsai, 1992; Triboi és mtsai, 2003; Blumenthal és mtsai, 1995). Ezzel összhangban a szárazság csökkenti a gluteninmolekulák méretét, valamint a glutenin makropolimerek (GMP) arányát is az érett szemben (Dai és mtsai, 2016). Ellentmondó eredménynek tűnik azonban Zhang és mtsai (2013) megállapítása, mely szerint a GMP koncentrációja nő korai szárazság, késői szárazság és kombinált korai szárazság+késői hőstressz hatására. Ezek a környezeti hatások a feldolgozóipari tulajdonságokat is befolyásolják, így például Li és mtsai (2013b) szerint a szárazság növeli a tesztaerősséget, míg csökkenti a kenyértérfogatot.

A szárazság a búza és a rozs fő sejtfalalkotó poliszacharidjának és rostkomponensének – vagyis az arabinoxilánnak (AX) – a mennyiségét és tulajdonságait is befolyásolja. Coles és mtsai (1997) szerint az AX koncentrációját búzában a virágzás utáni enyhe szárazság növeli, míg a nagy szárazság csökkenti. A szárazság a virágzás alatt növeli, míg virágzás után csökkenti az AX koncentrációját (Hong és mtsai, 1989; Laurentin és Douglas, 2003).

Természetes körülmények között a szárazságstressz rendszerint hőstresszel jár együtt, és a két tényező együtt szinergisztikusan megnöveli a búza rostanyagtartalmát (Gebruers és mtsai, 2010). Az AX tulajdonságaira, így a szerkezetére is hatással van a szárazság (Toole és mtsai, 2007). Az AX molekula mérete és arabinozilációjának mértéke megváltozik, mely az AX oldhatóságát is befolyásolja és végeredményben a feldolgozóipari tulajdonságokat, valamint az egészségre kifejtett hatást is megváltoztatja (Izydorczyk és Dexter, 2008).

A β -glükán a második legjelentősebb sejtfalalkotó poliszacharid és rostkomponens búzában (a liszt rostjainak 25%-át alkotja), míg árpa és zabban ez a domináns komponens (Fincher, 1975). Számos tanulmány leírja, hogy a szárazságstressz csökkenti az árpa (Morgan és Riggs, 1981; Coles és mtsai, 1991; Narasimhalu és mtsai, 1995; Güler, 2003; Nilssen és mtsai, 2008) β -glükán-tartalmát, bár Swanston és mtsai (1997) ezzel ellentétes tendenciát állapítottak meg. MacNicol és mtsai (1993) ugyanakkor azt találták, hogy a szemtelítődés késői szakaszaiban alkalmazott szárazságstressznek nincs hatása a β -glükán-tartalomra.

A környezeti stressztényezők hatásával kapcsolatos genetikai összefüggések

A búza termesztését leginkább korlátozó globális környezeti tényezők a szárazság és a hőstressz, amely a klímaváltozással egyre nagyobb problémává válik. Számos kísérletet publikáltak, amelyben a termést, valamint az agronómiai és fiziológiai tulajdonságokat meghatározó QTL régiókat azonosítottak szárazság- és hőstressz alatt, amelyek hozzájárulhatnak a növény jobb teljesítőképességéhez mostoha körülmények között is. Ezeknek a QTL-eknek a metaanalízisével azonosítottak meta-QTL-eket (MQTL), melyek a szárazság- és hőstresszel szembeni jobb adaptációs képességgel mutattak összefüggést (Acuña-Galindo és mtsai, 2015). A kutatók 81 különböző tulajdonságra határoztak meg QTL-eket tenyészkerti vagy kontrollált klímakamrás kísérletekben. Összesen 854 egyedi QTL-t határoztak meg, melyek közül 502 a szárazságstresszel, 234 a hőstresszel és 118 a fiziológiai tulajdonságokkal volt összefüggésben. Az egyedi QTL-ek 66 MQTL-be csoportosultak a teljes genom mentén. Ezek közül 43 MQTL a szárazság- és hőstresszel, 20 a szárazsággal, 2 a hőstresszel és 1 MQTL a fiziológiai tulajdonságokkal volt összefüggésben. A növénymagasság, az érésig eltelt napok száma, a szemtömeg, a kalászsűrűség és a bokrosodási hőmérséklet QTL-ei mutattak szorosabb egybeesést a szemtermés QTL-jeivel. Az ismert hő- és szárazságstresszel szembeni ellenállóságot meghatározó markerek közül 50 SNP esett valamely MQTL konfidencia intervallumába, beleértve a cukor metabolizmusában, a ROS rendszerben és az abszcizinsav-indukált légzésben szerepet játszó géneket. A szem beltartalmi összetételét befolyásoló tényezők közül egyedül az ezerszemtömeg QTL-ét határozták meg, mellyel összefüggésben mind a hét kromoszómán azonosítottak géneket (Acuña-Galindo és mtsai, 2015).

2.4 A nemesítés törekvései a búza bioaktív komponens-összetételének megváltoztatására

A második világháború után a nemesítők legfontosabb célja a gabonafélék termésmennyiségének növelése volt. A klímaváltozás és a globalizáció hatására megjelenő új kórokozók és kártevők új nemesítési irányokat határoztak meg, mint például a növények biotikus és abiotikus stressztoleranciájának javítását. A '70-es és '80-as években a feldolgozóipari igényeket jobban kielégítő, minőségi gabonafajták előállítása lett a fő cél a termésnövelés mellett, míg az elmúlt 15–20 évben az egészségre ható beltartalmi komponensek felé irányult a figyelem, melynek következményeként nagyobb rostanyag- és antioxidáns-tartalmú gabonafélék előállítása került előtérbe. A technikai fejlődés, mely ezidő alatt tapasztalható volt mind a gabonaszemek beltartalmi komponenseinek kémiai elválasztásában, mind a molekuláris markerek vagy a számítógépes adatfeldolgozás terén nagyban hozzájárultak a nemesítés sikerességéhez, a szelekció hatékonyságának növeléséhez. Mindezen túl előrelépést jelentett a génbanki gabonafajok és tájfajták tulajdonságainak alaposabb megismerése, mely nagyban hozzájárult a nagyobb betegség-ellenállóságú és/vagy módosított beltartalmi összetételű búza genotípusok előállításához. A beltartalmi tulajdonságokban fajon belül és fajok között talált diverzitás azonban még koránt sincs teljes mértékben kihasználva. A lehetőségek tárháza ezért még széles, azonban szükséges hozzá az egyes komponensekhez tartozó genetikai háttér megismerése, melynek eddig feltárt részleteit az előzőekben tárgyaltuk.

Habár az irodalom eddig nem számolt be olyan nemesítési programról, melyben az arabinoxilán-tartalmat növelték volna, azonban számos térképező populációt állítottak már elő az AX genetikai háttérének vizsgálatára. Az első populáció, amiről beszámoltak, egy dihaploid (DH) populáció volt, melyet a 'Courtot' és a 'Chinese Spring' intraspecifikus keresztezésével hoztak létre az INRA növénynemesítő állomásán (Clermont Ferrand, Franciaország). Cadalen és mtsai (1997) ennek a keresztezésnek 106 törzsét térképezték RFLP módszerrel (Restriction Fragment Length Polymorphism – restrikciós fragmenthossz-polimorfizmus). A következő populációt (ITMI térképező populáció – Leroy és mtsai, 1997) a szintetikus amfiploid búza W7984 ('Synthetic') és a piros, keményszemű tavaszi búza ('Opata 85') keresztezésével hozták létre, majd az F₇ generáció 115 SSD (Single Seed Descent – egymagszármazék módszer) törzsét vizsgálták. Ezt a két térképező populációt használták a liszt WE-AX-ának genetikai vizsgálatára, melyhez az örlemény vizes extraktumának relatív viszkozitását (RV) használták mérőszámként, bár a szülői genotípusok RV értéke nem különbözött szignifikánsan (1,8/1,9 a 'Courtot'/'Chinese Spring' szülőkből, míg 1,5/2 a 'Synthetic'/'Opata85' szülőkből) (Martinant és mtsai, 1998). Később Charmet és mtsai (2009) előremutató mennyiségi genetikát (mely a fenotípusból indul ki) alkalmaztak két rekombináns populáció felhasználásával, melyek kis és nagy WE-AX-tartalmú szülők keresztezéséből származtak. A francia elit törzseket – az R6 és a C7-et (RE0006 és CF0007 DH törzsek) –, valamint a nagyon eltérő 'Valoris' és 'Isengrain' fajtákat használták két populáció előállítására, melyek 125 és 280 DH törzset tartalmaztak, egyenként. A szülők közül az R6 és a 'Valoris' viszkozitása alacsony volt, míg a C7 és az 'Isengrain' nagy viszkozitással rendelkezett (értékeik sorrendben 1,2, 1,29, illetve 4,14, és 3,19 voltak) (Quraishi és mtsai, 2011).

A β -glükán-tartalom jóval alacsonyabb búzában, mint az arabinoxilán mennyisége. Ennek köszönhetően nem volt eddig célkomponense a búzanemesítési programoknak. Nagy β -glükán-tartalmú gabonaféléket (pl. árpa) használtak már korábban a búza tulajdonságainak javítására, de ezek célja többnyire nem a beltartalmi tulajdonságainak, hanem a növény

környezeti stresszekkel szembeni ellenállásának növelése volt. Cseh és mtsai (2013) állítottak elő olyan búza/árpa ('Asakaze'/'Manas') 7H diszómás addíciós vonalat, melynek a β -glükán-tartalma szignifikánsan nagyobb volt a búzáénál. Később Türkösi és mtsai (2018) állítottak elő ennél stabilabb búza/árpa Robertsoni transzlokációs vonalat (7BS.7HL centrikus fúzió, $2n=42$), mely a kontroll búzáénál nem csak nagyobb sőtúréssel, de nagyobb β -glükán-tartalommal is rendelkezett. Ezek az előnemesítésben előállított alapanyagok hasznos forrásai lehetnek a búza rostanyagtartalmának növelésére irányuló törekvéseknek.

A búza rostanyagtartalom-növelésének egyik módja a humán emésztő enzimeknek ellenálló keményítő, azaz rezisztens keményítőfrakció mennyiségi arányának a növelése (Rakszegi és mtsai, 2006). A normál búzatörzsek között azonban, amelyeket nem speciálisan célzott genetikai mutációik jelenléte miatt választottak ki, az amilóz- és az RS-tartalom variabilitása viszonylag limitált (18–35%) (Zeng és mtsai, 1997; Mohammadkhani és mtsai, 1998; Stoddard és Sarker, 2000). Az egyik legátfogóbb tanulmányban, az EU-FP6 HEALTHGRAIN programban (2005–2010) is limitált változatosságot találtak a fajták és a termőhelyek között (Shewry és mtsai, 2010) a keményítő amilóz:amilopektin jellemző 1:3 arányában 150 búzafajta analízisével (Shewry és mtsai, 2012). A kereskedelmi forgalomban elérhető normál búzafajták amilóztartalmában szintén kicsi volt a változatosság, azonban azonosítottak olyan nagy amilóztartalmú búzagenotípusokat EMS-el (etil-metil-szulfonát) (Sestili és mtsai, 2010) kezelt mutáns búzapolulációban (cv. Cadenza), melyek mindhárom genomon mutáns allélt tartalmaztak (*Sgp-I*, *Wx*). A tripla mutáns (*SsII*) genotípusokban 36% amilóztartalmat értek el. Később *SbeIIa* mutáns géneket tartalmazó, további nagy amilóztartalmú törzset (>40%) azonosítottak TILLING módszerrel ugyanazon populációban (Botticella és mtsai, 2011). Ezeket a Yamamori és mtsai (2000) által korábban már azonosított SGP-1 mutáns géneket (*Sgp-A1*, *Sgp-B1*, *Sgp-D1 null*) Konik-Rose és mtsai (2007) használták fel SGP1 null vonal/'Sunco' keresztezésével létrehozott dihaploid búzapolulációban génfunkciós vizsgálatokra. Később a null alléleket bevitték az N11 búzapoluláció egyes vonalaiba is (Hallström és mtsai 2011). Biokémiai és molekuláris módszerekkel tehát már számos olyan speciális búzatörzset állítottak elő, melyek bizonyos gének különböző allélvariánsait és azok kombinációit tartalmazzák. Különböző technikákkal előállítottak már 2%-nál kisebb amilóztartalmú (waxy), alacsony amilóztartalmú (10–18%) (Yasui és mtsai, 2002), emelt amilóztartalmú (35–40%) (Yamamori és mtsai, 2000) és nagy amilóztartalmú (>70%) (Regina és mtsai, 2006) búzatörzseket is. További kutatócsoportok is állítottak már elő mutáns búzatörzseket (Rakszegi és mtsai, 2010a) és azonosították köztük a keményítőszintézisben résztvevő mutáns allélokat hordozó vonalakat (Botticella és mtsai, 2011). Nagy amilóztartalmú (rezisztens keményítő) búza hagyományos nemesítési céllal való előállítására korábban nem volt még irodalmi példa.

2.5 A búzaszem komponenseinek egészségmegőrző hatása

A legfontosabb pozitív egészségügyi hatást kifejtő búzacomponensek a rostanyagok és az antioxidánsok. Ezek közül a rostanyagok egészségmegőrző hatásait tárgyaljuk az alábbiakban, mivel ez képezi a dolgozatban szereplő vizsgálatok tárgyát. Az FDA (Amerikai Élelmiszer- és Gyógyszerfelügyeleti Hivatal) irányelve szerint egy egészséges felnőtt embernek napi 25 g ételmi rost bevitele ajánlott (FDA, 2014). Az **ételmi rost** elnevezés magában foglal minden olyan poliszacharidot, melyet a humán tápcsatorna saját enzimei többnyire nem, csak a vastagbél mikroflórája képes részben lebontani és amelyek fogyasztása táplálkozástani, illetve egészségügyi előnyökkel jár (Magyar Élelmiszerkönyv, Codex Alimentarius Hungaricus, 2008). Az ételmi rost főként növényi sejfalból származik. Fő

alkotóelemei a szénhidrátok, olyan poliszacharidok, amelyek kémiai és fizikai tulajdonságaikban igen különbözőek lehetnek. Gabonák esetén a rostot a cellulóz, valamint az öt szénatomszámú cukor monomerekből (pentozánok: arabinóz, xilóz, mannóz), azaz glükózból (glükánok) és fruktózból (fruktánok) felépülő szénhidrátok alkotják, de más sejtfalhoz kapcsolódó, nem emészthető összetevők is tartoznak az ételmi rost szélesebb definíciójába. Ilyenek a sejtfalalkotó fehérjék (extenzin), a kutin, a viasz, a polifenolok (a ligninen kívül), az észterkötött csoportok, mint az ecetsav és a fenolos savak, a fitinsav, valamint a szeretlen komponensek (Theander és Aman, 1979). Az ételmi rost komponensei főként a búzaszem külső rétegeiben találhatóak. Mennyiségük a búzaszemben 13–15%, a korpában/maghéjban 60%, az aleuron rétegben pedig 30–50% (Amrein és mtsai, 2003). Oldhatóságuk alapján megkülönböztetünk vízben oldható és oldhatatlan ételmi rostokat. Búzaszemben az oldható ételmi rost mennyisége 2–4% (Rakha, 2013). Az oldhatatlan ételmi rost fogyasztása segíti a bélmozgást, szabályozza az ételmiszer tartózkodási idejét a tápcsatornában, valamint a tápanyagok felszívódását, ezzel befolyásolva a glükóz felszívódását és a glikémiás indexet (Andersson és mtsai, 2009). Az oldhatatlan rost ezen felül megköti a karcinogéneket is. Egyes rostanyagoknak prebiotikus hatásuk van, mivel a vastagbélben részlegesen lebomlanak és a fermentáló baktériumok szaporodásához és hatékonyabb működéséhez járulnak hozzá. A fermentáció során rövid szénláncú zsírsavak keletkeznek, melyek felszívódása a koleszterinszint és a vércukorszint hatékonyabb szabályozásához járul hozzá. Az oldható rostok az epesavakhoz kötődve gátolják a vér koleszterinszintjének növekedését (Eastwood és Kritchevsky, 2005; Wong és mtsai, 2006). Ezen kívül, a glükóz abszorpcióját is csökkentik a vékonybélben, aminek köszönhetően kisebb lesz a vér inzulinszintje is étkezés után (Moore és mtsai, 1998; Lewis és Heaton, 1999). A vér alacsonyabb koleszterin- és cukorszintje közvetve csökkentheti a 2-es típusú diabétesz, továbbá az elhízás kialakulásának kockázatát.

A humán táplálkozásban a rostanyagbevitel fő forrásai a gabonafélék (Steer és mtsai, 2008). A búzaszem fő rostalkotó komponensei a sejtfalalkotó poliszacharidok, vagyis az arabinoxilán és az (1-3) (1-4)- β -D-glükán (β -glükán), melyek közül az első az endosperm összes sejtfalalkotó komponensének 70, míg a második azok 20%-át alkotja (Mares és Stone, 1973).

A **β -glükán**-molekulában található kémiai kötések eloszlása és a molekula tömege feltehetőleg egyaránt befolyásolják a molekula oldhatóságát, majd oldódás után az oldat viszkozitását (Cui és mtsai, 2000; Lazaridou és Biliaderis, 2007). Ezek a tulajdonságok alapvetően meghatározzák a β -glükán egészségügyi hatását (Wood, 2007). Egy csirkeetelési kísérletben például a β -glükán által előidézett nagy viszkozitás negatív hatással volt az állatok takarmányfogyasztására, emésztésére, súlygyarapodására, és az ürülékük ragacsossá vált (Hesselman és mtsai, 1981). Ezzel ellentétben, ha humán ételmiszerek előállításában gondolkodunk, a nagy mennyiségű oldható β -glükán-tartalom előnyös, mivel fogyasztásával csökken a vér koleszterinszintje, a vércukorszint szabályozása pedig kontrollálhatóbb lesz (McIntosh és mtsai, 1991; Cavallero és mtsai, 2002; Wood, 2007).

A búza **arabinoxilán (AX)** bomlástermékét – az arabinoxilán oligoszacharidokat (AXOS) – xilanázenzim-kezeléssel hozták létre, és e komponens egészségügyi hatásait vizsgálták széleskörűen (Swennen és mtsai, 2006). Kimutatták, hogy az AXOS a bélcsatornában részt vesz a fermentációs folyamatok szabályozásában, mivel a specifikus bifidobaktériumok szaporodását segíti elő, melynek következtében meghatározza az emberi gasztrointesztinális rendszer tulajdonságait is (Cloetens és mtsai, 2010; Maki és mtsai, 2012; François és mtsai, 2012). Az AXOS jelenléte javíthatja a glükóztoleranciát, valamint közvetve az inzulinérzékenységet is és fokozhatja a bélben a fermentáció mértékét (Johansson és mtsai, 2016; Scarpellini és mtsai, 2018). Csirkeetelési kísérletben a széklet bifidobaktérium-

tartalmának, míg patkányban a rövid láncú zsírsavak mennyiségének növekedését tapasztalták. Emberben az AXOS megnövekedett fogyasztása nem befolyásolta az emésztés hosszát vagy a székletürítést, de szignifikánsan nagyobb lett az N¹⁵-kibocsátás a székletben, mint a vizeletben, feltételezhetően a bélbaktériumok felszaporodása és azok metabolikus aktivitásának növekedése miatt (François és mtsai, 2012).

A **keményítő** alapvetően már a vékonybélben könnyen megemésztődik és megkötődik. Berry (1986) megállapította, hogy a keményítőnek van egy része, mely ellenáll az emésztésnek, azaz **rezisztens**. Az EURESTA (European FLAIR Concerted Action on Resistant Starch) az enzimeknek ellenálló, rezisztens keményítőt (RS) úgy definiálta, mint a keményítő és bomlástermékeinek azon részét, amely egészséges emberek esetén nem kötődik meg a vékonybélben, azonban részlegesen fermentálódhat a vastagbél mikroflórájának köszönhetően. A rezisztens keményítőnek négy típusát különböztetik meg (RS1-4) (Izd. 2.1.1). A nagy rezisztenskeményítő-tartalmú diéta az alacsony rezisztenskeményítő-tartalmú diétához képest csökkenti a vérérum koleszterinszintjét és a triglicerid-koncentrációt (De Deckere és mtsai, 1993; Ranhotra és mtsai, 1997). A rezisztens keményítő fogyasztása a glikémiás indexre is hatással lehet (Brown és mtsai, 1995). Emésztése csökkenti a bél pH értékét és növeli a széklet mennyiségét (Phillips és mtsai, 1995; Ranhotra és mtsai, 1991), mely egészségesebb bélműködésre utal. A keményítő viszkozitás szintén fontos az emészthetőség szempontjából. Csirkeetelési kísérletben kimutatták, hogy a kis amidotartalmú rizsszel etetett csirke étvágya nőtt, súlya gyarapodott, a bélzetében pedig kisebb volt a táplálék viszkozitása, mint a nagy amidotartalmú rizsszel etetett csirkék esetében (Pirgozliev és mtsai, 2010). Egy patkányetelési kísérlet eredményei szerint a 70%-ban amidot tartalmazó búzakeményítő (Regina és mtsai, 2006) növeli a bélsár tömegét, csökkenti a pH-t a bélben és növeli a rövid láncú zsírsavak termelését, mely minden rezisztens keményítő esetén jellemzően előfordul.

Szintén fontos annak vizsgálata, hogy a nagy amidotartalmú búza előnyös egészségügyi hatásai megmaradnak-e az élelmiszeripari feldolgozás folyamán. Hallström és mtsai (2011) szignifikánsan nagyobb rezisztenskeményítő-tartalmat találtak kenyérben, mint a teljes kiőrlésű búzában. Ezen felül megállapították, hogy a nagy amidotartalmú lisztből készült kenyér alacsonyabb étkezés utáni glükózválaszt indukált 120 percig, mint a fehér kenyér, azonban az inzulinválaszban nem volt szignifikáns különbség. Tárolás során a rezisztens keményítő mennyisége (mely arányos az amidotartalommal) fokozatosan emelkedett. A sütés és az autoklavozás (hő- és nyomáskezelés) szintén növelte a rezisztens keményítő mennyiségét mind a nagy amidotartalmú, mind a normál búzában (Yamamori és mtsai, 2006; Van Hung és mtsai, 2005).

2.6 A búzaszem komponenseinek hatása a feldolgozóipari tulajdonságokra

A **búzaminőség** komplex fogalom, mely alatt a búzaliszt alkalmasságát értjük különböző végtermékek (kenyér, tészta, keksz stb.) előállítására. Ez alapján a búza minőségét a nyersanyag őrési, kémiai és reológiai tulajdonságai, valamint a gyártási technológia egyaránt meghatározzák, illetve meghatározzák azt is, hogy milyen termék készülhet az adott búzafajtából. A búzára vonatkozó magyar szabvány az étkezési búza két nagy csoportját különbözteti meg: a javító és a malmi minőségű búzák csoportját. Ezen belül – a feldolgozóipar igényeinek megfelelően – több minőségi csoport létezik. Európában és Magyarországon a búzanemesítés kenyérbúza-centrikus. Megjegyzendő azonban, hogy tájegységenként/országoként különböző kenyértípusokat állíthatnak elő, melyek egyben más-más technológiai paramétereket is igényelnek. Így például – más országok kenyereihez és egyéb termékeihez viszonyítva – a magyar kenyér nagyobb dagasztási igényt, hosszabb

fermentációt és erősebb tésztát követel. A búzaliszt egy részét a tésztaiparban használják fel. Az itt támasztott minőségi követelmények a nedvessikér-tartalom és a reológiai tulajdonságok tekintetében nem olyan szigorúak, mint a kenyérgyártásnál, az őrlési technikának azonban annál nagyobb szerepe van a száraztészta gyártásához szükséges minőség kialakításában. A legfontosabb tulajdonságok, amelyeket figyelembe vesznek: a hamutartalom (mely nem lehet nagyobb 0,5%-nál) és a liszt szemcsemérete. A búza ritkább és speciálisabb felhasználását jelenti a búzasőr gyártása, melyhez alacsony fehérjetartalmú és alacsony esésszámú búzafajták használata szükséges.

A búza sütőipari minőségének meghatározásához a búza **tartalékfehérje** allélösszetételének és ezek abszolút mennyiségeinek, illetve relatív arányainak ismerete is szükséges (Marchylo és mtsai, 1989; Sutton, 1991; Seilmeier és mtsai, 1991). Számos kutató vizsgálta a glutenin és a gliadin alegységek arányának komplex hatását a tészta reológiai tulajdonságaira, nyújthatóságára (Uthayakumaran és mtsai, 2000a; Ahmad, 2000; Singh és mtsai, 1991). Eredményeik alapján megállapították, hogy a gliadintartalom növelése a tésztakialakulási idő (MT), a tésztarezisztencia (PR), a nyújtással szembeni maximális ellenállás (R_{max}), valamint a kenyértérfogot csökkenését eredményezi, miközben a tészta ellágyulása gyorsul, nyújthatósága pedig nő (Uthayakumaran és mtsai, 2001; Fido és mtsai, 1997).

A HMW és LMW gluteninek mennyiségi arányainak megváltoztatása az *in vitro* polimerek molekulatömeg-eloszlásában és a búza funkcionális tulajdonságaiban okoz változásokat. Beasley és mtsai (2001) szerint a HMW glutenin homopolimerekből felépülő tészta erősebb az LMW glutenin homopolimerekből felépülőnél. A glutenin alegységekkel végzett keverési és dagasztási vizsgálatokban a HMW:LMW arány növekedésével emelkedett az MT, PR, R_{max} , továbbá a kenyértérfogot értéke, míg az ellágyulás és a nyújthatóság csökkent (Uthayakumaran és mtsai, 2000b). Reoxidációs kísérletekkel is bizonyították, hogy a HMW glutenin mennyiségének növelése a sikérerősség javulását eredményezi (Schropp és Wieser, 1996; Wieser és mtsai, 1994a,b).

Számos kutatócsoport vizsgálta a HMW és LMW glutenin alegységek külön-külön és együttes jelenlétének hatását a funkcionális tulajdonságokra. Tanulmányozták a különböző alegységek szinergisztikus és additív hatásait *in vitro* módszerekkel, szisztematikusan változtatva a fehérjeösszetételt a búzalisztból kinyert tisztított fehérjekomponensek lisztbe történő adagolásával (Uthayakumaran és mtsai, 2002; Beasley és mtsai, 2002). Megállapították, hogy a Glu-D1-en kódolt HMW gluteninek (5+10) hatása a tészta tulajdonságaira szignifikánsan nagyobb, mint a Glu-B1-en kódolt alegységeké (17+18), valamint azt hogy a Glu-A1 által kódolt 1-es alegység befolyásolta a legkisebb mértékben a búzaliszt funkcionális tulajdonságait. HMW glutenin alegység-kombinációk esetében a 17+18 (Glu-B1) és 5+10 (Glu-D1) allélek együttes jelenléte szignifikánsan pozitívabb hatású volt a tésztaerősségre, mint akár a 20 (Glu-B1) és 2+12 (Glu-D1) allélek vagy keverékeik jelenlétének hatása. Békés és mtsai (1994 a,b) ellenőrzött reoxidációs eljárás mellett fehérjéket építettek be a Glu-D1 alegységeket eredetileg nem tartalmazó lisztbe. Tapasztalataik szerint az x- és y-típusú alegységek együttes beépítése szinergikus hatást gyakorolt a mixográfus tulajdonságokra. Uthayakumaran és mtsai (2000b) hasonló kísérleteket végeztek a Glu-1B lokuszról származó 7 és 8 alegységek beépítésére is. A Glu-D1 5 és Glu-D1 10 alegységek együttes beépítésekor tapasztalt szinergikus hatásokkal ellentétben a Glu-B1 7 alegység tésztaerősségre gyakorolt hatása nagyobb volt, mint akár a 8-as alegység, akár a 7+8 együttes beépítésekor tapasztalt hatások. Megfigyelések szerint az LMW gluteninek közül a Glu-A3c és Glu-B3b alléleket együttesen hordozó genotípusok szignifikánsan nagyobb extenzográfus R_{max} értékekkel rendelkeztek, mint a Glu-A3e és Glu-B3c alléleket együttesen hordozó fajták. Azokban az esetekben, amikor egy pozitív és egy

kevésbé pozitív hatású allél kombinálódott, az R_{max} a két szélsőérték között volt (Gupta és mtsai, 1994; Gupta és MacRitchie, 1994). Ugyancsak szignifikáns kölcsönhatásokat mutatott ki a Glu-1 és Glu-3 lokuszok között a szedimentációs értékre vonatkozóan Rodriguez-Ouijano és Carrillo (1996). Gupta és mtsai (1994) szerint a búzagenotípusok reológiai tulajdonságai megbecsülhetők a Glu-1 és Glu-3 alléllösszetételük alapján. Vizsgálataikban a Glu-1 lokusz 60%-ban, a Glu-3 lokusz 20%-ban, míg a lokuszkölcsönhatások 10%-ban járultak hozzá a tézstabilitásban mutatkozó különbségekhez. Az egyes Glu-1 és Glu-3 lokuszok közötti kölcsönhatások túlmutatnak a lokuszok additív viszonyain, azaz egy allél relatív hatását befolyásolja az is, hogy a többi lokuszon milyen allélek találhatók. A jelenlegi álláspont szerint a HMW gluteninek *in vivo* és *in vitro* körülmények között is erősen korrelálnak a tészta erősségével, míg az LMW gluteninek és a gliadinok a tészta nyújthatóságát határozzák meg (Shewry és mtsai, 2003a,b; Uthayakumaran és mtsai, 2002).

A **keményítő** összetétele és egyéb tulajdonságai szintén minőség-meghatározóak lehetnek. A waxy, azaz a kis amilóztartalmú búza eredetét, tulajdonságait és felhasználását széleskörűen tanulmányozták már (Abdel-Aal és mtsai, 2002; Graybosch és mtsai, 2003; Hayakawa és mtsai, 1997, 2004; Kiribuchi-Otobe és mtsai, 1997; Hung és mtsai 2006; Morita és mtsai, 2002; Nakamura és mtsai, 1995), de csak néhány tanulmány foglalkozik a nagy amilóztartalmú búza jellemzésével és használatával (Yamamori és mtsai, 2000; Morita és mtsai, 2002; Yamamori és mtsai, 2006; Vrinten és mtsai, 2012). A **nagy amilóztartalmú búzának** speciális tulajdonságai vannak. Köszönhetően a vele együtt járó megnövekedett rostanyag- és **rezisztenskeményítő- (RS)** tartalomnak, pozitív élettani hatással bír (Brown és mtsai, 2001; Slavin, 2002; Topping és Clifton, 2001), ezért ennek a típusnak a hatásait vizsgáljuk meg közelebbről.

A nagy amilóztartalmú búzaliszt önmagában gyenge tésztaerősséget és sütőipari minőséget eredményez (Morita és mtsai, 2002), azonban a normál liszt táplálkozástani értékét és funkcionális tulajdonságait javíthatjuk nagy amilóztartalmú búza lisztjének bekeverésével. Van Hung és mtsai (2005) szerint a kenyér térfogata és bélzetkeménysége nem változik meg szignifikánsan, ha maximum 50%-ban keverjük be a nagy amilóztartalmú lisztet, viszont a termék rostanyag- és rezisztenskeményítő-tartalmát szignifikánsan megnöveli. A Western Red Spring búzatípus lisztjének 50%-os bekeverése nagy amilóztartalmú liszttel olyan tészta előállítását eredményezte, amelynek a tulajdonságai a durumtésztáéhoz hasonlítottak (Morita és mtsai, 2003). Viszkozitási tulajdonságait tekintve a nagy amilóztartalmú lisztszuspenziót kis csúcsviszkozitás jellemez (Yamamori és mtsai, 2006; Park és mtsai, 2013), ami alkalmassá teszi „sárga lúgos metélt tészta” (yellow alkaline noodle) előállítására. Az RS ugyanakkor növeli az omlós kekszek morzsalékosságát és csökkenti a töréssel szembeni ellenállóságát (Laguna és mtsai, 2011). Az *sgp-1* mutáns búzatörzsek megemelkedett amilóztartalommal rendelkeznek (30,8–37,4%) a normál búzához képest, melynek következtében keményítőszemcséi deformáltak, az amilopektinláncainak mérete pedig DP11-25-re csökken. A röntgen krisztallográfia a keményítő csökkent kristályosságára, míg a DSC (Differential Scanning Calorimetry – differenciális pásztázó kalorimetria) eredményei az alacsonyabb gélesedési hőmérsékletre utalnak. Az *sgp-1* mutáns törzsek sütőipari minőségét is vizsgálták, amelyben a liszt nagyobb vízfelvételét ugyanakkor gyengébb, kevésbé stabil tésztát, továbbá kisebb kenyértérfogatot mértek (Morita és mtsai, 2002). Az RS mennyisége mindeközben 0,9%-ról 1,6, 2,6 illetve 3%-ra nőtt 10, 20 és 50% *sgp-1* null liszt bekeverésével, és a tárolás eredményeként további növekedést tapasztaltak (Hung és mtsai, 2005, 2006). Magas RS-tartalmú borsókeményítő adagolásával megállapították, hogy 20% arányú adagolás még nem befolyásolja negatív irányban a tészta tulajdonságait (Sanz-Penella és mtsai, 2010), ennél nagyobb mennyiség azonban csökkenti a kenyértérfogatot és növeli a kenyérbélzet keménységét (Ozturk és mtsai, 2009).

Rostkomponensek liszthez adagolásával igen változatosak lehetnek a tészta fizikai és reológiai tulajdonságai. Ezeket a tulajdonságokat befolyásolja a hozzáadott rostanyag forrása, valamint a rost tulajdonságai (pl. a molekula szubsztituáltságának mértéke), illetve maga a feldolgozási folyamat is hatással van rá (Rosell és mtsai, 2009). A rostok dagasztás közben kölcsönhatásba lépnek a siker–keményítő mátrixszal (Gan és mtsai, 1992) és versengés alakul ki e komponensek között a megköthető vízért (Rosell és mtsai, 2010; Skendi és mtsai, 2009). A rostkomponensek nagy vízmegkötő-képessége nagyobb farinográfus vízfelvételt eredményez, mely bizonyos mértékig előnyös a feldolgozóipar számára, mivel ugyanannyi lisztből több kenyeret tudnak előállítani (Izydorczyk és mtsai, 2008). Ezzel együtt a keményítő gélesedési tulajdonságai is megváltozhatnak (Santos és mtsai, 2008). A vízfelvétel mértékét a rost több tulajdonsága is befolyásolja, így például a rostok mérete, mivel a nagy rostmolekulák sokkal lassabban abszorbeálják a vizet, mint a kisméretűek.

Skendi és mtsai (2009) megállapították, hogy a nagyobb molekulatömegű β -glükán nagyobb vízfelvételt eredményez, mint a kis molekulatömegű. A liszt megnövekedett vízfelvételének köszönhetően a kenyérhéj ropogóssága csökken, ami viszont már nem kívánt kenyértulajdonság. Ezen kívül az oldható és oldhatatlan rost arányától szintén függ a liszt vízfelvétele (Katina és mtsai, 2003). Az oldható β -glükán által okozott nagy viszkozitás gondot okoz a maláta és a sör előállításakor, például a sörcefre szűrésében (Bamforth, 1982), vagy a megfelelő keményítőhozam elérésében a keményítőgyártás során.

A vízfelvételi kapacitáson kívül a liszt és a tészta egyéb tulajdonságai is megváltoznak a rost adagolásával. A bekevert búzakorpa mennyiségének növelésével például csökken a tészta nyújthatósága, míg a tésztakialakulási idő nő (Sudha és mtsai, 2007). A zabliszt részarányának növelésével viszont a tésztastabilitás csökken (Mariotti és mtsai, 2006). A korpával ellentétben, a nem keményítő poliszacharidok – mint az AX és a β -glükán – kis mennyiségű adagolása, szignifikánsan növeli a tészta dagasztással szembeni ellenállását és a stabilitását (Izydorczyk és mtsai, 2001). E polimerek mértékletes adagolása tehát alkalmas lehet gyengébb minőségű lisztek feljavítására, nagyobb mennyiségben azonban gyengébb dagasztási tulajdonságokat eredményeznek (Rosell és mtsai, 2010). A rostban gazdag lisztfrakció előhidratációja vagy enzimes kezelése azonban javíthatja a belőle készülő kenyér minőségét (Izydorczyk és Dexter, 2008).

A legegyszerűbb és leginkább elterjedt módja a fehér kenyér rostanyagtartalmának növelésére a **korpa liszthez keverése** (Bagdi és mtsai 2016; Bucsella és mtsai. 2016). A korpaadalék legfontosabb forrása a sütőiparban a búza (Sanz-Penella és mtsai, 2008) és a rozs (Katina és mtsai, 2007). Emellett az árpa- és a zabkorpa használata is egyre elterjedtebb, mivel nagy bennük az oldható rosttartalom, valamint a kevert kötésű β -glükán-tartalom. A korpa, mint adalék specifikus tulajdonságait elsősorban az oldhatatlanságának és a korpa szövetében található egyéb komponensek jelenlétének köszönheti. Zabkorpaadalékot például már sikeresen használtak számos termékben, de magas lipidtartalma korlátozza a használatát. Kenyér esetében maximum 20% zabkorpa adagolása eredményez még megfelelő textúrájú kenyeret, de klinikai vizsgálatoknál kísérleteztek már 55–60% bekeverésével is (Aman és mtsai, 2004). A 20% árpakorpa-adalékot tartalmazó kenyér 4,2-szer több rostanyagot és 7,6-szor több β -glükánt tartalmaz, mint a búzakenyér (Knuckles és mtsai, 1997). Korábbi tanulmányok azonban kimutatták, hogy a rostban gazdag frakció liszthez keverése növeli a tészta rugalmatlanságát vagy ragadósságát. Az ilyenfajta lisztből készült kenyérnek kisebb a kenyértérfogata, sűrűbb a kenyérbélzete, kevesebb légréssel, keményebb, de kevésbé ropogós héjjal rendelkezik, melynek következtében a fogyasztók nem részesítették előnyben (Ktenioudaki és Gallagher, 2012; Sivam és mtsai, 2010; Schmieles és mtsai, 2012). Ezen felül a termékek színe sötét, ízük pedig keserű vagy fanyar. Ez olyan egyéb komponensek jelenléte

miatt alakul ki, mint a fenolos komponensek, aminosavak, kis méretű peptidok, zsírsavak és cukrok (Heiniö és mtsai, 2016; Rakha, 2013; Moriarty és mtsai, 2011).

A korpa technológiai, táplálkozástani és élelmiszerbiztonsági tulajdonságai különböző **feldolgozóipari technológiákkal** javíthatók. A korpa szemcsemérete az egyik fontos minőség-meghatározó tényező a sütőipari és extrudált termékek előállításánál (Rodin és mtsai, 2011; Noort és mtsai, 2010; Zhang és Moore, 1999). Az őrlési technikák azonban ma már lehetővé teszik a szükséges ultrafinom őrlés előállítását (Paltakari és mtsai, 2012). Másik lehetőség a búzaszem külső 1–3%-ának koptatása, mely azon túl, hogy javítja a korpa érzékszervi tulajdonságait (Hemery és mtsai, 2010), biztonságosabbá is teszi az élelmiszert, mivel eltávolítja a mikrobákat, mikotoxinokat, nehézfémeket és a peszticideket. Eredményül egy aleuronban gazdag frakciót kapunk, mely gazdag forrása az egészségre jótékony hatású komponenseknek (Behrens és Bohm, 2004; Hemery és mtsai, 2011).

Megfigyelték továbbá, hogy a fermentáció – például a koptatott rozs szemekből őrlött korpafrakció tejsavbaktériumok általi fermentációja – javítja a sütőipari minőséget (Katina és mtsai, 2007). A fermentáció ugyanis csökkenti a tészta pH-ját, ami aktiválja a rozs sejtfalbontó enzimeit. Az élesztő, a tejsav starterkultúra és a sejtfalbontó enzimek (xilanáz, oxidatív enzimek) alkalmazása ezért alkalmas módszerek a sütőipari minőség javítására (Katina és mtsai, 2012; Gül és mtsai, 2009; Laurikainen és mtsai, 1998).

A rostanyag-molekulák mérete szintén fontos minőség-meghatározó tulajdonság. Enzimes módszerrel csökkenhető például a β -glükán- vagy az AX-molekulák mérete, melynek eredményeként csökken a belőle készített oldat viszkozitása (Zheng és mtsai, 2004; Broekaert és mtsai, 2010) és ezért javul az alkalmazása különböző italok készítésére.

A feldolgozóipari folyamatok is hatással vannak a rostanyagok tulajdonságaira. A kenyérfőzés összességében csökkenti a rostanyagtartalmat és a rostok molekulatömegét, ugyanakkor az oldható AX mennyiségét növeli (Trogh és mtsai, 2004; Andersson és mtsai, 2009). A dagasztás és a sütőipari enzimek adagolása is növeli az AX oldhatóságát, ugyanakkor maga a sütési folyamat csökkenti azt. A fő rostkomponensek közül a β -glükán a legérzékenyebb a feldolgozóipari folyamatokra. A dagasztás, a fermentáció és a kenyérfőzés csökkenti a molekulatömegét, de növeli az oldhatóságát (Aman és mtsai, 2004; Andersson és mtsai, 2004).

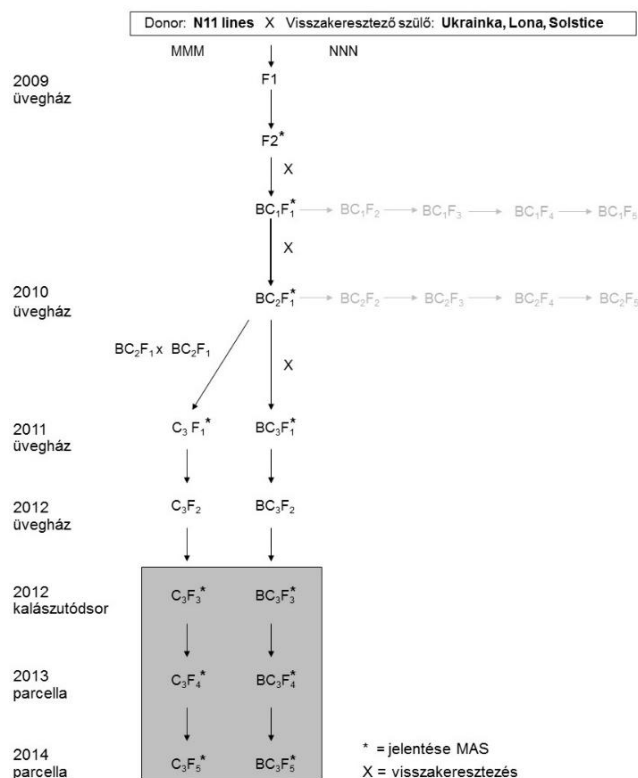
A keményítő egyéb tulajdonságai közül a keményítő sérülése szintén hatással lehet a feldolgozóipari minőségre. A keményítősérülés mértékét több tényező is meghatározza, így például a búzaszem keménysége vagy az őrlés technikája (Rakszegi és mtsai, 2010b).

3 ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

3.1 Növényi anyagok és kísérleti körülmények

3.1.1 Nagy amilóztartalmú búzatörzsek előállítása

Az N11 búzapopulációból a University of Tuscia egyetemen olyan vonalakat szelektáltak, melyek mindhárom SGP-1 (*Sgp-A1B1D1 null*) allélra mutánsak voltak (Hallström és mtsai, 2011). Ezeket három regisztrált búzafajtával, az 'Ukrainka', 'Lona' és 'Solstice' fajtákkal kereszteztük az Agrártudományi Kutatóközpontban (8. ábra). Három vissza-keresztezést végeztünk úgy, hogy minden visszakeresztezés előtt molekuláris markerszelekción (Shimbata és mtsai, 2005) alkalmaztunk populációnként megközelítőleg 300 növényen (380, 324 illetve 223 növény). Csak azokat a törzseket kereszteztük vissza az apai szülőkkel, amelyeknek mindhárom allélja mutáns volt. Az F₁ generáció visszakeresztezése meghiúsult a szülői genotípusok virágzási idejének eltérése miatt, így az F₂ generációt (amelyben már megjelentek homozigóta mutáns törzsek egy vagy több allélra) kereszteztük vissza (létrehozva a BC₁F₁ generációt), majd ezt még két további visszakeresztezés követte. A mindhárom allélra mutáns genotípusok megjelenésének felgyorsítása érdekében néhány törzset a BC₂F₁ generációból (BC₂F₁ × BC₂F₁ = C₃F₁) szintén összekereszteztük egymással. A búzaszemek felszaporítása után a szimpla, dupla és tripla mutáns és/vagy heterozigóta BC₃F₃ és C₃F₃ törzseket kalászatúdsorokban vetettük el a tenyészertben. Ezt követően a szelekció az agronómiai tulajdonságok és az amilóztartalom alapján történt.



8. ábra. A kísérleti anyagok keresztezési diagramja és a markerszelekció lépései. (M – mutáns, N – normál, MAS – molekuláris markerszelekció, BC – visszakeresztezés).

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.

3.1.2 Nagy arabinoxilán-tartalmú búzatörzsek előállítása

Az EU FP6 HEALTHGRAIN projekt során azonosítottunk egy kínai búzafajtát – az 1988-ban forgalomba hozott ‘Yumai-34’-et –, melynek lisztje kiemelkedően nagy mennyiségben tartalmazza a teljes és a vízoldható arabinoxilán-komponenseket (TOT-AX és WE-AX) (Gebruers és mtsai, 2008). A nagy AX-tartalom és a jó sütőipari minőség kombinálása céljából keresztezéseket végeztünk a ‘Yumai-34’, valamint négy, az európai környezeti körülményekhez jól adaptálódó fajta és egy törzs között (‘Lupus’, ‘Mv-Mambo’, ‘Mv-Emese’, ‘Ukrainka’ és 1061-26). A 1061-26-el létrehozott kombinációt még egyszer visszakereszteltük a ‘Yumai-34’-el. A keresztezéshez használt fajtáknak optimális a növényfejlődése, jó az abiotikus stressztoleranciája (fagyállóság, kalászban csírázás) és nagy a termése. Az F₂ szegregáló populáció kalászeit kalászutódsoros formában vetettük el az F₃ generációban. A szelekciót az agronómiai tulajdonságok alapján végeztük valamennyi generációban, továbbá azonosítottuk azokat a törzseket, melyek vízoldható (WE) pentozántartalma (melynek fő komponense az AX) nagy volt a lisztben. Többéves szelekció után 36, az átlagosnál nagyobb WE-pentozántartalmú és jó agronómiai tulajdonságokkal rendelkező törzs (kilenc ‘Lupus’/‘Yumai-34’, egy ‘Mv-Mambo’/‘Yumai-34’, tizennégy ‘Ukrainka’/‘Yumai-34’, egy ‘Mv-Emese’/‘Yumai-34’, tizenegy 1061-26/‘Yumai-34’) tulajdonságait vizsgáltuk az F₇–F₁₁ generációkban (2013–2017). Kontrollként a szülői genotípusokat használtuk (‘Yumai-34’, ‘Lupus’, ‘Mv-Mambo’, ‘Mv-Emese’ és ‘Ukrainka’). Ezen kívül az egyik hivatalos, NÉBIH (Nemzeti Élelmiszerlánc-biztonsági Hivatal) fajtakontrollt, az ‘Mv-Nádort’ is felhasználtuk a termésösszehasonlító kísérletben.

Időjárás és termesztési körülmények a nagy amilóz- és arabinoxilán-tartalomra történő nemesítés vizsgálati éveiben

A 2013–2017-es években a termőhely az Agrártudományi Kutatóközpont, Mezőgazdasági Intézetének martonvásári telephelye volt (szélesség: 47° 21' N; hosszúság: 18° 49' E; tengerszint feletti magasság: 150 m). A hatsoros parcellák 2,5 m hosszúak voltak 20 cm-es sortávval. A kísérlet harmadik évében a törzseket 6 méteres, három ismétléses, random blokk elrendezésű, teljesítmény-összehasonlító kísérletben vetettük el. A talaj csernozjom típusú, agyagos szerkezetű, 7,25 pH-jú volt. Az elővetemény repce (2011/2012), olajretek (2012/2013 és 2013/2014) és facélia (2014/2015, 2015/2016 és 2016/2017) volt. A parcellákat minden évben gyomirtószerral (4 L/ha U-46 D-fluid SL 500 g/L 2-metil-4-klór-fenoxi-ecetsav-tartalommal; 40 g/ha Granstar 50 SX 50% tribenuron-metil-tartalommal), rovarölőszerral (0,2 L/ha Karate Zeon 5CS, 50 g/L λ-cihalotrin-tartalommal) és gombaölővel (először: 1 L/ha Amistar Extra, 200 g/L azoxistrobin- és 80 g/L ciprokonazol-tartalommal, másodszer: 1 L/ha Cherokee, 50 g/L ciprokonazol-, 62 g/L propikonazol- és 375 g/L klorotalonil-tartalommal) kezelték. A termesztési körülményeket a 9. táblázat tartalmazza.

A 2011/2012 és a 2014/2015 évjáratokban a nyár nagyon forró és száraz volt alacsony téli minimum hőmérséklettel, míg a 2013/2014-es évjárat mérsékelt hőmérsékletéhez nagy mennyiségű aratás előtti csapadék társult. A 2012/2013-as évjáratot igen meleg nyár jellemezte, extrém kis mennyiségű aratás előtti (100 nap) csapadékmennyiséggel. A kumulált csapadékösszeg két évben érte el a környéken átlagosan jellemző 500 mm-es értéket: a 2015/2016 és a 2017/2018 évjáratokban. Ezekben az években télen 72 és 80 nap volt azon napok száma, amikor a hőmérséklet fagypontra esett. A 2016/2017-es évjáratot az

előzőeknél még több hideg téli nap és az átlagosnál kisebb mennyiségű csapadék jellemezte. A 2018/2019-es év átlagosnak tekinthető az aratást megelőző 100 napban hullott nagyobb mennyiségű csapadékkal (10. táblázat).

9. táblázat. Termesztési körülmények (Martonvásár, 2010–2019).

| Termesztési körülmények | | |
|-------------------------|--|-------------------------|
| Termőhely | Földrajzi koordináták | 47.3N, 18.8E |
| | Magasság | 115 m |
| Termesztési körülmények | Vetés sűrűsége, csíraszám | 550 szem/m ² |
| Talaj tulajdonságai | Talaj típusa | csernozjom |
| | PH (KCl) | 7,25 |
| | Humusz (m/m %) | 2,8 |
| | P ₂ O ₅ (mg/kg) | 210 |
| | K ₂ O (mg/kg) | 210 |
| | Éves átlagos N bevitel NPK komplex trágya (aktív hatóanyag, kg/ha) | 120 |

3.1.3 Szárazság- és hőstressz hatásának vizsgálatához használt növényi anyag és termesztési körülmények

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 terméspotenciáljáról, valamint jó malom- és sütőipari minőségéről ismert. Az 'Mv Magma' középkésői érésű, kenyérfőzésre alkalmas malmi minőségű fajta, jó betegségellenállósággal és fagyállósággal.

A növényeket Conviron 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 hétig tartó, 4 °C-os vernalizáció után a növényeket a stresszkezelés kezdetéig kontrollált hőmérsékleten neveltük T2NY2 klímaprogrammal (Tischner és mtsai, 1997). A kísérlet négy kezelésből állt: kontroll (C), hőstressz (H), szárazságstressz (D), és hő+szárazságstressz (H+D). Minden fajtából összesen 16 cserépünk volt kezelésként négy cseréppel, minden cserépben négy növénnyel. A kezelés a kalászás utáni 12. napon kezdődött (Zadoks-75 fejlődési stádiumban, Tottman és Makepeace, 1979; Zadoks és mtsai, 1974) és 15 napig tartott. A hőmérséklet a kontroll kamrában 24/20 °C volt (nappali/éjszakai, fokozatosan növekvő 12,5-16,0 órás nappalhosszal mellett) (Tischner és mtsai, 1997). A hőstresszkezelés 16 órás nappalhosszal történt és naponta 8 órán át tartott 35/20 °C (nappali/éjszakai) hőmérséklet mellett. A talajnedvességet a természetes nedvesség 60–70%-ára állítottuk (NWC, a talaj természetes vízkapacitása jelenti a 100%-ot) a kontroll kísérletben, míg 40–45%-ra a szárazságstressz-kezelésnél. A vizet tömeg alapon adagoltuk. A fényintenzitást 350 μmol/m²/s-ra állítottuk a stresszkezelés alatt.

10. táblázat. Időjárási körülmények vetéstől aratásig (október 10.–július 15.) és elővetemény (Martonvásár, 2012–2019).

| | | 2011/2012 | 2012/2013 | 2013/2014 | 2014/2015 | 2015/2016 | 2016/2017 | 2017/2018 | 2018/2019 |
|----------------|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| teljes szezon | Termesztési időszak napjainak száma | 272 | 273 | 268 | 276 | 271 | 288 | 282 | 279 |
| | Kumulált csapadékösszeg (mm) | 236,1 | 347,0 | 348,9 | 287,5 | 518,0 | 254,7 | 494,5 | 365,6 |
| | Átlaghőmérséklet (°C) | 8,87 | 9,13 | 10,44 | 10,01 | 9,15 | 8,30 | 9,67 | 9,37 |
| | Abszolút minimum hőmérséklet (°C) | -22,60 | -13,00 | -11,80 | -15,40 | -14,10 | -20,70 | -20,20 | -14,40 |
| | Abszolút maximum hőmérséklet (°C) | 37,6 | 37,30 | 33,80 | 36,10 | 34,50 | 35,60 | 32,00 | 36,00 |
| utolsó 100 nap | Kumulált csapadékösszeg az utolsó 100 napban (mm) | 146,00 | 102,60 | 202,60 | 115,50 | 233,10 | 125,30 | 189,70 | 225,00 |
| | Átlaghőmérséklet az utolsó 100 napban (°C) | 17,88 | 19,08 | 18,33 | 18,80 | 16,97 | 17,10 | 19,39 | 17,08 |
| | Abszolút minimum hőmérséklet az utolsó 100 napban (°C) | -5,20 | 4,90 | 2,60 | 0,20 | -1,50 | -0,60 | 2,60 | -0,70 |
| | Abszolút maximum hőmérséklet az utolsó 100 napban (°C) | 37,60 | 37,30 | 33,80 | 36,10 | 34,50 | 35,60 | 32,00 | 36,00 |
| absz. min-max | Napok száma, ha $T_{min} \leq 0$ (°C) | 104 | 93 | 71 | 82 | 72 | 95 | 80 | 90 |
| | Napok száma, ha $T_{min} \leq -10$ (°C) | 9 | 5 | 1 | 3 | 7 | 14 | 3 | 6 |
| | Napok száma, ha $T_{max} \geq 25$ (°C) | 51 | 57 | 54 | 53 | 43 | 49 | 68 | 42 |
| | Napok száma, ha $T_{max} \geq 30$ (°C) | 24 | 23 | 18 | 27 | 10 | 17 | 8 | 16 |
| | Napok száma, ha $T_{max} \geq 35$ (°C) | 7 | 7 | 0 | 4 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| | Elővetemény | repce | olajretek | olajretek | facélia | facélia | facélia | facélia | olajretek |
| | Amilóznesítés fő vizsgálati évei | | | | | | | | |
| | Arabinoxilán-nemesítés fő vizsgálati évei | | | | | | | | |
| | Aegilops fajok tenyészkerti vizsgálata | | | | | | | | |

kék – sok csapadék vagy alacsony hőmérséklet, rózsaszín – magas hőmérséklet vagy szárazság, absz. – abszolút

3.1.4 Vad fajok hasznosítása a beltartalmi értékek növelésére és/vagy stabilitásának megőrzésére

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 (Dr. Bernd Friebe, Kansas State University, Manhattan, Kansas) és néhány búza ('Mv9kr1' vonal) / *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* vonal hordozza a *Kr1* és *Kr2* recesszív keresztezhetőségi alléleket, miközben a genotípus genomja 93,75%-ban megegyezik az 'Mv9' genomjával (Molnár-Láng és mtsai, 1996).

Az *Ae. geniculata* és *Ae. biuncialis* génbanki tételeket a Gabona Génbank, Martonvásár (MvGB), a Wheat Genetics Resource Center, Kansas State University, USA (TA), valamint az Institute of Plant Genetics and Crop Plant Research, Gatersleben, Németország (AE) bocsátották rendelkezésünkre, majd a gabonaszemeket a Gabona Génbank, Martonvásár tartotta fenn.

Üvegházi kísérletek

A gabonaszemeket nedves szűrőpapíron, Petri-csészében csíráztattuk 3 napig szobahőmérsékleten, majd Jiffy7 tápkockába ültettük (www.jiffygroup.com). Az 5 napos csíráztatott növényt 6 héten át 4 °C-on, alacsony fényintenzitáson (20 μmolm⁻²s⁻¹) vernalizáltuk, majd cserépekbe, kerti talaj, komposzt és homok 3:2:1 arányú keverékébe ültettük (1 növény/2 literes cserép). A növényeket random elrendezésben elhelyezve üvegházban (Global Glasshouse Venlo) neveltük 12 hétig. A kiültetés utáni második héttől 10 naponta, 4 alkalommal trágyáztuk a növényeket 150 mL 0,1%-os (g/v) komplex műtrágyával, mely 14% N-t, 7% P₂O₅-t, 21% K₂O-t, 1% Mg-t és 1% mikroelemet (B, Cu, Mn, Fe, Zn) tartalmazott (Volldünger Classic, Gartenhilfe GmbH, Ausztria). A termesztési körülmények a következők voltak: az érésig 12 hét alatt a kezdeti 11/7 °C nappali/éjszakai hőmérséklet és a 13 órás nappalhossz fokozatosan emelkedett 23/17 °C nappali/éjszakai hőmérsékletre és 16 órás nappalhosszra (16 óra fény/8 óra sötétség). A termesztési körülmények és a növények vízellátása minden növénynél azonos volt. A növényeket rendszeresen öntöttük és 30–35% átlagos talajnedvesség-tartalmat (VSMC) állítottunk be, melyet HH2 nedvességmérővel kontrolláltunk (Delta-T mérőeszköz SM-100 szenzor, Delta-T Devices Ltd., Cambridge, Egyesült Királyság). Üvegházi kísérletekben 10 növény szemtermését arattuk minden genotípus esetén, melyből 3 vagy 4 növény szemtermését tekintettük egy biológiai ismétlésnek.

Tenyéskerti kísérletek

Az *Aegilops*, a búza–*Ae. geniculata* és a búza–*Ae. biuncialis* addíciós vonalakat és ezek szülői genotípusait szántóföldi körülmények között csernozjom talajon vetettük el a martonvásári tenyészkertben (2012/2013), majd a növényeket „low-input” termesztési körülmények között neveltük fel (műtrágya, gyomirtószer, rovarirtószer és gombaölőszert alkalmazása nélkül). Az adott szezonban (október és július között) a termesztési körülményeket 387,5 mm összcsapadék-mennyiség és 8,0 °C átlaghőmérséklet jellemezte (Mikó és mtsai, 2014).

3.2 Módszerek

3.2.1 Őrlés

A teljes gabonaszem beltartalmi vizsgálatához minden mintából 50 g szemet őrltünk le Perten Laboratory Mill 3100 malommal (0,5 mm szitaméret mellett), majd a teljesőrleményt azonnal lehűtöttük és $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on tároltuk. Ennél is kisebb mintamennyiségek esetén (pl. üvegházi kísérletek) minden mintából 4 g szemet őrltünk le teljesőrleménnyé Retsch Mixer Mill MM 400 golyós malommal. Az így keletkezett teljesőrleményt $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on tároltuk a laboratóriumi vizsgálatokig. A liszt jellemzőinek és a tézta reológiai tulajdonságainak vizsgálatához mintánként 500–800 g szemet kondicionáltunk 15,5% nedvességtartalomra, majd a lisztet Chopin CD1 labormalommal állítottuk elő. Kisebb mintamennyiségek esetén minden mintából 100 g szemet őrltünk Brabender Junior labormalommal és az így kapott lisztfrakciót vizsgáltuk.

3.2.2 A búzaszem fizikai tulajdonságainak vizsgálata

Mértük a hektolitersúlyt (TW, g/100 liter) (Foss Tecator 1241), az ezerszemtömeget (TKW, g/1000 szem) (MSZ 6367/4-86, Budapest: Magyar Szabadalmi Hivatal, 1986) és a szemkeménység indexet (HI) (AACC method 55-31, Perten SKCS 4100). Minden mintából két párhuzamos mérést végeztünk.

3.2.3 Beltartalmi tulajdonságok vizsgálata

Fehérje-összetevők

A nyersfehérje tartalmat Kjeldahl módszere alapján határoztuk meg az ICC 105/2 szabványnak (1995) megfelelően Kjeltec 1035 Analyzer készülékkel. Minden mintából két párhuzamos mérést végeztünk. A sikértartalmat és a siker indexet (GI) Glutomatic 2200 készülékkel határoztuk meg (ICC 137/1, 155, 1995). A sikerterületet az MSZ 6369/5-87 (1987) magyar szabvány szerint mértük. Ez a paraméter a minták proteolitikus aktivitásáról ad információt azáltal, hogy a sikérgolyó átmérőjének változását méri szobahőmérsékleten, egy óra leforgása alatt.

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). Tíz mg lisztet szuszpendáltunk 1 ml 0,5% (w/v) SDS-t tartalmazó foszfát pufferben (pH 6,9) és 15 mp-ig szonikáltuk. Centrifugálás után a felülúszót 0,45 μm PVDF szűrőn szűrtük. Az elválasztást Phenomenex BIOSEP-SEC 4000 oszlopon végeztük acetonitril pufferben (0,1% [v/v] triflórecetsav-tartalmú acetonitril:víz [50:50 arányú] elegyével), 10 perc futtatási idővel, 2 ml/perc áramlási sebesség mellett. A fehérjék abszorbanciáját 214 nm-en detektáltuk.

Szénhidrát-összetevők

A keményítő- és amilóztartalom meghatározása

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

A β -glükán mennyiségi meghatározása

A kevert kötésű β -glükán teljes mennyiségét teljesórleményben a Megazyme módszerével (Megazyme, Bray, Írország) (ICC Standard No 166, AACC Method 32-23) határoztuk meg. Minden mintából két párhuzamos mérést végeztünk. A mintákat szuszpendáltuk és 6,5-ös pH-jú pufferoldatban hidrolizáltuk, majd tisztított licsenáz enzimmel inkubáltuk és leszűrtük. Az oldat egy részét tovább emésztettük β -glükózidáz enzimmel. Az így keletkező D-glükózt glükóz oxidáz/peroxidáz reagenssel (GOPOD) mutattuk ki.

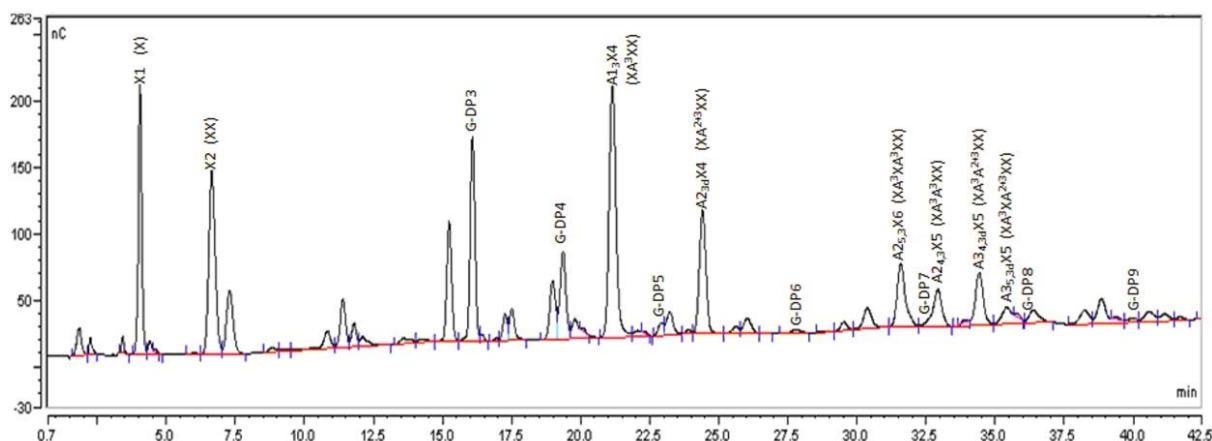
A teljes és a vízoldható pentozánok mennyiségi meghatározása

A pentozánok – melyeknek az AX a fő összetevő komponense – teljes és vízoldható frakciójának mennyiségét kolorimetriás módszerrel határoztuk meg Douglas (1981), valamint Finnie és mtsai (2006) módszere szerint. 12,5 ml Milli-Q vizet adtunk 62,5 mg liszthez, majd összeráztuk. A szuszpenzió 0,5 ml-ét vízzel hígítottuk 1 ml-re és hozzáadtunk 5 ml frissen készített extrakciós oldatot (93,2% [v/v] ecetsav, 1,69% [v/v] HCl, 0,85% [w/v] floroglucinol és 0,017% [w/v] glükóz). A mintát tartalmazó csöveket 25 percre forrásban levő vízfürdőbe helyeztük, a minták abszorpcióját lehűlés után mértük 552 és 510 nm-en (TOT-pentozán). A liszt-víz szuszpenzió többi részét 30 percig ráztuk, hogy meghatározzuk a vízoldható pentozán mennyiségét (WE-pentozán). A szuszpenziót ezután 10 percig 2500g-n centrifugáltuk, majd a felülúszó 0,5 ml-ét vízzel 1 ml-re hígítottuk és ehhez 5 ml extrakciós oldatot adtunk hozzá. A mintákat ezután 25 percig forraltuk vízfürdőben, majd kihűlés után 552 és 510 nm-en mértük le a minták abszorbanciáját. A pentózkoncentrációt az ismert koncentrációjú D-(+) xilóz standard oldatok abszorbanciájának ismeretében határoztuk meg. Minden mintából két párhuzamos mérést végeztünk.

Az AX és a β -glükán enzimes ujjenyomatának meghatározása

Az AX és a β -glükán enzimes elbontásával keletkező „ujjenyomatot” Ordaz-Ortiz és mtsai (2004, 2005) módszerével határoztuk meg. 1 ml 80%-os (v/v) etanolt adtunk 100 mg liszthez, majd 5–10 percre 95 °C-os vízfürdőbe tettük az enzimek inaktiválása céljából. Centrifugálás után a maradékot 80%-os, majd 95%-os (v/v) etanollal mostuk és Speedvac vákuum-centrifugában szárítottuk. A megszáritott port felvettük 1 ml 16U endoxilanáz (Megazyme, *Trichoderma viride*, Xylanase M1, Bray, Írország) és 2U licsenáz (Megazyme) enzimet tartalmazó vízben és folyamatos keverés mellett 40 °C-on 16 órán át inkubáltuk. Centrifugálás után az enzimek inaktiválása céljából a felülúszó 0,6 ml-ét 10 percre 95 °C-os vízfürdőbe tettük. Újabb centrifugálás után a mintákat 0,45 μ m Millex-HV fecskendőszűrőn szűrtük. A mintákat vízzel hússzorosára hígítottuk, majd HP-AEC (nagyhatékonyságú anioncserélő kromatográfia) módszerrel, Carbopac PA1 analitikai oszlopon (4 \times 250 mm) választottuk el (Ordaz-Ortiz és mtsai, 2004, 2005) (9. ábra). Az AX oligoszacharidok (AXOS) közül az arabinóz szubsztitúció nélküli, valamint a mono- és di-szubsztituált xilózegységek arányát, valamint a β -glükán DP3 és DP4 egységeinek arányát a görbe alatti területekből számoltuk (Saulnier és mtsai, 2009; Toole és mtsai, 2010) az alábbiak szerint:

monoszubsztituált (M) = $(XA^3XX) + 2(XA^3A^3XX) + 2(XA^3XA^3XX) + (XA^3A^{2+3}X) + (XA^3XA^{2+3}XX)$, diszubsztituált (D) = $(XA^{2+3}XX) + (XA^3A^{2+3}X) + (XA^3XA^{2+3}XX)$, nem szubsztituált (US) = $X + XX + XXX$ és összes (TOT) = $X + XX + XXX + XA^3XX + XA^3A^3XX + XA^3XA^3XX + (XA^{2+3}XX) + (XA^3A^{2+3}XX) + (XA^3XA^{2+3}XX)$ AXOS.



| Ordaz-Ortiz et al. 2004* | Saulnier et al. 2009** | DP |
|-------------------------------|--------------------------------------|-----------|
| Arabinoxylan fragments | | |
| X1 | X | DP1 |
| X2 | XX | DP2 |
| A1 ₂ X3 | XA ² X | DP4 |
| A1 ₃ X4 | XA ² XX | DP5 |
| A2 _{3,4} X4 | XA ²⁻³ XX | DP6 |
| A2 _{4,3} X5 | XA ² A ³ XX | DP7 |
| A2 _{5,3} X6 | XA ² XA ³ XX | DP8 |
| A3 _{3,4} X5 | XA ² A ²⁻³ XX | DP8 |
| A3 _{5,3,4} X5 | XA ² XA ²⁻³ XX | DP9 |
| β-glucan fragments | | G-DP3-DP9 |

***X: d-Xylp (xylose residue of the β-(1,4)-linked backbone),
 A²: α-l-Araf-(1→2)-β-d-Xylp,
 A³: α-l-Araf-(1→3)-β-d-Xylp,
 A²⁻³: α-l-Araf-(1→2)-[α-l-Araf-(1→3)]-β-d-Xylp,
 G-DP3: 3-O-β-cellobiosyl-d-glucose,
 G-DP4: 3-O-β-cellotriosyl-d-glucose,
 G-DP5: 3-O-β-cellotetraosyl-d-glucose.

*Ordaz-Ortiz, J.J., Guillon, F., Tranquet, O., Dervilly-Pinel, G., Tran, V., Saulnier L. (2004). Specificity of monoclonal antibodies generated against arabinoxylans of cereal grains. *Carbohydrate Polymers* 57, 425–433

**Saulnier, L., Robert, P., Grintchenko, M., Jamme, F., Boudhet, B., Guillon, F. (2009). Wheat endosperm cell walls: Spatial heterogeneity of polysaccharide structure and composition using micro-scale enzymatic fingerprinting and FT-IR microspectroscopy. *Journal of Cereal Science* 50, 312–317.

***Fauré, R., Courtin, C.M., Delcour, J.A., Dumon, C., Faulds, C.B., Fincher, G.B., et al. (2009). A brief and informationally rich naming system for oligosaccharide motifs of heteroxylans found in plant cell walls. *Aust. J. Chem* 62, 1–5.

9. ábra. A búzaliszt xilanáz és licsenáz emésztéssel kapott bontási termékeinek elválasztása HP-AEC-PAD módszerrel (y axis: PAD response [μ V]; x axis: Time [min]).

3.2.4 A tészta tulajdonságainak vizsgálata

A tészta tulajdonságait Brabender Farinográfval, ICC 115/1 (1995) standard módszerrel határoztuk meg (vízfelvétel, tésztakialakulási idő, tésztastabilitás, tésztaellágyulás). A sűrűségiindexet az ICC 155 szabvány (1995) szerint számoltuk, míg a kenyértérfogattal összefüggő Zeleny-féle szedimentációs értékét az ICC116/1 (1997) módszerével, SediCom System készülékkel mértük (BMGE fejlesztés, LabIntern Kft. gyártás, Tömösközi és mtsai, 2009)

A liszt szuszpenzió gélesedés közbeni viszkozitásváltozásait adott hőmérsékletprofil mellett Rapid Visco Analyser (RVA-3D, Newport Scientific Pty. Ltd., Warriewood, NSW, Ausztrália) készülékkel határoztuk meg. A mérések ismételtetősége ± 5 RVU volt. A 20 perces hőmérsékletprofil egy 2 perces tartási szakasszal kezdődik 50 °C-on, majd 6 perc egyenletes felfűtés után egy 4 perces tartási szakasz kezdődik 95 °C-on. Ezután 4 perc egyenletes hűtést követően ismét 50 °C-os tartás következik 4 percig (AACC 76-21, Batey és mtsai, 1997). Az enzimek hatásának kizárása érdekében enziminhibitorként ezüst-nitrátot használtunk (Merck, 101510, 12 mM).

3.2.5 DNS-alapú markerszelekció és szekvenciaelemzés

Markerszelekció

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.

DNS-szekvencia elemzése az *Aegilops* fajok beltartalmi komponenseinek azonosításához és jellemzéséhez

Az *Ae. umbellulata* ($2n=2x=14$, UU) (génbanki szám: AE740/03) 1U, 2US, 2UL, 3U, 4U, 5U, 6U, 7U és 7UL mitózisos kromoszómáit áramlásos osztályozással (flow sorting technikával) tisztították (Molnár és mtsai, 2016). Minden kromoszóma három mintájából amplifikálták a DNS-t Illustra GenomiPhi V2 DNA Amplification Kit felhasználásával (Šimková és mtsai, 2008), majd az előírt protokoll szerint szekvenálták a mintákat HiSeq 2000 (Illumina, Inc., San Diego, USA) készüléken. A szekvenciaadatok feldolgozására MaSuRCA assembler-t (Zimin és mtsai, 2013) használtak, és a 200bp-nál rövidebb kontigokat eltávolították. Az Illumina leolvasások, valamint a kigyűjtött kontigok adatbázisa nyilvánosan elérhető az IEB, Olomouc honlapján (http://olomouc.ueb.cas.cz/projects/Aegilops_umbellulata). A búzaszem tartalékfehérje-, β -glükán- és arabinoxilán-tartalmát és -összetételét meghatározó fő gének és allélek szekvenciáit nyilvánosan elérhető adatbázisokból töltöttük le (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/>; <http://plants.ensembl.org/>; Schreiber és mtsai, 2014) majd ezeket használtuk BLAST kereséshez az *Ae. umbellulata* kromoszómaszekvenciáit tartalmazó adatbázisban. Azokat az első legjobb találatokat tekintettük szignifikánsnak, ahol legalább 75% szekvenciaazonosságot és legalább 200 bp-nyi szekvenciailleszkedést találtunk. Ezeket a szekvenciákat használtuk annak meghatározására, hogy a fő gének mely kromoszómán helyezkednek el az *Ae. umbellulata* U genomján.

3.2.6 Statisztikai elemzések

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 kromatográfiás 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 variancia analízist (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 érdekében 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 termésadatait 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 fix 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. A 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).

4 EREDMÉNYEK

4.1 Nagy amilóztartalmú búza genotípusok előállítása és jellemzése

Az alacsony amilóztartalmú, azaz waxy búza eredetét, tulajdonságait és felhasználását széleskörűen tanulmányozták már, főként az ázsiai országokban és Ausztráliában, ugyanakkor csak néhány tanulmány foglalkozott a nagy amilóztartalmú búza jellemzésével és gyakorlati alkalmazhatóságának vizsgálatával. Ilyen irányú nemesítési törekvések megvalósításáról pedig csak az elmúlt néhány évben számolt be az irodalom. A nagy amilóztartalmú búzáknak speciális tulajdonságai vannak. A vele együtt járó megnövekedett rostanyag- és rezisztenskeményítő-tartalomnak (RS) köszönhetően pozitív hatással lehet az emberi egészségre. Gyakorlati hasznosíthatóságának feltárása azonban még várat magára, többek között ezért is maradt a mai napig releváns kutatási téma. Európában elsők között próbáltunk meg nagy amilóztartalmú törzseket létrehozni. Jelen tanulmányban e törekvéseinkről, illetve az előállított törzsek tulajdonságainak (fizikai, összetételi és sütőipari) vizsgálatáról számolunk be.

Mindhárom SGP allélre mutáns (*Sgp-A1B1D1 null*) őszi búzavonalat kereszteztünk három búzafajtával, az 'Ukrainka', a 'Lona' és a 'Solstice' fajtákkal. Három visszakeresztezést (BC) végeztünk, melynek során molekuláris markerszelekcióval azonosítottuk azokat a törzseket, amelyek mindhárom allélre mutánsak voltak. A BC₃ és BC₂×BC₂ F₃, F₄ és F₅ generációkban (2012–2014) részletesen vizsgáltuk a törzsek fizikai (ezerszemtömeg), beltartalmi (fehérje, sikér, amilóz) és keményítő viszkozitási (Rapid Visco Analyser-RVA) paramétereit (Rakszegi és mtsai, 2015).

4.1.1 Nagy amilóztartalmú búzatörzsek létrehozása

Az első keresztezés után az F₁ generáció szemeit felszaporítottuk, learattuk és az F₂ generációt visszakeresztettük az apai szülővel (8. ábra). Az F₂ generációra jellemző allélhasadások miatt már előfordultak tiszta mutáns törzsek. Ennek eredményeként a dupla és tripla mutáns és/vagy heterozigóta törzsek aránya már nagy volt mind a BC₁F₁ mind a BC₂F₁ generációkban. Összesen 132 törzset azonosítottunk a BC₁F₁ generációban kevert mutáns (M) és heterozigóta (H) allélekkel, de mindhárom allélre heterozigóta törzsek nem jelentek meg a BC₁F₁ generációban. A két allélre mutáns törzsek aránya viszont szignifikánsan megnőtt a BC₂F₁ generációban, míg végül a BC₃ generációban 181 növényt állítottunk elő, melyből 45 növény az 'Ukrainka', 43 a 'Lona' és 93 a 'Solstice' keresztezéséből származott. Az 'Ukrainka' törzsek 11,1%-a (5 törzs) tripla, 31,1%-a dupla (14) és 33,3%-a (15) szimpla heterozigóta törzs volt az SGP-1 allélekre. Hasonlóképp a 'Lona' törzsek 6,9%-a (3) tripla, 41,9%-a (18) dupla és 30,2%-a (13) szimpla heterozigóta törzs volt. A 'Solstice' törzseiből 3,2% (3) tripla, 30,1% (28) dupla, míg 47,3% (44) szimpla heterozigóta volt. A többi törzs normál volt, mutáns alléleket nem tartalmaztak.

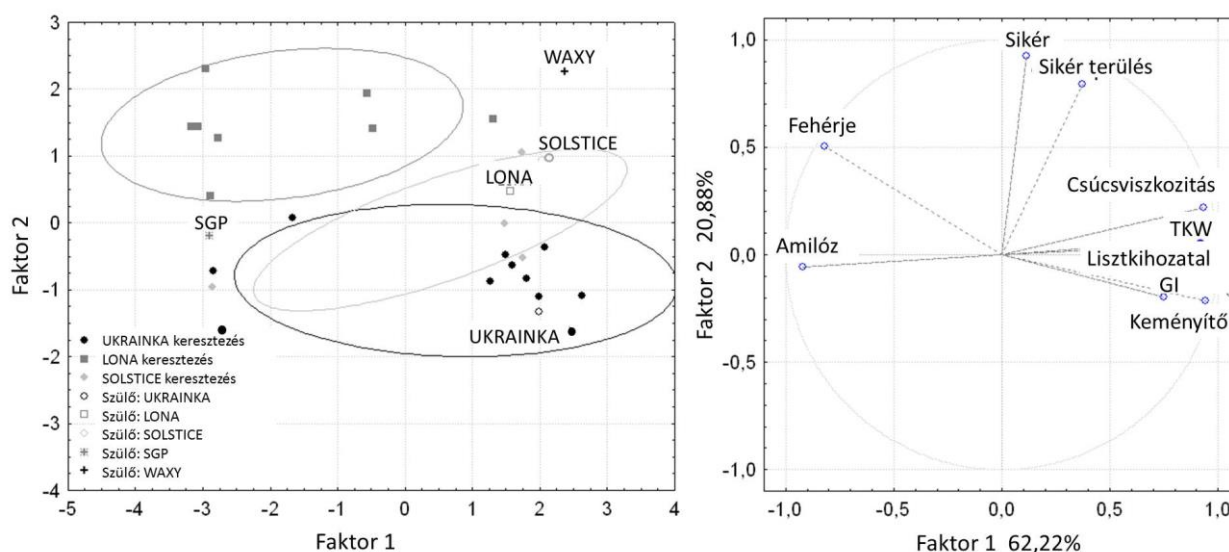
A BC₂F₁ generációban 32, mindhárom allélre heterozigóta törzset azonosítottunk (a 87-ből), melyeknek az amilóztartalma is nagy volt. Ezeket a BC₂ törzseket kereszteztük egymással, hogy megnöveljük a tiszta tripla mutáns törzsek előfordulásának valószínűségét (BC₂F₁×BC₂F₁). Ennek eredményeként 49 'Ukrainka', 14 'Lona' és 28 'Solstice' törzset állítottunk elő. Az 'Ukrainka' törzsek közül 17 (34,7%) volt tripla, 17 (34,7%) dupla és 14 (28,6%) szimpla mutáns és/vagy heterozigóta. A 'Lona' esetében 3 (21,4%) volt tripla, 6 (42,8%) volt dupla és 4 (28,6%) szimpla mutáns és/vagy heterozigóta. A 'Solstice' törzseiből 11 (39,3%) volt tripla, 9 (32,1%) volt dupla és 6 (21,4%) volt szimpla mutáns és/vagy heterozigóta. A BC₂×BC₂ generációban egy 'Ukrainka' és két 'Lona' tripla mutáns törzset

azonosítottunk. E törzsek 95 szemét elvetettük, majd molekuláris markerrel, illetve az amilóztartalom mérésével 10 olyan törzset azonosítottunk, melyek mindhárom genomon mutáns alléleket tartalmaztak. Ezt a tíz törzset valamint további 14 törzset és 6 kontrollt kisparcellás kísérletben vetettük el a tenyészkeretben, felszaporításuk és további laboratóriumi vizsgálatuk érdekében.

4.1.2 A nagy amilóztartalmú búzatörzsek jellemzése

A harminc szelektált törzs (12 nagy amilóztartalmú, 12 normál amilóztartalmú, 6 kontroll, köztük 2 waxy) ezerszemtömegét, lisztkihozatalát, összetételi tulajdonságait (keményítő, amilóz, fehérje, sikér), sikér minőségét (sikérterület, sikérindex) és a keményítő viszkozitását mértük három egymást követő évben (2012–2014) az F₃–F₅ generációkban.

A keményítő és a fehérje tulajdonságait jellemző paraméterekkel végzett főkomponens-analízis (PCA) eredményei szerint (10. ábra) a nagyobb amilóztartalom nagyobb fehérjetartalommal járt együtt, de emellett kisebb volt a keményítőtartalom, valamint a keményítő viszkozitási paraméterei is alacsonyabbak voltak. A sikér mennyisége független volt az amilóztartalomtól, nem úgy, mint a sikér minősége (GI), mely gyengébb volt a nagy amilóztartalmú törzsekben. A nagyobb sikértartalommal nagyobb terület járt együtt, mely a térsza nagyobb nyújthatóságára utal. Ez különösen a waxy genotípusokra volt érvényes. A nagy amilóztartalmú törzseknek ezen felül kisebb volt az ezerszemtömege és a lisztkihozatala is.



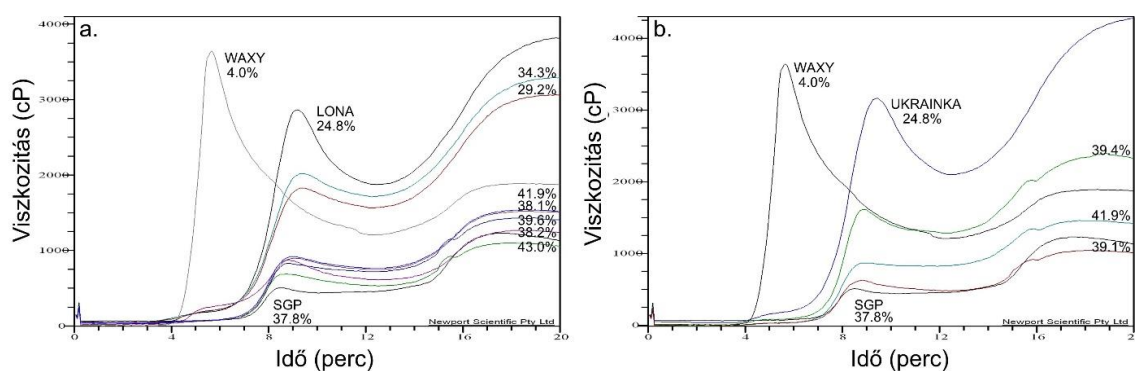
10. ábra. Főkomponens-analízis az SGP mutáns törzsek összetételi és feldolgozóipari tulajdonságai alapján (2012–2014 átlaga). (TKW – ezerszemtömeg, GI – sikérindex), n= 30.

Ezzel összhangban a fizikai, beltartalmi és sütőipari minőségi tulajdonságok (n= 30) korrelációanalízise azt mutatta, hogy az amilóztartalom szignifikánsan korrelált a keményítőtartalommal ($r_{5\%} = -0,83$, $p = 0,05$), a fehérjetartalommal ($r_{5\%} = 0,434$, $p = 0,05$), a sikérindexszel ($r_{5\%} = -0,36$, $p = 0,05$), a lisztkihozattal ($r_{5\%} = -0,65$, $p = 0,05$), az ezerszemtömegeg ($r_{5\%} = -0,66$, $p = 0,05$) és még a sikérterülettel is ($r_{5\%} = -0,64$, $p = 0,05$) (11. táblázat). Nem találtunk szignifikáns összefüggést az amilóztartalom és a sikértartalom vagy a Zeleny-féle szedimentációs érték és a liszt vízfelvétele között (ezért ezeket az adatokat nem tüntettük fel). Ugyanakkor az RVA-vel mért összes viszkozitási tulajdonság

szignifikánsan negatív korrelációt mutatott az amilóztartalommal ($r_{5\%} = -0,47$ – $-0,94$, $p=0,05$). Ezek az eredmények megerősítik a főkomponens-analízis eredményeit is.

A tíz szelektált, nagy amilóztartalmú, tripla mutáns törzset összehasonlítottuk a kontrollokkal a hároméves átlag adatai alapján (12. táblázat). A tíz közül nyolc törzsnek kiemelkedően nagy amilóztartalma volt (38,1–43,0%), míg két törzs (SGP/LONA 4 és 5) amilóztartalma a három mutáns allél jelenlétének ellenére mérsékelten volt csak magas (34,3 illetve 29,2%). A nagy amilóztartalmú törzseknek a fehérjetartalma is magas volt (14,1–18,1%) a 'Lona' és az 'Ukrainka' fajtákhoz képest. A sikértartalom nagy volt a nagy amilóztartalmú törzsekben (33,2–41,3%), kivéve négy törzset (SGP/LONA 6 és SGP/UKRAINKA 1, 2 és 3), melyeknek az N11 mutáns kontrolléhoz (26,8%) hasonlóan alacsony sikértartalma volt. A sikerindex (GI) szerint a nagy amilóztartalmú törzsek tésztaerőssége gyengébb (63,7–90,8), mint a 'Lona' és az 'Ukrainka' fajtáké, de erősebb a mutáns kontrollénál (50,3) vagy a waxy genotípusokénál (53,1, 70,7). A nagy amilóztartalmú törzsek sikerterülete hasonló a normál kontrolléhoz (3–4 mm), kivéve egy törzset, melynek ennél nagyobb volt a tésztanújthatósága (SGP/LONA 5) (12. táblázat). Bár a liszt vízfelvétele nem mutatott szignifikáns korrelációt az amilóztartalommal, értéke mégis nagyobb volt a legtöbb nagy amilóztartalmú törzsben (60,1–67,7%), mint a normál kontrollokból (59,5 és 63,6%). Ez harmóniában van, Van Hung és mtsai (2005) eredményeivel, akik kimutatták, hogy a nagy amilóztartalmú liszt vízfelvétele nagyobb.

Az amilóz és az amilopektin arányának szignifikáns hatása volt a keményítő viszkozitási tulajdonságaira (11. ábra, 13. táblázat), így a csúcs-, a maradó- és a végső viszkozitásértékei szignifikánsan alacsonyabbak voltak a nagy amilóztartalmú törzsek esetén, mint a kontrollok mérésekor ('Ukrainka', 'Lona'), de hasonlóak voltak az N11 mutánséhoz. A waxy törzseknek nagy volt a csúcsviszkozitása ('Bai-Huo', 'Nuo-Maizi'), de a maradó és a végső viszkozitásuk a normál és a nagy amilóztartalmú típusok közé esett. Két 'Lona' törzs keményítőviszkozitása különbözött a többi nagy amilóztartalmú törzsetől. Ezeknek sorban 34,3 és 29,2% volt az amilóztartalmuk, viszonylag alacsony volt a csúcsviszkozitásuk, míg kis görbeletörés után a maradó és a végső viszkozitásuk a normál kontrollokéhoz volt hasonló (11. ábra).



11. ábra. A nagy amilóztartalmú törzsek keményítőviszkozitási tulajdonságainak összehasonlítása (2013) a. 'Lona' keresztezésből származó törzsek, b. 'Ukrainka' keresztezésből származó törzsek.

A mintákhoz tartozó amilóztartalom a görbéken fel lett tüntetve.

11. táblázat. Az amilóztartalom összefüggése a liszt más betartalmi és feldolgozóipari tulajdonságaival, korreláció analízissel (2012–2014).

| Tulajdonságok | Amilóz | Keményítő | Fehérje | Sikérterület | GI | Lisztkihozatal | Ezerszemtömeg |
|------------------------------|--------|-----------|---------|--------------|--------|----------------|---------------|
| | % | % | % | mm | | % | g |
| Amilóz (%) | 1,000 | -0,833 | 0,434 | -0,641 | -0,358 | -0,654 | -0,659 |
| Csúcsviszkozitás (cP) | -0,943 | 0,822 | -0,491 | 0,691 | 0,445 | 0,784 | 0,793 |
| Maradó viszkozitás (cP) | -0,675 | 0,637 | -0,566 | 0,654 | 0,625 | 0,799 | 0,825 |
| Viszkozitás letörése (cP) | -0,942 | 0,794 | -0,391 | 0,615 | n.s. | 0,696 | 0,688 |
| Végső viszkozitás (cP) | -0,584 | 0,602 | -0,597 | 0,570 | 0,657 | 0,815 | 0,826 |
| Viszkozitás növekedése (cP) | -0,474 | 0,549 | -0,614 | 0,467 | 0,673 | 0,810 | 0,806 |
| Csúcsidő (min) | 0,509 | -0,370 | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. |
| Csirizedési hőmérséklet (°C) | 0,729 | -0,578 | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | -0,358 |

$r_{5\%} = 0,3494$, $n=30$, n.s. – nem szignifikáns, GI – sikerindex, cP – centipoise

12. táblázat. Tíz nagy amilóztartalmú búzatörzs és a kontroll fajták beltartalmi és feldolgozóipari tulajdonságai (2012–2014).

| Törzsek/Tulajdonságok | Amilóz (%) | | Fehérje (%) | | Sikér (%) | | GI | | Sikérterület (mm) | | Vízfelvétel (%) | | Ezerszem tömeg (g) | |
|-----------------------|------------|-------|-------------|------|-----------|-------|-------|-------|-------------------|------|-----------------|------|--------------------|-------|
| | Átlag | SD | Átlag | SD | Átlag | SD | Átlag | SD | Átlag | SD | Átlag | SD | Átlag | SD |
| SGP/LONA 1 | 39,56 | 8,53 | 16,10 | 0,53 | 38,05 | 1,48 | 63,73 | 3,51 | 3,00 | 0,35 | 66,15 | 0,78 | 28,74 | 10,26 |
| SGP/LONA 2 | 43,03 | 12,27 | 17,40 | 1,81 | 35,63 | 8,94 | 71,09 | 27,38 | 4,00 | 0,35 | 66,65 | 4,17 | 28,82 | 5,40 |
| SGP/LONA 3 | 38,10 | 9,05 | 18,10 | 0,10 | 41,33 | 3,43 | 72,47 | 13,12 | 3,50 | 0,35 | 67,55 | 0,78 | 30,41 | 7,43 |
| SGP/LONA 4 | 34,33 | 6,74 | 14,70 | 0,28 | 33,18 | 3,36 | 90,79 | 0,30 | 5,00 | 0,70 | 60,05 | 5,02 | 32,07 | 9,21 |
| SGP/LONA 5 | 29,22 | 6,61 | 14,15 | 0,92 | 34,60 | 2,26 | 81,47 | 0,75 | 6,00 | 0,70 | 64,10 | 2,40 | 32,53 | 6,99 |
| SGP/LONA 6 | 38,18 | 7,81 | 16,70 | 0,46 | 29,88 | 18,92 | 81,24 | 24,81 | 3,00 | 0,35 | 66,15 | 0,64 | 28,62 | 7,33 |
| SGP/LONA 7 | 41,92 | 10,69 | 17,20 | 0,70 | 34,58 | 6,89 | 85,22 | 14,23 | 4,00 | 0,35 | 66,10 | 1,41 | 29,78 | 6,31 |
| SGP/UKRAINKA 1 | 39,43 | 14,64 | 15,10 | 1,73 | 30,28 | 1,87 | 71,84 | 8,05 | 3,00 | 0,00 | 63,05 | 2,33 | 29,32 | 3,55 |
| SGP/UKRAINKA 2 | 41,98 | 12,30 | 15,63 | 1,36 | 24,78 | 8,87 | 84,85 | 14,55 | 3,00 | 0,00 | 63,85 | 1,48 | 25,70 | 3,06 |
| SGP/UKRAINKA 3 | 39,21 | 7,39 | 14,77 | 1,01 | 20,48 | 10,71 | 78,73 | 27,89 | 1,50 | 0,35 | 63,40 | 4,67 | 28,70 | 3,10 |
| N11 (sgp mutáns) | 37,80 | 6,42 | 15,58 | 0,46 | 26,85 | 0,64 | 50,33 | 3,78 | 2,00 | 0,35 | 55,50 | 5,20 | 27,52 | 0,24 |
| LONA | 24,83 | 1,95 | 13,30 | 0,92 | 30,93 | 2,72 | 98,55 | 0,10 | 4,50 | 0,70 | 63,55 | 0,35 | 38,35 | 2,73 |
| UKRAINKA | 24,85 | 1,21 | 12,17 | 0,86 | 27,35 | 3,46 | 99,30 | 0,34 | 3,00 | 0,35 | 59,50 | 0,71 | 40,50 | 2,14 |
| BAI-HUO (waxy) | 20,97 | 3,45 | 16,10 | 1,47 | 46,00 | 6,22 | 53,06 | 14,71 | 8,00 | 0,00 | 63,65 | 0,92 | 33,77 | 0,04 |
| NUO-MAIZI (waxy) | 3,98 | 0,84 | 15,07 | 1,29 | 37,03 | 1,10 | 70,72 | 10,59 | 6,00 | 0,70 | 59,70 | 0,57 | 36,78 | 0,06 |
| LSD _{5%} | 4,16 | | 0,80 | | 4,75 | | 9,95 | | 0,30 | | 2,63 | | 3,08 | |

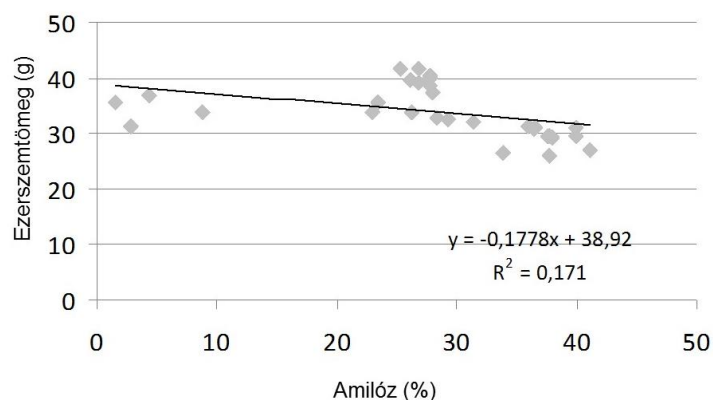
GI – sikerindex, SD – szórás, LSD – legkisebb szignifikáns differencia

13. táblázat. Nagy amidóztartalmú búzatörzsek keményítőviszkózitási tulajdonságai (2013–2014).

| Törzsek | Csúcsviszkózitás (cP) | | Maradó viszkózitás (cP) | | Végső viszkózitás (cP) | |
|-------------------|-----------------------|-------|-------------------------|-------|------------------------|-------|
| | Átlag | SD | Átlag | SD | Átlag | SD |
| SGP/LONA1 | 960,7 | 216,1 | 798,0 | 120,3 | 1500,3 | 359,3 |
| SGP/LONA2 | 625,3 | 348,0 | 475,7 | 114,2 | 969,0 | 233,9 |
| SGP/LONA3 | 953,0 | 291,0 | 671,0 | 157,3 | 1293,3 | 314,0 |
| SGP/LONA4 | 1848,5 | 238,3 | 1627,5 | 116,7 | 3186,5 | 150,6 |
| SGP/LONA5 | 1959,5 | 149,2 | 1731,5 | 201,5 | 3462,5 | 261,5 |
| SGP/LONA6 | 793,0 | 178,8 | 635,7 | 184,1 | 1256,7 | 345,8 |
| SGP/LONA7 | 687,3 | 226,4 | 571,7 | 164,6 | 1127,7 | 362,4 |
| SGP/UKRAINKA1 | 1538,7 | 521,1 | 1020,0 | 258,3 | 1995,3 | 520,0 |
| SGP/UKRAINKA2 | 560,0 | 279,9 | 499,3 | 142,1 | 955,7 | 422,9 |
| SGP/UKRAINKA3 | 574,7 | 225,8 | 455,7 | 74,0 | 954,0 | 323,8 |
| N11 (sgp mutáns) | 509,0 | 200,0 | 434,0 | 60,0 | 1127,0 | 320,0 |
| UKRAINKA | 2655,0 | 499,9 | 1603,0 | 255,5 | 3273,0 | 480,6 |
| LONA | 2772,3 | 215,0 | 1825,0 | 86,7 | 3745,0 | 170,6 |
| BAI-HUO (waxy) | 3169,0 | 140,0 | 1600,0 | 104,7 | 2877,0 | 130,1 |
| NUO-MAIZI (waxy) | 3967,5 | 457,5 | 1255,0 | 72,1 | 1959,0 | 124,5 |
| LSD _{5%} | 314,68 | | 165,69 | | 334,52 | |

cP – centipoise, LSD – legkisebb szignifikáns differencia

Valamennyi nagy amidóztartalmú törzsnek szignifikánsan alacsonyabb volt az ezerszemtömege (25,7–32,5 g), mint az ‘Ukrainka’ és ‘Lona’ fajtáknak (40,5 és 38,4 g) (12. táblázat), azonban az N11 mutáns vonaléhoz hasonlóak voltak (27,5 g). Csupán a két, mérsékelten nagy amidóztartalmú törzsnek (SGP/LONA 4 és 5) volt szignifikánsan nagyobb az ezerszemtömege, mint az N11 vonalnak. Szélesebb amidóztartományt reprezentáló, nagyobb mintaszám mellett (n=30) vizsgáltuk az ezerszemtömeg összefüggéseit. A regressziós analízis eredményei azt mutatták, hogy gyenge negatív korreláció van az amidóztartalom és az ezerszemtömeg között ($r^2 = 0,171$) (12. ábra). A 28–30% amidóztartalmú törzseknek volt a legnagyobb az ezerszemtömege (40 g), míg a nagy amidóztartalmú törzseké 30 és 32 g közé esett.



12. ábra. Az amidóztartalom és az ezerszemtömeg közötti összefüggés vizsgálata regresszióanalízissel, különböző amidóztartalmú búzatörzsek felhasználásával (2012–2014 átlag), n=30.

A nagy amilóztartalmú törzsek termését két évben mértük (2012/2013 és 2013/2014, kg/parcella egységben), majd kéttényezős varianciaanalízissel és a lineáris kevert modell páronkénti összehasonlításával értékeltük az eredményeket. Egy nagy amilóztartalmú törzsnek (SGP/LONA 4) statisztikailag azonos volt a termése az 'Ukrainka' és 'Lona' standard fajtákéval. A többi törzs termése ezeknél kisebb volt, de a waxy és az N11 mutáns kontrollok termését még ezek is meghaladták. A törzsek termésének páronkénti összehasonlítása azt mutatta, hogy három nagy amilóztartalmú törzs (SGP/LONA 2, 4 és 7) termése nem különbözött szignifikánsan a normál búzafajtákétól ('Ukrainka' és 'Solstice') (14. táblázat, Melléklet 1. táblázat). Összességében tehát a SGP/LONA 4 törzs tekinthető a legígéretesebbnek a terméshozam tekintetében.

Valamennyi tulajdonságot figyelembe véve azonban az előállított törzsek előnemesített génforrásnak tekinthetők, amelyek igény szerint hasznosíthatók későbbi nemesítési programokban.

14. táblázat. A nagy amilóztartalmú búzatörzs és a kontroll fajták termésének páronkénti összehasonlításának kivonata (Melléklet 1. táblázat).

| | UKRAINKA | LONA | SOLSTICE | N11 | NUO-MAIZI | BAI-HUO |
|----------------|----------|------|----------|-----|-----------|---------|
| SGP/LONA 1 | * | * | * | | | |
| SGP/LONA 2 | | * | | | | |
| SGP/LONA 3 | * | * | * | | | |
| SGP/LONA 4 | | * | | | | * |
| SGP/LONA 5 | * | * | * | | | |
| SGP/LONA 6 | * | * | * | | | |
| SGP/LONA 7 | | * | | | | |
| SGP/UKRAINKA 1 | * | * | * | | | |
| SGP/UKRAINKA 2 | * | * | * | | | |
| SGP/UKRAINKA 3 | * | * | * | | | |

* a termés szignifikánsan különbözik 0,05 valószínűségi szinten

4.2 A környezet és a genotípus hatása az amilóztartalomra

Az amilóztartalom variabilitása a normál búzafajtákban nagyon kismértékű, ezért a genotípus (G) és a környezet (E) hatásának tanulmányozása nehézségekkel járhat. Értekezésemben ezért a G és E hatásait az előző fejezetben szelektált, ugyanazon 30 fajta és törzs felhasználásával vizsgáltuk, melyeknek a kis amilóztartalmú waxy genotípusoktól a nagy amilóztartalmú genotípusokig széles tartományt ölel fel az amilóztartalma (~5–40%) (Rakszegi és mtsai, 2015). Vizsgáltuk a búzaszem fizikai, beltartalmi és néhány feldolgozóipari tulajdonságának függését a genotípus (G) és az évjárat, mint környezeti tényező (E) hatásától. Nehézséget jelentett azonban, hogy a nagy amilóztartalmú genotípusok termésmennyisége és lisztkihozatala nagyon alacsony volt mindhárom évben. Ennek következtében az elvégezhető mérések, azok száma és az adatok értékelhetősége korlátozott volt.

4.2.1 A genotípus és az évjárat hatásának vizsgálata

A genotípus szignifikáns hatással volt mind a keményítő-, mind az amilóztartalomra, valamint az általuk befolyásolt viszkozitási paraméterekre (15. táblázat). A fehérjetartalmat szintén szignifikánsan meghatározta a genotípus, azonban a belőle származott sikértartalmat és sikerminőséget nem befolyásolta. Az őrlés utáni lisztkihozatalra szignifikáns hatással volt a

genotípus, hiszen a nagy amilóztartalmú törzsek igen kis szemmérettel rendelkeztek. A vízfelvételt a genotípus szintén meghatározta, ennek értéke összefüggésben áll mind a keményítő-, mind az amilóz- és a fehérjetartalommal. A csúcsviszkozitás értékét, a sikértartalmat, a siker-indexet, valamint a lisztkihozatalt a környezet nem befolyásolta szignifikánsan, minden más paraméterre szignifikánsan hatott. Legnagyobb hatással a liszt vízfelvétele és a sikerterülésre volt. A G×E kölcsönhatást a kis mintamennyiségek eredményeként létrejött ismétléshiány miatt nem tudtuk ebben a kísérletben értékelni.

15. táblázat. A genotípus (G) és az évjárat (E) hatása a 30 eltérő amilóztartalmú törzs fizikai, beltartami és sütőipari tulajdonságaira, egytényezős varianciaanalízissel.

| Tulajdonságok | G | E |
|-------------------------|----------|----------|
| Keményítő (%) | *** | ** |
| Amilóz (%) | *** | * |
| Csúcsviszkozitás (cP) | *** | n.s. |
| Maradó viszkozitás (cP) | *** | * |
| Végső viszkozitás (cP) | *** | * |
| Fehérje (%) | *** | * |
| Siker (%) | n.s. | n.s. |
| Sikerindex (GI) | n.s. | n.s. |
| Sikerterülés (mm) | n.s. | *** |
| Lisztkihozatal (%) | *** | n.s. |
| Vízfelvétel (ml) | * | *** |
| Ezerszemtömeg (g) | * | ** |

cP – centipoise

Vizsgáltuk az időjárási adatok összefüggéseit a búza tulajdonságaival. A keményítő, az amilóz, a fehérje, a sikértartalom, valamint a liszt vízfelvétele szignifikánsan függött az utolsó 100 nap átlaghőmérsékletétől, az abszolút minimum hőmérséklettől ugyanezen periódusban, valamint a 25 °C-nál melegebb napok számától (10., 16. táblázat). A keményítő- és a sikértartalom ezen kívül szignifikánsan összefüggött a kumulált csapadék mennyiségével is. A csapadék mennyisége befolyásolta továbbá az ezerszemtömeget és a vízfelvétel értékét is. Az ezerszemtömegre a csapadék mennyiségén túl számos más időjárási tényező is hatással volt még, így az átlaghőmérséklet, az abszolút minimum hőmérséklet, a hideg és a meleg napok száma is. A vízfelvétele az utolsó 100 nap átlaghőmérséklete határozta meg. A siker minőségét az utolsó 100 nap csapadékmennyisége és az abszolút minimum hőmérséklete befolyásolta a legerősebben, de hatottak rá az abszolút minimum és maximum hőmérsékletek is.

4.2.2 A nagy amilóztartalmú törzsek tulajdonságainak stabilitásvizsgálata

A nagy amilóztartalmú törzsek fizikai, beltartalmi és feldolgozóipari tulajdonságainak stabilitását a variációs együttható (Coefficient of Variation, CV) értékeinek felhasználásával értékeltük. A stabilabb ezerszemtömeeggel és stabilabb keményítőtartalommal rendelkező törzsek amilóztartalma is stabilabb volt. A stabilabb keményítőtartalom egyben stabilabb fehérjetartalommal is járt. Ezen kívül a keményítő viszkozitási paraméterei és a sikerindex között volt összefüggés, illetve a stabilabb sikermennyiséghez stabilabb sikerminőség is társult (17. táblázat). A CV adatok alapján legstabilabb beltartalmi értékekkel az SGP/UKRAINKA_2 és az SGP/LONA_5 bírtak (adatokat nem mutatjuk).

16. táblázat. Harminc eltérő amidontartalmú törzs átlagos beltartalmi és sütőipari minőségének (2012–2014) összefüggése az időjárási körülményekkel.

| Tulajdonságok | Termesztési időszak napjainak száma | Kumulált csapadékösszeg (mm) | Átlaghőmérséklet °C | Abszolút minimum hőmérséklet °C | Abszolút maximum hőmérséklet °C | Kumulált csapadékösszeg az utolsó 100 napban (mm) | Átlaghőmérséklet az utolsó 100 napban °C | Abszolút minimum hőmérséklet az utolsó 100 napban °C | Napok száma, ha Tmin<=0 °C | Napok száma, ha Tmin<=-10 °C | Napok száma, ha Tmax>=25 °C | Napok száma, ha Tmax>=30 °C | Napok száma, ha Tmax>=35 °C |
|-------------------------|-------------------------------------|------------------------------|---------------------|---------------------------------|---------------------------------|---|--|--|----------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Amilóz (%) | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | -0,9841 | -0,9639 | n.s. | n.s. | -0,9994 | n.s. | n.s. |
| Csúcsviszkozitás (cP) | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | 0,9286 | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. |
| Maradó viszkozitás (cP) | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | 0,9286 | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. |
| Végző viszkozitás (cP) | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | 0,9286 | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. |
| Fehérje (liszt) (%) | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | -0,9879 | -0,9576 | n.s. | n.s. | -0,9999 | n.s. | n.s. |
| Keményítő (%) | n.s. | 0,9719 | n.s. | 0,9478 | n.s. | n.s. | 0,9031 | 0,9913 | n.s. | n.s. | 0,9552 | n.s. | n.s. |
| Sikér (%) | n.s. | 0,9009 | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | 0,9730 | 0,9769 | n.s. | n.s. | 0,9960 | n.s. | n.s. |
| Sikérindex (GI) | n.s. | n.s. | n.s. | -0,9697 | n.s. | n.s. | n.s. | -0,9973 | n.s. | n.s. | -0,9293 | n.s. | n.s. |
| Sikérterület (mm) | -0,9830 | n.s. | n.s. | n.s. | -0,9022 | 0,9974 | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | -0,9306 |
| Lisztkihozatal (%) | n.s. | 0,9584 | n.s. | 0,9300 | n.s. | n.s. | 0,9241 | 0,9984 | n.s. | n.s. | 0,9692 | n.s. | n.s. |
| Vízfelvétel (ml) | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | 0,8963 | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. |
| Ezerszemtömeg (g) | n.s. | -0,9175 | -0,8923 | -0,9485 | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | 0,9582 | 0,9950 | n.s. | 0,8928 | n.s. |

n=3, r 5%= 0,8783, r 1%= 0,9587, r 0,1%= 0,9912, n.s. – nem szignifikáns, cP – centipoise

17. táblázat. Változatos amilóztartalmú törzsek variációs együttható értékeinek (CV) összefüggései korreláció-analízissel.

| <i>Tulajdonságok</i> | <i>Amilóz</i> | <i>Csúcsviszkozitás</i> | <i>Maradó viszkozitás</i> | <i>Végső viszkozitás</i> | <i>Fehérje</i> | <i>Keményítő</i> | <i>Sikér</i> | <i>GI</i> | <i>Sikérterület</i> | <i>Lisztkihozatal</i> | <i>Vízfelvétel</i> | <i>Ezerszem</i> |
|-------------------------|---------------|-------------------------|---------------------------|--------------------------|----------------|------------------|--------------|-----------|---------------------|-----------------------|--------------------|-----------------|
| Amilóz (%) | 1 | | | | | | | | | | | |
| Csúcsviszkozitás (cP) | 0,1025 | 1 | | | | | | | | | | |
| Maradó viszkozitás (cP) | 0,0737 | 0,9399 | 1 | | | | | | | | | |
| Végső viszkozitás (cP) | 0,0561 | 0,9578 | 0,9792 | 1 | | | | | | | | |
| Fehérje (%) | 0,1054 | 0,1549 | 0,0037 | 0,0230 | 1 | | | | | | | |
| Keményítő (%) | 0,4831 | 0,1468 | 0,0509 | 0,0746 | 0,4246 | 1 | | | | | | |
| Sikér (%) | 0,1093 | 0,2079 | 0,2618 | 0,2087 | 0,2063 | 0,0470 | 1 | | | | | |
| Sikérindex | 0,0846 | 0,3857 | 0,3731 | 0,3775 | 0,1397 | 0,2021 | 0,5500 | 1 | | | | |
| Sikérterület (mm) | -0,0565 | -0,0134 | 0,0485 | 0,0068 | -0,0428 | -0,1296 | 0,3817 | 0,3274 | 1 | | | |
| Lisztkihozatal (%) | 0,0427 | 0,0939 | 0,0102 | 0,0489 | 0,3455 | 0,3097 | 0,1713 | 0,1855 | 0,0439 | 1 | | |
| Vízfelvétel (%) | 0,2004 | -0,0486 | -0,1077 | -0,1415 | 0,2606 | 0,2526 | -0,1825 | 0,0220 | -0,0392 | 0,1065 | 1 | |
| Ezerszemtömeg (g) | 0,4565 | 0,2777 | 0,2556 | 0,3200 | -0,2241 | 0,2212 | 0,0535 | 0,0282 | -0,1593 | -0,0680 | -0,3485 | 1 |

n=30, r_{5%} = 0,3494, r_{1%} = 0,4487, r_{0,1%} = 0,5541, n.s. – nem szignifikáns, cP – centipoise

4.3 Nagy arabinoxilán-tartalmú búza genotípusok előállítása és jellemzése

A liszt rostanyag tartalmának növelését második lépésben a sejtfalalkotó poliszacharidok, pontosabban az AX mennyiségének növelésével végeztük el. Ilyen jellegű nemesítési törekvésekre korábban nem találtunk példát az irodalomban. E célkitűzés megvalósítását segítette, hogy nagy fajtakörön végzett diverzitásvizsgálatok során sikerült azonosítani a kínai ‘Yumai-34’ búzafajtát (1988-ban forgalomba hozott), mely két-háromszor annyi vízdoldható (WE) arabinoxilán- (AX) tartalommal rendelkezik (Gebruers és mtsai, 2008; Rakszegi és mtsai, 2008; Ward és mtsai, 2008), és valamivel nagyobb teljes (TOT) AX-tartalommal is bír, mint a fajta átlaga. Ez a fajta ezért hasznos génforrás. Ezért a kínai fajtát öt közép-európai búzafajtaival kereszteztük (Tremmel-Bede és mtsai, 2017) (‘Lupus’, ‘Mv-Emese’, ‘Mv-Mambo’, ‘Ukrainka’, ‘1061-26’ törzs), és összehasonlítottuk a törzsek fizikai, beltartalmi és feldolgozóipari tulajdonságait ötéves kísérletben (2013–2017) az F₇–F₁₁ generációkban.

4.3.1 Nagy arabinoxilán-tartalmú búzatörzsek létrehozása

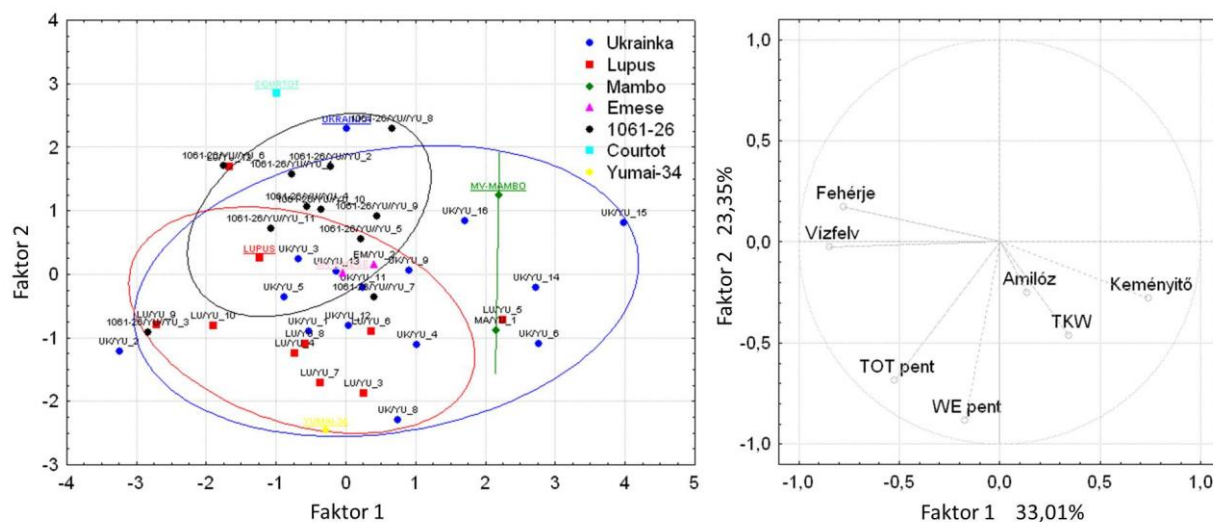
A szelekciót az agronómiai tulajdonságok alapján végeztük valamennyi generációban, valamint azonosítottuk azokat a törzseket, melyek vízdoldható (WE) pentozántartalma (melynek fő komponense az AX) nagy volt a lisztben. Többéves szelekció után 36, az átlagosnál nagyobb WE-pentozántartalmú és jó agronómiai és feldolgozóipari tulajdonságokkal rendelkező törzset (9 ‘Lupus’/‘Yumai-34’, 1 ‘Mv-Mambo’/‘Yumai-34’, 1 ‘Mv-Emese’/‘Yumai-34’, 11 ‘1061-26’/‘Yumai-34’ és 14 ‘Ukrainka’/‘Yumai-34’) állítottunk elő és vizsgáltunk a kontrollokkal összehasonlítva.

4.3.2 A nagy arabinoxilán-tartalmú búzatörzsek jellemzése

Főkomponens-analízist végeztünk, hogy a törzseket több tulajdonság együttes figyelembevételével jellemezzük. A két fő komponens együtt (PC1 és PC2) a teljes kumulatív variancia 56%-át határozta meg a beltartalmi komponensek mennyiségének tekintetében, míg 67%-át a sütőipari minőséget meghatározó paraméterek figyelembevételével (13. és 14. ábra). A beltartalmi komponensekkel végzett főkomponens-analízis alapján a nagyobb fehérje- és teljes pentozántartalom kisebb keményítőtartalom mellett volt mérhető a búzaszemekben. E két komponens, azaz a fehérje és a teljes pentozán volt felelős egyben a liszt nagyobb vízfelvételéért. A nagyobb ezerszemtömeg kisebb sikerindexet és tésztastabilitást is eredményezett, melynek következtében a tésztanyújthatóság és ellágyulás nőtt. Ugyanakkor a nagyobb fehérjetartalom és vízfelvételi értékek a sikértartalom növekedését és a sütőipari minőség javulását (nagyobb Zeleny, Farinográf értékszám) vonták magukkal (14. ábra). Az ‘Mv-Mambo’ fajtaival létrehozott törzsnek volt a legnagyobb ezerszemtömege és ezzel együtt a legnagyobb tésztanyújthatósága, míg a nagyobb tézstaerősségű, nagy arabinoxilán-tartalmú törzsek az ‘Ukrainka’ fajta keresztezéseiből kerültek ki.

A korreláció-analízis eredményei szerint (18. táblázat) az ezerszemtömeg és a keményítőtartalom közötti összefüggés pozitív ($r=0,4401$) volt, ugyanakkor a szem mérete nem függött össze egyetlen más beltartalmi komponens mennyiségével és lényegében a sütőipari minőséggel sem. A teljes pentozántartalom a vízdoldható pentozánok mennyiségével adott erős pozitív korrelációt. A vízdoldható pentozánok növekvő mennyisége pozitív hatással volt a liszt vízfelvételére, a lisztkihozatalra őrlés során és a sütőipari minőségre is (Zeleny). A fehérjetartalom főkomponens-analízissel kapott összefüggéseit a korreláció-analízis is alátámasztotta. Így a vízfelvételre és a sütőipari minőségre kifejtett pozitív hatását, illetve

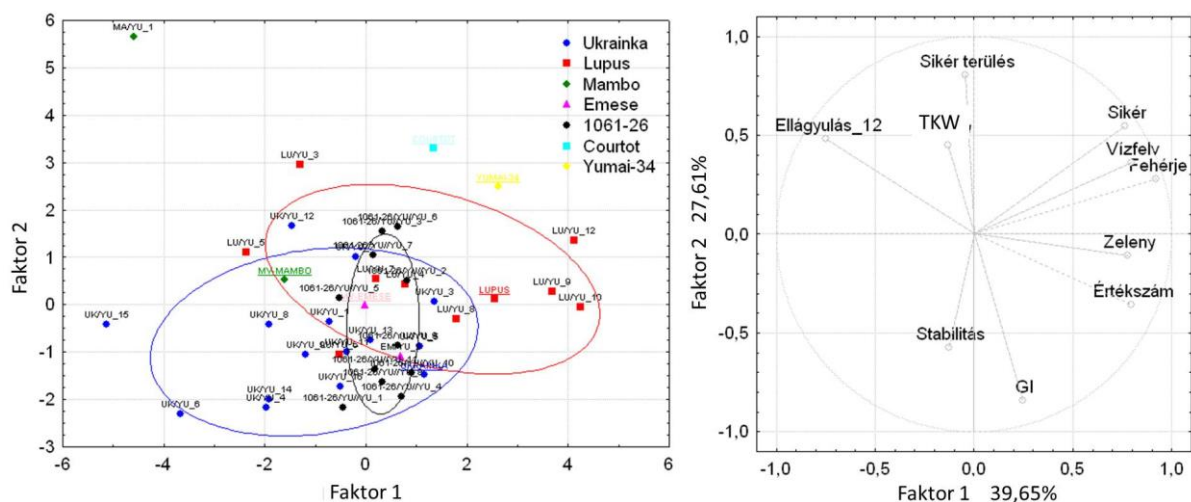
negatív összefüggését mutattuk ki a szemkeménységgel. Az amidóztartalom ugyanakkor korreláció-analízissel nem mutatott összefüggést egyetlen vizsgált paraméterrel sem.



| Változók faktor koordinátái, korreláció alapján | Faktor 1 | Faktor 2 |
|--|----------|----------|
| TOT-pentozán (TOT pent) | -0,5237 | -0,6832 |
| WE-pentozán (WE pent) | -0,1741 | -0,8854 |
| Fehérje | -0,7792 | 0,1748 |
| Keményítő | 0,7407 | -0,2769 |
| Amilóz | 0,1346 | -0,2500 |
| Ezerszemtömeg (TKW) | 0,3437 | -0,4616 |
| Vízfelvétel (Vízfelv) | -0,8446 | -0,0258 |

13. ábra. Főkomponens-analízis a nagy arabinoxilán-tartalmú törzsek beltartalmi tulajdonságai alapján (2013–2017 átlag).
(pent – pentozán, TKW – ezerszemtömeg, TOT – teljes, Vízfelv – liszt vízfelvétele, WE – vízdoldható).

A vizsgált 36 törzs lisztjének TOT-pentozán-tartalma 17,7 és 23,8 mg/g között változott, míg a WE-pentozán tartalom 6,7 és 10 mg/g között volt (19. táblázat). A többségében nagy AX-tartalmú törzsek átlagos WE-pentozán-tartalma 8,3 mg/g volt, míg a normál 'Ukrainka' kontrollé 6,7 mg/g. Igen nagy volt a variabilitás a fehérje- és a sikértartalomban, melyek 10,7–15,7% illetve 24,2–39,8% közötti értékeket vettek fel. Kismértékű volt azonban a változatosság a keményítő- és az amidóztartalomban (54,5–58,6% és 20,7–23,8% közötti értékekkel), ami nagymértékben elősegítette a vizsgálat tárgyát képező komponensek hatásának megállapítását. Az AX törzsek átlagértékei alapján megállapítható, hogy a törzsek keményszeműek voltak, 43 g átlagos ezerszemtömeeggel, és 51,7% lisztkihozattal. A liszt vízfelvétele értékei 56,4 és 62,8% között változtak, magas, 60 feletti átlagértékkel (60,54 ml). A sütőipari minőség, mint azt már a PCA analízis is mutatta, igen változatos a törzsek között. Ezt bizonyítják többek között a Zeleny-féle szedimentáció 23,5 és 44,5 ml vagy a tésztastabilitás 6,5 és 18 perc közötti értékei. Ez a változatosság köszönhető a szülői genotípusok tulajdonságai közötti szignifikáns eltéréseknek, így az 'Ukrainka' és a 'Yumai-34' szülők szignifikánsan eltérő fehérje- és WE-pentozán-tartalmának vagy a tésztastabilitás és -ellágyulás eltéréseinek (19. táblázat).



| Változók faktor koordinátái, korreláció alapján | Faktor 1 | Faktor 2 |
|--|----------|----------|
| Sikér | 0,7648 | 0,5458 |
| Ezerszemtömeg (TKW) | -0,1304 | 0,4486 |
| Vízfelvétel (Vízfelv) | 0,7956 | 0,3601 |
| Zeleny | 0,7792 | -0,1091 |
| Sikérterület | -0,0436 | 0,8044 |
| GI (Sikérindex) | 0,2469 | -0,8400 |
| Stabilitás | -0,1281 | -0,5744 |
| Ellágyulás_12 (12. percnél) | -0,7489 | 0,4839 |
| Értékszám | 0,7975 | -0,3558 |

14. ábra. Főkomponens-analízis a nagy arabinoxilán-tartalmú törzsek feldolgozóipari tulajdonságai alapján (2013–2017 átlag).

(Ellágyulás_12 – tészta ellágyulása a 12. percnél, Értékszám – Farinográf értékszám, Stabilitás – tészta stabilitása Farinográfal, Vízfelv – liszt vízfelvétele, TKW – ezerszemtömeg).

A WE-pentozán-tartalomra legkiemelkedőbb tíz törzs fizikai, beltartalmi és sütőipari tulajdonságait a Melléklet 2. és 3. táblázatai foglalják össze. Ezek a törzsek 9 és 10 mg/g közötti WE-pentozán-tartalommal rendelkeztek. Fehérjetartalmuk 10,9 és 13,3%, sikértartalmuk 24,2 és 34,5%, keményítőtartalmuk 54,5 és 58,0%, míg amilóztartalmuk 22,1 és 22,8%, között változott. A sütőipari minőséget jellemző paraméterek közül a Zeleny-féle szedimentációs érték 29,0 és 38,5 ml, a tézstabilitás pedig 10,2 és 18,0 perc között változott, de a sikérindex (GI) is 86,0 és 98,1 között volt. A farinográfus értékszám 78,9 és 100 közötti értékeket mutatott, míg a liszt vízfelvétele 56,6 és 62,7% között változott.

A legkiemelkedőbb genotípusok ezerszemtömege 37,2 és 49,1 g tartományban mozgott. Regresszió-analízissel alátámasztottuk a korreláció-analízis eredményét, mely szerint az ezerszemtömeg és a liszt pentozántartalma között nem volt összefüggés ($r^2 = 9 \cdot 10^{-6}$) (15. ábra), azaz nem a szem mérete határozza meg a pentozántartalmat.

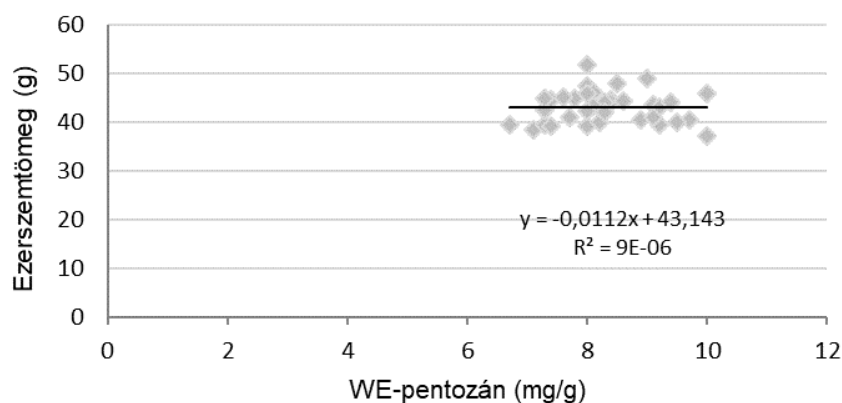
Négy év termésadatainak felhasználásával összehasonlítottuk a vizsgált törzsek terméspotenciálját a szülői genotípusokéval, illetve egy hivatalos kontrolléval, az 'Mv-Nádor'-éval. Az eredmények szerint a legtöbb törzs termése nem különbözött szignifikánsan egyik kontroll fajtaétól sem. Ez azt jelenti, hogy a törzsek termése a szülői kontrollok és a nagy termésű 'Mv-Nádor' fajta termése között volt. Csúpan három genotípus termése (Melléklet 4. táblázat, 20. táblázat) mutatott szignifikánsan eltérő termést a kontroll fajtaétól,

de ez azt jelenti, hogy ezeknél szignifikánsan kisebb volt. Ebben a mintakörben tehát a legtöbb vizsgált törzs termése a ‘Yumai-34’ fajta és három törzs kivételével statisztikailag nem volt megkülönböztethető az ‘Mv-Nádor’-étől.

18. táblázat. Az arabinoxilán-tartalom összefüggése a liszt más betartalmi és feldolgozóipari tulajdonságaival, korreláció analízissel (2013–2017).

| Tulajdonságok | TOT-pentozán | WE-pentozán | Fehérje | Sikér | Keményítő | Amilóz |
|-------------------------|--------------|-------------|---------|---------|-----------|--------|
| TOT-pentozán (mg/g) | 1,0000 | | | | | |
| WE-pentozán (mg/g) | 0,6226 | 1,0000 | | | | |
| Fehérje (%) | n.s. | n.s. | 1,0000 | | | |
| Sikér (%) | n.s. | n.s. | 0,9056 | 1,0000 | | |
| Keményítő (%) | n.s. | n.s. | -0,4312 | -0,3917 | 1,0000 | |
| Amilóz (%) | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | 1,0000 |
| Hektoliter (kg/hl) | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | 0,3021 | n.s. |
| Ezerszemtömeg (g) | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | 0,4401 | n.s. |
| HI | n.s. | -0,4972 | n.s. | 0,2917 | -0,4702 | n.s. |
| Lisztkihozatal (%) | n.s. | 0,3266 | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. |
| Vízfelvétel (%) | n.s. | 0,3641 | 0,7191 | 0,6212 | -0,3626 | n.s. |
| Zeleny (ml) | n.s. | 0,2523 | 0,5947 | 0,3971 | n.s. | n.s. |
| Sikérterület (mm) | n.s. | n.s. | 0,2945 | 0,5166 | n.s. | n.s. |
| GI | n.s. | n.s. | n.s. | -0,3958 | n.s. | n.s. |
| Tésztakialakulás (perc) | n.s. | n.s. | 0,3468 | 0,2913 | -0,2925 | n.s. |
| Stabilitás (perc) | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. |
| Ellágyulás_12 (FU) | n.s. | n.s. | -0,5139 | -0,2921 | 0,3120 | n.s. |
| Értékszám | n.s. | n.s. | 0,3985 | 0,3054 | -0,3412 | n.s. |

$r_{5\%} = 0,2500$, $r_{1\%} = 0,3248$, $r_{0.1\%} = 0,4079$, $n=42$, n.s. – nem szignifikáns, GI – sikérindex, HI – szemkeménység index



15. ábra. A WE-pentozán-tartalom és az ezerszemtömeg közötti összefüggés vizsgálata regresszió-analízissel (2013–2017 átlag).

19. táblázat. A 36 vizsgált búzatörzs fizikai, beltartalmi és sütőipari tulajdonságainak átlagos és szélső értékei. Kontroll fajták: 'Ukrainka', 'Yumai-34'.

| Tulajdonságok | | minimum | maximum | átlag | szórás | UKRAINKA | YUMAI-34 |
|------------------|-------|---------|---------|-------|--------|----------|----------|
| TOT-pentozán | mg/g | 17,70 | 23,80 | 20,35 | 1,41 | 18,60 | 19,50 |
| WE-pentozán | mg/g | 6,70 | 10,00 | 8,30 | 0,85 | 6,70 | 9,80 |
| Fehérje | % | 10,70 | 15,70 | 12,85 | 0,96 | 13,60 | 14,60 |
| Sikér | % | 24,20 | 39,80 | 30,93 | 3,29 | 30,40 | 37,00 |
| Keményítő | % | 54,50 | 58,60 | 56,97 | 0,89 | 56,80 | 58,60 |
| Amilóz | % | 20,70 | 23,80 | 22,10 | 0,55 | 20,80 | 22,20 |
| Hektoliter | kg/hl | 70,70 | 82,10 | 76,57 | 2,46 | 77,50 | 78,80 |
| Ezerszemtömeg | g | 37,20 | 51,80 | 43,05 | 3,24 | 42,00 | 49,60 |
| HI | | 31,80 | 54,30 | 44,71 | 5,88 | 46,30 | 38,70 |
| Lisztkihozatal | % | 45,90 | 56,10 | 51,73 | 2,63 | 51,10 | 52,20 |
| Vízfelvétel | % | 56,40 | 62,80 | 60,54 | 1,57 | 60,60 | 62,50 |
| Zeleny | ml | 23,50 | 44,80 | 31,56 | 4,87 | 37,30 | 40,50 |
| Sikérterület | mm | 1,40 | 5,50 | 3,13 | 0,85 | 2,30 | 3,80 |
| GI | | 80,00 | 99,80 | 94,50 | 4,99 | 97,70 | 92,60 |
| Tésztakialakulás | perc | 4,70 | 19,70 | 13,89 | 3,72 | 14,70 | 14,60 |
| Stabilitás | perc | 6,50 | 18,00 | 13,81 | 2,68 | 15,50 | 9,60 |
| Ellágyulás_12 | FU | 0,00 | 62,30 | 15,17 | 14,16 | 6,30 | 12,30 |
| Értékszám | | 67,60 | 100,00 | 90,51 | 7,12 | 94,80 | 91,90 |

HI – szemkeménység-index, GI – sikérindex, FU – farinográf egység

20. táblázat. A nagy arabinoxilán-tartalmú búzatörzsek és a kontroll fajták termésének páronkénti összehasonlításának kivonata (Melléklet 4. táblázat).

| | MV-NÁDOR | LUPUS | YUMAI-34 | UKRAINKA | MV-EMESE | MV-MAMBO |
|------------------|----------|-------|----------|----------|----------|----------|
| MV-NÁDOR | | | * | | | |
| LUPUS | | | | | | |
| YUMAI-34 | | * | | | | |
| UKRAINKA | | | | | | |
| MV-EMESE | | | | | | |
| MV-MAMBO | | | | | | |
| UK/YU_12 | | * | | | | |
| LU/YU_2 | | * | | | | |
| 1061-26/YU//YU_2 | | * | | * | | * |

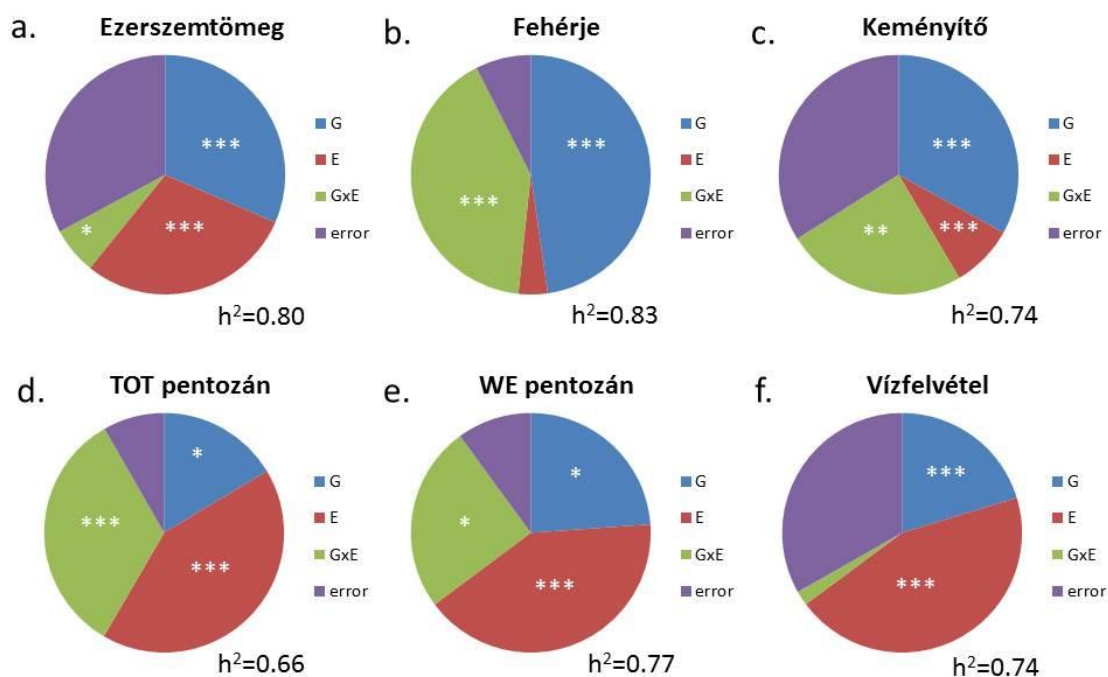
4.4 A környezet és a genotípus hatása az arabinoxilán-tartalomra

A növénynevelők régi törekvése, hogy kiváló teljesítményű, különböző környezetekben is stabil minőséggel rendelkező búzafajtákat hozzanak létre. A Yumai-34, nagy arabinoxilán-tartalmú fajta keresztezéseiből 36 törzset szelektáltunk, és vizsgáltuk a törzsek fizikai, beltartalmi és sütőipari minőségét (Tremmel-Bede és mtsai, 2020). A továbbiakban arra voltunk kíváncsiak, hogy ezek a tulajdonságok milyen stabilak, és hogy

menyire függenek a genotípus (G) és az évjárat (E.) hatásaitól, valamint ezek kölcsönhatásától (G×E), különös tekintettel a beltartalmi paraméterekre.

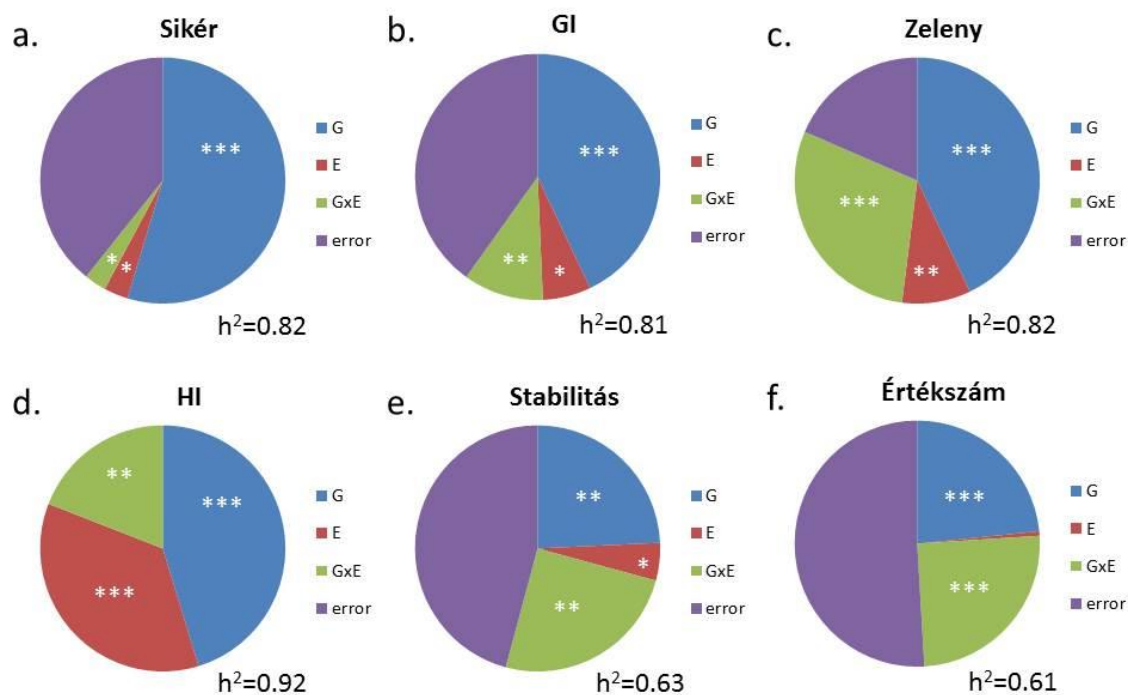
4.4.1 A genotípus és az évjárat hatásának vizsgálata

Az ezerszemtömeg értékét mind a három tényező, a genotípus (G), az évjárat (E.) és a két tényező kölcsönhatása is szignifikánsan befolyásolta (16.a ábra). Mindazonáltal az örökölhetőség értéke (0,8) a genotípus meghatározó szerepéről tanúskodik. A G a teljes variancia 31,53%-át, míg az E a 29,53%-át határozta meg. A búzaszem fehérje- és keményítő-tartalmát szignifikánsan meghatározta a genotípus, illetve annak kölcsönhatása a környezettel (16.b,c ábra). Ennek megfelelően az örökölhetőségük is magas volt, 0,83 illetve 0,74 értékekkel. A fehérjetartalom teljes varianciájának 47,74%-át határozta meg a G, míg csak 3,92%-át az E. A keményítőtartalomra valamivel nagyobb hatása volt az E-nek, mivel a teljes variancia 8,52%-át határozta meg, ugyanakkor a G a 33,03%-át. Jelentős környezethatást tapasztaltunk mind a TOT-pentozán, mind a WE-pentozán értékeire, de emellett a genotípus hatása is szignifikáns mértékű volt (16.d,e ábra). A genotípus nem elhanyagolható szerepét az örökölhetőség adatok támasztották alá, mely 0,66 és 0,77 volt a két tulajdonságra, továbbá mindkét tulajdonságra hatott a G×E is. A genotípus a teljes variancia 16,39% és 23,88%-át határozta meg a TOT- és WE-pentozán esetén, míg a környezet hatása ennél jóval nagyobb volt (42,0% és 40,89%).



16. ábra. A 36 törzs és a szülői kontrollok néhány beltartalmi tulajdonságának (a. ezerszemtömeg, b. fehérjetartalom, c. keményítőtartalom, d. teljes [TOT] pentozántartalom, e. vízoldható [WE] pentozántartalom, f. liszt vízfelvételének) varianciakomponensei és örökölhetősége (2013–2017).

G – genotípus, E – környezet (évjárat), G×E – genotípus és évjárat kölcsönhatásának hatása, error – hiba, *, **, *** – szignifikáns hatás 0,05, 0,01 vagy 0,001 valószínűségi szinten.

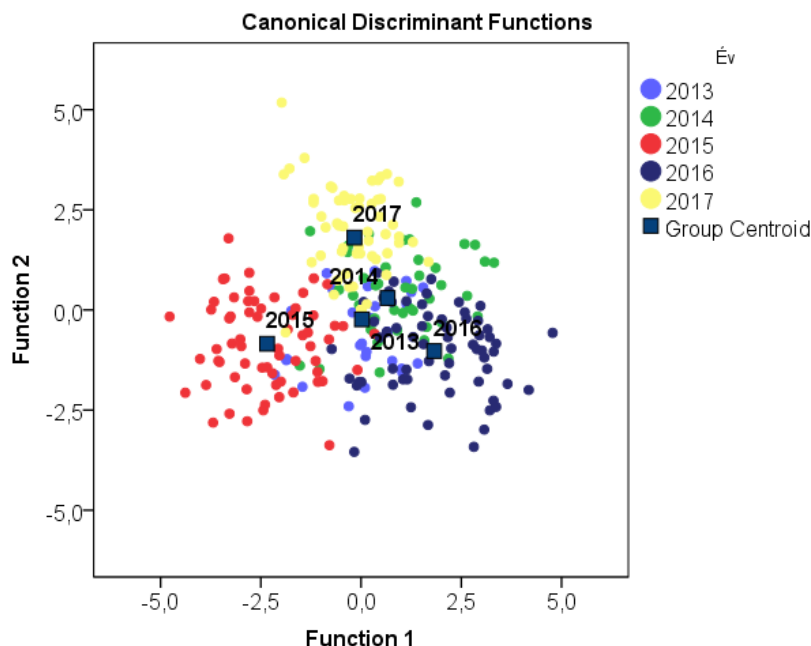


17. ábra. A 36 törzs és a szülői kontrollok néhány beltartalmi tulajdonságának (a. sikértartalom, b. sikérindex [GI], c. Zeleny-féle szedimentációs érték, d. szemkeménység index [HI], e. tésztastabilitás, f. farinográf értékszám) varianciakomponensei és örökölhetősége (2013–2017).

G – genotípus, E – környezet (évjárat), G×E – genotípus és évjárat kölcsönhatásának hatása, error – hiba, *, **, *** – szignifikáns hatás 0,05, 0,01 vagy 0,001 valószínűségi szinten.

Mindemellett 33,34% és 24,18% értékekkel a G×E hatása sem volt elhanyagolható a teljes varianciára. Hasonló eredményeket kaptunk a liszt vízfelvételeire is (16.f ábra), 0,74-es örökölhetőség mellett itt a G×E-nek nem volt szignifikáns szerepe. A G és az E a liszt vízfelvételenek a 20,28% és a 44,55%-át határozták meg egyenként.

A sütőipari minőséget meghatározó paraméterek közül a sikértartalom a fehérjetartalomhoz hasonlóan jelentős mértékben volt genetikailag meghatározott (17.a ábra). A G a teljes variancia 54,66%-át határozta meg, miközben az örökölhetőség értéke is magas volt (0,82). Emellett az E és a G×E hatása elhanyagolható volt. A sikér és a tézsta minőségét jellemző paraméterekre, így a sikérindexre (GI), a Zeleny-féle szedimentációs értékre, a téztastabilitásra és a Farinográf értékszámra a genotípus szignifikáns hatást gyakorolt (18.b,c,e,f). Az első két paraméter teljes varianciáját 42,9%-ban, míg a másik kettőt megközelítőleg 24%-ban határozta meg. Emellett a G×E kölcsönhatásnak volt meghatározó szerepe a téztaminőségre. Mind a négy paraméter örökölhetősége jelentős volt, 0,81, 0,82, 0,63 illetve 0,61 értékekkel. A beltartalmi komponensek mellett a szemkeménységnek (HI) is minőségmeghatározó szerepe lehet. A szemkeménység teljes varianciáját 45,27%-ban a genotípus határozta meg, de a környezetnek is ugyanilyen jelentős volt a hatása (35,63%) (17.d ábra). Az örökölhetőség értéke (0,92) azonban a genotípus meghatározó szerepét bizonyítja. Több tulajdonság figyelembevételével, diszkriminancia-analízissel értékelve az évjáratok hatását, szignifikáns különbségek állapíthatók meg. Az egymással leginkább átfedő évjáratok a 2013 és a 2014-es évek voltak (18. ábra).



18. ábra. Évjárat hatása a törzsek minőségi és beltartalmi tulajdonságaira, diszkriminancia-analízissel (2013–2017).

4.4.2 A beltartalmi tulajdonságok és a minőség stabilitásának vizsgálata

A vizsgált törzsek beltartalmi tulajdonságainak stabilitásvizsgálatát GGE biplot elemzéssel és a variációs együtthatók (Coefficient of Variation, CV) számításával végeztük el. Az elemzés során különösen a szelekció alapját képező WE-pentozán- és a fehérjetartalomra koncentráltunk.

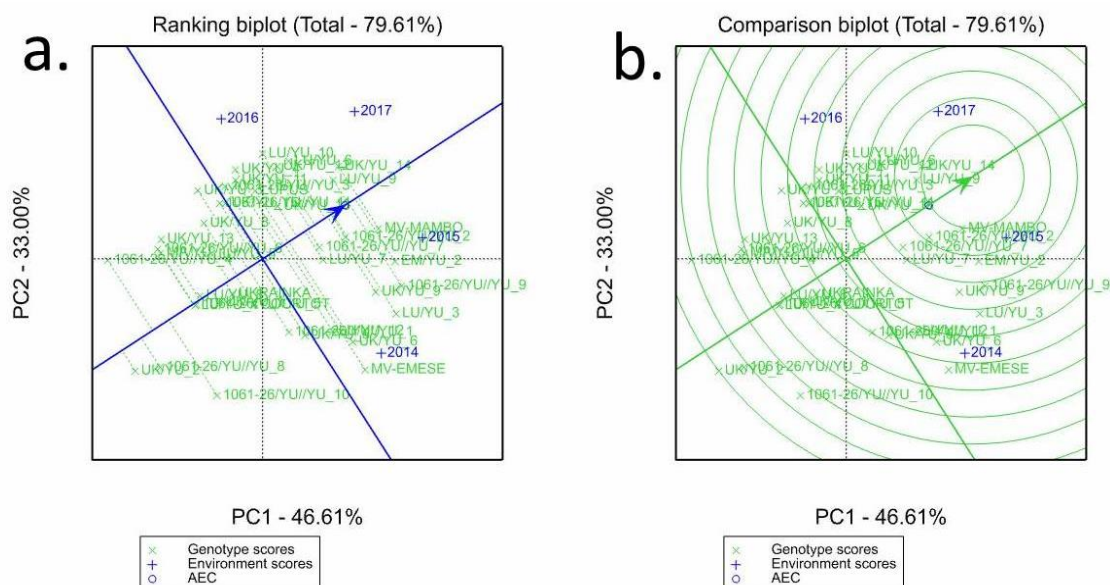
Vizsgáltuk a mért paraméterek stabilitása közötti összefüggéseket a CV értékek korreláció-analízisével (21. táblázat). A stabilabb ezerszemtömegű törzsek stabilabb szemkeménységgel rendelkeztek. A TOT-pentozán-tartalomra stabilabb törzseknek a WE-pentozán-tartalma is stabilabb volt. A stabilabb fehérjetartalom stabilabb siker- és keményítőtartalommal járt együtt. A vízfelvételértékek stabilitása a fehérje- és sikértartalom stabilitásával függött össze, a pentozánok stabilitásával nem. A CV értékek ugyan megmutatják, hogy egy genotípus adott tulajdonsága stabil-e a különböző környezetekben, azonban nem ad információt arról, hogy az értékek stabilan magasak vagy alacsonyak. Ebben ad többek között többet a GGE biplot analízis.

A GGE biplot ábrán a stabil genotípusok az AEC (átlag környezet) tengelyhez közel helyezkednek el, a tengelyen a nyíl a jobb teljesítőképesség irányába mutat (Melléklet 1. ábra). Következésképp azok a törzsek, amelyek az ábra jobb oldalán, az AEC tengelyhez és a nyíl végéhez közel helyezkednek el, azok a legnagyobb teljesítőképességűek és a legstabilabbak. Néhány törzs csak egyes évjáratokban rendelkezik stabilan magas értékekkel, ezek a törzsek az adott év jeléhez közel helyezkednek el. A másik tengely a környezetek és genotípusok nagyjátlagát mutatja.

A fehérje-, a keményítő- és a WE-pentozán-tartalom esetén a fajták nagymértékben az AEC tengely köré csoportosultak, mely azt mutatja, hogy többségükben stabilnak mondható a legtöbb törzs e tulajdonságokra (Melléklet 1.b,c,e ábra). A tengelytől távolabbi, azaz kevésbé

stabil törzs nagyobb számban az ezerszemtömeg, a TOT-pentozán és a vízfelvétel esetén jelent meg (Melléklet 1.a,d,f ábra). Ezekre a törzsekre így feltehetőleg nagyobb a környezeti hatás. Megfigyelhető továbbá, hogy a nagy ezerszemtömegű fajták nagy keményítőtartalommal is rendelkeznek (pl. MA/YU_1, LU/YU_2, LU/YU_5) (ábrák jobb oldalán, Melléklet 1.a,d,f ábra). A nagy keményítőtartalom mellé kis fehérjetartalom társult (pl. UK/YU_6, 15). Ugyanígy a nagy fehérjetartalom kis keményítőtartalommal járt együtt több törzsnél (pl. 1061-26/YU/YU_12, UK/YU_2). A nagy vízfelvételű törzsek a 1061-26 vonal keresztezései közül kerültek ki (pl. 1061-26/YU/YU_3, 4, 6, 9), míg az ‘Ukrainka’ törzsei rendelkeztek kisebb vízfelvétellel a többi törzshöz képest (pl. UK/YU_6,10,15). A legnagyobb és legstabilabb TOT-pentozán értékkel a LU/YU_10 és az UK/YU_1 törzsek rendelkeztek, míg a legstabilabb nagy WE-pentozán-tartalommal a LU/YU_1 és 3 törzsek bírtak. A normál pentozántartalmú szülői fajták a TOT- és WE-pentozán ábra ellentétes végein helyezkednek el a ‘Yumai-34-hez’ képest. Közülük az ‘Ukrainka’-nak van a legkisebb pentozántartalma. A szülői genotípusok beltartalmának stabilitása sok esetben kisebb, mint az újonnan létrehozott törzseké, amely stabil tulajdonságokkal bíró törzsek szelekciós lehetőségét ígéri.

Fajtajelölt szelekciója esetén különös jelentősége van a termés mennyiségének és stabilitásának. Az ötből négy év eredményei alapján a termés tekintetében legjobb teljesítményű törzsek az UK/YU_14, a LU/YU_9 és a 1061-26/YU/YU_2,7 voltak (19.a ábra). A négy különböző környezet, azaz év adatait figyelembe véve a legideálisabb genotípusoknak (19.b ábra) az UK/YU_14 és a LU/YU_9 tekinthetők (a legelső kör középpontja, a nyíl vége).



19. ábra. A 36 törzs és a szülő kontrollok termésének (a.) stabilitásvizsgálata és az (b.) ideális genotípus kiválasztása (2013–2017). x-genotípus, +- környezet, o- átlag környezet (AEC).

Bár nem szelektáltunk olyan törzseket, melyek több tulajdonságra is nagyfokú stabilitást mutatnának, meg kell azonban jegyezni, hogy a GGE biplot ábrán számos törzs a tengely köré csoportosul, mely azt jelzi, hogy nincs szignifikáns különbség e törzsek stabilitása között.

Valamennyi tulajdonság esetén csak néhány olyan törzs volt, melyek stabilitása a fajták és környezetek nagy átlagától szignifikánsan különbözött. Ezek gyakorlati hasznosíthatósága nagy valószínűséggel korlátozott.

4.4.3 Az időjárási körülmények hatásának vizsgálata

Korreláció-analízist végeztünk, hogy összefüggést keressünk az átlagos minőségi adatok és az időjárási paraméterek között (22. táblázat). Az ezerszemtömeg, a TOT- és WE-pentozán-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. Szignifikáns értékeket azonban csak az ezerszemtömeg és keményítőtartalom esetén kaptunk. A liszt vízfelvételének értékét leginkább a hideg napok befolyásolták: az abszolút minimum hőmérséklet és az utolsó 100 nap leghidegebb napjai. A Zeleny és a sikerterülés értéke szintén ez utóbbi paramétertől és a 25 °C-nál melegebb napok számától függött. A sikerindex (GI) az átlaghőmérséklettől és a -10 °C-nál hidegebb napok számától, míg a tésztabilitás a csapadék mennyiségétől és a 30 °C-nál melegebb napok számától függött.

21. táblázat. A fizikai és beltartalmi tulajdonságok variációs együttható (CV, Coefficient of Variation) értékeinek korrelációja.

| Tulajdonságok | TOT-pentozán | WE-pentozán | Fehérje | Sikér | Keményítő | Amilóz | Hektoliter | Ezerszemtömeg | HI | Lisztkihozatal | Vízfelvétel | Zeleny | Sikérterület | GI | Tésztakialakulás |
|-------------------------|--------------|-------------|---------|---------|-----------|---------|------------|---------------|---------|----------------|-------------|--------|--------------|------|------------------|
| TOT-pentozán (%) | 1 | | | | | | | | | | | | | | |
| WE-pentozán (%) | 0,5184 | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| Fehérje (%) | n.s. | n.s. | 1 | | | | | | | | | | | | |
| Sikér (%) | n.s. | n.s. | 0,5897 | 1 | | | | | | | | | | | |
| Keményítő (%) | n.s. | n.s. | 0,4455 | 0,5219 | 1 | | | | | | | | | | |
| Amilóz (%) | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | 1 | | | | | | | | | |
| Hektoliter g | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | 1 | | | | | | | | |
| Ezerszemtömeg (g) | n.s. | -0,3271 | n.s. | n.s. | n.s. | 0,5162 | n.s. | 1 | | | | | | | |
| HI | n.s. | n.s. | n.s. | -0,4228 | n.s. | n.s. | n.s. | 0,3471 | 1 | | | | | | |
| Lisztkihozatal (%) | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | 1 | | | | | |
| Vízfelvétel (%) | n.s. | n.s. | 0,4444 | 0,5673 | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | -0,3798 | n.s. | 1 | | | | |
| Zeleny (m)l | n.s. | n.s. | 0,3798 | n.s. | 0,4778 | n.s. | n.s. | 0,3276 | n.s. | n.s. | 0,3570 | 1 | | | |
| Sikérterület (mm) | n.s. | n.s. | 0,3176 | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | 1 | | |
| GI | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | 1 | |
| Tésztakialakulás (perc) | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | 0,4116 | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | 1 |
| Stabilitás (perc) | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | 0,3262 | -0,3245 | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | 0,4149 | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. |
| Ellágyulás_12 (FU) | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. |
| Értékszám | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | 0,3949 | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | n.s. | 0,8697 |

n=42, r 5% = 0,3044, r 1% = 0,3932, r 0,1% = 0,4896, n=42, n.s. – nem szignifikáns, GI – sikérindex, HI – szemkeménység index

22. táblázat. 36 törzs átlagos beltartalmi és sütőipari minőségének (2013–2017) összefüggése az időjárási körülményekkel.

| Tulajdonságok | Termesztési időszak napjainak száma | Kumulált csapadékösszeg (mm) | Átlaghőmérséklet °C | Abszolút minimum hőmérséklet °C | Abszolút maximum hőmérséklet °C | Kumulált csapadékösszeg az utolsó 100 napban (mm) | Átlaghőmérséklet az utolsó 100 napban °C | Abszolút minimum hőmérséklet az utolsó 100 napban °C | Napok száma, ha Tmin<=0 °C | Napok száma, ha Tmin<=-10 °C | Napok száma, ha Tmax>=25 °C | Napok száma, ha Tmax>=30 °C |
|-------------------------|-------------------------------------|------------------------------|---------------------|---------------------------------|---------------------------------|---|--|--|----------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| TOT-pentozán (%) | -0,3676 | 0,3764 | 0,0877 | 0,3388 | -0,6484 | 0,6515 | -0,3293 | 0,1871 | -0,4020 | -0,0573 | -0,1257 | -0,6596 |
| WE-pentozán (%) | -0,4545 | 0,3039 | 0,2126 | 0,4554 | -0,5804 | 0,5654 | -0,1400 | 0,3557 | -0,3913 | -0,2017 | 0,0595 | -0,5084 |
| Fehérje (%) | 0,4452 | -0,0880 | -0,7965 | -0,3591 | 0,3636 | -0,2604 | -0,2502 | 0,2639 | 0,6724 | 0,6722 | 0,0288 | -0,2820 |
| Sikér (%) | 0,0430 | 0,6908 | -0,3965 | -0,1941 | -0,1414 | 0,4534 | -0,6564 | -0,7341 | -0,2401 | 0,3558 | -0,8864 | -0,6084 |
| Keményítő (%) | 0,0770 | -0,3604 | -0,1098 | 0,0914 | 0,9521 | -0,8338 | 0,7525 | 0,6445 | 0,6560 | -0,1212 | 0,6905 | 0,7460 |
| Amilóz (%) | -0,4959 | 0,6577 | -0,1447 | 0,5368 | 0,3279 | 0,1264 | 0,1695 | 0,4253 | -0,0114 | -0,1646 | 0,0165 | -0,2229 |
| Hektoliter (kg) | 0,6273 | -0,3581 | -0,5998 | -0,5588 | 0,8610 | -0,7670 | 0,1286 | -0,0820 | 0,7838 | 0,4854 | 0,0693 | 0,4361 |
| Ezerszemtömeg (g) | -0,0941 | -0,4614 | 0,2369 | 0,2637 | 0,7947 | -0,7878 | 0,9333 | 0,7252 | 0,4571 | -0,4086 | 0,8577 | 0,9047 |
| HI | 0,2557 | 0,3394 | -0,6089 | -0,3273 | -0,4149 | 0,4842 | -0,8249 | -0,3190 | 0,0124 | 0,6514 | -0,5956 | -0,8760 |
| Lisztkihozatal (%) | -0,1486 | -0,4559 | 0,5277 | 0,2425 | 0,5056 | -0,6034 | 0,8515 | 0,3721 | 0,1251 | -0,5724 | 0,6683 | 0,9369 |
| Vízfelvétel (%) | -0,6050 | 0,5086 | 0,0541 | 0,6877 | 0,3357 | 0,0421 | 0,4041 | 0,6731 | -0,0179 | -0,3597 | 0,2938 | -0,0427 |
| Zeleny (ml) | -0,2007 | -0,3785 | 0,1738 | 0,3902 | 0,4692 | -0,5067 | 0,7492 | 0,9791 | 0,3909 | -0,3307 | 0,9062 | 0,5219 |
| Sikérterület (mm) | -0,4821 | -0,0664 | 0,3219 | 0,6453 | 0,5581 | -0,4154 | 0,8707 | 0,9415 | 0,1948 | -0,5680 | 0,8163 | 0,5563 |
| GI | 0,7257 | -0,1702 | -0,8237 | -0,7444 | -0,0836 | -0,0031 | -0,7233 | -0,3320 | 0,4671 | 0,9131 | -0,4016 | -0,5231 |
| Tésztakialakulás (perc) | -0,8227 | 0,8328 | 0,2481 | 0,8053 | -0,1950 | 0,5659 | 0,0792 | 0,3521 | -0,5072 | -0,4580 | -0,0772 | -0,4278 |
| Stabilitás (perc) | -0,4737 | 0,9305 | -0,1498 | 0,3778 | -0,3998 | 0,7641 | -0,4904 | -0,1399 | -0,4722 | 0,0262 | -0,5825 | -0,8441 |
| Ellágyulás_12 (FU) | 0,7895 | -0,7181 | -0,2275 | -0,8161 | -0,0724 | -0,3236 | -0,2916 | -0,5078 | 0,3275 | 0,4948 | -0,1093 | 0,2006 |
| Értékszám | -0,7112 | 0,9098 | 0,0898 | 0,6604 | -0,2895 | 0,6738 | -0,1575 | 0,1624 | -0,5131 | -0,2729 | -0,2922 | -0,6228 |

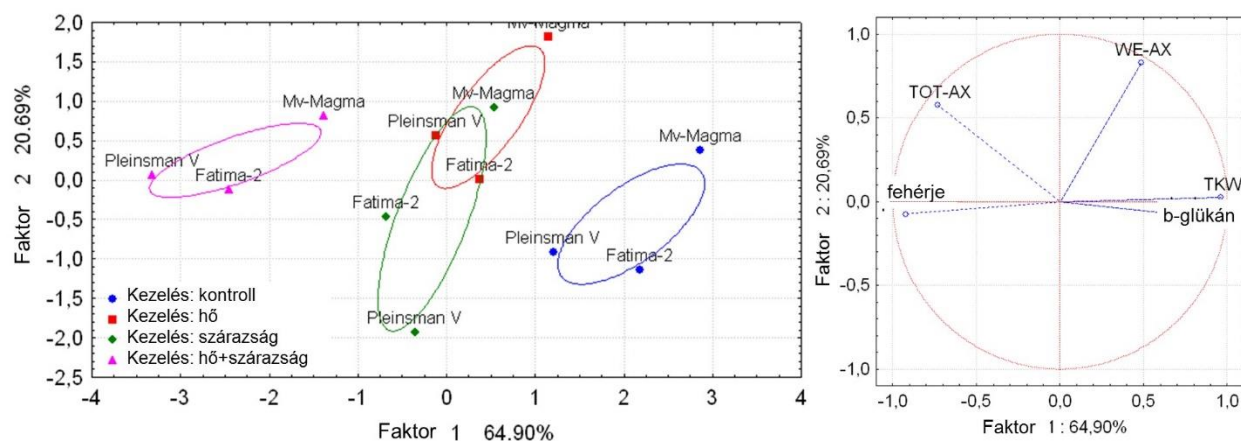
n=5, r_{0,5%}=0,8114, r_{0,1%}= 0,9172, r_{0,01%}= 0,9706, GI – sikérindex, HI – szemkeménység index

4.5 A hő- és a szárazságstressz hatása a búzaszem arabinoxilán és β -glükán rostanyag-összetételére és molekulaszerkezetére

Az előzőekben megállapítottuk, hogy a környezeti tényezőknek, így a meleg napok számának és az átlaghőmérsékletnek vagy a csapadék mennyiségének milyen jelentős hatása lehet a búza beltartalmi komponenseire. Következő lépésben a hő- (H), a szárazságstressz (D) és ezek kombinációjának (H+D) hatását vizsgáltuk (a kalászolás utáni 12. naptól 15 napon keresztül) három őszi búzafajta ('Plainsman V', 'Mv Magma' és 'Fatima 2') rostanyagtartalmára (arabinoxilán [AX] és β -glükán) és összetételére (Rakszegi és mtsai, 2014a).

4.5.1 A búzaszem összetételének változásai

A hő, a szárazság és a két stressz kombinációjának kitett három őszi búzafajta ('Plainsman V', 'Mv Magma' és 'Fatima 2') termésének rostanyagtartalmát és annak összetételét vizsgáltuk. A TOT-AX- és a WE-AX-tartalom meghatározására egy – a pentóz cukrok mérésére alkalmazott – kolorimetriás módszert használtunk. Az ezerszemtömeg, fehérje- és a rostanyagfrakciók adatainak főkomponens-analízise (PCA) kimutatta a hő- és a szárazságstressz egyértelmű hatását a szem beltartalmi összetételére és az ezerszemtömege (20. ábra). A hő- és a szárazságstressz elsősorban kisebb ezerszemtömeget és β -glükántartalmat eredményezett a kontrollhoz képest, miközben a fehérje- és az AX-tartalom nőtt. A legnagyobb TOT-AX- és fehérjetartalmat a kombinált stresszhatás eredményezte, míg a hőstressz magában jobban növelte az AX vízdíszíthatóságát (WE), mint a kombinált stresszhatás (H+D) (20. ábra, 23. táblázat).



20. ábra. Főkomponens-analízis 3 búzafajta ('Plainsman V', 'Mv Magma', 'Fatima 2') beltartalmi összetétele alapján: ezerszemtömeg, fehérje, β -glükán, TOT-AX, WE-AX. A különböző stresszkezelések eredményeit csoportosítottuk és ezeket különböző színnel jelöltük.

(TKW – ezerszemtömeg, TOT-AX – teljes arabinoxilán, WE-AX – vízdíszítható arabinoxilán).

23. táblázat. Ezerszemtömeg (TKW), fehérje-, β -glükán-, TOT-AX- és WE-AX-tartalom a. átlagértékei és szórása stresszelt és kontroll mintákban, b. a kontroll százalékában.**a.**

| Fajta | Kezelés | TKW | TKW sd | fehérje | fehérje sd | β -glükán | β -glükán sd | TOT-AX | TOT-AX sd | WE-AX | WE-AX sd |
|-------------|--------------|-------------|--------|---------|------------|-----------------|--------------------|---------|-----------|---------|----------|
| | | g/1000 szem | | % | | mg/g | | mg/g | | mg/g | |
| | | | | (sz.a.) | | (sz.a.) | | (sz.a.) | | (sz.a.) | |
| Mv Magma | kontroll | 28,84 | 1,00 | 16,10 | 0,21 | 7,57 | 0,60 | 37,96 | 2,85 | 8,31 | 0,64 |
| Mv Magma | hő | 24,76 | 2,65 | 19,60 | 0,42 | 6,32 | 0,44 | 48,12 | 0,87 | 8,99 | 0,32 |
| Mv Magma | szárazság | 24,06 | 1,25 | 17,20 | 0,14 | 5,19 | 0,21 | 48,23 | 3,89 | 7,78 | 0,37 |
| Mv Magma | hő+szárazság | 17,60 | 2,35 | 24,30 | 0,28 | 3,94 | 0,02 | 47,93 | 1,72 | 7,73 | 0,40 |
| Fatima-2 | kontroll | 28,64 | 2,96 | 18,10 | 0,14 | 7,23 | 0,16 | 35,60 | 1,24 | 6,78 | 0,55 |
| Fatima-2 | hő | 17,94 | 1,56 | 21,90 | 0,07 | 6,05 | 0,19 | 39,00 | 1,07 | 7,81 | 0,11 |
| Fatima-2 | szárazság | 19,63 | 0,75 | 21,80 | 0,21 | 5,02 | 0,61 | 45,80 | 2,30 | 6,50 | 0,26 |
| Fatima-2 | hő+szárazság | 12,34 | 1,60 | 26,80 | 0,21 | 4,76 | 0,48 | 52,58 | 1,01 | 6,35 | 0,19 |
| Plainsman V | kontroll | 23,12 | 1,74 | 20,70 | 0,35 | 6,75 | 0,24 | 36,28 | 3,50 | 7,01 | 0,45 |
| Plainsman V | hő | 18,29 | 0,45 | 24,50 | 0,35 | 5,69 | 1,06 | 42,02 | 0,70 | 8,17 | 0,27 |
| Plainsman V | szárazság | 19,42 | 1,87 | 22,90 | 0,35 | 5,03 | 0,21 | 34,87 | 0,61 | 5,87 | 0,30 |
| Plainsman V | hő+szárazság | 8,67 | 0,64 | 32,00 | 0,14 | 5,10 | 0,51 | 54,70 | 0,67 | 6,52 | 0,83 |

sd – szórás, sz.a. – szárazanyag, AX – arabinoxilán, TOT – teljes, TKW – ezerszemtömeg, WE – vízoldható

b.

| Fajta | Kezelés | TKW | TKW sd | fehérje | fehérje sd | β -glükán | β -glükán sd | TOT-AX | TOT-AX sd | WE-AX | WE-AX sd |
|-------------|--------------|----------|--------|----------|------------|-----------------|--------------------|----------|-----------|----------|----------|
| | | kontroll | | kontroll | | kontroll | | kontroll | | kontroll | |
| | | % | | % | | % | | % | | % | |
| Mv Magma | hő | 85,85 | 10,70 | 121,74 | 1,30 | 83,49 | 7,93 | 126,77 | 7,51 | 108,18 | 7,70 |
| Mv Magma | szárazság | 83,43 | 5,20 | 106,83 | 2,14 | 68,56 | 6,96 | 127,05 | 1,81 | 93,62 | 3,56 |
| Mv Magma | hő+szárazság | 61,03 | 13,35 | 150,93 | 0,81 | 52,05 | 4,05 | 126,26 | 8,07 | 93,02 | 4,76 |
| Fatima-2 | hő | 62,64 | 8,70 | 120,99 | 0,77 | 83,68 | 2,21 | 109,55 | 3,48 | 115,19 | 8,11 |
| Fatima-2 | szárazság | 68,54 | 3,82 | 120,44 | 0,32 | 69,43 | 3,14 | 128,65 | 2,74 | 95,87 | 1,41 |
| Fatima-2 | hő+szárazság | 43,09 | 12,97 | 148,07 | 0,96 | 65,84 | 12,15 | 147,70 | 5,02 | 93,66 | 4,00 |
| Plainsman V | hő | 79,11 | 2,46 | 118,36 | 1,69 | 84,30 | 3,56 | 115,82 | 9,65 | 116,55 | 6,42 |
| Plainsman V | szárazság | 84,00 | 9,63 | 110,63 | 1,43 | 74,52 | 18,63 | 96,11 | 1,67 | 83,74 | 3,30 |
| Plainsman V | hő+szárazság | 37,50 | 7,38 | 154,59 | 1,53 | 75,56 | 4,17 | 150,77 | 1,75 | 93,01 | 5,11 |

Vizsgálatainkban az ezerszemtömeg fajtától függően 14,1–37,4%-kal csökkent hőstresszre, 16,0–31,5%-kal szárazságstresszre és 39,0–62,5%-kal a két stressz együttes hatására (23. táblázat). Ezzel párhuzamosan a β -glükán-tartalom hő, szárazság és a kettő együttes hatására 15,8–16,6%, 25,5–31,4% illetve 24,5–47,9%-kal csökkent. A fehérje- és a TOT-AX-tartalom sorrendben 18,4–21,7% és 9,5–26,8%-kal nőtt hőstressz alatt, míg 48,1–54,6% és 26,3–50,8%-kal nőtt a két stressz együttes hatására. A szárazságstressz egyedüli hatására a fehérjetartalom 6,8–20,4%-kal nőtt, de a TOT-AX-tartalomra kifejtett hatása fajtánként változó volt. Szárazságra a TOT-AX-tartalom 3,9%-kal csökkent a szárazságtűrő Plainsman V-ben, míg maximum 28,6%-kal nőtt a másik két fajtában. A WE-AX-tartalom is nőtt hőstressz hatására (8,1–16,5%-kal), míg csökkent szárazság (4,2–16,3%-kal) és a két stressz együttes hatására is (6,4–7,0%).

24. táblázat. Különböző beltartalmi tulajdonságok korrelációja három búzafajta adatai alapján.

| | TKW (g) | Fehérje (%) | β -glükán (mg/g) | TOT-AX (mg/g) | WE-AX (mg/g) |
|---------------------------|---------|-------------|------------------------|---------------|--------------|
| TKW (g) | 1,00 | | | | |
| Fehérje (%) | -0,96 | 1,00 | | | |
| β -glükán (mg/g) | 0,72 | -0,62 | 1,00 | | |
| TOT-AX (mg/g) | -0,64 | 0,58 | -0,61 | 1,00 | |
| WE-AX (mg/g) | 0,43 | -0,44 | 0,34 | 0,03 | 1,00 |
| DP3 | 0,53 | -0,52 | 0,66 | -0,12 | 0,15 |
| DP4 | 0,61 | -0,53 | 0,80 | -0,57 | -0,03 |
| DP3/DP4 | 0,03 | -0,12 | -0,01 | 0,50 | 0,22 |
| DP3-4/DP5-11 | 0,65 | -0,60 | 0,80 | -0,36 | 0,18 |
| X | -0,98 | 0,92 | -0,66 | 0,70 | -0,32 |
| XX | -0,68 | 0,60 | -0,58 | 0,49 | -0,23 |
| Nem szubsztituált (US)* | -0,77 | 0,68 | -0,63 | 0,55 | -0,26 |
| Teljes (TOT)* | 0,08 | -0,12 | 0,05 | -0,05 | 0,15 |
| Monoszubsztituált AX (M)* | 0,25 | -0,30 | 0,14 | -0,20 | 0,26 |
| Diszubsztituált AX (D)* | -0,11 | 0,08 | -0,07 | 0,16 | 0,01 |
| M / D | 0,62 | -0,65 | 0,32 | -0,65 | 0,32 |
| US/M | -0,53 | 0,51 | -0,39 | 0,42 | -0,28 |
| US/D | -0,24 | 0,20 | -0,27 | 0,12 | -0,17 |
| US/M+D | -0,45 | 0,43 | -0,36 | 0,34 | -0,25 |
| US/TOT | -0,45 | 0,42 | -0,38 | 0,34 | -0,23 |
| M/TOT | 0,72 | -0,76 | 0,36 | -0,62 | 0,49 |
| D/TOT | -0,48 | 0,50 | -0,24 | 0,54 | -0,21 |

$r_{5\%} = 0,5324$, $r_{1\%} = 0,6614$, $r_{0,1\%} = 0,7800$

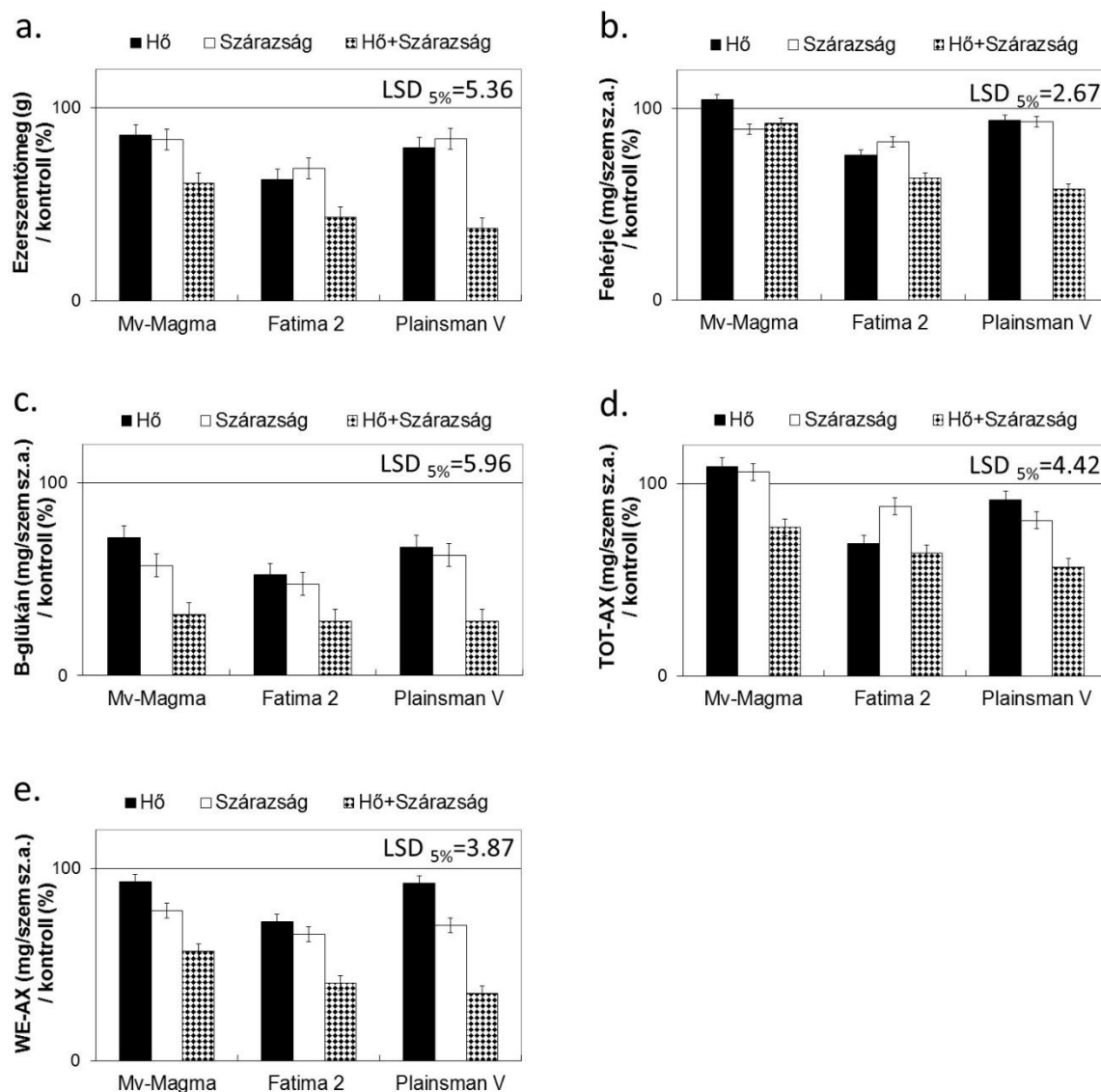
* A különböző AXOS egységek mennyiségét a görbe alatti területértékekből számítjuk a következőképp:

$M = (xa3xx) + 2(xa3a3xx) + 2(xa3xa3xx) + (xa3a2+3x) + (xa3xa2+3xx)$, $D = (xa2+3xx) + (xa3a2+3x) + (xa3xa2+3xx)$,
 US = $x+xx+xxx$ és TOT = $x+xx+xxx+xa3xx+xa3a3xx+xa3xa3xx+(xa2+3xx)+(xa3a2+3xx)+(xa3xa2+3xx)$ a teljes AXOS

AX – arabinoxilán, D – diszubsztituált, DP – polimerizáltsági fok, M – monoszubsztituált, TOT – teljes, TKW – ezerszemtömeg, US – nem szubsztituált, WE – vízdoldható.

Mivel a búzaszem beltartalmi összetétele erősen korrelált az ezerszemtömeggel (24. táblázat), az eredményeket átszámítottuk egy szemre vonatkoztatva és úgy hasonlítottuk a kontroll mintákhoz a stresszelteket, hogy az ezerszemtömeg hatásait is figyelembe vegyük (21. ábra). Valamennyi paraméter mennyiségében csökkenés mutatkozott mindhárom fajtánál, a stresszkezelések hatására. Közülük a hőstressznek volt a legkisebb hatása a három fajta beltartalmi összetételére. A fajták közül pedig az 'Mv Magma' fehérje és TOT-AX-tartalma maradt a legstabilabb hőstressz alatt. A szárazságstressz hatása statisztikailag nem különbözött a hőstressztől az ezerszemtömeg, a fehérje- és a β -glükán-tartalom esetén, de mindhárom stressz csökkentette e paraméterek értékét. A kombinált stressz hatása szignifikánsan nagyobb mértékű volt a hő és a szárazság egyedi hatásainál. A TOT-AX-

tartalom esetén a két kezelés hatása szignifikánsan eltért a Fatima 2 és a Plainsman V fajtáknál, de mindkét stressz szignifikánsan csökkentette a TOT-AX értékét. A WE-AX-tartalom esetén a ‘Plainsman V’ és az ‘Mv Magma’ fajtákra nagyobb hatása volt a szárazságstressznek, mint a hőstressznek, azonban valamennyi stressz hatására szignifikánsan csökkent a WE-AX-tartalom. A legnagyobb hatása ismét a két stressz kombinálásának volt és drasztikus csökkenést eredményezett valamennyi mért paraméterben (21. ábra).

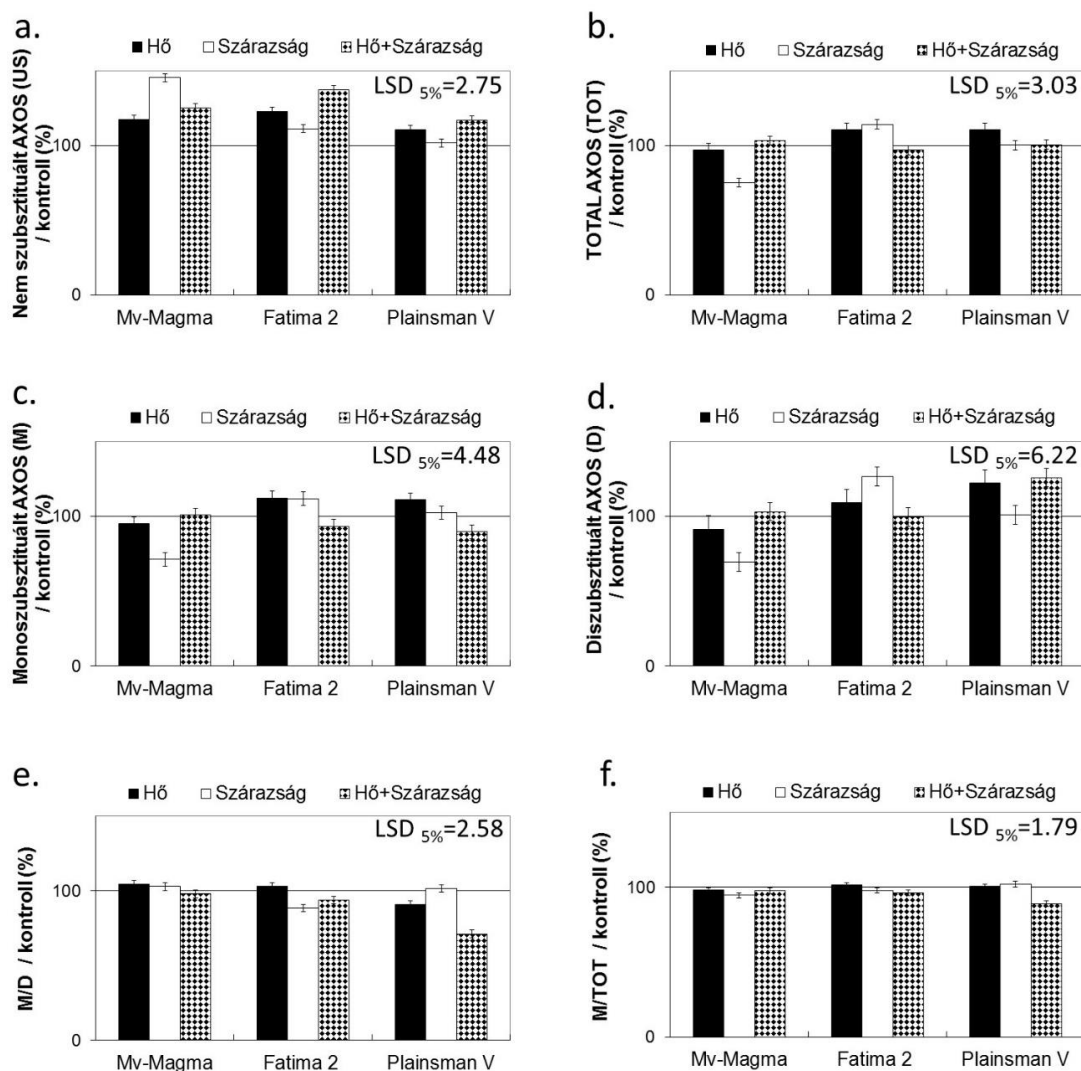


21. ábra. Stressz kezelések hatása a beltartalmi tulajdonságok mennyiségére egy szemre vetítve és a kezeletlen kontrollhoz viszonyítva. a. ezerszemtömeg, b. fehérje, c. β -glükán, d. TOT-AX, e. WE-AX tartalom egy szemben a kontroll %-ában. (TOT-AX – teljes arabinoxilán, WE-AX – vízdoldható arabinoxilán).

4.5.2 Az arabinoxilán mennyiségének és összetételének változásai

Az arabinoxilán a búzában található legfontosabb élelmi rostkomponens, melynek mennyisége 1,35–2,75% sz.a. lisztben és 13,2–22,1% sz.a. korpában (Gebruers és mtsai, 2008). Az arabinoxilán-molekulák szerkezete, melyet meghatároz az arabinóz helyettesítés nélküli, monoszubsztituált és 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 nyert mintázatot az adott minta „ujjlenyomatának” tekinthetjük. A különböző minták emésztésével kapott AXOS-molekulák arányát a 22. és a 23. ábra mutatja. A stresszhatásra bekövetkező AX-t jellemző adatokban (TOT-AX, WE-AX, AXOS mintázat) bekövetkező változások összefüggéseit pedig PCA eljárással elemeztük (24. ábra).

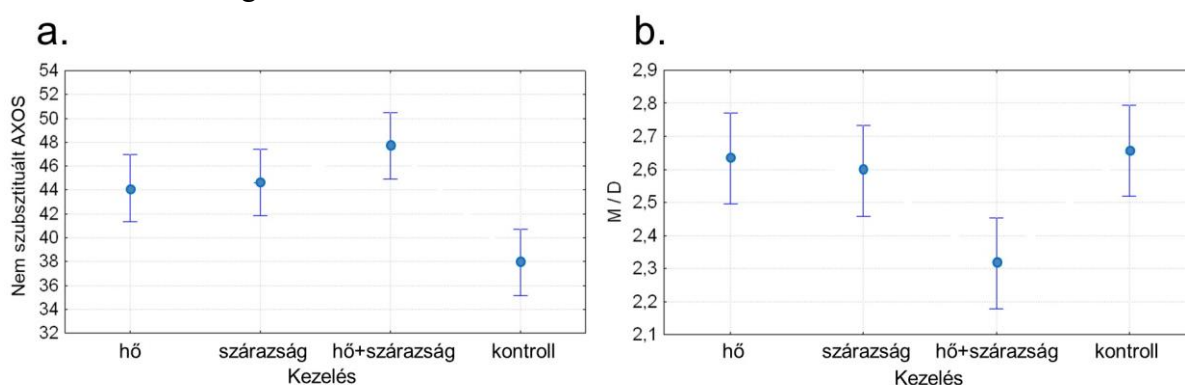


22. ábra. Emésztéssel kapott arabinoxilán-egységek mennyisége stresszelt mintákban, a kontroll %-ában kifejezve, ahol a. arabinóz szubsztitúció nélküli xilóz (US), b. teljes AXOS (TOT), c. monoszubsztituált AXOS (M), d. diszubsztituált AXOS (D), e. M/D arány, f. M/TOT arány. (AXOS – arabinoxilán oligoszacharid).

A különböző AXOS-egységek mennyiségét a görbe alatti területértékekből számítjuk a következőképp: $M = (xa3xx) + 2(xa3a3xx) + 2(xa3xa3xx) + (xa3a2+3x) + (xa3xa2+3xx)$, $D = (xa2+3xx) + (xa3a2+3x) + (xa3xa2+3xx)$, $US = x+xx+xxx$, $AXOS$ és $TOT = x+xx+xxx+xa3xx+xa3a3xx+xa3xa3xx+(xa2+3xx)+(xa3a2+3xx)+(xa3xa2+3xx)$ a teljes AXOS.

Az abiotikus stressznek hatása volt az AXOS mintázatra, így növelte a xilóz (x), a xilobióz (xx) vagy a diszubsztituált AXOS- ($xa2+3xx$) és a keverten szubsztituált AXOS- ($xa3a2+3xx$, $xa3xa2+3xx$) molekulák arányát a monoszubsztituált AXOS-molekulák rovására

(xa3xx , xa3a3xx , xa3xa3xx). Ezek az eredmények egyértelműen tükröződnek olyan mennyiségi változásokban (22. ábra), mint a szubsztitúció nélküli AXOS (US) vagy a monoszubsztituált (M) AXOS aránya a di- (D) és teljes AXOS-hoz képest. A varianciaanalízis eredményei szintén alátámasztják ezen eredményeket, mivel az átlag US AXOS és M/D értékek szignifikánsan különböztek a kezelések között mindhárom fajta esetén (23. ábra, fajtánkénti adatokat nem mutatjuk). A US AXOS aránya szignifikánsan nagyobb volt valamennyi stresszkezelésre a kontroll kezeléshez képest, ugyanakkor az M/D értéke csak a kombinált stressz hatására lett szignifikánsan kisebb a kontrollnál (23. ábra). Az M/TOT arány hasonlóan viselkedett az M/D arányhoz, azaz kisebb különbségeket mutatott szárazságra és kombinált stresszhatásra. A PCA analízis (24. ábra) a TOT-AX, ezen belül is a US-AXOS mennyiségi arányának a növekedését valamint az M/D arány csökkenését mutatta ki a hő és szárazságstressz hatására.



23. ábra. Emésztéssel kapott arabinoxilán-egységek mennyiségeinek változása a különböző stresszkezelések hatására egytényezős varianciaanalízissel. a. arabinóz szubsztitúció nélküli xilóz (US), b. M/D arány.

(AXOS – arabinoxilán oligoszacharid, M – monoszubsztituált AXOS, D – diszubsztituált AXOS (D), US – arabinóz szubsztitúció nélküli xilóz AXOS).

A különböző AXOS-egységek mennyiségét a görbe alatti területértékekből számítjuk a következőképp:

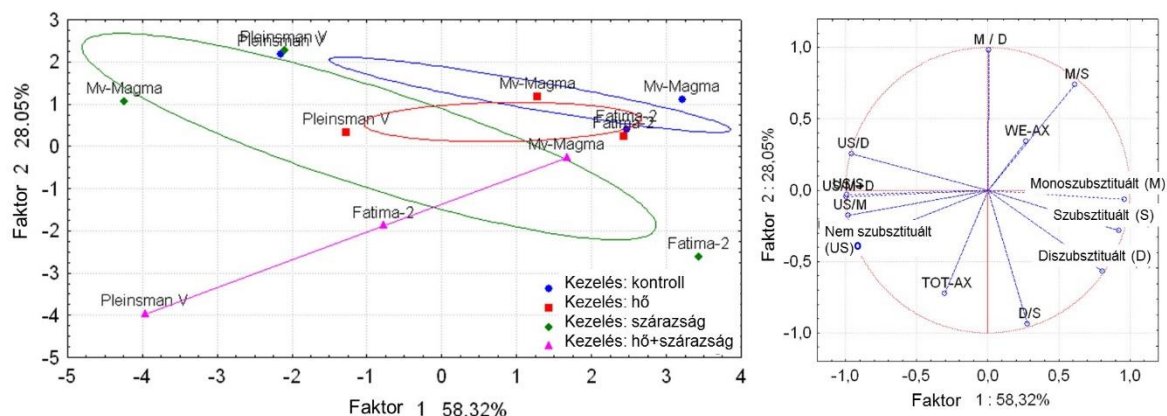
$M = (\text{xa3xx}) + 2(\text{xa3a3xx}) + 2(\text{xa3xa3xx}) + (\text{xa3a2+3x}) + (\text{xa3xa2+3xx})$ és $D = (\text{xa2+3xx}) + (\text{xa3a2+3x}) + (\text{xa3xa2+3xx})$, $US = \text{x+xx+xxx}$ AXOS.

4.5.3 A β -glükán mennyiségének és összetételének változásai

A β -glükán kisebb mennyiségben található meg búzában, mint az AX, a teljesörlemény 0,5–0,95%-át (sz.a.) teszi ki (Gebruers és mtsai, 2008). A β -glükán mennyisége a fentiek szerint kisebb a hő- és szárazságstressznek kitett termésben, és ezt a PCA analízis eredményei is megerősítették (25. ábra). A hő- és a szárazságstressznek hasonló hatása volt az ‘Mv Magma’ és a ‘Fatima 2’ fajtákra, míg a kombinált stressznek még nagyobb volt a hatása, mint az egyedi stressztényezőknek. Ezzel ellentétben a hőstressznek nagyobb hatása volt a ‘Plainsman V’ β -glükán-tartalmára, mely utal a fajta nagyobb stressztűrő képességére.

A β -glükán licsenáz enzimmel történő emésztésével keletkező glüko-oligoszacharidok (GOS) polimerizációs foka (DP) 3–10 között változhat, melyek közül a DP3 és a DP4 a legnagyobb mennyiségben megjelenő formák. A mintákban a DP3 és a DP4 egységek aránya 1,92 és 2,30 között változott, de nem volt egyöntetű szignifikáns különbség a három kezelés között vagy a kezelt és a kontroll minták között (26. ábra). Azonban mind a hő, a szárazság és ezek kombinált hatása szignifikáns csökkenést eredményezett a rövid és a hosszú glükánegységek arányában $[(\text{DP3}+\text{DP4})/(\text{DP5}+\text{DP6}+\text{DP7}+\text{DP8}+\text{DP9}+\text{DP10}+\text{DP11})]$, azaz a

hosszú láncok aránya nőtt. A kezelések között azonban itt sem volt szignifikáns a különbség (kontrollok: 3,39–5,34; kezelt minták: 1,76–2,83) (25. ábra, 26. ábra).

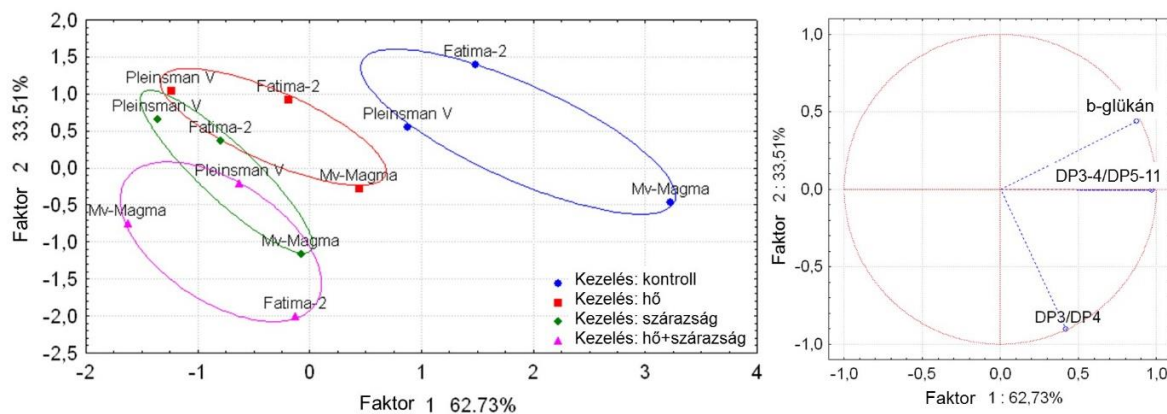


24. ábra. Főkomponens-analízis három búzafajta ('Plainsman V', 'Mv-Magma', 'Fatima 2') enzimes emésztéssel kapott arabinoxilán-egységei által alkotott ujjenyomata alapján.

A különböző stresszkezelések eredményeit csoportosítottuk és külön színnel jelöltük. (AXOS – arabinoxilán oligoszacharid, D – diszubsztituált AXOS, M – monosubsztituált AXOS, TOT – teljes AXOS, TOT-AX – teljes arabinoxilán, US – arabinóz szubsztitúció nélküli xilóz AXOS, WE-AX – vízoldható arabinoxilán).

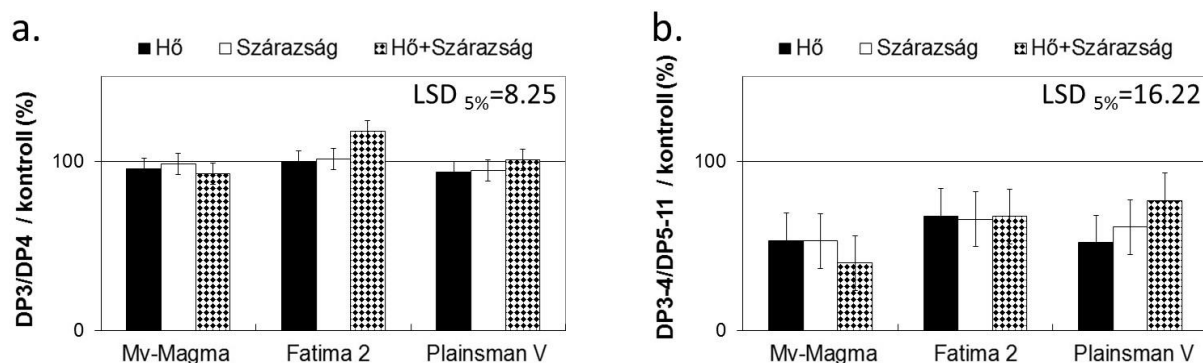
A különböző AXOS-egységek mennyiségét a görbe alatti területértékekből számítjuk a következőképp:

$M = (x_1x_2) + 2(x_1x_3) + 2(x_2x_3) + (x_1^2 + x_2^2 + x_3^2)$, $D = (x_1^2 + x_2^2) + (x_1x_2 + x_2x_1) + (x_1x_3 + x_3x_1) + (x_2x_3 + x_3x_2)$ a teljes AXOS.



25. ábra. Főkomponens-analízis három búzafajta ('Plainsman V', 'Mv-Magma', 'Fatima 2') enzimes emésztéssel kapott β -glükán-egységei alapján.

A különböző stresszkezelések eredményeit csoportosítottuk és külön színnel jelöltük. (DP–polimerizációs fok, DP3–4/DP5–11 az DP3+DP4/DP5+DP6+DP7+DP8+DP9+DP10+ DP11).



26. ábra. Az enzimes emésztéssel kapott β -glükán-egységek mennyisége stresszelt mintákban, a kontroll %-ában. a. DP3/DP4, b. DP3-4/DP5-11.

(DP – polimerizáció foka, DP3–4/DP5–11 az DP3+DP4/DP5+DP6+DP7+DP8+DP9+DP10+ DP11).

4.6 Az *Aegilops* U és M kromoszómáinak hatása a búza fehérje- és rostanyagtartalmára, valamint összetételére

Az egyik lehetőség a búza rostanyagtartalmának és -összetételének javítására a búzával rokon fajok génjeinek bevitele búzába. Vizsgáltuk ezért az *Aegilops* (*Aegilops biuncialis* és *Aegilops geniculata*) kromoszómáinak addíciós hatását a búza beltartalmának összetételére (Rakszegi és mtsai, 2017). Ezek az eredmények segíthetik azon genomi régiók feltérképezését, melyek az *Aegilops* étkezési rosttartalmáért felelősek és hozzájárulnak a vad allélek hatékony átviteléhez búza introgressziós vonalakba, melyek egészségesebb gabonafélék előállítását teszik lehetővé.

Ezen kívül az előző fejezethez kapcsolódóan vizsgáltuk a szárazságstressz hatásait is a búza/*Aegilops* addíciós vonalak rostanyagtartalmára és -összetételére, ám ez a téma már nem képezi a dolgozat részét (Rakszegi és mtsai, 2019).

4.6.1 Az *Ae. biuncialis* és az *Ae. geniculata* beltartalmi összetételének fajon belüli variabilitása

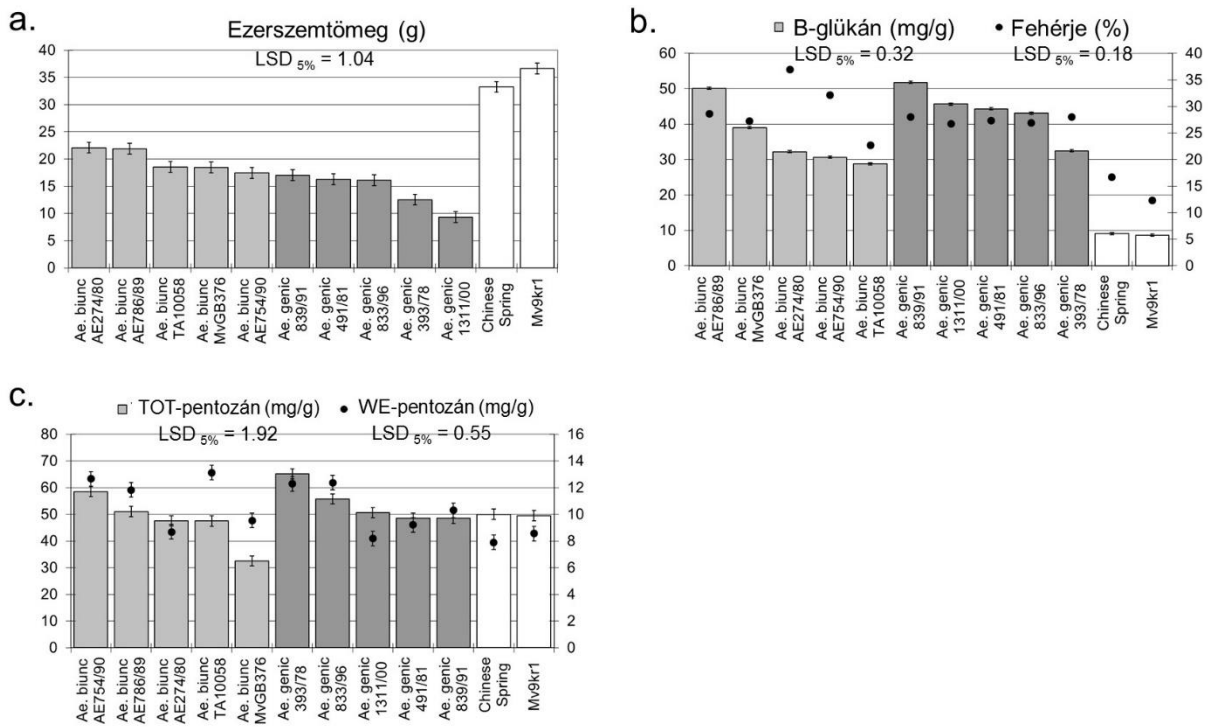
Az U és az M genommal rendelkező *Aegilops* fajok rostanyagtartalmának összetételéről eddig nem jelent meg irodalom, de a HMW glutenin allélorösszetételben nagy variabilitást találtak ezekben a fajokban (Ahmadpoor és mtsai, 2014; Dai és mtsai, 2015; Garg és mtsai, 2016; Medouri és mtsai, 2015; Wang és mtsai, 2015). Az *Ae. geniculata* és az *Ae. biuncialis* fehérje-, β -glükán-, TOT-pentozán- és WE-pentozán-tartalmában vélhető variabilitás meghatározása céljából mindkét fajból 5–5 génbanki tételt vizsgáltunk. Az *Ae. geniculata* és az *Ae. biuncialis* vonalak szignifikánsan kisebb ezerszemtömeeggel (TKW) rendelkeztek (27. ábra), mint a két búzaszülő ('Chinese Spring' és 'Mv9kr1'), 17,4 g és 22,1 g (a megfelelő génbanki szám sorban: AE754/90 illetve AE274/80), valamint 9,3 g és 17,0 g (génbanki szám AE1311/00 illetve AE839/91) közötti értékekkel.

A β -glükán- és a fehérjetartalom szignifikánsan nagyobb volt valamennyi *Aegilops*sban, mint búzában (27.b ábra). Az *Ae. geniculata* és az *Ae. biuncialis* fajokon belül a β -glükán-tartalom ~30 és 50 mg/g között változott az ezerszemtömegtől függetlenül. Az *Ae. biuncialis* vonalak fehérjetartalma azonban sokkal változatosabb volt (~22–37%), mint az *Ae. geniculata* vonalaké (~26%), melyek között nem találtunk szignifikáns különbséget a fehérjetartalommal illetően. A TOT-pentozán és a WE-pentozán mennyisége szintén nagy

diverzitást mutatott (~30–60 mg/g valamint ~8–14 mg/g), de értékük hasonló nagyságrendű volt a búzáéval, illetve egy minta kivételével (MvGB376) csak kicsivel volt annál nagyobb (27.c ábra).

4.6.2 Az *Aegilops* kromoszómák hatása a búza ezerszemtömegére és fehérjetartalmára

Az *Ae. geniculata* (TA2899) és *Ae. biuncialis* (MvGB642) szülők, szignifikánsan kisebb (<50%) **ezerszemtömegeg** (TKW) rendelkeztek, mint a búza szülők, vagyis a ‘Chinese Spring’ és az ‘Mv9kr1’ (28.a ábra). A ‘Chinese Spring’ × *Ae. geniculata* kombinációban, az 1U^g, 4-5-6U^g, 1M^g és 7M^g kromoszóma addíciós vonalak szignifikánsan nagyobb ezerszemtömegeg rendelkeztek, mint a búza szülők, míg a 2U^g, 2M^g és 5M^g vonalak ezerszemtömege szignifikánsan kisebb volt. Az *Ae. biuncialis* kromoszómáknak nem volt hatása a TKW-re. A kisebb TKW-val párhuzamosan az *Aegilops* vonalak **fehérjetartalma** nagyobb volt a búzáénál (28.b ábra), mely egyfajta termékéghígulási hatásnak köszönhető, azaz a búzaszem nagyobb tömege a megnövekedett keményítő tartalomnak köszönhető, amely a fehérjetartalom relatív csökkenését eredményezi. Az *Ae. geniculata* 2U^g, 4U^g, 5U^g, 7U^g, 2M^g, 5M^g és 7M^g kromoszómáinak addíciója növelte a búza (‘Chinese Spring’) fehérjetartalmát, míg a 3U^b, 2M^b, 3M^b és 7M^b *Ae. biuncialis* kromoszómák az ‘Mv9kr1’ búzatörzset növelték (28.b ábra).



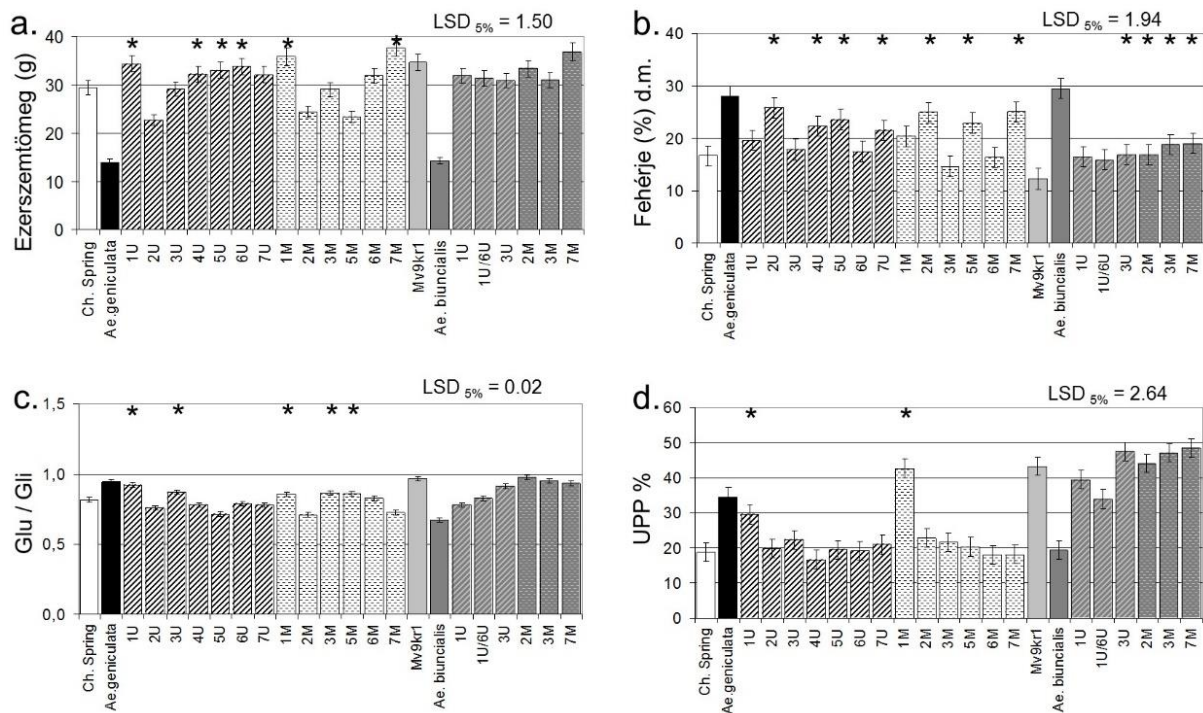
27. ábra. Öt *Aegilops biuncialis* és öt *Aegilops geniculata* génbanki tétel ezerszemtömege és szemösszetétele. a. ezerszemtömeg, b. fehérje- és β -glükán-tartalom, TOT-pentozán- és WE-pentozán-tartalom.

(LSD – legkisebb szignifikáns különbség, TOT – teljes, WE – vízdoldható).

Szántóföldi körülmények között a 6U^g, 3M^g, 6M^g és 7M^b addíciók eredményezték a legstabilabb, búzához hasonló ezerszemtömeget, míg a többi vonal ezerszemtömege csökkent az *Aegilops* kromoszóma addíciók hatására (Melléklet 2.a ábra). Valószínű, hogy az *Aegilops* addíciós vonalak búzánál szignifikánsan nagyobb fehérjetartalmát a kisebb ezerszemtömeg

eredményezte (a 2M^b és 3M^b addíciók kivételével), melyek közül az 1U^b, 1U/6U^b, 2U^g, 3U, 4U^g, 2M^g és mindkét 7M addíciónak volt a legnagyobb hatása a fehérjetartalomra (Melléklet 2.b ábra).

A búza jó sütőipari minősége összefüggésben áll a polimer gluteninek aránylag nagyobb, gliadinokhoz viszonyított mennyiségével (Glu/Gli), valamint az oldhatatlan polimer glutenin fehérje frakció mennyiségével (UPP%). Az *Ae. geniculata* (TA2899) szülőnek a ‘Chinese Spring’ búzáénál nagyobb volt a Glu/Gli aránya és az UPP%-a is, míg ez a két paraméter kisebb volt az *Ae. biuncialis*-ban (MvGB642), mint az ‘Mv9kr1’ törzsből (28.c,d ábra). Az *Aegilops* kromoszómák búzaminőségre kifejtett hatása a ‘Chinese Spring’ genetikai háttérben jobban érvényesült, mivel a ‘Chinese Spring’ modellbúza genotípusnak gyenge a feldolgozóipari minősége, kisebb a Glu/Gli aránya és az UPP% értéke, mint a jó sütőipari minőségű ‘Mv9kr1’-nek. Ezzel összhangban az 1U^g és 1M^g kromoszómák addíciójának hatására szignifikánsan nőtt a polimer glutenin fehérjék aránya a ‘Chinese Spring’-ben, mely jobb feldolgozóipari minőségre utal (28.c, d ábra). A 3U^g, 3M^g és 5M^g kromoszómák addíciója szintén növelte a Glu/Gli arányt, ugyanakkor az UPP%-ra nem voltak hatással. Az *Ae. biuncialis* esetén szintén az 1U^b és 1U^b/6U^b kromoszómáknak volt a legnagyobb hatása a fehérje-összetételre és a glutenin polimer arányára (28.c,d ábra), de ez a hatás negatív volt, vagyis a monomer gliadin fehérjék aránya nőtt a gluteninek rovására.



28. ábra. Két búza genotípus (cv. ‘Chinese Spring’ és ‘Mv9kr1’), két *Aegilops* faj (*Ae. geniculata*, *Ae. biuncialis*) és búza–*Aegilops* kromoszóma addíciós vonalak beltartalmi összetétele érett állapotban a. Ezerszemtömeg, b. Fehérjetartalom (%), c. Glu/Gli, d. UPP%.

(Gli – gliadin, Glu – glutenin, LSD – legkisebb szignifikáns különbség, TKW – ezerszemtömeg, UPP – oldhatatlan polimer fehérje).

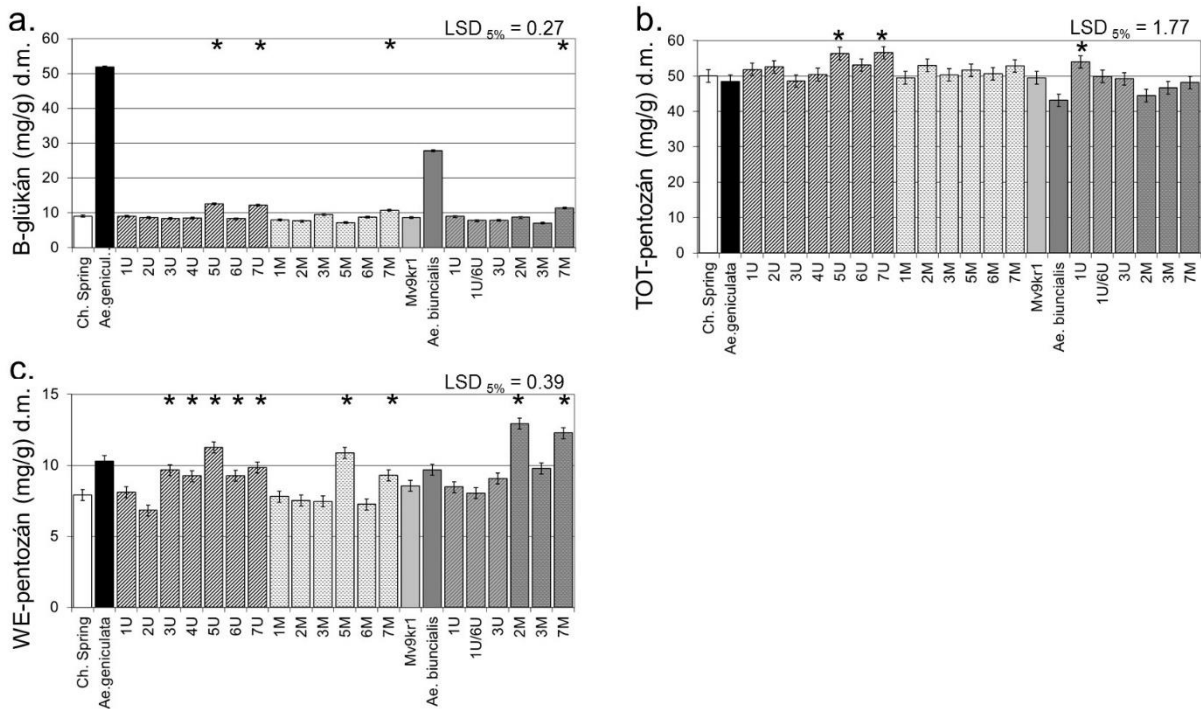
*szignifikánsan nagyobb a búza (*T. aestivum*) kontrollnál.

4.6.3 Az *Aegilops* kromoszómák hatása a β -glükán- és az AX-tartalomra

A teljesörlemény mg/g szárazanyagban kifejezett **β -glükán-tartalma** ötször akkora az *Ae. geniculata* (TA2899) szülőben, mint a ‘Chinese Spring’-ben és 2,5-szer akkora az *Ae.*

biuncialis (MvGB642) szülőben, mint az ‘Mv9kr1’-ben (29.a ábra). Az 5U^g, 7U^g és a 7M^g kromoszóma addíciós vonalak, melyek a búzához hasonló vagy nagyobb ezerszemtömeeggel rendelkeztek, pozitív hatással voltak a β -glükán-tartalomra a ‘Chinese Spring’ genetikai háttérben. Az ‘Mv9kr1’ \times *Ae. biuncialis* vonalak közül a 7M^b addíciós vonalnak volt szignifikánsan nagyobb a β -glükán-tartalma. Az 5U^g, 7U^g, 7M^g és 7M^b *Aegilops* kromoszóma addíciók szántóföldi körülmények között is növelték a teljesörlemény β -glükán-tartalmát, mely alátámasztotta az üvegházi kísérletek eredményeit (Melléklet 2.c ábra). Ezen kívül az 1U^b kromoszóma szignifikáns hatását is kimutattuk a szántóföldi kísérletben.

A teljes pentozántartalom hasonló volt az *Ae. geniculata*-ban és a ‘Chinese Springben’, de kisebb volt az *Ae. biuncialis*-ban, mint az ‘Mv9kr1’-ben (29.b ábra). A kromoszóma addíciók hatása általában nem volt szignifikáns, de kis emelkedést tapasztaltunk a TOT-pentozán-tartalomban az 5U^g és 7U^g addíciók hatására, míg az ‘Mv9kr1’ genetikai háttérben csak az 1U^b adott magasabb értéket, mint a búza szülői genotípusok (29.b ábra). Nem találtunk szignifikáns különbséget a szülői genotípusok TOT-pentozán-tartalmában és az addíciós vonalak között a szántóföldi kísérletben (Melléklet 2. ábra).



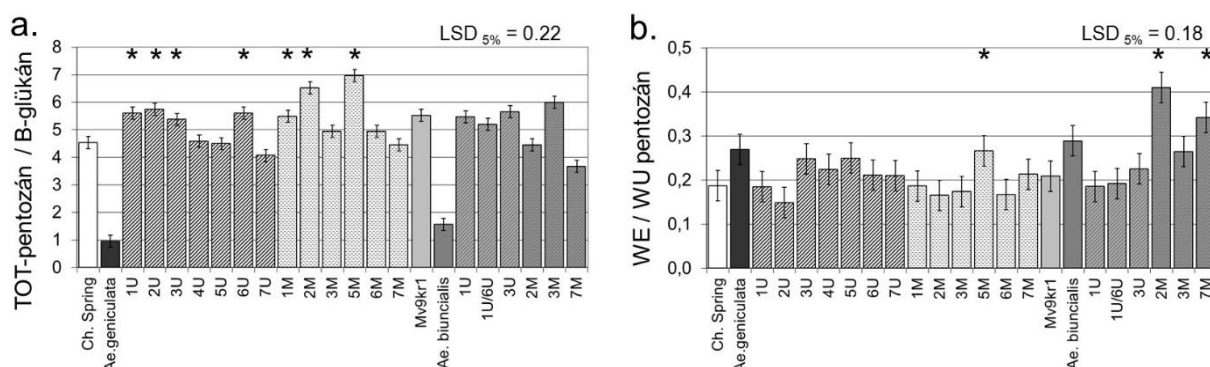
29. ábra. Két búza genotípus (cv. ‘Chinese Spring’ és ‘Mv9kr1’), két *Aegilops* faj (*Ae. geniculata*, *Ae. biuncialis*) és búza–*Aegilops* kromoszóma addíciós vonalak beltartalmi összetétele érett állapotban a. β -glükán-, b. TOT-pentozán-, és c. WE-pentozán-tartalom. (LSD – legkisebb szignifikáns különbség, TOT – teljes, WE – vízoldható).

*szignifikánsan nagyobb a búza (*T. aestivum*) kontrollnál.

A pentozánok vízoldhatósága (**WE-pentozán**) az *Aegilops* szülőkből nagyobb volt, mint a búza szülőkből (29.c ábra). Az egyedi kromoszómák szintjén szignifikánsan nagyobb WE-pentozán-tartalmat találtunk a 3U^g, 4U^g, 5U^g, 6U^g, 7U^g, 5M^g és a 7M^g addíciós vonalakban, melyek közül a legnagyobb pozitív hatást az *Ae. geniculata* ötös kromoszómái fejtették ki. Az *Ae. biuncialis* esetén a 2M^b és 7M^b kromoszóma addíciós vonalnak volt a legnagyobb WE-pentozán-tartalma. Az üvegházi kísérlet eredményeit alátámasztották a szántóföldi kísérlet eredményei, vagyis az üvegházi kísérletekhez hasonlóan az 5U^g és 5M^g

kromoszóma addíciós vonalnak volt a legnagyobb WE-pentozán-tartalma a ‘Chinese Spring’–*Ae. geniculata* addíciós vonalak között, bár az értékeik nem különböztek szignifikánsan a búza szülőkétől. Emellett az *Ae. biuncialis* 7M^b addíciós vonalának az ‘Mv9kr1’ búzáéhoz képest szignifikánsan nagyobb volt a WE-pentozán-tartalma (Melléklet 2.e ábra).

A **TOT-pentozán β -glükánhoz viszonyított aránya** jellemzi a nem keményítő jellegű poliszacharidok összetételét a szemben. Ebben a kísérletben a két komponens mennyiségi arányai a búza szülőkben 4,5 és 5,5 voltak (a ‘Chinese Spring’ illetve ‘Mv9kr1’-ben). Ezzel szemben az *Ae. geniculata* (TA2899) és az *Ae. biuncialis* (MvGB642) szülőkben ez az arány csupán 1,0 és 1,5 volt (30.a ábra), mely az *Aegilops* genotípusok igen nagy β -glükán-tartalmának köszönhető (29.a ábra). A ‘Chinese Spring’–*Ae. geniculata* kromoszóma addíciós vonalakban ez az arány nagyobb volt az 1U^g, 2U^g, 3U^g, 6U^g, 1M^g, 2M^g és 5M^g kromoszómák hatására, mint a búza szülőkben, míg a 7U^g addíció hatására kisebb értéket kaptunk. Az *Ae. biuncialis* addíciós sorozaton belül, a 2M^b és a 7M^b kromoszómák a búzához viszonyítva szignifikánsan csökkentették a TOT-pentozán és a β -glükán egymáshoz viszonyított mennyiségi arányát. A vízoldható és az oldhatatlan pentozánok (**WE/WU pentozán**) aránya olyan két pentozánfrakció arányát jelentik, melyeknek eltérő egyézségügyi hatásai vannak. Ez az arány az *Aegilops* szülőkben nagyobb volt, mint a búza szülőkben (30.b ábra). Relatív nagyobb WE-pentozánt mértünk az 5M^g, 2M^b és 7M^b búza–*Aegilops* addíciós vonalakban (29.c ábra).



30. ábra. Két búza genotípus (cv. ‘Chinese Spring’ és ‘Mv9kr1’), két *Aegilops* faj (*Ae. geniculata*, *Ae. biuncialis*) és a búza–*Aegilops* kromoszóma addíciós vonalak beltartalmi komponenseinek aránya érett állapotban a. TOT-pentozán/ β -glükán, b. és WE/WU-pentozán arányok.

(LSD – legkisebb szignifikáns különbség, TOT – teljes, WE – vízoldható, WU – vízben oldhatatlan).

*szignifikánsan nagyobb a búza (*T. aestivum*) kontrollnál.

4.6.4 Az *Aegilops* kromoszómák hatása a β -glükán és az AX polimerek szerkezetére

Az *Ae. geniculata* (TA2899) és az *Ae. biuncialis* (MvGB642) TOTAL-GOS értéke 1,6 és 1,3-szorosa volt a búzáénak (Melléklet 3.a ábra). A 7U^g és 7M^g kromoszómák hatása szignifikáns növekedést eredményezett a TOTAL-GOS-tartalomban (Melléklet 3.a ábra) összhangban a β -glükán-tartalom változásával (29.a ábra). A β -glükán szerkezetének különbségeit licsenáz enzimes emésztéssel határoztuk meg. A licsenáz emésztéssel kapott glükó-oligoszacharidok (GOS) polimerizációs foka (DP) akár 10 is lehet, de a legnagyobb

mennyiségben előforduló formái a DP3 és a DP4. A **DP3:DP4 glükán egységek aránya**, mely a polimer β -(1-3) és β -(1-4) kötéseinek arányát jellemzi, szignifikánsan kisebb volt mindkét *Aegilops* fajban, mint a búzában (Melléklet 3.b ábra). Az 5U kromoszóma addíciója csökkentette a DP3 és DP4 egységek arányát a legnagyobb mértékben, de a 6U^s és 3U^b kromoszómáknak is hasonló volt a hatásuk (Melléklet 3.b ábra), mely a nagyobb polimerek mennyiségi arányának növekedésére utal.

Az AX-molekula szerkezetének különbözőségeit endoxilanáz enzimes emésztéssel határoztuk meg. Az arabinoxilán-molekula xilóz vázának elemeit helyenként arabinózmolekulák helyettesítik. A szerkezetbeli különbséget okozhatja a szubsztitúció nélküli, az egy- vagy kétszeres arabinóz szubsztitúcióval rendelkező xilóz láncok arányának és eloszlásának különbözősége. Az endoxilanáz enzimes emésztéssel olyan AX oligoszacharidok (AXOS) keletkeznek, melyeket HP-AEC módszerrel el tudunk választani és a mennyiségi elemzéssel megkapjuk a molekulák „ujjlenyomatát” (Ordaz-Ortiz és mtsai, 2005).

Az *Ae. geniculata* és az *Ae. biuncialis* ~50%-kal kevesebb TOTAL-AXOS-tartalommal rendelkezett, mint a búza (Melléklet 3.c ábra). A szubsztituált xilóz láncok aránya szintén szignifikánsan alacsonyabb volt az *Aegilops* szülőknél, mint a búzában (Melléklet 3.d,e,f,h ábra), de a mono- és diszubsztituált xilóz láncok egymáshoz való aránya majdnem kétszer akkora volt az *Ae. geniculata*-ban, mint a búzában vagy az *Ae. biuncialis*-ban (Melléklet 3.g ábra). Az arabinóz szubsztitúció nélküli AXOS-molekuláinak aránya a teljes AXOS-hoz képest (Melléklet 3.d,e,f ábra) nagyobb volt az 5M^s, 1U^b, 1U^b/6U^b, 3M^b és 7M^b kromoszóma addíciók hatására. A monoszubsztituált molekulák arányát a 2U^s, 3-5U^s, 2M és 6M^s (Melléklet 3.e ábra) kromoszómák, a diszubsztituált molekulákét pedig a 2U^s, 4-6U^s, 2M, 3M^b és 7M^b (Melléklet 3.g ábra) kromoszóma addíciók növelték.

4.6.5 A tartalékfehérje, a β -glükán és az AX bioszintézisében résztvevő gének kromoszomális lokalizációja *Aegilops*-ban

Ahhoz, hogy azonosítsuk a tartalékfehérje, a β -glükán és az AX bioszintéziséért felelős fő homológ géneket, összehasonlítást végeztünk a búza, árpa és az *Aegilops* genomok között. Mivel azonban az *Ae. geniculata* és az *Ae. biuncialis* U és M genomjának nem áll rendelkezésre a teljes szekvenciája, ezért az *Ae. umbellulata* U genomjának szekvenciáját használtuk az összehasonlításhoz (http://olomouc.ueb.cas.cz/projects/Aegilops_umbellulata). A tartalékfehérjék szintéziséért felelős fő gének cDNS szekvenciáinak (Melléklet 5. táblázat) BLAST-olásával kimutattuk, hogy a legtöbb keresett gén (HMW gluteninek, LMW gluteninek, γ -gliadinok) ugyanazon homeológ kromoszómacsoporton található (1 csoport) az *Ae. umbellulata* U genomján, mint a búzában (Melléklet 5. táblázat). Az α -gliadin gének, melyek a 6-os kromoszómán helyezkednek el búzában, az *Aegilops* 1U és 3U kromoszómáin találhatóak. A β -glükán szintézisben részt vevő gének esetén (*OsCslF1-F2*, *HvCslF3-4*, *HvCslF6-10*, *HvCslF12-13*, *HvCslH1*) az *Aegilops* homológokat szintén ugyanazon a homeológ kromoszómacsoporton (1, 2, 5 és 7) találtuk, mint a búzában (Melléklet 7. táblázat). Ugyanez volt igaz az AX bioszintéziséért felelős gének többségére is, melyek a 4-es és 7-es (*TaGT43* család), a 3-as (*TaGT47* család) és a 2-es (*TaGT75* család) kromoszómákon voltak megtalálhatóak (Melléklet 6. táblázat). Néhány homeológot azonban más kromoszómákon azonosítottunk, mint búzában. Így például a *TaGT47-12* gén a hexaploid búza 3-as kromoszómáján helyezkedik el, míg *Aegilops* homológját a 6U-n találtuk. Szintén különbségeket találtunk a *HvCslF11*, *TaGT61-1*, *TaGT61-2* és *TaGT75-4* gének elhelyezkedésében (Melléklet 6. táblázat).

5 MEGVITATÁS

5.1 Nagy amilóz tartalmú búza törzsek előállításának és jellemzésének megvitatása

5.1.1 Megvitatás

Az **SGP-1 mutánsok** kérdésével először Yamamori és mtsai (2000) foglalkoztak. Megállapították, hogy az SGP-1 egy 100–105 kDa nagyságú fehérje, amely a keményítőszemcsékhez kötődik, de a szemfejlődés korai szakaszában oldható formában is megtalálható. Az SGP-1 egy keményítő-szintáz enzim, mely homológ a keményítő-szintáz II-vel (leginkább az *SSIIa*-val). Búzában az SGP-1-nek három izoformja létezik a három különböző genomon. Az *Sgp-A1* a 7AS kromoszómakaron helyezkedik el, míg az *Sgp-B1* és *Sgp-D1* a 7BS és 7DS kromoszómakarokon található (Denyer és mtsai, 1995). Megállapították, hogy az SGP-1 hiánya pleiotróp hatással van a búzakeményítőre, azaz annak több tulajdonsága változik meg egyszerre. Így tapasztalták például az SGP-2 és SGP-3 fehérjék mennyiségének csökkenését is az SGP-1 hiánya mellett. Ezen felül az amilopektin szerkezete is megváltozott, atipikussá vált azáltal, hogy a hosszú láncok aránya megnőtt. Ennek következtében a keményítő kristályossága is megváltozott, ahogy azt a DSC termogram és a polarizációs kereszt is kimutatta.

Az amilóz-amilopektin-arány növelését célzó kutatási törekvések elsősorban az amilopektin szintéziséért felelős géneket használták fel eszközként. Erre alapoztunk, amikor mutáns törzseket állítottunk elő (Rakszegi és mtsai, 2010a) és azonosítottuk a keményítőszintézis génekre mutáns egyedeket (Botticella és mtsai, 2011). Alkalmazták a keményítő-szintáz IIa (*SSIIa*) és az elágazásokat létrehozó enzimek (*SBEII*) csendesítését is transzformációs technikával (Regina és mtsai, 2006), továbbá az ugyanezen enzimeket kódoló mutáns homeológ alléleket kombinálták hagyományos keresztezéssel (Botticella és mtsai, 2018; Hogg és Giroux 2019; Konik-Rose és mtsai, 2007; Regina és mtsai, 2015; Schönhofen és mtsai, 2016; Slade és mtsai, 2012; Yamamori és mtsai, 2000). Ez utóbbi utat követtük mi is párhuzamos kutatásainkban (Rakszegi és mtsai, 2015).

Korábbi tanulmányokban és a legújabb kutatások szerint az *SSIIa* aktivitásának elvesztése szignifikánsan lecsökkentette a keményítőtartalmat a búzaszemekben, melynek fennmaradó nagyobb részét az amilóz alkotta 32 és 48% közötti mennyiségi aránnyal (Yamamori és mtsai, 2000; Konik-Rose és mtsai, 2007; Shimbata és mtsai, 2012; Hogg és mtsai, 2017; Botticella és mtsai, 2018). Ez az arány az általunk előállított törzsekben 29,2 és 43,0% között változott. A lecsökkent keményítőtartalom miatt az *SSIIa* null törzsek ezerszemtömege csökkent, míg a fehérjetartalma megnőtt (Hogg és Giroux, 2019; Konik-Rose és mtsai, 2007; Hogg és mtsai, 2017; Botticella és mtsai, 2018), ahogy ezt saját vizsgálataink eredményeként is kaptuk (Rakszegi és mtsai, 2015). Saját törzseink ezerszemtömege 8–10 grammal lett kisebb a normál kontroll búzáéhoz képest, ami akár 25%-os csökkenést is jelent a kontrollhoz képest. A fehérjetartalom ugyanakkor 0,8–4,8%-kal nőtt abszolút értékben, ami 6–36% növekedést eredményezett a kontrollban mért fehérjetartalomhoz képest. Az *SSIIa* mutánsok megnövekedett amilóztartalma csak mérsékelt növekedést eredményezett a rezisztenskeményítő-tartalomban (Botticella és mtsai, 2018; Yamamori és mtsai, 2006). Az amilóztartalom növekedése mellett azonban a nem keményítő poliszacharidok (fruktánok, arabinoxilánok) mennyiségének a növekedését is tapasztalták (Li és mtsai, 2017; Botticella és mtsai, 2018). Hasonló tapasztalatokkal mi is rendelkezünk, tekintve hogy a lisztnek láthatóan magasabb volt a korpatartalma, de ebben a kísérletben ezt nem vizsgáltuk. Az *SSIIa* mutánsok keményítőszemcséi deformált alakúak és az A-típusú kristályosságuk csökkent mértékű (Botticella és mtsai, 2018; Regina és mtsai, 2015; Slade és

mtsai, 2012), mely keményebb szemtípus kialakulását is eredményezte (Botticella és mtsai, 2018; Schönhofen és mtsai, 2017).

Az **SBEII mutánsokban** 55–80% amilóztartalmat mértek módszertől függően. Ezeknek a törzseknek a keményítőtartalma és az ezerszemtömege szintén nagymértékben csökkent a normál búzáéhoz képest (Regina és mtsai, 2015; Schönhofen és mtsai, 2016; Slade és mtsai, 2012), de nem olyan mértékben, mint az SSIIa null mutánsokban (Botticella és mtsai, 2018; Hogg és Giroux, 2019; Hogg és mtsai, 2017; Konik-Rose és mtsai, 2007). A megnövekedett amilóztartalom az SBEII null törzsekben a rezisztenskeményítő-tartalom szignifikáns növekedését is eredményezte (Botticella és mtsai, 2018; Regina és mtsai, 2015; Schönhofen és mtsai, 2017; Slade és mtsai, 2012), nem úgy mint az SSIIa null törzsekben, ahol csak mérsékelt növekedést tapasztaltak.

A nagy amilóztartalmú lisztből készült tészta minőségét is vizsgálták Yamamori és mtsai (Morita és mtsai, 2002). Vizsgálatukban az SSIIa törzsek lisztjének nagyobb volt a vízfelvétele a 'Chinese Spring'-hez képest, ugyanakkor kisebb volt a Farinográf tézstabilitása. A nagy amilóztartalmú lisztből készült kenyér térfogata kisebb (akár 71%-kal), kenyérbélzete pedig gyengébb minőségű volt a normál lisztéhez mérve. A nagy amilóztartalmú liszt 10, 30 és 50%-ban normál búzaliszthez történő keverése során hasonló eredményeket kaptak (Morita és mtsai, 2002). Az adagolás mértékének növelésével arányosan nőtt a liszt vízfelvétele, azonban 30% keverési arányig nem változott meg a kenyér térfogata a normál lisztéhez képest. Vizsgálatainkban 3–4% növekedést tapasztaltunk a vízfelvétel értékében, ami maximum 6,3% változást jelent az eredetileg felvett víz mennyiségéhez viszonyítva. A siker és a tészta erősségét a sikerindex értékével jellemeztük, melynek értéke 8–35-tel csökkent maximum 35,7%-os változást eredményezve a kontroll fajta sikerindexéhez képest.

A keményítő viszkozitási tulajdonságainak vizsgálatával kismértékű gélesedést, alacsony gélesedési hőmérsékletet és csúcsviszkozitást állapítottak meg az SSIIa null törzsekben, melynek mértéke a nagy amilóztartalmú liszt adagolásával arányosan csökkent a keverési kísérletekben (Botticella és mtsai, 2018; Hogg és mtsai, 2017; Konik-Rose és mtsai, 2007; Shimbata és mtsai, 2012; Yamamori és mtsai, 2000, 2006). Ezzel összhangban vannak saját eredményeink, mely szerint (Rakszegi és mtsai, 2015) a nagy amilóztartalmú törzsek csúcs-, minimum- és végső viszkozitásértékei alacsonyak és a görbeletörésük kicsi volt. Schirmer és mtsai (2013) kimutatták továbbá, hogy a nagy amilóztartalmú törzsekben a keményítőszemcsék növekedése gélesedés közben kisebb mértékű ezért kisebb a csirizedési viszkozitás. Az SBEII null törzsek tésztaja ugyanakkor nagyobb gélesedési hőmérséklettel és alacsonyabb csúcsviszkozitással rendelkezett, mint a normál tészta. A kenyértérfogat is kisebb lett, de nem olyan mértékben, mint ahogyan azt az SSIIa null törzseknél tapasztalták (Morita és mtsai, 2002). Emellett alacsony lisztkihozattal, nagy fehérje- és rostanyagtartalommal, essz számmal, rezisztenskeményítő-tartalommal, keményítősérüléssel és vízfelvétellel rendelkeztek az SBEII null törzsek (Schönhofen és mtsai, 2017).

Az eredmények azt mutatják tehát, hogy az SSIIa mutáció sokkal drasztikusabb változásokat okoz a feldolgozóipari minőségben, mint az SBEII enzim működésének hiánya. Így nem véletlen, hogy az első, gyakorlatban is hasznosuló eredményeket az utóbbi géneknek a módosításával érték el 2020-ban. A Limagrain az ausztrál CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation) kutatóintézet és a GRDC (Grain Research and Development Corporation) együttműködésével hozta létre első egészséges, nagy rezisztenskeményítő-tartalmú búzafajtáját (Viallis és Berbezy, 2020), melyet LifyWheat-nek neveztek el. Ez az új fajta 40%-ban tartalmaz rostanyagot, melyből 30% rezisztens keményítő. Ez igen magas arány a normál búza 13 és 5%-os értékeihez képest. Arról azonban nem számoltak be a fajtaival és annak előállításával kapcsolatos tanulmányok, hogy milyen az SBEII mutánsok szemtermése, ezerszemtömege vagy lisztkihozatala, mely a tripla mutáns

törzsek alapvető problémájának tűnik. Burgonya és árpa esetén számoltak be szignifikáns terméscsökkenésről nagy amilóz tartalom következményeként (Hofvander és mtsai, 2004; Carciofi és mtsai, 2012). Az általunk előállított búzatörzsek többségénél, a néhány kivételtől eltekintve, mi is hasonló eredményeket kaptunk.

A rezisztens keményítő vagy amilóztartalom növekedését a fent említett búzában az SBEIIa enzim működésének inaktiválásával érték el. Nehézséget jelentett, hogy a búzában három genomja van (A, B, D), így a gén hat kópiában van jelen, genomként két példányban. Genomspecifikus SBEIIa markereket terveztek, hogy a különböző genomok génekópiáin levő deléciókat és módosulásokat azonosítani tudják. Ezeket a módosulásokat lefordították aminosav-szekvenciává és ily módon vizsgálták, hogy szintetizálódik-e fehérje, és ha igen, akkor az működőképes-e. A potenciális genotípusjelölteket keresztezték, hogy kombinálják a különböző genomok megváltozott SBEIIa expresszióját. Új markereket is terveztek abból a célból, hogy a keresztezési programban hatékonyan tudják szelektálni az SBEIIa módosulásait tartalmazó genotípusokat. Minden keresztezést egy öntermékenyítési ciklus követett, hogy homozigóta törzseket hozzanak létre az adott SBEIIa módosulásra. Az első potenciális nagy amilóztartalmú törzsnek pedig még nagyon heterogén volt a genetikai háttere, ezért elit fajtákkal kellett visszakereszteni, hogy kereskedelembe is forgalmazható fajtát kapjanak. Saját kísérletünkben az F₁ generáció létrehozása után, majd pedig az utolsó visszakeresztesítés után volt egy öntermékenyítési ciklus, de ezzel együtt is nehézségekbe ütközött a stabil mutáns törzsek azonosítása. Stabil tripla mutáns törzseket végül a BC₂F₁ törzsek keresztezésével sikerült előállítanunk.

5.1.2 Következtetések

Tíz, mindhárom allélra mutáns, nagy amilóztartalmú (40%) búzatörzset hoztunk létre, melyeknek nagy volt a fehérjetartalma (>14%), ugyanakkor kicsi a keményítőtartalma, a sikerindexe, a keményítő viszkozitása és az ezerszemtömege. A tíz törzs közül kettőnek csupán mérsékelten volt nagy az amilóztartalma (30%), de kiemelkedő volt a sikerminősége és a keményítő tulajdonságai is módosultak. Kimutattuk, hogy lehetséges hagyományos nemesítési módszerekkel olyan mutáns alléleket átvinni búza genotípusokba, melyek eredményeként megnő a keményítő amilóztartalma. Stabil mutánsok létrehozásához és azonosításához viszont több öntermékenyülési ciklus vagy dihaploid törzsek előállítása szükséges. Olyan nagy amilóztartalmú törzsek szelekciója is lehetséges, melyek egyben jó agronómiai tulajdonságokkal is rendelkeznek, ugyanakkor a nagy amilóztartalmat nagy ezerszemtömeggel kombinálni már nehézkes. Ezzel összefüggésben a megfelelő lisztkihozatal-érték elérése is nehézségekbe ütközik tripla mutáns törzsekben, viszont a kis szemtömeg és keményítőtartalom következtében egy korpában és rostanyagban gazdagabb lisztet kapunk. Feltehetőleg stabil szimpla vagy dupla mutációk jelenléte kevésbé drasztikus változásokat eredményezne a gabonaszemek minőségében és egyértelműbb gyakorlati hasznosíthatóságot tenne lehetővé. Az előzetes termésösszehasonlító kísérletek eredményei szerint a nagy amilóztartalmú búza termése elérheti a normál búza genotípusokra jellemző értékeket. Ez esetben nem a termés az alapvető limitáló kritikus tényező.

5.2 A környezet és a genotípus amilóztartalomra kifejtett hatásának megvitatása

5.2.1 Megvitatás

A gabona keményítő-összetétele és -szerkezete fontos indikátora lehet az élelmiszer minőségének (Tian és mtsai, 2009, Dang és Copeland, 2004, Sun és mtsai, 2011) élettani előnyeinek (Hazard és mtsai, 2012), az állati takarmányok tápértékének (Moritz és mtsai,

2005, Svihus és mtsai, 2005), valamint a bioüzemanyag (Wu és mtsai, 2013) és a biopolimerek előállítására való alkalmasságának (Lu és mtsai, 2009). A keményítő funkcionális tulajdonságai a genetikai tényezőkön túl függenek a környezeti körülményektől, így a növény egyedfejlődése során uralkodó hőmérséklettől, a csapadék és páratartalom eloszlásától, a termőhelytől vagy az időszakos környezeti stresszhatásoktól (Beckles és Thitisaksakul, 2014; Dang és Copeland, 2004). Bizonyos esetekben az évjáráthatás (Rosicka-Kaczmarek és mtsai, 2013), a vetésidő (Siebenmorgen és mtsai, 2013) vagy a termőhely hatása is meghaladja a genotípusét (Aboubacar és mtsai, 2006; Beta és Corke, 2001; Cameron és mtsai, 2008; Campbell és mtsai, 1995). A környezet a keményítő bioszintézisében részt vevő enzimekre hat és ezáltal módosítja a keményítő tulajdonságait (Thitisaksakul és mtsai, 2012). A különböző genotípusokban azonban eltérő lehet a környezet enzimekre kifejtett hatása. Mindezt bonyolítja még, hogy az enzimek komplexeket hoznak létre, melyek együtt szintetizálják a keményítőt (Tetlow és mtsai, 2004a,b). Attól függően, hogy milyen enzimek alkotják a komplexeket, végeredményben más-más lehet a keményítő összetétele és szerkezete.

Régóta ismert a **hőmérsékletnek** a növények agronómiai produktivására gyakorolt hatása. Ez a környezeti tényező az egyik legkárosabb, mivel szántóföldi körülmények között nem kontrollálható (Battisti és Naylor, 2009). Az előrejelzések szerint magasabb átlaghőmérséklet lesz jellemző az elkövetkező évtizedekben (Hatfield és mtsai, 2011). Ennek egy érdekes, de máig elhanyagolt következménye, hogy egyes régiók hőmérséklet-emelkedése más régiókban jelentős lehűlést eredményezhet. Eddigi vizsgálatok szerint, melyeknek többségét rizsen végezték el, az elsődleges stressztényező, mely csökkenti a szemtermés keményítőtartalmát és megváltoztatja a keményítő funkcionális tulajdonságait, az a magas lég- és talajhőmérséklet (Tester és mtsai, 2001; Tester, 1997; Jiang és mtsai, 2003). A szem telítődéséhez optimális hőmérséklet azonban fajonként változó, sőt egy napon belül is lehet eltérés a növény hőmérséklet-érzékenységében (Siebenmorgen és mtsai, 2013; Peng és mtsai, 2004). A növény növekedésének különböző fázisaiban megjelenő magas hőmérséklet növeli az amilóztartalmat búzában (Hurkman és mtsai, 2003; Liu és mtsai, 2011; Matsuki és mtsai, 2003; Shi és mtsai, 1994; Tester és mtsai, 1995; Stone és Nicolas, 1995; Panozzo és Eagles, 1998) és csökkenti kukoricában (Lu és mtsai, 1996), de ezen változások nagyságrendje nem olyan szignifikáns és konzisztens, mint a japán rizs esetén, ahol az amilóztartalom akár 20%-kal is csökkenhet 30 °C hőmérséklet felett (Asaoka és mtsai, 1985; He és mtsai, 1990; Lanning és mtsai, 2012; Liu és mtsai, 2013; Suzuki és mtsai, 2004; Yamakawa és mtsai, 2007; Lisle és mtsai, 2000; Inukai és Hirayama, 2010; Lin és mtsai, 2010). Ezzel szemben az indiai rizs amilóztartalma alig változik hő hatására (Liu és mtsai, 2013; Madan és mtsai, 2012; Paule, 1977; Resurreccion és mtsai, 1977; Zhong és mtsai, 2005). Vizsgálatainkban a növényfejlődés utolsó 100 napjában mért átlaghőmérséklet, illetve a 25 °C-nál melegebb napok számának növekedésével az amilóztartalom csökkent, azaz a japán rizsnél és a kukoricánál tapasztalt tendenciákhoz hasonló eredményt kaptunk ($r = -0,9841$). Rizs esetén azt is megállapították, hogy magas hőmérsékleten az eredendően alacsony amilóztartalmú genotípusok amilóztartalma nagyobb mértékben csökken, mint a nagy amilóztartalmú genotípusoké (Madan és mtsai, 2012; Paule, 1977; Resurreccion és mtsai, 1977; Zhong és mtsai, 2005; Cheng és mtsai, 2005; Umemoto és Terashima, 2002). Az amilóztartalom látszólag kismértékű (1%) változása a keményítő gélesedési tulajdonságainak módosulása miatt a gabona felhasználásának jelentős funkcionális változásait eredményezheti (Hurkman és mtsai, 2003; Zeng és mtsai, 1997). Ennek oka, hogy hőstressz hatására az amilopektin-molekulákban a lánchosszeloszlás is megváltozik. Míg búzában a rövid láncok (Matsuki és mtsai, 2003; Shi és mtsai, 1994), addig rizsben a hosszú láncok aránya nő (Aboubacar és mtsai, 2006; Jiang és mtsai, 2003; Asaoka és mtsai, 1985; Suzuki és mtsai, 2004; Yamakawa és mtsai, 2007). Ennek hatására a keményítőszemcsék mérete és szerkezete

is megváltozik, melynek mértéke függ a stressz erősségétől és annak időtartamától (Liu és mtsai, 2011). Búzában az A- és a B-típusú szemcsék mérete általánosságban egyaránt csökken, miközben az A-típusú szemcsék mennyiségi aránya a B rovására nő (Bhullar és Jenner, 1985; Blumenthal és mtsai, 1995). A virágzás körüli időszakban a hőnek aránytalanul nagy hatása van az „A” szemcsék méretére (Liu és mtsai, 2011). Mindezen változások eredményeként a búza funkcionális tulajdonságai is megváltoznak, így a keményítő gélesedési hőmérséklete nagyobb lesz hőstressz hatására (Matsuki és mtsai, 2003; Tester és mtsai, 1995), de a csirizedési profilja is módosul (Liu és mtsai, 2011). Kísérletünkben az utolsó 100 nap átlaghőmérsékletének növekedésével a viszkozitásértékek és a gélesedési hőmérséklet is nőtt ($r=0,9286$). Alacsony hőmérsékleten az amilóz és az amilopektin aránya általában nő (Labuschagne és mtsai, 2009; Singh és mtsai, 2010), arra vonatkozóan azonban kevés tanulmány van, hogy a hideg hatására hogyan változnak meg a keményítő gélesedési és csirizedési tulajdonságai és a rendelkezésre álló eredmények is ellentmondásosak (Aboubacar és mtsai, 2006; Myllarinen és mtsai, 1998; Labuschagne és mtsai, 2009). Vizsgálatainkban az abszolút minimum hőmérséklet növekedésével az amilóztartalom kisebb lett, vagyis alacsonyabb hőmérsékleten az amilóztartalom változása hasonló volt az irodalmi megfigyelésekéhez ($r=-0,9639$)

A mérsékelt **vízhiány** akár 40%-kal csökkentheti a gabonafélékben a keményítő akkumulációját, melynek eredményeként megváltozik a keményítő összetétele, szerkezete, valamint funkcionális tulajdonságai is (Thitisaksakul és mtsai, 2012). Vízhány hatására búzában az amilóztartalom szignifikánsan csökken (Lu és Lu, 2013; Dai és mtsai, 2009; Fábíán és mtsai, 2011; Singh és mtsai, 2008), a keményítőszemcse-méret eloszlása szintén megváltozik, azaz az A-típusú szemcsék aránya nő, míg ezzel arányosan a B- és a C-típusú szemcsék aránya csökken (Fábíán és mtsai, 2011; Singh és mtsai, 2008; Balla és mtsai, 2011; Nicolas és mtsai, 1985; Zhang és mtsai, 2010a). Az öntözött búzakísérletek azonban azt bizonyítják, hogy a vízhiány időtartama szintén kritikus tényező lehet a szemcseméret-eloszlás alakulásában (Dai és mtsai, 2009). A vízmegvonás a keményítő funkcionális tulajdonságait, de főként a csirizedési tulajdonságokat is megváltoztatja rizsben és búzában egyaránt. Búzában megnöveli a csirizedési hőmérsékletet, mely nagyobb viszkozitást és viszkozitásnövekedést eredményez (Fábíán és mtsai, 2011; Singh és mtsai, 2008; Singh és mtsai, 2010; Dai és mtsai, 2009). Az itt közölt vizsgálatainkban a kumulált csapadékösszeg nagysága egyedül a keményítőtartalommal mutatott pozitív korrelációt.

A **talaj nitrogéntartalmának** szintén hatása van a keményítő és a fehérje arányára a búzaszemben, valamint a keményítő funkcionális tulajdonságaira (Beckles és mtsai, 2012; Buresova és mtsai, 2010). Kísérletünk valamennyi évében hasonló módon végeztük a tápanyag-utánpótlást, így ennek hatása nem elemezhető. Korábbi tanulmányok azonban kimutatták, hogy a talaj N-tartalmának csökkenésével az amilóztartalom nő (Wang és mtsai, 2008a; Li és mtsai, 2013a,b), más tanulmányok azonban nem mutattak ki hatást (Fredriksson és mtsai, 1998). Az eltérő reakciók feltehetőleg a genetikai háttérben fellelhető különbségeknek tudhatók be elsősorban (Gunaratne és mtsai, 2011; Champagne és mtsai, 2009; Wang és mtsai, 2008a; Li és mtsai, 2013b). Az alacsonyabb talajnitrogén-tartalmon túl a szem amilóztartalmát a rendszeres öntözés még tovább növelte búzában (Wang és mtsai, 2008b). Ugyanakkor **kén** egyidejű adagolásával a kisebb nitrogéntartalom csökkenti az amilóztartalmat (Li és mtsai, 2013b). Az alacsonyabb nitrogéntartalom hatására a B-típusú szemcsék aránya nő (Li és mtsai, 2013b; Fredriksson és mtsai, 1998), és a keményítő funkcionális tulajdonságai is megváltoznak, így kisebb lesz a csirizedési hőmérséklet és a kohezivitás, míg a gélkeménység növekedni fog rizsben (Dong és mtsai, 2007; Gunaratne és mtsai 2011; Singh és mtsai, 2011). Búzában is találtak ugyan eltéréseket a csirizedési tulajdonságokban (Wang és mtsai, 2008b), de ezek kevésbé szignifikánsak, feltehetőleg az egyéb környezeti tényezők párhuzamos hatása miatt (Li és mtsai, 2013b; Nowotnaa és mtsai,

2007; Wang és mtsai, 2008b). Elsősorban rizsben számos tanulmány vizsgálta már a **szén-dioxid** hatását a keményítő tulajdonságaira nézve, az eredmények azonban ellentmondásosak (Tester és mtsai, 1995; Madan és mtsai, 2012; Blumenthal és mtsai, 1996; Rogers és mtsai, 1998; Terao és mtsai, 2005; Yang és mtsai, 2007). Ezen kívül megállapították a talaj fizikai szerkezetének, ozmotikus tulajdonságainak és kémiai összetételének a keményítő tulajdonságaira gyakorolt hatását (Brennan és mtsai, 2012; Mittler és Blumwald, 2010).

5.2.2 Következtetések

Harminc változatos amilóztartalmú fajta három évjáratának vizsgálatával kimutattuk, hogy a növényfejlődés utolsó 100 napjában mért átlaghőmérséklet, illetve a 25 °C-nál melegebb napok számának növekedésével az amilóztartalom csökkent, míg az abszolút minimum hőmérséklet csökkenésével az amilóztartalom nagyobb lett. Az utolsó 100 nap átlaghőmérsékletének növekedésével a viszkozitásértékek és a gélesedési hőmérséklet is nőtt. A kumulált csapadékösszeg nagysága a keményítő-tartalommal mutatott pozitív korrelációt. A stabilabb szemméret, stabilabb keményítőtartalom stabilabb amilóz- és fehérjetartalmat is eredményezett.

Összességében a keményítő tulajdonságait a genotípus határozta meg elsősorban, a környezet hatása jóval kisebb volt kísérletünkben. A siker mennyiségét és minőségét meghatározó paraméterek (siker tartalom, siker index) többségére nem mutattunk ki szignifikáns G és E hatásokat, mely feltehetőleg a minták eltérő amilóztartalmából eredő eltérő lisztösszetételre vezethető vissza.

5.3 Nagy arabinoxilán-tartalmú búza genotípusok előállításának és jellemzésének megvitatása

5.3.1 Megvitatás

A vizsgálatban szereplő, szelektált törzsek többségének szignifikánsan nagyobb volt a WE-pentozán-tartalma, mint a hozzá tartozó normál kontroll genotípusé (öt törzs kivételével). Az alacsony rottartalmú szülők közül a WE-pentozán-tartalomban a legnagyobb növekedési arányt az 'Ukrainka' keresztezésből származó törzsekkel értük el, mivel ennek a fajtának volt eredetileg a legalacsonyabb a WE-pentozán-tartalma a többi szülői búza genotípus között ('Lupus', 'Mv-Emese', 'Mv-Mambo', 'Ukrainka'). Korábbi tanulmányokban kimutatták, hogy rostban gazdag frakció búzaliszthez adagolása megnöveli a liszt vízfelvétele, ugyanakkor a tészta stabilitása és rugalmassága csökken, rugalmatlanná vagy ragadóssá válik a tészta. Az ilyen típusú lisztből sült kenyér térfogata kisebb, a kenyérbélzete sűrűbb (Ktenioudaki és Gallagher, 2012; Sivam és mtsai, 2010; Schmiele és mtsai, 2012). Ezeket a hatásokat eredményezheti a siker és a rostkomponensek vízért folytatott versengése vagy a fehérje és a rost ferulasavon keresztüli kölcsönhatása (Bagdi és mtsai, 2016; Bucsella és mtsai, 2016; Noort és mtsai, 2010).

Eredményeink szerint a 8, 9, 10 és 12 számú 'Lupus'/'Yumai-34', a 2, 3 számú 'Ukrainka'/'Yumai-34' és a 3-as '1061-26'/'Yumai-34' törzseknek volt a legnagyobb a **vízfelvétele**, mely valószínűleg az együttesen nagy pentozán- (8–10 mg/g) és fehérjetartalomnak (13,2–15,7%) köszönhető a törzsek többségében. Kivételt képez ez alól a 12-es 'Lupus' törzs, melyben csak a fehérjetartalom (15,7%) volt kiemelkedő. A legkisebb vízfelvétele az 'Ukrainka'/'Yumai-34' keresztezés 4, 6, 14 és 15 számú törzseinek volt. Bár ezeknek a törzseknek a WE-pentozán-tartalma szignifikánsan nagyobb volt (7,6–9,5 mg/g), mint az 'Ukrainka' (6,7 mg/g) kontrollé, a fehérjetartalom viszont ezen törzsek esetében volt a legalacsonyabb (10,7–12%). Ez az alacsony fehérjetartalom lehet a felelős az alacsony vízfelvételükért, bár az AX vízmegtartó képessége 5–10-szer nagyobb, mint a fehérje vagy a

keményítő vízmegtartó képessége (mely sorrendben 10, 2 és 1 g/g) Wang és mtsai (2002) szerint. Következésképp, feltehetőleg az AX befolyásolja más tészta komponensek vízhez történő hozzáférhetőségét (Goesaert és mtsai, 2005; Izydorczyk és Rattan, 1995) és ezáltal a tészta és a kenyér minőségére is hatással van.

A búzaliszt egyik legfontosabb minőségi paramétere a vízfelvétel, az a szükséges vízmennyiség, mely a liszt komponenseket hidratálva optimális konzisztenciájú tészta kialakulásához vezet (Bushuk és Békés, 2002). E meghatározás alapján a vízfelvétel a hidratálódni képes komponensek (keményítő, fehérjék, pentozánok) relatív mennyiségének és fajlagos vízmegkötő képessége függvényének tekinthető.

Az őrlési folyamat során a keményítőszemcsék egy része – a szem keménységétől függően – sérül, amelynek eredményeként több vizet vesz fel, mint a natív keményítő, és könnyebben hozzáférhetővé válik a keményítőt lebontó enzimek számára. Következésképp a kemény szemtípusú búza vízfelvétele nagyobb. Egy régebbi tanulmány szerint a liszt vízfelvételét keményítősérülés mértéke és a fehérjetartalom határozza meg, melynek függvényében a szárazanyag-tartalom 1–2-szeresének megfelelő vízmennyiséget képes a liszt megkötni, esetenként még nagyobb mennyiséget is (Moss, 1961). Ezek a megfigyelések számos regressziós modell kifejlesztéséhez vezettek, amelyek a vízfelvétel becslésére képesek a keményítősérülés és a fehérjetartalom vagy a szemkeménység és a fehérjetartalom figyelembevételével (Roels és mtsai, 1993).

A búza szemkeménységét évtizedek óta használják a búzanemesítésben a vízfelvétele történő szelekcióban. Mivel azonban a szemkeménység mérésének lehetőségei korlátozottak, más megközelítésre volt szükség a vízfelvétel javításának eléréséhez. Az egyik lehetőséget az oldható fehérje- és pentozánkomponensek vízmegkötő képességének javulásában látták. A különböző fehérjetípusokat lisztadalékként alkalmazva azt figyelték meg, hogy a dagasztási tulajdonságok, a tésztaerősség és a -nyújthatóság nagymértékben függtek a glutenin és a gliadin fehérjék arányától, ugyanakkor a vízfelvétele ez nem volt hatással (Uthayakumaran és mtsai, 1999). Ehelyett azt tapasztalták, hogy a glutenin és az oldható fehérjék aránya befolyásolta a liszt vízfelvétele (Tömösközi és mtsai, 2004). Különböző eredetű és polaritású oldható fehérjék adagolása a búzaliszthez azt mutatta, hogy a hozzáadott fehérje polaritása/hidrofóbicitása, valamint töltéseloszlása szintén kulcsfontosságú tényezők, melyek megváltoztathatják a hidratáláshoz szükséges víz mennyiségét (Tömösközi és mtsai, 2002). A pentozánok a liszt kis részét (2–3%) alkotják, de nagy hatással vannak a vízfelvétele (Holas és Tipples, 1978). Becslések szerint saját tömegük tízszeresének megfelelő mennyiségű vizet képesek megkötni és így a tészta víztartalmának egynegyedét a pentozánok kötik meg (Kulp, 1968). A liszt pentozán-összetétele és vízfelvétele közötti összefüggésekről rendelkezésünkre álló, korlátozott mennyiségű információ alapján az arabinoxilánok hatása a legnagyobb a vízfelvétele, azok közül is különösen az oldható kis és közepes méretű arabinoxilánok hatása a legjelentősebb (Primo-Martín és Martínez-Anaya, 2003). Mindezen eredményekre alapozva dolgoztak ki a vízfelvétele becslésére regressziós modellt az oldható fehérje és az AX tartalom figyelembe vételével (Rakszegi és mtsai, 2014b).

A pentozánok nagy vízkötő képessége köszönhető a keresztkötött AX polimerek vízfelvételi kapacitásának (Biliaderis és mtsai, 1995; Courtin és Delcour, 1998), illetve azon hatásának, mellyel a nedvesség eloszlását befolyásolják a tészta összetevői között és amelyen keresztül a tészta reológiai tulajdonságaira is hatnak (Izydorczyk és Biliaderis, 1992; Wang és mtsai, 2003). A tésztaban az AX lecsökkenti a keményítő- és a fehérjekomponensek számára hozzáférhető szabad víz mennyiségét, miközben a vízoldható fehérjéket teljes mértékben oldatban tartja. Ennek az lesz az eredménye, hogy a vízoldható fehérjék vékony folyadékfilmképző képessége csökken, melynek következtében csökken a tészta habképző és gázvisszatartó képessége (Hoseney, 1984; Salt és mtsai, 2005). Dagasztás során a rostanyagok (korpa) kölcsönhatásba lépnek a siker-keményítő mátrixszal (Gan és mtsai, 1992) és

versengés alakul ki közöttük a víz megkötéséért (Izydorczyk és mtsai, 2008; Rosell és mtsai, 2010; Santos és mtsai, 2008; Skendi és mtsai, 2009). A rost számos tulajdonsága befolyásolhatja annak vízfelvételt, így a molekulatömege, a molekulamérete (Skendi és mtsai, 2009) vagy az oldhatósága (Katina, 2003). A nagyméretű molekulák sokkal lassabban abszorbeálják a vizet, mint a kis molekulák.

A legegyszerűbb és legelterjedtebb mód a liszt rostanyagtartalmának növelésére a korpafrakció részben vagy egészben történő visszakeverése. A rosttartalom növekedése számos változást idéz elő a tészta és a belőle készült termékek tulajdonságaiban. Hatására a tészta nyújthatósága csökken, míg a tésztaalakulási idő nő (Sudha és mtsai, 2007). A kenyér térfogata kicsi, a kenyér bélzete sűrű lesz. Az organoleptikus tulajdonságok romlanak (Heiniö és mtsai, 2016; Rakha, 2013). Kis mennyiségű nem keményítő poliszacharid (mint az AX) adagolása szignifikánsan megnöveli a dagasztással szembeni ellenállást és a tészta stabilitást (Izydorczyk és mtsai, 2001). Így ezen polimerek mennyiségének mérsékelt növelése, adagolása alkalmas lehet gyengébb minőségű lisztek tulajdonságainak javítására (Rosell és mtsai, 2010). Még célravezetőbb lenne azonban olyan búzafajta előállításának, melynek lisztje genetikai alapon tartalmaz nagyobb mennyiségű rostanyagot, ezáltal elkerülve a káros mellékhatást okozó egyéb komponensek mennyiségének növekedését a lisztben.

Korábbi tanulmányokban a WE-AX fehér liszthez adagolása mérsékelt mennyiségben növelte a vízfelvételt, a tésztaalakulási időt és a kenyértérfogatot (1,3, 1,3 illetve 0,9% WE-AX-hozzáadás mértékéig), ugyanakkor nagyobb mennyiségű WE-AX hozzáadása csökkentette a kenyértérfogatot és a minőséget (Biliaderis és mtsai, 1995). Az általunk vizsgált törzsekben mért 49,2% maximális és 16,3% átlagos növekedés a WE-AX és a 21,5% maximális és 6,7% átlagos növekedés a TOT-AX-tartalomban pozitív változást eredményezett a tészta minőségében. A törzsek jobb feldolgozóipari minősége feltehetőleg annak köszönhető, hogy a WE-AX-frakció mennyisége megnőtt a lisztben, ami megnövelte a tésztaiban található sikerfehérje-molekulák és a gázbuborékok között található víz viszkozitását. Az így létrejött nagy viszkozitás megnövelte a gázbuborékok körüli filmréteg erősségét és rugalmasságát, amely megvédheti őket a mechanikai és termikus bomlás hatására bekövetkező összeolvadástól. Ezáltal nő a tészta gázvisszatartó képessége dagasztás, formázás és sütés során. Ennek eredménye a nagyobb kenyértérfogat és a jobb kenyérbélzet szerkezet lehet (Courtin és Delcour 2002; Goesaert és mtsai, 2005). Ezzel ellentétben, az oldhatatlan AX jelenléte a gázbuborékok összeolvadását segíti elő, mely csökkenti a gázvisszatartó képességet és ezáltal gyengébb minőségű kenyeret eredményez (Courtin és Delcour, 2002; Goesaert és mtsai, 2005). **Sütőipari minőség** tekintetében három olyan törzset azonosítottunk, melyeknek átlagosan rövidebb volt a tésztaalakulási ideje, nagyobb volt a tészta ellágyulása és ezért a minőségi értékszámuk kisebb volt az átlagnál. Ezek a gyengébb tészta minőségű törzsek a MA/YU_1, LU/YU_3 és a UK/YU_15 törzsek voltak. A törzsek többségének 12 perc feletti volt a tészta stabilitása és 90 feletti a sütőipari értékszámuk, de 9 db törzs kivételével a Zeleny-féle szedimentációs értékük is meghaladta a 29-es értéket. Három, nagy fehérje- és TOT-pentozán-tartalmú 'Lupus'/'Yumai-34' törzsnek (4, 9, 10) volt kiváló a Zeleny-féle szedimentációs értéke (38,5–44 ml), mely a várhatóan nagyobb kenyértérfogatra utal.

Kísérletet végeztek a liszthez hozzáadható tisztított AX optimális mennyiségének megállapítására, mely a gabonatermékek diétás rosttartalmát a sütőipari minőség megváltozása nélkül növelné. Az eredmények szerint ezt a mennyiséget számos tényező befolyásolja. Befolyásolja egyrészt az **AX molekulatömege, az arabinóz:xilóz aránya**, a rost szemcsemérete, a ferulasav-tartalom és a fehérjetartalom is (Morales-Ortega és mtsai, 2013). Az arabinóz:xilóz arányt (A:X) a xilopiranozil egységek szubsztitúciójának mértéke határozza meg (Ordaz-Ortiz és Saulnier, 2005). A nagyobb A:X érték nagyobb mértékű szubsztitúciót és nagyobb molekulatömeget jelent. Tremmel-Bede és mtsai (2017)

megállapították, hogy a WE-AX A:X aránya a legtöbb törzsből hasonló volt a ‘Yumai-34’ fajtájához, de a TOT-AX A:X aránya szignifikánsan kisebb volt számos vizsgált törzsből, mint a ‘Yumai-34’-ben. Ez azt jelenti, hogy a vízben oldhatatlan (WU) AX-ban volt arányaiban kisebb a szubsztitúció mértéke, és ezzel párhuzamosan az AX molekulatömege, és ez a változás hathatott a végtermék minőségére. A molekulatömeg hatásának vizsgálatával megállapították, hogy a nagy molekulatömegű (HMW) AX hatása a liszt vízfelvételére és a tézstakialakulási időre nagyobb, mint a kis molekulatömegű WE-AX hatása (Biliaderis és mtsai, 1995; Courtin és Delcour, 1998). Bár a HMW AX polimer kisebb mennyiségű jelenléte csökkenti a rost negatív hatását a feldolgozóipari tulajdonságokra és a sütőipari minőségre, azonban emellett csökken az AX azon képessége, hogy nagy viszkozitású oldatot képezzen (Baksa és mtsai, 2016). A vízdoldható frakció vonatkozásában a kisebb molekulatömegű (2–20 kDa) és kevesebb szubsztitúcióval (0,5–0,6) rendelkező WE-AX negatív hatását a minőségre kisebbnek találták, mint a nagyobb molekulatömegű WE-AX hatását (100–120 kDa vagy 300–600 kDa, 0,3–1,1) (Saulnier és mtsai, 2007).

A kísérlet fő célja tehát az volt, hogy az AX-tartalmat korpa bekeverése nélkül növeljük a fehér lisztben. Az ezerszemtömeg és a **lisztkihozatal** nem mutatott szignifikáns összefüggést a liszt TOT-AX-tartalmával, mely azt jelzi, hogy ezt a célt sikerült elérni, és hogy a liszt megnövekedett AX-tartalma nem a liszt őrlése közben keletkező nagyobb korpatartalomnak köszönhető. Ezt támasztja alá a liszt alacsony hamutartalma is (amely 0,05 és 0,6% között változott, 0,32% átlagos értékkel ‘Yumai’ keresztezésű törzsekben Tremmel-Bede és mtsai [2017] tanulmányában). Az alacsony hamutartalom az őrlési technikának is köszönhető. A Chopin CD1 malom ugyanis kis szemcseméretű lisztet állít elő (<180 µm) kisebb hamutartalommal, mint a tipikus labormalmok, melyek 250 µm-nél nagyobb szemcseméretet gyártanak. A vizsgált lisztek hamutartalma jellemzően a kereskedelmi liszt hamutartalma (~0,5%) alatt van. Meg kell jegyezni azonban, hogy a Chopin CD1 malom lisztkihozatala (50–60%) szintén alacsonyabb, mint a kereskedelmi malmoké (80%).

A szemtermés mennyisége, valamint a szem fizikai tulajdonságai a fajtaregisztráció szempontjából is fontos és alapvető tulajdonságok. **Hektolitersúlyuk és ezerszemtömegük** alapján a törzsek alkalmasak lehetnek a fajtaregisztrációra, mivel e tulajdonságaik a szülői genotípusokét általában meghaladják. Ez nem meglepő, hiszen maga a ‘Yumai-34’ is jó szemtulajdonságokkal rendelkezik. Bár a törzsek laboratóriumi szinten mért lisztkihozatala alacsonynak tűnik, de egyrészt nem múlja alul a kontroll fajták kihozatalát, másrészt ez a kísérlet nem jellemzi a törzsek ipari/kereskedelmi teljesítményét, ahol a lisztkiőrlés sokkal hatékonyabb. A vizsgált törzsek **szemtermés** mennyisége statisztikailag nem volt megkülönböztethető sem az Mv-Nádor termésétől, sem a normál szülői genotípusokétól, amely azt mutatja, hogy a törzsek termése (3 kivételével) az ‘Mv-Nádor’ és a keresztezéshez használt szülői genotípusok termés mennyisége között volt. Ez azt jelenti, hogy ezek a törzsek egy speciális minőségkategóriában alkalmasak lehetnek a fajtabejelentésre. Az átlagos malmi minőséget valamennyi törzs fizikai, beltartalmi és sütőipari paraméterei meghaladták, sőt akadt néhány kiemelekedő minőségű törzs is. Tremmel-Bede és mtsai (2017) szintén azonosítottak három genotípust, melyek alkalmasak lehetnek a fajtabejelentésre, mivel ezek termése a ‘Yumai-34’-nél szignifikánsan nagyobb volt, ugyanakkor a terméskontrollokétól nem tértek el szignifikánsan. Ezekre az alacsonyabb fehérje- és sikérmennyiség, de nagy sikérerősség volt a jellemző. Ebben a kísérletben a szemtermés mennyisége, valamint a TOT-AX- és a WE-AX-tartalom között nem találtunk szignifikáns összefüggést, sőt a termés egyetlen beltartalmi vagy minőségi paraméterrel sem korrelált. Tremmel-Bede és mtsai (2017) ezzel szemben negatív korrelációt találtak a termés és a fehérjetartalom, a sikértartalom, valamint a Farinográf vízfelvétel között, míg a termés korrelációja pozitív volt a keményítőtartalommal. Ez alátámasztotta azt az általánosan elfogadott szabályt is, mely szerint a nagyobb termés általában gyengébb sütőipari minőséggel párosul. Kísérletükben

azonban egy év három ismétléses kísérletét értékelték, míg jelen tanulmányban négy év termését értékeltük évenként egy ismétlésben, más törzsekkel. A környezeti körülmények variabilitását is figyelembe véve (2013–2017) elmondható, hogy a szelektált törzsek ígéretes tulajdonságokkal és alkalmazkodóképességgel bírtak, és hogy a nagy rostanyagtartalmat képesek voltak a nagy terméssel és a jó sütőipari tulajdonságokkal kombinálni.

5.3.2 Következtetések

Létrehoztunk tíz nagy vízoldható arabinoxilán-tartalmú törzset (9–10 mg/g), melyekben a rostanyagtartalom növekedése a szülői kontrollokéhoz képest 49,3% maximális és 16,3% átlagos növekedést jelentett a WE-pentozán, míg 21,5% maximális és 6,7% átlagos növekedés a TOT-pentozán-tartalomban. Emellett többségében 13% körüli volt a törzsek fehérjetartalma, 30% feletti a sikértartalma, és 60–62% a liszt vízfelvétele. A 40–45 g-os ezerszemtömeg mellé 50% feletti lisztkihozatal társult. A sütőipari minőséget általánosan a 29–34%-os Zeleny-féle szedimentációs érték, a 90-es érték feletti sikérindex, 12 perc feletti tésztastabilitás és 80 feletti értékszám jellemezte.

Kimutattuk, hogy lehetséges konvencionális nemesítési módszerekkel olyan speciális törzseket előállítani, melyek lisztjében nagy a vízoldható pentozántartalom. Ezek a törzsek nemcsak hogy jó agronómiai tulajdonságokkal rendelkeznek, de termésük mennyisége, fizikai tulajdonságai és a liszt sütőipari tulajdonságai is megfelelőek és versenyképesek más fajtákéval. A termésösszehasonlító kísérletek eredményei szerint a nagy pentozántartalmú búzafajták termése képes elérni a terméskontrollok termésszintjét. Ezen túl a megnövelt rostanyagtartalom nem csupán az egészségre fejthet ki pozitív hatást, de a feldolgozóipari tulajdonságokra is pozitív hatása lehet (pl. a liszt vízfelvételi kapacitásának növelésével).

5.4 A környezet és a genotípus arabinoxilán-tartalomra kifejtett hatásának megvitatása

5.4.1 Megvitatás

A búza tulajdonságai közül a legtöbb kutató a búza terméshozamának stabilitását vizsgálta különböző környezeti körülmények mellett. Így például Abraha és mtsai (2019) Etiópiában, Singh és mtsai (2019) Indiában, George és Lundy (2019) Kaliforniában vizsgálták a genotípusok terméshozamát esőztetés mellett, míg Matlala és mtsai (2019) a dél-afrikai szárazságban tanulmányozták a búza genotípusok stabilitását. Thungo és mtsai (2019) a hő- és a szárazságstressz búzára kifejtett hatásait hasonlították össze üvegházban és a szántóföldön esősátorban a stabilan nagyteljesítményű fajták azonosítása céljából. Hasonlóképp Karaman és mtsai (2019) az öntözött és öntözetlen körülményeket hasonlította össze, míg Beres és mtsai (2008) mind az öntözést, mind a N-trágyázás hatását vizsgálták Kanadában. Más tanulmányok vizsgálták a szem morfológiai tulajdonságait és/vagy a terméskomponenseket (Mehraban és mtsai, 2019; Yabwalo és mtsai, 2018), de kevés tanulmány foglalkozott a szem összetételének és minőségének stabilitásával. A szemtermést és néhány minőségi tulajdonságot (ezerszemtömeg, hektolitertömeg, fehérje, keményítő, sikér, Zeleny, Alveográf) mértek, hogy stabil genotípusokat azonosítsanak Törökországban (Aktas, 2019; Yildirim és mtsai, 2018; Bilgin és mtsai, 2016) és Indiában (Gupta és mtsai, 2016), ugyanakkor Silva és mtsai (2014) Braziliában a vetésidő hatását tanulmányozták ezekre a tulajdonságokra. Amiri és mtsai (2018) és Tremmel-Bede és mtsai (2016) a beltartalmi összetétel stabilitását kutatták különös tekintettel a fehérje- és rostkomponensekre. Amiri és mtsai (2018) régi és új fajtákat hasonlítottak össze és megállapították, hogy az új fajtáknak nagyobb a termésük, valamint a sikérindexük, miközben kisebb a fehérje- és a rosttartalmuk. Tremmel-Bede és mtsai (2016) pedig diverz populációk stabilitását és a szántóföldi menedzsment technikák hatását

vizsgálták, és kimutatták, hogy a populáción belüli diverzitásnak stabilizáló hatása van a szem beltartalmi paramétereire, továbbá hogy ez a hatás „low-input” rendszerekben sokkal kifejezettebb.

Vizsgálatainkban, több tulajdonság együttes figyelembevételével szelektált, 36 nagy pentozántartalmú genotípus fehérje- és keményítőtartalma nagymértékű genotípushatást mutatott nagy örökölhetőség értékekkel (sorban 0,83 és 0,74). A keményítőtartalom esetén szignifikáns volt az évjárat hatása is, míg a $G \times E$ kölcsönhatás mindkét tulajdonságra szignifikáns hatással volt (16. ábra). A genotípus jelentős hatása a fehérje- és a keményítőtartalomra annak a ténynek tulajdonítható, hogy a vizsgált törzsek számos szelekciós cikluson estek át, melynek következtében feldúsultak azok a genotípusok, melyek nemcsak hogy nagy pentozántartalommal rendelkeztek, de a fehérjetartalmuk és/vagy a sütőipari minőségük is jó volt. Feltehetőleg ennek köszönhető, hogy az irodalmi adatokkal (Martinant és mtsai, 1999; Branlard és mtsai, 1991, 2001) ellentétben kis környezeti hatást kaptunk.

A TOT- és a WE-pentozán-tartalmat mind a három faktor (G, E, $G \times E$) szignifikánsan befolyásolta, de a TOT-pentozán örökölhetősége kisebb volt (0,66), mint a vízoldható pentozáné (0,77). Hasonló eredményeket kaptak Tremmel-Bede és mtsai (2017), akik gáz-kromatográfiás mérésel megállapították, hogy a G hatása a WE-arabinoxilán mennyiségén túl annak összetételére is szignifikáns hatással van. Eredményeink összhangban vannak Dornez és mtsai (2008) megállapításaival, mely szerint a TOT-AX örökölhetősége (0,53) kisebb, mint a WE-AX-é (0,96), azonban megjegyzendő, hogy számos más tanulmány épp ennek ellenkezőjét állította (Gebruers és mtsai, 2010; Hong és mtsai, 1989). Más tanulmányok az E jelentősebb hatását állapították meg a WE-AX-tartalomra (Li és mtsai, 2009; Török és mtsai 2019), ellentétben Tremmel-Bede és mtsai (2017) és számos más szerző (Dornez és mtsai, 2008; Finnie és mtsai, 2006; Martinant és mtsai, 1999) munkájával, akik az E kismértékű hatását állapították meg. Habár a WE-pentozán és -arabinoxilán örökölhetőségét illetően a legtöbb publikáció hasonlóképp vélekedik és nagy örökölhetőségének köszönhetően alkalmasnak tartják nemesítési célokra, a TOT-pentozán és -arabinoxilán esetében azonban ellentmondásosak az eredmények. Ez részben betudható a minta-előkészítéshez és méréshez használt módszerek különbözőségének, valamint a vizsgálat tárgyát képező eltérő mintahalmazoknak.

A környezeti tényezők magukba foglalják az időjárást (csapadék, hőmérséklet stb.), a talaj összetételét és tulajdonságait, az agrotechnikát (elővetemény, trágyázás, talajművelés), valamint a növényvédőszer alkalmazását (rovarirtószer, tápanyagok) is. Kísérletünkben a 2011/2012 és a 2014/2015 évjáratokban nagyon forró és száraz volt a nyár nagyon alacsony téli minimum hőmérséklettel, míg a 2013/2014-es évjárat mérsékelt hőmérsékletéhez nagy mennyiségű aratás előtti csapadék társult. A 2012/2013-as évjáratot igen meleg nyár jellemezte, extrém kis mennyiségű aratás előtti (100 nap) csapadékmennyiséggel. A kumulált csapadékösszeg az öt közül csak egy évben érte el a környéken átlagosan jellemző 500 mm-es értéket: a 2015/2016 évben. Ezek az extrém időjárási körülmények mind hatással lehettek a beltartalmi tulajdonságokra és így kísérletünk eredményeire. A hő- és a szárazságstressz nagymértékű hatását bizonyítja az ezerszemtömeg és a keményítőtartalom összefüggése az abszolút maximum hőmérséklettel, a 30 °C-nál melegebb napok számával és az utolsó 100 napban leesett csapadék mennyiségével. A liszt vízfelvétele, valamint a sikerminőséget jellemző tulajdonságok (terülés, Zeleny) ugyanakkor a hideg napok, azaz az abszolút minimum hőmérséklet és az utolsó 100 nap lehidegebb napjaival voltak összefüggésben. Magyarországon egyre gyakrabban fordul elő szárazság- és hőstressz, melynek gyakoriságától és időtartamától függően a búza termése több mint 50%-kal is csökkenhet (Reynolds és mtsai, 2007; Shamsi és mtsai, 2011). A szárazságstressz a búzaszemek kémiai összetételét is szignifikánsan befolyásolja, így csökkenti a szemek szénhidrát-tartalmát (beleértve a

szacharózt és a keményítőt) (Barnabás és mtsai, 2008; Balla és mtsai, 2011) és növeli a fehérjetartalmát (Flagella és mtsai, 2010). Természetes körülmények között a szárazságstressz rendszerint hőstresszel jár együtt, és ez a két tényező együttesen szinergisztikusan növeli a búza rostanyag-tartalmát (Gebruers és mtsai, 2010; Jiang és mtsai, 2009; Ashraf, 2014), beleértve az AX-t is (Rakszegi és mtsai, 2014a). A teljes végső hatás azonban nagyban függ a szárazság súlyosságától és időtartamától, valamint más környezeti stresszekkel létrehozott kölcsönhatásától. Ezek a környezeti hatások a búza feldolgozóipari minőségét is nagyban befolyásolják, a szárazság hatására például nő a téztaerősség, de csökken a kenyértérfogat (Li és mtsai, 2013b).

A TOT-AX-tartalommal legszorosabb összefüggést mutató feldolgozóipari tulajdonság a liszt vízfelvétele (Tremmel-Bede és mtsai, 2017). Kísérletünkben a pentozánok teljes mennyisége nem, de vízdoldható frakciója (WE-pentozán) korrelált a vízfelvétellel (0,3641). A vízfelvétel fenotípusos varianciáját a genotípus 20,28%-ban határozta meg, örökölhetősége 0,74 volt. Bár a pentozánok a lisztnek csak 2–3%-át alkotják, saját tömegük tízszeresének megfelelő vízmennyiséget képesek megkötni, ezáltal nagyban hozzájárulnak a vízfelvétel mértékéhez (Holas és Tipples, 1978; Kulp, 1968). Az arabinoxilán-tartalmon túl azonban a fehérje mennyiségét, annak oldható részét, valamint a keményítősérülés mértékét is figyelembe kell venni, amikor a liszt vízfelvételeire ható tényezőket vizsgáljuk (Rakszegi és mtsai, 2014b). Fontos továbbá az AX molekulamérete, mivel a kis- és közepes méretű oldható arabinoxilánnak nagyobb a hatása a vízfelvételekre, mint a nagy molekuláknak (Primo-Martín és Martínez-Anaya, 2003).

5.4.2 Következtetések

Mind a teljes, mind a vízdoldható pentozán mennyiségét szignifikánsan befolyásolták a G, E és a G×E tényezők, de a teljes pentozán örökölhetősége (0,66) valamivel kisebb értéket adott, mint a vízdoldható pentozáné (0,77). A WE-pentozán 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. A TOT-pentozán-tartalom nagyobb stabilitása gyakran együtt járt a WE-pentozán-tartalom stabilitásával. Összességében a nagy WE-pentozán-tartalmú törzsek analízise kimutatta, hogy a WE-pentozán-tartalom jól öröklődő, genetikailag meghatározott tulajdonság.

A vizsgált törzsek minősége stabilnak és jónak tekinthető, beleértve a vízfelvétel értékeit is, mely a stabil jó minőség és egészségügyi hatás kombinálhatóságát bizonyítja. A vízfelvétel teljes fenotípusos varianciájának 21%-át határozta meg a genotípus, a tulajdonság örökölhetősége 0,74 volt. Számos törzs egy csoportba tömörült a stabilitás ábrán, mely szerint ezek a törzsek minőségstabilitásukat tekintve, többségében nem különböztek egymástól.

5.5 A hő- és a szárazságstressz búzaszem rostanyag-összetételre kifejtett hatásának megvitatása

5.5.1 Megvitatás

Korábban vizsgálták a hő- és a szárazságstressz hatását a szemtelítődés ideje alatt öt búzafajta ('Plainsman V', 'Fatima 2', 'Mv Mambo', 'Mv Mariska', 'Bezostaja 1') fehérje és keményítő-összetételére, valamint sütőipari minőségére (Balla és mtsai, 2011). Ezek közül a fajták közül hármat vontunk további vizsgálatokba, annak megállapítására, hogy a stresszek hogyan befolyásolják a búzaszem rostanyag összetételét és szerkezetét. Korábban megállapították, hogy a szárazság- és a kombinált stressz hatása sokkal nagyobb a szemtermésre és a minőségi paraméterekre – így a fehérjetartalomra is –, mint a hőstressz

hatása. Ugyanezt állapítottuk meg ebben a vizsgálatban a rostanyagok esetén is, bár a különbségek a hő- és a szárazságstressz hatásai között kisebbek voltak.

A korábbi tanulmányokból (Fábián és mtsai, 2011) szárazságtűnőnek tekintett 'Plainsman V' búzafajta szárazságtűrését megerősítették e kísérlet eredményei is. Miközben ugyanis a TOT-AX-tartalom általánosan nőtt valamennyi stressz hatására a másik két fajtában, addig a 'Plainsman V' ezzel ellentétesen reagált, azaz a szárazságstressz hatására csökkent a TOT-AX (3,9%) és a WE-AX-tartalma (16,3%). Ezzel szemben a hőstressz növelte a 'Plainsman V' TOT-AX- (15,8%) és WE-AX-tartalmát (16,5%). A két stressz együttesen növelte az X és a diszubsztituált AXOS (xa₂+3xx) arányát a 'Plainsman V'-ben. A szárazság és a hőstressz hatása hasonló volt a 'Plainsman V' β-glükán-tartalmára és szerkezetére, de ez a komponens kevésbé domináns búzában.

Az 'Mv Magma' fajtának volt a legstabilabb fehérje és TOT-AX-tartalma a hőstressz alatt, míg a szárazság hatása nagyobbak bizonyult és jelentősen csökkentette a fehérjetartalmat, ugyanakkor az XX AXOS-tartalmat növelte. A szárazságnak szintén nagyobb hatása volt a mono-, di-, és keverten szubsztituált AXOS arányra az 'Mv Magma' fajtában, mint a másik két fajtában. A szárazságnak az 'Mv Magma' β-glükán-tartalmára is nagyobb volt a hatása, mint a hőstressznek.

A 'Fatima 2' hasonlóan viselkedett a 'Plainsman V'-höz a szárazságtűrés tekintetében, de érzékenyebb volt a hőstresszre, ami hatással volt az ezerszemtömegre, a fehérje- és a TOT-AX-tartalomra (21. ábra). A di- és a keverten szubsztituált AXOS aránya is nőtt a szárazság hatására, míg az X és az XX arány csak a kombinált stresszhatásra nőtt. A szárazság és a hő hatása a 'Fatima 2' β-glükán-tartalmára és annak szerkezetére hasonló volt.

A hő- és a szárazságstressz hatását a gabona rostanyagtartalmára különböző fajtákkal, fajokkal, módszerekkel és megközelítésben vizsgálták már. Így az AX-koncentrációt nagyobbak találták Saastamoinen és mtsai (1989) az optimálisnál nagyobb mértékű öntözés mellett. A virágzaskori hő- és szárazságstressz szintén növeli az AX-koncentrációt Hong és mtsai (1989) szerint, ugyanakkor a virágzás utáni megjelenése csökkenti azt (Laurentin és Douglas, 2003). Árnyaltabb eredményeket kaptak Coles és mtsai (1997), akik szerint a virágzás utáni enyhe szárazság növeli, míg az extrém szárazság csökkenti a búza AX-tartalmát. A két stressz kombinációjának hatását vizsgálták Zhang és mtsai (2010b) tavaszi búzán, és megállapították, hogy a TOT-AX és a WE-AX mennyisége is nagyobb a búzaszemben vízmegvonás és magas hőmérséklet mellett és kisebb jól öntözött körülmények között és mérsékelt hőmérsékleten (Zhang és mtsai, 2010b). Az eredményekben azonban még mindig sok az ellentmondás, melynek okai lehetnek az eltérő termőhelyek és fajták, illetve az egyes kísérletekben tesztelt fajták igen alacsony száma. Nem beszélve a stresszkezelés mikéntjéről, hogy milyen fejlődési fázisban, milyen hosszban, milyen mértékben éri a stressz a növényt. Ennélfogva az arabinoxilán-tartalom környezetfüggősége még mindig nem teljesen tisztázott (Li és mtsai, 2009).

Eredményeink (Rakszegi és mtsai, 2014a) összhangban vannak azon korábbi megfigyelésekkel, miszerint a hő (Zhang és mtsai, 2010b), a szárazság (Coles és mtsai, 1997) és a két stressz kombinációja (Gebruers és mtsai, 2010) növeli a TOT-AX mennyiségét, míg a hőstressz a WE-AX mennyiségére van ugyanilyen hatással (Zhang és mtsai, 2010b).

A β-glükán-tartalom változását elsősorban árpában vizsgálták. Coles és mtsai (1991) vizsgálatai szerint a szárazság csökkenti a β-glükán-tartalmat árpában. Savin és mtsai (1997) szerint a rövid, de intenzív hőstressznek szintén negatív hatása van az árpa β-glükán-tartalmára. Eredményeink szerint a búza β-glükán-tartalma is csökken mind a hő, mind a szárazság, valamint a két stressz kombinációjának hatására.

Az AX-molekula szerkezetének az általunk találthoz hasonló változásait, vagyis a kevésbé szubsztituált formák arányának növekedését állapították meg Philippe és mtsai (2006a), valamint Toole és mtsai (2007) spektroszkópiás munkái is. Eredményeik szerint a

szerkezet-átrendeződés gyorsabb volt nagyobb hőmérsékleten, korlátozott vízellátás mellett a virágzás után 14 nappal, de a fajták között is volt különbség a molekulaszervezet újrendeződésének mértékében (Toole és mtsai, 2007). Mindez utal annak fontosságára, hogy a növény fejlődésének mely időszakában és milyen hosszán éri az abiotikus stressz a növényeket a fejlődésük során, amely bizonyára hatással van az AXOS molekulák szintézisére és szerkezetének szerveződésére is. Ebben a tanulmányban mennyiségileg is értékeltük a különböző AXOS-molekulák arányait és az US AXOS megnövekedett arányát állapítottuk meg valamennyi fajta esetén valamennyi stresszhatásra.

Ezen kívül a β -glükán összetételét is vizsgáltuk és a hosszabb láncok arányának növekedését figyeltük meg búzában valamennyi stresszhatásra, melyhez hasonló eredményt nem találtunk az irodalomban.

Az abiotikus stressz hatása a búza beltartalmi összetételre nagymértékben függhet a stressz időzítésétől, mivel a szemben lévő egyes komponensek felhalmozódása a szemtelítődés eltérő időszakára eshet. Wilson és mtsai (2006) vizsgálták az egyes sejtfalalkotó poliszacharidok lerakódását a fejlődő árpa endospermiumban és megállapították, hogy a kallóz és a cellulóz rakódik le először (a megporzást követő 3. és 4. nap között, DAP), majd ezt követi a β -glükán (5 DAP), a hetero-(1/4)- β -mannán (6 DAP), az AGP (7 DAP) és az AX (8 DAP). Philippe és mtsai (2006b) szerint a β -glükán az endosperm sejteinek sejtfalában halmozódik fel először a sejtkepződés folyamán, majd csak később jelenik meg az aleuron réteg sejtfalában. Az FT-IR mikrospektroszkópiával vizsgált fejlődő búzaendosperm sejtfalában kimutatták, hogy az AX csak a sejtkepződés után halmozódik fel, és hogy a differenciáció alatt az AX tulajdonságai dominálnak (Philippe és mtsai, 2006b). A ferulált AX először az endosperm és az aleuron sejtfalában jelenik meg 13 nappal a beporzás után és a felhalmozódás a 19. napig folytatódik az aleuron sejtek differenciálódásáig (Philippe és mtsai, 2006a). Toole és mtsai (2010) hasonló mintázatúnak találták az AX és a β -glükán felhalmozódását a szemben. A stresszkezelések ebben a kísérletben a kalászás utáni 12. napon kezdődtek és 15 napon keresztül tartottak (Zadoks-75). Ez ekvivalens a virágzás utáni 9-24. napos periódussal, amikor az AX, a β -glükán és a fehérje akkumulációja zajlik. A fajták virágzási ideje eltérő volt ugyan, de a stresszkezelés kezdetét ugyanahhoz a fenofázishoz (azaz virágzást követő naphoz) igazítottuk minden fajtánál (Rakszegi és mtsai, 2014a).

5.5.2 Következtetések

A kalászás utáni 12. naptól 15 napon át tartó hő- és szárazságstressz hatását vizsgáltuk a búza arabinoxilán és β -glükán komponenseinek mennyiségére és szerkezetére. Szignifikáns különbségeket találtunk a genotípusok abiotikus stresszekkel szembeni toleranciájában, de általánosságban a hő- és a szárazságstressz csökkentette az ezerszem-tömeget, 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. Emellett a nem szubsztituált (US) AXOS aránya és a hosszabb β -glükán láncok aránya is nőtt stresszkörülmények között, ugyanakkor az M/D arány a kombinált stressz hatására szignifikánsan csökkent.

Míg az AX-tartalom általánosságban nőtt valamennyi stresszhatásra, a szárazságstressz negatív hatással volt a szárazságtűrő 'Plainsman V' fajta AX-tartalmára. A 'Fatima 2' – szárazságtűrését illetően – hasonlóképp viselkedett, mint a 'Plainsman V', ugyanakkor nagyon érzékeny volt a hőre. A hőre legellenállóbb fajta az 'Mv Magma' volt. Ezek az általános észrevételek segíthetnek, hogy a nemesítés során hatékonyabban szelektálhassunk nagyobb rostanyagtartalmú és az abiotikus stresszeknek jobban ellenálló búzatörzseket.

5.6 Az U és M kromoszómák búza rostanyagtartalomra kifejtett hatásának megvitatása

5.6.1 Megvitatás

Kiváló táplálkozási értékük ellenére nagyon kevés tanulmány vizsgálta a búzával rokon gabona fajokat, mint génforrásokat a búza étkezési rosttartalom mennyiségének és összetételének javítására (Marcotuli és mtsai, 2015, 2016). E vizsgálatban használt *Ae. biuncialis* és *Ae. geniculata* vonalak a búzánál nagyobb genetikai variabilitást mutattak a fehérje- és a rostanyagtartalomban, ami azt jelenti, hogy a kromoszóma addíciók minőségre kifejtett hatását e komponensek esetén megbízhatóan tanulmányozhatjuk. Erre a tényre alapozva a jelen tanulmány célja annak vizsgálata volt, hogy az *Aegilops* U és M genomjának kromoszómái hogyan képesek módosítani a búza tartalékfehérje-, AX- és β -glükán-tartalmát. Információt nyerhetünk továbbá a fehérje- és rostanyag-bioszintézisért felelős fő gének potenciális vad alléljeinek kromoszómális elhelyezkedéséről (Rakszegi és mtsai, 2017).

Az *Ae. geniculata* 1-es kromoszómáinak addíciója (1U^s és 1M^s) növelte a búza oldhatatlan gluteninjeinek arányát a teljes glutenin mennyiségéhez képest (%UPP), valamint a gluteninek arányát a gliadinokéhoz képest (Glu/Gli) (28.c,d ábra). Ezek az eredmények alátámasztják Garg és mtsai (2016) eredményeit, akik ugyanezt a Chinese Spring–*Ae. geniculata* addíciós sorozatot vizsgálták és megállapították, hogy az 1M^s kromoszóma addíciója a búzáénál nagyobb téztaerősséget eredményez. A búza **sikérfehérjéit** már fél évszázada tanulmányozzák. Az előzetes genetikai eredmények már az 1960-as években megszülettek. Megállapították, hogy a búzafehérjék három fő csoportja (LMW gluteninek, ω -gliadinok, γ -gliadinok) az 1-es kromoszóma rövid karján elhelyezkedő gének által kódoltak mindhárom genomon (A, B, D). A HMW glutenin gének ugyanezen kromoszóma hosszú karján, míg az α -gliadinok a 6-os kromoszóma rövid karján kódoltak (Shewry és mtsai, 2003a,b, 2009; Payne és mtsai, 1987). A sikérfehérje gének vad homológjait az *Ae. umbellulata* 1U kromoszómáján azonosítottuk (Melléklet 5. táblázat), hasonlóan Medouri és mtsai (2015) *Ae. geniculata*-val végzett korábbi kísérleteinek eredményeihez. A búza kromoszómáinak egyenkénti összehasonlítása az *Ae. umbellulata* és *Ae. comosa* kromoszómáival „flow-sorted” módszerrel azt mutatta, hogy az 1U és az 1M kromoszómák makroszinten megegyeznek a hexaploid búza 1-es kromoszómáival (Molnár és mtsai, 2016). Ez arra is utal egyben, hogy az *Ae. geniculata* 1M^s kromoszómája tartalmazhatja a búza sikérfehérjék vad alléljeit.

A rostanyagok mennyiségi aránya alapján mindkét *Aegilops* faj a zab és az árpa beltartalmi összetételéhez hasonlított leginkább. Bennük a **β -glükán** mennyisége szignifikánsan nagyobb volt az AX-tartalomnál. A búzaliszt β -glükán-tartalmának növelése szintén jelentőséggel bírhat az ismert pozitív egészségügyi hatásainak köszönhetően (Anderson és mtsai, 2009; Buttriss és Stokes, 2008; Tighe és mtsai, 2010). Eredményeink szerint az *Ae. geniculata* és az *Ae. biuncialis* 5U^s és 7-es kromoszómái szignifikánsan növelték a búza β -glükán-tartalmát valamennyi termesztési körülmény között (29.a ábra). Emellett a TOTAL-GOS-tartalmat az 1U^s, 7U^s (vagy 7M^s) és a 3M^s kromoszómák addíciói növelték (Melléklet 3.a ábra). Az 5U kromoszóma a DP3:DP4 glükán egységek mennyiségi arányát eközben csökkentette (Melléklet 3.b ábra). Korábbi vizsgálatokban kimutatták, hogy 0–5% β -glükán adagolása a búzaliszthez szignifikánsan lecsökkenti a tézta nyújthatóságát és a kenyértérfogatot (Brennan és Cleary, 2007). A nagyobb β -glükán szint ugyanakkor csökkenti a rostanyagok oldhatóságát (Izydorczyk és Dexter, 2008), miközben a kisebb DP3:DP4 arány növeli azt (Izydorczyk és Dexter, 2008). A két ellentétes hatás feltehetőleg azt eredményezi, hogy a β -glükán oldhatósága közel konstans marad az *Aegilops* addíciós vonalakban, míg a feldolgozóipari minőségükben kisebb változások várhatók.

A cellulóz-szintázszerű (*Csl*) gének azok a lehetséges génjelöltek, melyek a különböző nem cellulóz alapú sejtfalalkotó poliszacharidok vázának szintézisében részt vevő enzimeket kódolhatják (Doblin és mtsai, 2009) (ld. 2.2.3 fejezet). A búza–*Aegilops* kromoszóma addíciós vonalak β -glükán-tartalmában talált eltérések összefüggést mutattak az *Ae. umbellulata* U genomján feltételezett β -glükán-szintáz gének elhelyezkedésével. Az árpa cellulóz-szintázszerű F (*CslF*) géncsaládjának szekvencia-összehasonlításával például kimutattuk, hogy a *CslF* géncsalád tagjainak ortológjai *Aegilops*-ban ugyanazon homeológ kromoszómákon találhatóak, mint árpában. Pontosabban az árpa *CslF6* gén homológjai a 7U kromoszómán vannak jelen, a *CslF9*-é az 1U-n, míg más *CslF* gének homológjai a 2U és 5U kromoszómákon találhatóak (Melléklet 6. táblázat). Korábbi tanulmányok (Cseh és mtsai, 2011) kimutatták, hogy a *HvCslF6* gén 7H kromoszóma mediált átvitele a ‘Manasz’ árpafajtából búzába szignifikánsan megnöveli a szem β -glükán-tartalmát. Bár a növekedés statisztikailag szignifikáns volt, a 7H addíciós vonal β -glükán-tartalma mérsékelten volt csak magasabb az árpa szülőénél (Cseh és mtsai, 2011). Ennek magyarázata az lehet, hogy az árpa 7H kromoszómáján található QTL csak egy része azon genomi régióknak, melyek a β -glükán-szintézis hatékonyabb működéséhez szükségesek (Shu és Rasmussen, 2014; Houston és mtsai, 2014). Ezért ez önmagában feltehetőleg nem elég a β -glükán-szint nagymértékű növekedéséhez. Mindez szintén igaz volt az 5U^s vagy 7U^s, 7M^s és 7M^b búza–*Aegilops* addíciós vonalakra (és az 1U^b-re is szántóföldi körülmények között), melyekben a β -glükán szint növekedése szintén csak mérsékelt volt. *HvCslF6* gén homológot a 7U kromoszómán is azonosítottak, amely további bizonyíték arra, hogy az *Ae. geniculata* és *Ae. biuncialis* 7-es kromoszómáinak addíciója növelheti a búza β -glükán-tartalmát. A *HvCslF7* gén egy vélhető ortológját azonosítottuk az 5U kromoszómán, mely a β -glükán-tartalom növekedését eredményezte a búza–*Ae. geniculata* 5U^s addíciós vonalban. Ezek az eredmények azt mutatják, hogy a *HvCslF7* gén különböző variánsai szerepet játszanak a *Aegilops* β -glükán-szintézisében (Burton és mtsai, 2008).

További, az *Ae. geniculata*, vagy az *Ae. biuncialis* diverz populációjának teljes genomra tervezett asszociációs vizsgálatait segíthetnének azon QTL-ek kromoszómális lokalizációját megállapítani, melyek az endospermium nagy β -glükán-tartalmáért felelősek. Az addíciós vonalak teljes homológ kromoszómápart tartalmazzák az *Aegilops*-ból, és a kívánt genomi régiókon kívül sok más gént is tartalmazzák, melyek hatással lehetnek a búzaszem fejlődésére és összetételére. A felesleges többlet idegen kromatin eliminálásával létrehozott búza–*Aegilops* transzlokációs vonalak, melyek tartalmazzák a kívánt QTL-eket egy genotípusban piramidálva, használhatóak lennének a β -glükán-tartalom növelésére.

Az az észrevétel, mely szerint a 5U^s, 7U^s és 1U^b kromoszóma addíciók növelik a búza teljes pentozántartalmát, míg a 3U^s, 4U^s, 5U^s, 6U^s, 7U^s, 5M^s, 7M^s, 2M^b és 7M^b addíciók növelik annak vízoldható frakcióját (29.b,c ábra), arra enged következtetni, hogy a kecskefűfélék ígéretes génforrások lehetnek a búza **AX-tartalmának** növelésére. Az oldható és oldhatatlan AX-frakciók nemcsak az egészségre lehetnek pozitív hatással, de növelik a liszt vízfelvételt, a téstakialakulási időt és a kenyértérfogatot is (Biliaderis és mtsai, 1995; Courtin és Delcour, 2002). Az oldható AX sütés közben hozzájárul a gázbuborékok képződéséhez, míg az oldhatatlan AX destabilizálja azt (Courtin és Delcour, 2002).

Komoly erőfeszítéseket tesznek a kutatók a mai napig annak érdekében, hogy azonosítsák azokat a géneket, melyek az AX bioszintézisét kontrollálják (ld. 2.2.3 fejezet). Kísérletünk eredményeként feltehetőleg a búzával ortológ *GT43*, *GT47*, *GT61* és *GT75* géneket azonosítottuk a 3U (*TaGT47-2B*, *TaGT47-2D*, *TaGT47-2A*, *TaGT47-13*), a 4U (*TaGT43-2B*, *TaGT43-2A*, *TaGT61-2*), a 6U (*TaGT47-12*, *TaGT61-1*, *TaGT75-4*) és a 7U (*TaGT43-4*) kromoszómákon, az *Ae. umbellulata* U genomján, mely eredményeket megerősíti, hogy a 7U^s kromoszóma addíciója növelte a teljes pentozántartalmat, míg a 3U^s, 4U^s, 6U^s és 7U^s kromoszóma addíciók a WE-pentozán-tartalmat növelték (29.b,c ábra,

Melléklet 6. táblázat). Az *Ae. geniculata* 5U^g kromoszómájának addíciója ugyan megnövelte a teljes és a vízdoldható pentozántartalmat búzában, de nem azonosítottunk egyetlen búzával ortológ GT gént sem az 5U kromoszómán (Rakszegi és mtsai, 2017). Az 5U^g addíciós vonal megnövekedett AX-tartalma összefüggésbe hozható viszont azzal a GWAS eredménnyel, mely szerint három QTL található a tetraploid búza 5A kromoszómáján, amelyek összefüggést mutattak az AX-tartalommal (Marcotuli és mtsai, 2015). Ezen ellentmondás lehetséges oka, hogy a keresés alapjául szolgáló kromoszóma-szekvenciák nem fedik le az *Ae. umbellulata* teljes genomját.

Az endoxilánáz enzimikus emésztésével kapott különböző AXOS molekulák arányát az *Ae. biuncialis* 2M^b, 3M^b és 7M^b kromoszómái befolyásolták búzában. Addíciójuk növelte a mono és a diszubsztituált (M/D) AXOS molekulák arányát. Az M/D arány ezen növekedése a monosubsztituált AXOS mennyiségi növekedésének köszönhető a 2M^b addíciós vonalban, és a diszubsztituált AXOS mennyiségi csökkenésének a 3M^b és 7M^b addíciós vonalakban. Ezek az eredmények azt bizonyítják, hogy az arabinoxilán-bioszintézist módosíthatjuk ezekkel az *Aegilops* kromoszómákkal (Melléklet 3.g ábra). Az a tény pedig, hogy az *Ae. geniculata* és az *Ae. biuncialis* szignifikáns fenotípusos varianciával rendelkezik a szem β -glükán- és AX-tartalmát illetően, alátámasztja azt az elképzelést, mely szerint ezeknek a fajoknak számottevő a genetikai variabilitásuk, amelynek köszönhetően felhasználhatók a kenyérbúza diétás rosttartalmának növelésére.

5.6.2 Következtetések

Eredményeink kimutatták, hogy az *Aegilops* 5U^g, 7U^g, 7M^g és 7M^b kromoszómái képesek növelni a búza β -glükán-tartalmát, míg az 5U^g, 5M^g és 7M^b kromoszómák a vízdoldható AX-tartalmat növelik búzában. Az 5U^g és 7M^b kromoszómák az arabinoxilán szerkezetére is hatással voltak. A megfelelő *Aegilops* keresztezési partner kiválasztásával ezek az *Aegilops* kromoszómák ígéretes források lehetnek a kromoszómamediatált génátvitelnek és azon kromoszóma mérnökségi programoknak, melyeknek célja az élelmi rosttartalom növelése búzában. Ezen kívül, a β -glükán- és az AX-tartalmat meghatározó gének ortológjainak azonosítása és kromoszómális lokalizációjának megismerése *Aegilops*ban alapot ad további GWAS vizsgálatokhoz és QTL régiók azonosításához a rostanyagok mennyiségével és összetételével összefüggésben. Ez a tanulmány ezért hozzájárul a búza rokon fajainak sokkal hatékonyabb felhasználásához idegen fajú introgressziós nemesítési programokban. Ezáltal olyan búzafajták előállítására nyílik lehetőség, melyeknek nagyobb a rostanyagtartalma, különösen a β -glükáné, és melynek fogyasztása általánosságban egészségesebb táplálkozáshoz vezet.

6 ÖSSZEFOGLALÁS

Az elmúlt húsz évben jelentősen megnőtt az érdeklődés az egészségesebb étrendhez hozzájáruló élelmiszerek előállítása és feldolgozása iránt. 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 szempögből közelíthetjük meg. Vizsgálhatjuk egyrészt azon gabonakomponensek jelenlétét és mennyiségét, melyek tüneteket idéznek elő az arra érzékeny fogyasztóknál. Ebben az esetben e 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 szénhidráttartalmának 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.

Célunk tehát 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 hőstressztényezők 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 jelentős megváltozását elkerüljük.

A kísérletek eredményei az alábbiak szerint foglalható össze:

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 mérsékeltőbb növekedése mellett a keményítő tulajdonságai ugyan módosulnak (csúcsviszkozitás ~ 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 nőtték ($r = 0,9286$). A kumulált csapadékösszeg nagysága a keményítőtartalommal mutatott pozitív korrelációt (Rakszegi és mtsai, 2015).

A sejtfallakó 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 $G \times E$ 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 kalászás 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 rendelkezik, 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 teljesörlemény 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^g, 2M^b és 7M^b búza-*Aegilops* addíciós vonalakban is.
- Kimutattuk, hogy az *Aegilops* kromoszómák közül az 5U^g, 7U^g, 7M^g és 7M^b kromoszómák addíciója képes növelni a búza β -glükán-tartalmát, míg az 5U^g, 5M^g 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 génjeivel 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 búzánál.
- 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).

7 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 ezerszemtömeeggel 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 ezerszemtömeeggel 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 vízdoldhatóságát.
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 kromoszómális lokalizációjának megismerése is. Az 5U és a 7M kromoszómák addíciójának szignifikáns hatását mutattuk ki a búza rostanyagtartalmára.

8 EREDMÉNYEK GYAKORLATI HASZNOSÍTHATÓSÁGA

Nemesítés és feldolgozóipari hasznosítás

A búzanesímítés 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 gabonaalapú 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, sikér, 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 melegekedése, a gyorsabb ütemben olvadó hó- és jégtakaró, valamint az emelkedő tengerszint is bizonyít. A klímarendek 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 ősszel 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 időjárás 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 száraztészták 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 táplálkozástani 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 siker tartalékfehérjék, melyekből 27 különböző glutenin allélt azonosítottak *Aegilops*ban, melyek összesen 29 féle fehérjemintázatot képesek létrehozni, ami nagy változatosságot eredményezhet a siker térhálószerkezetében és ezáltal a sütőipari minőségben.

Vizsgálatainkban a rostanyagkomponensek jelentős variabilitását mutattuk ki *Aegilops*ban és a β -glükán kiemelkedő mennyiségét, továbbá azonosítottunk 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.

9 KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ez úton szeretnék köszönetet mondani az Agrártudományi Kutatóközpont jelenlegi és volt igazgatóinak, Dr. Bedő Zoltánnak, Dr. Balázs Ervinnek és Dr. Veisz Ottónak, valamint a Kalászos Gabona Nemesítési Osztály jelenlegi és volt osztályvezetőinek, Dr. Láng Lászlónak és Dr. Vida Gyulának a támogatásukért.

Külön köszönetemet fejezem ki Dr. Bedő Zoltánnak, aki bevont az egészséges gabonafélék előállítását célzó kutatási programokba, vezette PhD munkámat és akivel 15 évig dolgozhattam együtt.

Köszönetemet fejezem ki Dr. Peter R. Shewry professzornak akivel a kialakított nemzetközi együttműködés nagyban hozzájárult a dolgozatban szereplő eredmények megszületéséhez, szakmai tapasztalataim, látóköröm bővüléséhez, valamint kutatói szemléletmódom formálásához.

Külön köszönet a dolgozatban feltüntetett eredmények megszületésében szerepet játszó együttműködő partnereimnek, Dr. Molnár Istvánnak, Némethné Kisgyörgy Boglárkának, Dr. Alison Lovegrovenak, Dr. Salgó Andrásnak, Dr. Tömösközi Sándornak, Prof. Domenico Lafinadrának és Dr. Francesco Sestilinek.

Köszönetemet fejezem ki PhD hallgatóimnak, Dr. Tremmel-Bede Karolinának és Tóth Violának, akik lelkesedésükkel, elhivatottságukkal és szorgalmas munkájukkal hozzájárultak dolgozatom megszületéséhez.

Hálás köszönetemet fejezem ki a Lisztlabor valamennyi jelenlegi és volt munkatársának, akik aktívan közreműködtek a szántóföldi kísérletek felvételezésében, és a laboratóriumi vizsgálatok elvégzésében (Bradák Regina, Varga Edina, Szeidl Antalné, Horgas Hanna, Jakab Richárd, Tóth Krisztina, Horváth Szilvia, Holtainé Patona Magdolna, Bodnárné Jávorai Tímea).

Köszönöm a Kalászos Gabona Nemesítési Osztály valamennyi dolgozójának a munkám során kapott segítségét, építő jó tanácsát.

Köszönöm családom támogatását, szeretetét, türelmét, amellyel átsegítettek a nehézségeken.

Köszönetemet fejezem ki a kutatások támogatóinak:

- NKFIH OTKA, CK 112169, Új szempontok a búzanemesítésben: A bioaktív komponens összetétel javítása és annak hatásai, 2015-2018
- NKFIH TÉT_12_JP-1-2014-0004, Egészséges gabonafélék nemesítése és gyakorlati hasznosíthatóságának vizsgálata, 2015-2017
- OM355/2008, Egészségmegőrzés és hagyomány: alapanyag-, termék- és technológiafejlesztés a gabonavertikumban, (HTcereal), 2009-2012
- EU-FP6 Integrated Project, EU-FP6-514008, Exploiting bioactivity of European cereal grains for improved nutrition and health benefits (HEALTHGRAIN), 2005-2010
- OTKA 68099F, A keményítő tulajdonságainak és jelentőségének vizsgálata a búzanemesítésben, 2007-2009

10 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.
- Abdel-Aal E.-S.M., Hucl P., Chibbar R.N., Han H.L., Demeke T. (2002). Physicochemical and structural characteristics of flour and starches from waxy and nonwaxy wheats. *Cereal Chemistry*, 79, 458–464.
- Aboubacar A., Moldenhauer K.A.K., McClung A.M., Beighley D.H., Hamaker B.R. (2006). Effect of growth location in the United States on amylose content, amylopectine structure, and thermal properties of starches of long grain rice cultivars. *Cereal Chem*, 83, 93–98.
- Abraha M.T., Shimelis H., Solomon T., Hailuv A. (2019). Genotype-by-environment interaction and selection of elite wheat genotypes under variable rainfall conditions in northern Ethiopia. *J. of Crop Improvement*, 33, 797-813.
- Acuña-Galindo M.A., Mason R.E., Subramanian N.K., Hays D.B. (2015). Meta-analysis of wheat QTL regions associated with adaptation to drought and heat stress. *Crop Sci*, 55, 477–492.
- Ahmad M. (2000). Molecular marker assisted selection of HMW glutenin alleles related to wheat bread quality by PCR-generated DNS markers. *Theoretical and Applied Genetics*, 101, 892-896.
- Ahmadpoor F., Asghari-Zakaria R., Firoozi B., Shahbazi H. (2014). Investigation of diversity in *Aegilops biuncialis* and *Aegilops umbellulata* by A-PAGE. *Natural Product Research*, 28, 1626-1636.
- Aktas B. (2019). Assesment of value for cultivation and use (VCU) trial data by GGE biplot analysis in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Applied Ecology and Environmental Research.*, 17, 12921-12936.
- Almeida E.L., Chang Y.K., Steel C.J. (2010). Effect of Adding Different Dietary Fiber Sources on Farinographic Parameters of Wheat Flour. *Cereal Chemistry*, 87, 566-573.
- Aman P., Rimsten I., Andersson R. (2004). Molecular weight distribution of β -glucan in oat-based foods. *Cereal Chemistry*, 81, 356-360.
- Amiri R., Sasani S., Jalali-Honarmand S., Rasaei A., Seifolahpour B., Bahraminejad S. (2018). Genetic diversity of bread wheat genotypes in Iran for some nutritional value and baking quality traits. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 24, 147-157.
- Amrein T.M., Granicher P., Arrigoni E., Amado R. (2003). In vitro digestibility and colonic fermentability of aleurone isolated from wheat bran. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie-Food Science and Technology*, 36, 451-460.
- Anders N., Wilkinson M.D., Lovegrove A., Freeman J., Tryfona T., Pellny T.K. et al. (2012). Glycosyl transferases in family 61 mediate arabinofuranosyl transfer onto xylan in grasses. *PNAS*, 109, 989-993.
- Anderson J.W., Baird P., Davis Jr R.H., Ferreri S., Knudtson M., Koraym A. et al. (2009). Health benefits of dietary fiber. *Nutrition Reviews*, 67, 188–205.
- Andersson A.A.M., Armö E., Rangeon E., Fredriksson H., Andersson R., Åman P. (2004). Molecular weight and structure units of (1→3, 1→4)- β -glucans in dough and bread made from hull-less barley milling fractions. *Journal of Cereal Science*, 40, 195–204.
- Andersson A.A.M., Kamal-Eldin A., Fras A., Boros D., Aman P. (2008). Alkylresorcinols in wheat varieties in the HEALTHGRAIN diversity screen. *J. Agric Food Chem*, 56, 9722-9725.
- Andersson R., Fransson G., Tietjen M., Aman P. (2009). Content and Molecular-Weight Distribution of Dietary Fiber Components in Whole-Grain Rye Flour and Bread. *J Agr Food Chem*, 57, 2004-2008.
- Anson N.M., van den Berg R., Havenaar R., Bast A., Haenen G.R.M.M. (2008). Ferulic acid from aleurone determines the antioxidant potency of wheat grain (*Triticum aestivum* L.). *J Agric Food Chem*, 56, 5589-5594.
- Antoine C., Peyron S., Mabilie F., Lapierre C., Bouchet B., Abecassis J. et al. (2003). Individual contribution of grain outer layers and their cell wall structure to the mechanical properties of wheat bran. *J Agric Food Chem*, 51, 2026-2033.
- Appels R., Eversole K., Feuillet C., Keller B., Rogers J., Stein N et al. (2018). Shifting the limits in wheat research and breeding using a fully annotated reference genome. *Science*, 361, 6403 p. 661 Paper: eaar7191.
- Asaoka M., Okuno K., Sugimoto Y., Fuwa H. (1985). Developmental-changes in the structure of endosperm starch of rice (*Oryza-sativa*-L). *Agric Biol Chem*, 49, 1973–1978.
- Ashraf M. (2014). Stress-Induced Changes in Wheat Grain Composition and Quality. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 54, 1576-1583.

- Bacic A., Stone B.A. (1981). Chemistry and organization of aleuron cell wall components from wheat and barley. *Aust J Plant Physiol*, 8, 475-495.
- Bacic C., Harris P.J., Stone B.A. (1988). Structure and function of plant cell walls. p. 297-371. in: *The biochemistry of plants*. J. Preiss, Ed. Academic Press, San Diego.
- Bagdi A., Tóth B., Lőrincz R., Szendi S., Gere A., Kókai Z. et al. (2016). Effect of aleurone-rich flour on composition, baking, textural, and sensory properties of bread. *LWT-Food Science and Technology*, 65, 762-769.
- Baldwin P.M. (2001). Starch granule-associated proteins and polypeptides: A review. *Starch/Starke*, 53, 475-503.
- Balla K., Rakszegi M., Li Z., Bekes F., Bencze Sz., Veisz O. (2011). Quality of winter wheat in relation to heat and drought shock after anthesis. *Czech Journal of Food Science*, 2, 117-128.
- Bamforth C.W. (1982). The enzymology of cell wall breakdown during malting and mashing: An Overview. *MBAA TQ* doi:10.1094/TQ-47-1-0309-01.
- Barcs J., Jenes B. (2017). Funkcionális élelmiszerek növekvő népszerűsége – A hazai cereáliapiac fogyasztói megítélése. *Táplálkozásmarketing*, 4, (1-2) 23-37.
- Barnabás B., Jäger K., Fehér A. (2008). The effect of drought and heat stress on reproductive processes in cereals. *Plant Cell Environment*, 31, 11-38.
- Barron C., Surget A., Rouau X. (2007). Relative amounts of tissues in mature wheat (*Triticum aestivum* L.) grain and their carbohydrate and phenolic acid composition. *J Cereal Sci*, 45, 89-96.
- Bartha A., Mezei E. (2019). Alacsony FODMAP étrend. Szerk. Laik E. Jaffa Kiadó.
- 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 highperformance liquid chromatography in the study of wheat flour proteins: an improved chromatographic procedure. *Cereal Chemistry*, 68, 207–209.
- Battisti D.S., Naylor R.L. (2009). Historical warnings of future food insecurity with unprecedented seasonal heat. *Science*, 323, 240–244.
- Beasley H.L., Blanchard C.L., Bekes F. 2001. Preparative method for in vitro production of functional polymers from glutenin subunits of wheat. *Cereal Chemistry*, 78, 464-470.
- Beasley H.L., Uthayakumaran S., Stoppard F.L., Partridge S.J., Daqiq L., Chong P. et al. (2002). Synergistic and additive effects of three high molecular weight glutenin subunit loci. II. Effects on wheat dough functionality and end-use quality. *Cereal Chemistry*, 79, 301-307.
- Bechtel D.B., Zayas I., Kaleikau I., Pomeranz Y. (1990). Size-distribution of wheat starch granules during endosperm development. *Cereal Chemistry*, 67, 59-63.
- Beckles D.M., Tananuwong K., Shoemaker C.F. (2012). Starch characteristics of transgenic wheat (*Triticum aestivum* L.) overexpressing the Dx5 high molecular weight glutenin subunit are substantially equivalent to those in nonmodified wheat. *J Food Sci*, 77, C437–C442.
- Beckles D.M., Thitisaksakul M. (2014). How environmental stress affects composition and functionality in cereal endosperm. *Starch/Starke*, 66, 58-71.
- Begcy K., Walia H. (2015). Drought stress delays endosperm development and misregulates genes associated with cytoskeleton organization and grain quality proteins in developing wheat seeds. *Plant Science*, 240, 109–119.
- Behrens R., Bohm A. (2004). Method for the electric contact charging of a mixture containing aleurone and shell particles. PCT application WO 2004/016354, 2004-Febr-26.
- Békés F., Anderson O., Gras P.W., Gupta R.B., Tam A., Wrigley C.W. et al. (1994a). The contributions to mixing properties of 1D HMW glutenin subunits expressed in a bacterial system. In: *Improvement of cereal quality by genetic engineering*. Proceedings of the Royal Australian Chemistry Institute, Cereal Chemistry Division Symposium on Improvement of Cereal Quality by Genetic Engineering. R.J. Henry and J.A. Ronalds eds., Sydney, Australia, 12-16 September 1993. p.97-103.
- Békés F., Gras P.W., Gupta R.B., Hickman D.R., Tatham A.S. (1994b). Effects of a high Mr Glutenin Subunit (1Bx20) on the dough mixing properties of wheat flour. *J Cereal Sci*, 19, 3-7.
- Beres B.L., Sadasivaiah R.S., McKenzie R.H., Graf R.J., Dyck R.J. (2008). The influence of moisture regime, N management, and cultivar on the agronomic performance and yield stability of soft white spring wheat. *Canadian Journal of Plant Science*, 88, 859-872.
- Berry C.P., D'Appolonia B.L., Gilles K.A. (1971). The characterization of triticale starch and its comparison with starches of rye, durum, and HRS wheat. *Cereal Chemistry*, 48, 415-427.
- Berry C.S. (1986). Resistant starch- Formation and measurement of starch that survives exhaustive digestion with amylolytic enzymes during the determination of dietary fiber. *J Cereal Sci*, 4, 301-314.
- Bertoft, E. (2013). On the building block and backbone concepts of amylopectin structure. *Cereal Chemistry*, 90, 294–311.

- Beta T., Corke H. (2001). Genetic and environmental variation in sorghum starch properties. *J Cereal Sci*, 34, 261–268.
- Betschart A.A. (1988). Nutritional quality of wheat and wheat foods. p. 91-130. in: *Wheat: Chemistry and Technology*, 3rd ed., Vol 2., Ed. Pomeranz Y. AACCC Int., St Paul, MN.
- Bhullar S.S., Jenner C.F. (1985). Differential responses to high temperatures of starch and nitrogen accumulation in the grain of four cultivars of wheat. *Aust J Plant Physiol*, 12, 363–375.
- Bilgin O., Guzman C., Baser I., Crossa J., Korkut K.Z. (2016). Evaluation of Grain Yield and Quality Traits of Bread Wheat Genotypes Cultivated in Northwest Turkey. *Crop Sciences*, 56, 73-84.
- Biliaderis C.G., Izydorczyk M.S., Rattan O. (1995). Effect of arabinoxylans on bread-making quality of wheat flours. *Food Chemistry*, 53, 165–171.
- Bird A. R., Regina A. (2018). High amylose wheat: A platform for delivering human health benefits. *Journal of Cereal Science*, 82, 99–105.
- Blanco A., Pasqualone A., Troccoli A., Di Fonzo N., Simeone R. (2002). Detection of grain protein content QTL across environments in tetraploid wheat. *Plant Mol Biol*, 48, 615-623.
- Blauth S. L., Kim K.-N., Klucinec J., Shannon J. C., Thompson D., Gultinan M. (2002). Identification of Mutator insertional mutants of starch-branching enzyme 1 (sbe1) in *Zea mays* L. *Plant Molecular Biology*, 48, 287–297.
- Blennow A., Nielsen T.H., Baunsgaard I., Mikkelsen R., Engelsen S.B. (2002). Starch phosphorylation: A new front line in starch research. *Trends in Plant Sci*, 7, 445-450.
- Blumenthal C., Bekes F., Gras P.W., Barlow E.W., Wrigley C.W. (1995). Identification of wheat genotypes tolerant to the effects of heat stress on grain quality. *Cereal Chemistry*, 72, 539–544.
- Blumenthal C., Rawson H.M., McKenzie E., Gras P.W., Barlow E.W.R., Wrigley C.W. (1996). Changes in wheat grain quality due to doubling the level of atmospheric CO₂. *Cereal Chem*, 73, 762–766.
- Bonnin E., Le Goff A., Saulnier L., Chaurand M., Thibault J.F. (1998). Preliminary characterisation of endogenous wheat arabinoxylan-degrading enzymic extracts. *J Cereal Sci*, 28, 53-62.
- Botticella E., Sestili F., Hernandez-Lopez A., Philips A., Lafiandra D. (2011). High resolution melting analysis for the detection of EMS induced mutations in wheat *SbeIIa* genes. *BMC Plant Biology*, 11, 156.
- Botticella E., Sestili F., Sparla F., Moscatello S., Marri L., Cuesta-Seijo J.A. et al. (2018). Combining mutations at genes encoding key enzymes involved in starch synthesis affects the amylose content, carbohydrate allocation and hardness in the wheat grain. *Plant Biotechnology Journal*, 16, 1723–1734.
- Bradley W.B. (1967). Wheat foods as sources of nutrients. *Bakers Dig*, 41, 66-77.
- Bramley P.M., Elmadfa I., Kafatos A., Kelly F.J., Manios Y., Roxborough H.E. et al. (2000). Vitamin E. *J Sci Food and Agric*, 80, 913-938.
- Branlard G., Dardevet M., Saccomano R., Lagoutte F., Gourdon J. (2001). Genetic diversity of wheat storage proteins and bread wheat quality. *Euphytica*, 119, 59-67.
- Branlard G., Rousset M., Loisel W., Autran J.C. (1991). Comparison of 46 technological breeding criteria used bread wheat quality evaluation. *J Genet Breeding*, 45, 263-280.
- Brennan C.S., Cleary L.J. (2007). Utilisation Glucagel® in the β -glucan enrichment of breads A physicochemical and nutritional evaluation. *Food Research International* 40, 291–296.
- Brennan C.S., Samaan J., El-Khayat G.H. (2012). The effect of genotype and environmental conditions on grain physicochemical properties of Syrian durum wheat cultivars. *Int J Food Sci Technol*, 47, 2627–2635.
- Briarty L.G., Hughes C.E., Evers A.D. (1979). The developing endosperm of wheat – A stereological analysis. *Ann Bot*, 44, 641-658.
- Broekaert W., Courtin C., Delcour J. (2010). Method for making soluble arabinoxylan as co-product of fermentation of whole-grain cereals. US patent application US2010/0035302 A1, 2010-Febr-11.
- Brouns F., Hemery Y., Price R.K., Anson N.M. (2012). Wheat Aleurone: Separation, Composition, Health Aspects, and Potential Food Use. *Critical reviews in food science and nutrition*, 52, 553-68.
- Brown I.L., McNaught K.J., Andrews D., Morita T. (2001). Resistant Starch: plant breeding, applications, development and commercial uses. In: McCleary BV, Prosky L, editors. *Advanced Dietary Fibre Technology*. Ames, Iowa, USA: Iowa State University Press, Blackwell Science; 2001.
- Brown I.L., McNaught K.J., Moloney E. (1995). Hi-maizeTM: new directions in starch technology and nutrition. *Food Australia*, 47, 273-279.
- Bucsell B., Molnár D., Harasztos A.H., Tömösközi S. (2016). Comparison of the rheological and end-product properties of an industrial aleurone-rich wheat flour, whole grain wheat and rye flour. *J Cereal Sci*, 69, 40-48.
- Buksa K., Nowotna A., Ziobro R. (2016). Application of cross-linked and hydrolyzed arabinoxylans in baking of model rye bread. *Food Chemistry*, 192, 991–996.
- Buresova I., Sedlackova I., Famera O., Lipavsky J. (2010). Effect of growing conditions on starch and protein content in triticale grain and amylose content in starch. *Plant Soil Environ*, 56, 99–104.

- Burton R.A., Jobling S.A., Harvey A.J., Shirley N.J., Mather D.E., Bacic A. et al (2008). The genetics and transcriptional profiles of the cellulose synthase-like HvCslF gene family in barley. *Plant Physiology*, 146, 1821–1833.
- Burton R.A., Wilson S.M., Hrmova M., Harvey A.J., Shirley N.J., Medhurst A. et al. (2006). Cellulose synthase-like CslF genes mediate the synthesis of cell wall (1,3;1,4)-beta-D-glucans. *Science*, 311, 1940-1942.
- Bushuk W., Békés F. (2002). Contribution of protein to flour quality. In: Salgó A., Tömösközi S., Lásztity R. (eds), *Proc. Novel Raw Materials, Technologies and Products – New Challenge for the Quality Control*. ICC, Vienna, Austria, pp. 4–9.
- Buttriss J.L., Stokes C.S. (2008). Dietary fibre and health: an overview. *Nutrition Bulletin* 33, 186-200.
- Cadalen T., Boeuf C., Bernard S., Bernard M. (1997). An intervarietal molecular marker map in *Triticum aestivum* L. em. Thell. and comparison with a map from a wide cross. *Theor Appl Genet*, 94, 367-374.
- Cameron D.K., Wang Y.J., Moldenhauer K.A. (2008). Comparison of physical and chemical properties of medium-grain rice cultivars grown in California and Arkansas. *J Food Sci*, 73, C72–C78.
- Campbell L.D., Boila R.J., Stothers, S.C. (1995). Variation in the chemical-composition and test weight of barley and wheat grain grown at selected locations throughout Manitoba. *Can J Anim Sci*, 75, 239–246.
- Carciofi M., Blennow A., Jensen S.L., Shaik S.S., Henriksen A., Buléon A. et al. (2012). Concerted suppression of all starch branching enzyme genes in barley produces amylose-only starch granules. *BMC Plant Biology*, 12, 223.
- Cavallero A., Empilli S., Brighenti F., Stanca A.M. (2002). High (1-3, 1-4)-β-glucan fractions in bread making and their effect on human glycemic response. *Journal of Cereal Science*, 36, 59-66.
- Champagne E.T., Bett-Garber K.L., Thomson J.L., Fitzgerald M.A. (2009). Unraveling the impact of nitrogen nutrition on cooked rice flavor and texture. *Cereal Chem*, 86, 274–280.
- Chanzy H.D., Grosrenaud A., Joseleau J.P., Dube M., Marchessault R.H. (1982). Crystallization behavior of glucomannan. *Biopolymers*, 21, 301-319.
- Chao S., Sharp P.J., Worland A.J., Warham E.J. Koebner R.M.D., Gale M.D. (1989). RFLP-based genetic maps of wheat homoeologous group 7 chromosomes. *Theoretical and Applied Genetics*, 78, 495–504.
- Charmet G., Masood-Quraishi U., Ravel C., Romeuf I., Rakszegi M., Guillon F. et al. (2009). Genetics of dietary fibre in bread wheat. *Euphytica*, 170, 155–168.
- Cheng F.M., Zhong L.J., Zhao N.C., Liu Y., Zhang G.P. (2005). Temperature induced changes in the starch components and biosynthetic enzymes of two rice varieties. *Plant Growth Regul*, 46, 87–95.
- Chung O.K., Ohm J. (2000). Cereal lipids. p.417-477. in: *Handbook of Cereal Science and Technology*, 2nd ed., Eds. Kulp K., Ponte J.G.J., Dekker M., New York.
- Cloetens L., Broekaert W.F., Delaedt Y., Ollevier F., Courtin C.M., Delcour J.A. et al. (2010). Tolerance of arabinoxylan-oligosaccharides and their prebiotic activity in healthy subjects: a randomised, placebo-controlled cross-over study. *Br J Nutr.*, 103, 703–713.
- Coles G.D., Hartunian-Sowa S.M., Jamieson P.D., Hay A.J., Atwell W.A., Fulcher R.G. (1997). Environmentally-induced variation in starch and non-starch polysaccharide content in wheat. *Journal of Cereal Science*, 26, 47-54.
- Coles G.D., Jamieson P.D., Haslemore R.M. (1991). Effect of moisture stress on malting quality in Triumph barley. *Journal of Cereal Science*, 14, 161–177.
- Colleoni, C., Myers, A.M., James, M.G. (2003). One- and two-dimensional native PAGE activity gel analyses of maize endosperm proteins reveal functional interactions between specific starch metabolizing enzymes. *Journal of Applied Glycoscience*, 50, 207–212.
- Corol D.I., Ravel C., Rakszegi M., Bedő Z., Charmet G., Beale M.H. et al. (2012). Effects of Genotype and Environment on the Contents of Betaine, Choline and Trigonelline in Cereal Grains. *J Agr Food Chem*, 60, 5471-5481.
- Courtin C.M., Delcour J. (1998). Physicochemical and bread-making properties of low molecular weight wheat-derived Arabinoxylans. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 46, 4066–4073.
- Courtin C.M., Delcour J.A. (2002). Arabinoxylans and endoxylanases in wheat flour bread making. *Journal of Cereal Science*, 35, 225-243.
- Cui W., Wood P.J., Blackwell B., Nikiforuk J. (2000). Physicochemical properties and structural characterization by two-dimensional NMR spectroscopy of wheat β-D-glucan—comparison with other cereal β-D-glucans. *Carbohydrates Polymers*, 41, 249–258.
- Cseh A., Kruppa K., Molnár I., Rakszegi M., Doležel J., Molnár-Láng M. (2011). Characterization of a new 4BS.7HL wheat/barley translocation line using GISH, FISH and SSR markers and its effect on the β-glucan content of wheat. *Genome* 54, 795-804.
- Cseh A., Soós V., Rakszegi M., Türkösi E., Balázs E., Molnár-Láng M. (2013). Expression of HvCslF9 and HvCslF6 barley genes in the genetic background of wheat and their influence on the wheat β-glucan content. *Ann. Appl. Biol.*, 163, 142–150. doi: 10.1111/aab.12043

- Dai S.F., Zhao L., Xue X.F., Jia Y.N., Liu D.C., Pu Z.J. et al. (2015). Analysis of high-molecular-weight glutenin subunits in five amphidiploids and their parental diploid species *Aegilops umbellulata* and *Aegilops uniaristata*. *Plant Genetic Resources – Characterization and Utilization*, 13, 186-189.
- Dai Z., Yin Y., Wang Z. (2009). Starch granule size distribution from seven wheat cultivars under different water regimes. *Cereal Chem*, 86, 82–87.
- Dai Z.M., Xu T.S., Li X.G., Zhang H., Li Y., Zhang X.L. (2016). Effect of different water supply on accumulation of high molecular weight glutenin subunits and glutenin macropolymers in near-isogenic wheat lines. *Plant Soil Environ*, 62, 53–59.
- Dang J.M.C., Copeland L. (2004). Genotype and environmental influences on pasting properties of rice flour. *Cereal Chem*, 81, 486–489.
- Darlington H.F., Tecsi L., Harris N., Griggs D.L., Cantrell I.C., Shewry P.R. (2000). Starch granule associated proteins in barley and wheat. *J Cereal Sci*, 32, 21-29.
- De Deckere E.A.M., Kloots W.J., VanAmelsvoort J.M.M. (1993). Resistant starch decreases serum total cholesterol and triacylglycerol concentrations in rats. *Journal of Nutrition*, 123, 2142-2151.
- Deng Z.Y., Fang W.Q., Guo X., Zhao X.Y., Guo H., Hu S.N. et al. (2018). Genetic dissection of interactions between wheat flour starch and its components in two populations using two QTL mapping methods. *Molecular Breeding*, 38, 41.
- Deng Z.Y., Hu S.N., Chen F., Li W.J., Chen J.S., Sun C.L. et al. (2015). Genetic dissection of interaction between wheat protein and starch using three mapping populations. *Mol Breed*, 35,12.
- Denyer K., Hylton C.M., Jenner C.F., Smith A.M. (1995). Identification of multiple isoforms of soluble and granule-bound starch synthase in developing wheat endosperm. *Planta*, 196, 256–265.
- Dinges J.R., Colleoni C., James M.G., Myers A.M. (2003). Mutational analysis of the pullulanase-type debranching enzyme of maize indicates multiple functions in starch metabolism. *Plant Cell*, 15, 666–680.
- Doblin M.S., Pettolino F., Bacic A. (2010). Plant cell walls: the skeleton of the plant world. *Functional Plant Biology*, 37, 357-381.
- Doblin M.S., Pettolino F.A., Wilson S.M., Campbell R., Burton R.A., Fincher G.B. et al. (2009). A barley cellulose synthase-like CSLH gene mediates (1,3;1,4)-beta-D-glucan synthesis in transgenic *Arabidopsis*. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106, 5996-6001.
- Dong M.H., Sang D.Z., Wang P., Wang X.M., Yang J.C. (2007). Changes in cooking and nutrition qualities of grains at different positions in a rice panicle under different nitrogen levels. *Rice Sci*, 14, 141–148.
- Dornez E., Gebruers K., Joye I.J., de Ketelaere B., Lenartz J., Masseax C. (2008). Effect of genotype, harvest year and genotype-by-harvest year interactions on arabinoxylan endoxylanase activity and endoxylanase inhibitor level in wheat kernels. *Journal of Cereal Science*, 47, 180-189.
- Douglas S.G. (1981). A rapid method for the determination of pentosans in wheat flour. *Food Chemistry*, 7, 139–145.
- Eastwood M., Kritchevsky D. (2005). Dietary fiber: How did we get where we are? *Book Series: Annual Review of Nutrition Volume*, 25, 1-8.
- European Commission Report on Functional Food, 2010, Publication Office of the European Union, ISBN 978-92-79-14239-0, ISSN 1018-5593, doi 10.2777/85512 Available at http://ec.europa.eu/research/bioeconomy/food/publications/index_en.htm
- Evers A.D. (1971). Scanning electron microscopy of wheat starch III. Granule development in endosperm. *Starch*, 23, 157-162.
- Fábián A., Jager K., Rakszegi, M., Barnabas B. (2011). Embryo and endosperm development in wheat (*Triticum aestivum* L.) kernels subjected to drought stress. *Plant Cell Rep*, 30, 551–563.
- Fido R.J., Békés F., Gras P.W., Tatham A.S. (1997). Effects of alpha-, beta-, gamma-, and omega- gliadins on the dough mixing properties of wheat flour. *Journal of Cereal Science*, 26, 271-277.
- Fincher G. (1975). Morphology and chemical composition of barley endosperm cell walls. *Journal of the Institute of Brewing*, 81, 116-122.
- 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.
- Fišteš A., Dosenovic T., Rakic D., Pajin B., Seres Z., Simovic S. et al. (2014). Statistical analysis of the basic chemical composition of whole grain flour of different cereal grains. *Acta University, Sapientiae, Alimentaria*, 7, 45–53.
- Flagella Z., Giuliani M.M., Giuzio L., Volpi C., Masci S. (2010). Influence of water deficit on durum wheat storage protein composition and technological quality. *European Journal of Agronomy*, 33, 197–207.
- Flipse E., Keetels C., Jacobsen E., Visser R. (1996). The dosage effect of the wildtype GBSS allele is linear for GBSS activity but not for amylose content: Absence of amylose has a distinct influence on the physico-chemical properties of starch. *International Journal of Plant Breeding Research*, 92, 121–127.
- François I.E.J.A., Lescroart O., Veraverbeke W.S., Marzorati M., Possemiers S., Evenepoel P. et al. (2012). Effects of a Wheat Bran Extract containing arabinoxylan oligosaccharides on gastroduodenal health

- parameters in healthy adult human volunteers: a double-blind, randomized, placebo-controlled, crossover trial. *Br J Nutr*, 108, 2229-2242.
- Fraser J.R., Holmes D.C. (1959). Proximate analysis of wheat flour carbohydrates. IV. Analysis of wholemeal flour and some fractions. *J Sci Food Agric*, 10, 506-512.
- Fredriksson H., Salomonsson L., Andersson R., Salomonsson A.C. (1998). Effects of protein and starch characteristics on the baking properties of wheat cultivated by different strategies with organic fertilizers and urea. *Acta Agric Scand, Sect B Soil Plant Sci*, 48, 49–57.
- Freeman J., Lovegrove A., Wilkinson M.D., Saulnier L., Shewry P.R., Mitchell R.A.C. (2016). Effect of suppression of arabinoxylan synthetic genes in wheat endosperm on chain length of arabinoxylan and extract viscosity. *Plant Biotechnology Journal*, 14, 109-116.
- Fujita N., Wadano A., Kozaki S., Takaoka K., Okabe S., Taira T. (1996). Comparison of the primary structure of waxy protein (granule-bound starch synthase) between polyploidy wheats and related diploid species. *Biochemical Genetics*, 34, 403–413.
- Fujita N., Yoshida M., Asakura N., Ohdan T., Miyao A., Hirochika H. et al. (2006). Function and characterization of starch synthase I using mutants in rice. *Plant Physiology*, 140, 1070–1084.
- Gallant D.I., Bouchet B., Baldwin P.M. (1997). Microscopy of starch: Evidence of new level of granule organization. *Carbohydrate Polymers*, 32, 177-191.
- Gan Z., Galliard T., Ellis P.R., Angold R.E., Vaughan J.G. (1992). Effect of the outer bran layers on the loaf volume of wheat bread. *Journal of Cereal Science*, 15, 151-163.
- Garg M., Tsujimoto H., Gupta R.K., Kumar A., Kaur N., Kumar R. et al. (2016). Chromosome specific substitution lines of *Aegilops geniculata* alter parameters of breadmaking quality of wheat. *PLoS ONE* DOI: [10.1371/journal.pone.0162350](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0162350)
- Gebruers K., Dornez E., Bedo Z., Rakszegi M., Fras A., Boros D. et al. (2010). Environment and genotype effect on the content of dietary fiber and its components in wheat in the HEALTHGRAIN diversity screen. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 58, 9353-9361.
- Gebruers K., Dornez E., Boros D., Fras A., Dynkowska W., Bedo Z. et al. (2008). Variation in the content of dietary fiber and components thereof in wheats in the HEALTHGRAIN diversity screen. *Journal of Agriculture and Food Chemistry* 56, 9740–9749.
- George N., Lundy M. (2019). Quantifying Genotype × Environment Effects in Long-Term Common Wheat Yield Trials from an Agroecologically Diverse Production Region. *Crop Science*, 59, 1960-1972.
- Gibson PR., Sopher SJ. (2005). Personal view: food for thought – western lifestyle and susceptibility for Crohn’s disease. *The FODMAP hypothesis. Aliment Pharmacol Ther* 21, 1399-1409.
- Goesaert H., Brijs K., Veraverbeke W.S., Courtin C.M., Gebruers K., Delcour J.A. (2005) Wheat flour constituents: how they impact bread quality, and how to impact their functionality. *Trends Food Sci Technol*, 16, 12–30.
- Graybosch R.A., Souza E., Berzonsky W., Baenziger P.S., Chung O. (2003). Functional properties of waxy wheat flours: genotype and environmental effects. *Journal of Cereal Science*, 38, 69-76.
- Greenwell P., Schofield J.D. (1986). A starch granule protein associated with endosperm softness in wheat. *Cereal Chem.*, 63, 379-380.
- Groos C., Bervas E., Charmet G. (2004). Genetic analysis of grain protein content, grain hardness and dough rheology in a hard x hard bread wheat progeny. *J Cereal Sci*, 40, 93-100.
- Gross G.G. (1981). Phenolic acids. p. 301-316. in: *The Biochemistry of Plants – A Comprehensive Treatise*. Eds. Stumpf P.K., Conn E.E.. Academic Press, New York.
- Gruppen H., Hamer R.J., Voragen A.G.J. (1992). Water-unextractable cell wall material from wheat flour. I. Extraction of polymers with alkali. *J. Cereal Sci*, 16, 41-51.
- Gunaratne A., Ratnayaka U.K., Sirisena N., Ratnayaka J., Kong X., Arachchi L.V. et al. (2011). Effect of soil moisture stress from flowering to grain maturity on functional properties of Sri Lankan rice flour. *Starch/Stärke*, 63, 283–290.
- Gupta R.B., Batey I.L., MacRitchie F. (1992). Relationships between protein composition and functional properties of wheat flours. *Cereal Chemistry*, 69, 125–131.
- Gupta R.B., MacRitchie F. (1994). Allelic variation at glutenin subunit and gliadin loci, Glu-1, Glu-3 and Gli-1, of common wheats. II. Biochemical basis of the allelic effects on dough properties. *J. Cereal Sci*, 19, 19-29.
- Gupta R.B., Paul J.G., Cornish G.B., Palmer G.A., Békés F., Rathjen A.J. (1994). Allelic variation at glutenin subunit and gliadin loci, Glu-1, Glu-3 and Gli-1, of common wheats. I. Its additive and interaction effects on dough properties. *J Cereal Sci*, 19, 9-17.
- Gupta S., Yadav R., Gaikwad K., Kushwah A., Singh A.M., Bainsla N.K. (2016). Genetic improvement trend analysis for end-use quality characteristics among wheat cultivars of North-Western India. *Indian Journal of Genetics and Plant Breeding*, 76, 137-143.

- Gül H., Özer M.S., Dizlek H. (2009). Improvement of the wheat and corn bran bread quality by using glucose oxidase and hexose oxidase. *J Food Qual*, 32, 209-222.
- Güler M. (2003). Barley grain β -glucan content as affected by nitrogen and irrigation. *Field Crops Research*, 84, 335-340.
- Hallström E., Sestili F., Lafiandra D., Björck I., Ostman E. (2011). A novel wheat variety with elevated content of amylose increases resistant starch formation and may beneficially influence glycaemia in healthy subjects. *Food and Nutrition Research*, 55, 7074.
- Hanashiro, I., Abe, J.-I., Hizukuri, S. (1996). A periodic distribution of the chain length of amylopectin as revealed by high-performance anion-exchange chromatography. *Carbohydrate Research*, 283(Supplement C), 151–159.
- Harberd N.D., Bartels D., Thompson R.D. (1986). DNA restriction-fragment variation in the gene family encoding high molecular weight (HMW) glutenin subunits of wheat. *Biochem Genet*, 24, 117-126.
- Hatfield J.L., Boote K.J., Kimball B.A., Ziska L.H., Izaurralde R.C., Ort D. et al. (2011). Climate impacts on agriculture: Implications for crop production. *Agron J*, 103, 351–370.
- Hayakawa K., Tanaka K., Nakamura T., Endo S., Hoshino T. (1997). Quality characteristics of waxy hexaploid wheat (*Triticum aestivum* L.). Properties of starch gelatinization and retrogradation. *Cereal Chemistry*, 74, 576–580.
- Hayakawa K., Tanaka K., Nakamura T., Endo S., Hoshino T. (2004). End use quality of waxy wheat flour in various grainbased foods. *Cereal Chemistry*, 81, 666–672.
- Hazard B., Zhang X., Colasuonno P., Uauy C., Beckles D.M., Dubcovsky J. (2012). Induced mutations in the Starch Branching Enzyme II (SBEII) genes increase amylose and resistant starch content in durum wheat. *Crop Sci.*, 52, 1754–1766.
- He G.C., Kogure K., Suzuki H. (1990). Development of endosperm and synthesis of starch in rice grain. 3. Starch property as affected by the temperature during grain development. *Jpn J Crop Sci*, 59, 340–345.
- Heiniö R.L., Noort M.W.J., Katina K., Alam S.A., Sozer N., de Kock H.L. et al. (2016). Sensory characteristics of wholegrain and bran-rich cereal foods - A review. *Trends in Food Science and Technology*, 47, 25-38.
- Hemery Y., Holopainen U., Lampi A-M., Lehtinen P., Nurmi T., Piironen V. et al. (2011). Potential of dry fractionation of wheat bran for the development of food ingredients, part II: Electrostatic separation of particles. *J Cereal Sci*, 53, 9-18.
- Hemery Y.M., Mateo Anson N., Havenaar R., Haenen G.R.M.M., Noort M.W.J., Rouau X. (2010). Dry fractionation of wheat bran increases the bioaccessibility of phenolic acids in breads made from processed bran fractions. *Food Res Int*, 43, 1429-1438.
- Herdon I., Nábrádi A. (2014). A piacra jutás lehetőségei a funkcionális élelmiszerek területén. *Táplálkozásmarketing*, 1, (1-2) 55-56.
- Hesselman, K., Elwinger, K., Nilsson, M., Thomke, S. (1981). The effect of beta-glucanase supplementation, stage of ripeness, and storage treatment of barley in diets fed to broiler chickens. *Poultry Science*, 60, 2664-2671
- Hoffmann R.A., Leeftang B.R., Debarse M.M.J. et al. (1991). Characterization by H-1-NMR spectroscopy of oligosaccharides, derived from arabinoxylans of white endosperm of wheat, that contain the elements. - 4)[α -L-Araf-(1-3)]- β -D-Xylp-(1- or -4)[α -L-Araf-(1-2)][α -L-Araf-(1-3)]- β -D-Xylp-(1-). *Carbohydrate Research*, 221, 63-81.
- Hofvander P., Andersson M., Larsson C.T., Larsson H. (2004). Field performance and starch characteristics of high-amylose potatoes obtained by antisense gene targeting of two branching enzymes. *Plant Biotechnology Journal*, 2, 311-320.
- Hogg A.C., Gause, K., Hofer, P., Martin, J.M., Graybosch, R.A., Hansen, L.E. et al. (2013). Creation of a high-amylose durum wheat through mutagenesis of starch synthase II (SSIIa). *Journal of Cereal Science*, 57, 377-383.
- Hogg A.C., Giroux M.J. (2019). Milling and baking quality of hexaploid spring wheat starch synthase IIa (ssIIa) mutants with elevated amylose content. *Cereal Chemistry*, 96, 532-544.
- Hogg AC., Martin JM., Giroux MJ. (2017). Novel ssIIa alleles produce specific seed amylose levels in hexaploid wheat. *Cereal Chemistry*, 94, 1008–1015.
- Holas J., Tipples K.H. (1978). Factors affecting farinograph and baking absorption I. Quality characteristics of flour streams. *Cereal Chemistry*, 55, 637–652.
- Hong B.H., Rubenthaler G.L., Allen R.E. (1989). Wheat pentosans cultivate variation and relationship to kernel hardness. *Cereal Chemistry*, 66, 369-373.
- Hoseney R.C. (1984). Functional properties of pentosans in baked goods. *Food Technol* 1, 114–119
- Houston K., Russell J., Schreiber M., Halpin C., Oakey H., Washington J.M. et al. (2014). A genome wide association scan for (1,3;1,4)- β -glucan content in the grain of contemporary 2-row spring and winter barleys. *BMC Genomics*, 15, 907.

- Hung P.V., Maeda T., Morita N. (2006). Waxy and high-amylose wheat starches and flours – Characteristics, functionality and application. *Trends Food Sci Technol*, 17, 448-456.
- Hung P.V., Yamamori M., Morita N. (2005). Formation of enzyme-resistant starch in bread as affected by high-amylose wheat flour substitutions. *Cereal Chemistry*, 82, 690-694.
- Hurkman W.J., McCue K.F., Altenbach S.B., Korn A., Tanaka C.K., Kothari K.M. et al. (2003). Effect of temperature on expression of genes encoding enzymes for starch biosynthesis in developing wheat endosperm. *Plant Science*, 164, 873–881.
- Igartua E., Hayes P.M., Thomas W.T.B., Meyer R., Mather D.E. (2002). Genetic control of quantitative grain and malt quality traits in barley. *Journal of Crop Production*, 5, 131–164.
- 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.
- Inukai T., Hirayama Y. (2010). Comparison of starch levels reduced by high temperature during ripening in Japonica rice lines near-isogenic for the Wx locus. *J Agron Crop Sci*, 196, 296–301.
- Izydorczyk M.S., Biliaderis C.G (1992) Effect of molecular size on physical properties of wheat arabinoxylan. *J Agr Food Chem*, 40, 561–566.
- Izydorczyk M.S., Biliaderis C.G. (1994). Studies on the structure of wheat endosperm arabinoxylans. *Carbohydrate Polymers*, 24, 61-71.
- Izydorczyk M.S., Chornick T.L., Paulley F.G., Edwards N.M., Dexter J.E. (2008). Physicochemical properties of hull-less barley fiber-rich fractions varying in particle size and their potential as functional ingredients in two-layer flat bread. *Food Chemistry*, 108, 561-570.
- Izydorczyk M.S., Dexter J.E. (2008). Barley β -glucans and arabinoxylans: Molecular structure, physicochemical properties, and uses in food products – a Review. *Food Research International*, 41, 850–868.
- Izydorczyk M.S., Hussain A., MacGregor A.W. (2001). Effect of barley and barley components on rheological properties of wheat dough. *Journal of Cereal Science*, 34, 251-260.
- Izydorczyk M.S., Rattan O. (1995). Effect of arabinoxylans on bread-making quality of wheat flours. *Food Chem*, 53, 165–171.
- Jane J.-L., Chen Y. Y., Lee L.F., McPherson A.E., Wong K.S., Radosavljevic M., Kasemsuwan T. (1999). Effects of amylopectin branch chain length and amylose content on the gelatinization and pasting properties of starch. *Cereal Chemistry*, 76, 629–637.
- Jenkins J.P.J., Cameron R.E., Donald A.M.A. (1993). Universal feature in the structure of starch granules from different botanical sources. *Starch/Starke*, 45, 417-420.
- Jiang D., Yue H., Wollenweber B., Tan W., Mu H., Bo Y., et al. (2009). Effects of Post-Anthesis drought and water-logging on accumulation of high-molecular-weight glutenin subunits and glutenin macropolymers content in wheat grain. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 195, 89–97.
- Jiang G., Vasanthan T. (2000). MALDI-MS and HPLC quantification of oligosaccharides of lichenase-hydrolyzed water-soluble β -glucan from ten barley varieties. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 48, 3305–3310.
- Jiang H.W., Dian W.M., Wu P. (2003). Effect of high temperature on the structure of amylopectin in rice endosperm by reducing the activity of the starch branching enzyme. *Phytochemistry*, 63, 53–59.
- Jobling S.A., Schwall G.P., Westcott R.J., Sidebottom C.M., Debet M., Gidley M.J. et al. (1999). A minor form of starch branching enzyme in potato (*Solanum tuberosum* L.) tubers has a major effect on starch structure: Cloning and characterisation of multiple forms of SBE A. *Plant Journal*, 18, 163–171.
- Johansson Boll E.V., Ekström L.M.N.K., Courtin C.M., Delcour J.A., Nilsson A.C, Björck I.M.E. et al. (2016). Effects of wheat bran extract rich in arabinoxylan oligosaccharides and resistant starch on overnight glucose tolerance and markers of gut fermentation in healthy young adults. *European Journal of Nutrition*, 55, 1661–1670.

- Karaman M. (2019). Evaluation of bread wheat genotypes in irrigated and rainfed conditions using biplot analysis. *Applied Ecology and Environmental Research*, 17, 1431-1450.
- Katina K. (2003). High fiber baking. In: *Bread making: improving quality*, ed.: Cuvain S.P., Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England, p. 487-499.
- Katina K., Juvonen K., Laitila A., Flander L., Nordlund E., Kariluoto S. et al. (2012). Fermented wheat bran as a functional ingredient in baking. *Cereal Chemistry*, 89, 126-134.
- Katina K., Laitila A., Juvonen R., Liukkonen K-H., Kariluoto S., Piironen V. et al. (2007). Bran fermentation as a means to enhance technological properties and bioactivity of rye. *Food Microbiol*, 24, 175-186.
- Keagy P.M., Borenstein B., Ranum P., Connor M.A., Lorenz K., Hobbs W.E. (1980). Natural levels of nutrients in commercially milled wheat flours. II. Vitamin analysis. *Cereal Chemistry*, 57, 59-65.
- Kiribuchi-Otobe C., Nagamine T., Yanagisawa T., Ohnishi M., Yamaguchi I. (1997). Production of hexaploid wheats with waxy endosperm character. *Cereal Chemistry*, 74, 72-74.
- Knuckles B.E., Hudson C.A., Chiu M.M., Sayre R.N. (1997). Effect of β -glucan barley fraction in high-fiber bread and pasta. *Cereal Food World*, 42, 94-99.
- Konik-Rose C., Thistleton J., Chanvrier H., Tan I., Halley P., Gidley M et al. (2007). Effects of starch synthase IIa gene dosage on grain, protein and starch in endosperm of wheat. *Theoretical and Applied Genetics*, 115, 1053-1065.
- Kontor E., Szakály Z., Véha M., Kiss M. (2018). Egészség vagy íz? Fogyasztói dilemmák a funkcionális élelmiszerekkel kapcsolatban – szakirodalmi áttekintés. *Táplálkozásmarketing*, V. évfolyam, 2018/2. szám, p. 17-29.
- Kreis M., Forde B.G., Rahman S., Mifflin B.J., Shewry, P.R. (1985a). Molecular evolution of the seed storage proteins of barley, rye and wheat. *Journal of Molecular Biology*, 183, 499-502.
- Kreis M., Shewry P.R., Forde B.G., Forde J, Mifflin B.J. (1985b). Structure and evolution of seed storage proteins and their genes, with particular reference to those of wheat, barley and rye. In *Oxford Surveys of Plant Cell and Molecular Biology Vol. 2* (ed. B.J. Mifflin), Oxford University Press, Oxford, pp. 253-317.
- Kruger J.E., Reed G. (1988). Enzymes and color. p. 441-500. in: *Wheat: Chemistry and Technology*, 3rd ed., Vol. 1., Ed. Pomeranz Y., Ed. AACC Int, Cereal Chem, St Paul, MN.
- Ktenioudaki A., Gallagher E. (2012) Recent advances in the development of high-fibre baked products. *Trends Food Sci Technol*, 28, 4-14.
- Kulp K. (1968). Pentosans of wheat endosperm. *Cereal Sci Today*, 13, 414-419.
- Labuschagne M.T., Elago O., Koen E. (2009). The influence of temperature extremes on some quality and starch characteristics in bread, biscuit and durum wheat. *J Cereal Sci*, 49, 184-189.
- Laguna L., Salvador A., Sanz T., Fiszman S.M. (2011). Performance of a resistant starch rich ingredient in the baking and eating quality of short-dough biscuits. *LWT-Food Science and Technology*, 44, 737-746.
- Lanning S.B., Siebenmorgen T.J., Ambardekar A.A., Counce P.A., Bryant R.J. (2012). Effects of night time air temperature during kernel development of field-grown rice on physicochemical and functional properties. *Cereal Chem*, 89, 168-175.
- Lásztity R. (1996). The chemistry of cereal proteins. CRC Press, Boca Raton, p.19-138.
- Laurentin A.M., Douglas E. (2003). Dietary fibre in health and disease. *Nutrition Bulletin* 28, 69-73.
- Laurikainen T., Harkönen H., Autio K., Poutanen K. (1998). Effects of enzymes in fibre-enriched baking. *J Sci Food Agric*, 76, 239-249.
- Lawrence G.J., Shepherd K.W. 1980. Variation in glutenin protein subunits of wheat. *Aust J Biol*, 33, 221-233.
- Lazaridou A., Biliaderis C.G. (2007). Molecular aspects of cereal β -glucan functionality: physical properties, technological applications and physiological effects. *Journal of Cereal Science*, 46, 101-118.
- Lazaridou A., Biliaderis C.G., Micha-Screttas M., Steele B.R. (2004). A comparative study on structure-function relations of mixed linkage (1-3), (1-4) linear β -D-glucans. *Food Hydrocolloids*, 18, 837-855.
- Lempereur I, Rouau X, Abecassis J. (1997). Genetic and agronomic variation in arabinoxytan and ferulic acid contents of durum wheat (*Triticum durum* L) grain and its milling fractions. *Journal of Cereal Science*, 25, 103-110.
- Leroy P, Negre S, Tixier MH, Perretant MR, Sourdille P, Gay G et al. (1997). A genetic reference map for the bread wheat genome - *Triticum aestivum* L. em. Thell. In: McGuire PE, Qualset CO (eds) *Progress in Genome Mapping of Wheat and Related Species*. Joint Proc 5th and 6th Public Workshops in the Triticeae Mapping Initiative. Report No. 18, University of California Genetic Resources Conservation Program, Davis, Calif, pp 134-140
- Lewis S.J., Heaton K.W. (1999). The metabolic consequences of slow colonic transit. *American Journal of Gastroenterology*, 94, 2010-2016.
- Li E.P., Hasjim J., Singh V., Tizzotti M., Godwin I.D., Gilbert R.G. et al. (2013a). Insights into sorghum starch biosynthesis from structure changes induced by different growth temperatures. *Cereal Chem*, 90, 223-230.

- Li H., Gidley M.J., Dhital S. (2019). High-Amylose Starches to Bridge the “Fiber Gap”: Development, Structure, and Nutritional Functionality. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 18, 362-379.
- Li L., Shewry P.R., Ward J.L. (2008). Phenolic acids in wheat varieties in the HEALTHRAIN diversity screen. *J. Agric. Food Chem*, 56, 9732-9739.
- Li S.B., Morris C.F., Bettge A.D. (2009). Genotype and environment variation for arabinoxylans in hard winter and spring wheats of the U.S. Pacific Northwest. *Cereal Chemistry*, 86, 88-95.
- Li W., Cui S.W., Kakuda Y. (2006). Extraction, fractionation, structural and physical characterisation of wheat β -glucans. *Carbohydrate Polymers*, 63, 404-408.
- Li X., Cavanagh C., Verbyla K., Thistleton J.L., Wang H., Pedler A. et al. (2017). A modified Megazyme fructan assay for rapidly screening wheat starch synthase IIa mutation populations reveals high fructan accumulation in mature grains of triple null lines. *J. Cereal Sci*, 73, 143-150.
- Li Y., Wua Y., Hernandez-Espinosa N., Peña R.J. (2013b). The influence of drought and heat stress on the expression of end-use quality parameters of common wheat. *Journal of Cereal Science*, 57, 73-78.
- Lin C.J., Li C.Y., Lin S.K., Yang F.H., Huang J.J., Liu Y.H. et al. (2010). Influence of high temperature during grain filling on the accumulation of storage proteins and grain quality in rice (*Oryza sativa* L.). *J Agric Food Chem*, 58, 10545-10552.
- Lisle A.J., Martin M., Fitzgerald M.A. (2000). Chalky and translucent rice grains differ in starch composition and structure and cooking properties. *Cereal Chem*, 77, 627-632.
- Liu P., Guo W., Jiang Z., Pu H., Feng C., Zhu X. et al. (2011). Effects of high temperature after anthesis on starch granules in grains of wheat (*Triticum aestivum* L.). *J Agric Sci*, 149, 159-169.
- Liu Q.H., Wu X., Ma J.Q., Li T., Zhou X., Guo T. et al. (2013). Effects of high air temperature on rice grain quality and yield under field condition. *Agron J*, 105, 446-454.
- Lovegrove A., Wilkinson M.D., Freeman J., Pellny T.K., Tosi P., Saulnier L., et al. (2013). RNA interference suppression of genes in glycosyl transferase families 43 and 47 in wheat starchy endosperm causes large decreases in arabinoxylan content. *Plant Physiology*, 163, 95-107.
- Lu D.L., Lu W.P. (2013). Effects of heat stress during grain filling on the functional properties of flour from fresh waxy maize. *Cereal Chem*, 90, 65-69.
- Lu D.R., Xiao C.M., Xu S.J. (2009). Starch-based completely biodegradable polymer materials. *Express Polym Lett*, 3, 366-375.
- Lu T.J., Jane J.L., Keeling P.L., Singletary G.W. (1996). Maize starch fine structures affected by ear developmental temperature. *Carbohydr Res*, 282, 157-170.
- Ma C., Zhou J., Chen G., Bian Y., Lv D., Li X. et al. (2014). iTRAQ-based quantitative proteome and phosphoprotein characterization reveals the central metabolism changes involved in wheat grain development. *BMC Genomics*, 15, 1029.
- MacNicol P.K., Jacobsen J.V., Keys M.M., Stuart I. (1993). Effects of heat and water stress on malt quality and grain parameters of Schooner barley grown in cabinets. *Journal of Cereal Science*, 18, 61-68.
- Madan P., Jagadish S.V.K., Craufurd P.Q., Fitzgerald M., Lafarge T., Wheeler T.R. et al. (2012). Effect of elevated CO₂ and high temperature on seed-set and grain quality of rice. *J Exp Bot*, 63, 3843-3852.
- Maes C., Delcour J.A. (2001). Alkaline hydrogen peroxide extraction of wheat non-starch polysaccharides. *J Cereal Sci*, 34, 29-35.
- Magyar Élelemiszerkönyv (Codex Alimentarius Hungaricus) 3-2-2008/1 számú irányelv, Élelmiszerek összes élelmi rosttartalmának a meghatározása enzimes-gravimetriás módszerrel, p.1-11.
- Maki K.C., Gibson G.R., Dickmann R.S., Kendall C.W., Chen C.Y., Costabile A. et al. (2012). Digestive and physiologic effects of a wheat bran extract, arabino-xylan-oligosaccharide, in breakfast cereal. *Nutrition*, 28, 1115-1121.
- Mandalari G., Faulds, C.B., Sancho A.I., Saija A., Bisignano G., LoCurto R. et al. (2005). Fractionation and characterization of arabinoxylan from brewers' spent grain and wheat bran. *J. Cere Sci*, 42, 205-212.
- Marchessault R.H., Buleon A., Deslandes Y. (1981). Structural studies on triacetates of mannan and glucomannan. *Carbohydrate Polymers*, 1, 129-138.
- Marchylo B.A., Kruger J.E., Hatcher D.W. (1989). Quantitative reversed-phase high-performance liquid chromatographic analysis of wheat storage proteins as a potential quality prediction tool. *J Cereal Sci*, 9, 113-130.
- Marcotuli I., Houston K., Schwerdt J.G., Waugh R., Fincher G.B., Burton R.A. et al. (2016). Genetic diversity and genome wide association study of β -glucan content in tetraploid wheat grains. *PLoS ONE* 11, e0152590.
- Marcotuli I., Houston K., Waugh R., Fincher G.B., Burton R.A., Blanco A. et al. (2015). Genome wide association mapping for arabinoxylan content in a collection of tetraploid wheats. *PLoS ONE* 10, e0132787.

- Mares D.J., Stone B.A. (1973). Studies on wheat endosperm. I. Chemical composition and ultrastructure of the cell walls. *Australian Journal of Biological Science*, 26, 793–812.
- Margiotta B., Urbano M., Colaprico G., Johansson E., Buonocore F., D' Ovidio R. et al. (1996). Detection of γ -type subunit at the Glu-A1 locus in some Swedish bread wheat lines. *J Cereal Sci*, 23, 203-211.
- Mariotti M., Lucisano M., Pagani M.A. (2006). Development of a baking procedure for the production of oat-supplemented wheat bread. *Int J Food Sci Technol*, 41, 151-157.
- Martinant J.P., Billot A., Bouguennec A., Charmet G., Saulnier L., Branlard G. (1999). Genetic and environmental variations in water-extractable arabinoxylans content and flour extract viscosity. *Journal of Cereal Science*, 30, 45-48.
- Martinant J.P., Cadalen T., Billot A., Chartier S., Leroy P., Bernard M. et al. (1998). Genetic analysis of water-extractable arabinoxylans in bread wheat endosperm. *Theor Appl Genet*, 97, 1069-1075.
- Masci S., Lafiandra D., Porceddu E., Lew E. J-L., Tao H.P., Kasarda D.D. (1993). D-glutenin subunits: N-terminal sequences and evidence for the presence of cysteine. *Cereal Chemistry*, 70, 581-585.
- Matlala M., Shimelis H., Mashilo J. (2019). Genotype-by-environment interaction of grain yield among candidate dryland wheat genotypes. *South African Journal of Plant and Soil*, 36, 299-306.
- Matsuki J., Yasui T., Kohyama K., Sasaki T. (2003). Effects of environmental temperature on structure and gelatinization properties of wheat starch. *Cereal Chem*, 80, 476–480.
- McCartney C.A., Somers D.J., Lukow O., Ames N., Noll J., Cloutier S. et al. (2006). QTL analysis of quality in traits in the spring wheat cross RL44529 AC domain. *Plant Breed*, 125, 565–575.
- McIntosh G.H., Whyte J., McArthur R., Nestel P.J. (1991). Barley and wheat foods – Influence on plasma-cholesterol concentrations in hypercholesterolemic men. *American Journal of Clinical Nutrition*, 53, 1205-1209.
- McIntosh S.R., Henry R.J. (2008). Genes of folate biosynthesis in wheat. *J Cereal Sci*, 48, 632-638.
- Medouri A., Bellil I., Khelifi D. (2015). Polymorphism at high molecular weight glutenin subunits and morphological diversity of *Aegilops geniculata* Roth collected in Algeria. *Cereal Research Communications*, 43, 272-283.
- Mehraban A., Tobe A., Gholipouri A., Amiri E., Ghafari A., Rostaii M. (2019). The Effects of Drought Stress on Yield, Yield Components, and Yield Stability at Different Growth Stages in Bread Wheat Cultivar (*Triticum aestivum* L.). *Polish Journal of Environmental Studies*, 28, 739-746.
- Mikó P., Löschenerberger F., Hiltbrunner J., Aebi R., Megyeri M., Kovács G. et al. (2014). Comparison of bread wheat varieties with different breeding origin under organic and low input management. *Euphytica*, 199, 69-80.
- Milder I.E.J., Arts I.C.W., Venema D.P., Lasaroms J.J.P., Hollman P.C.H., Wahala K. (2004). Optimization of a liquid chromatography-tandem mass spectrometry method for qualification of the plant lignans secoisolariciresinol, matairesinol, lariciresinol, and pinoresinol in foods. *J Agric Food Chem*, 52, 4643-4651.
- Miller S.S., Wood P.J., Pietrzak L.N., Fulcher R.G. (1993). Mixed linkage beta glucans, protein content, and kernel weight in *Avena* species. *Cereal Chemistry*, 70, 231–233.
- Mitchell R.A.C., Dupree P., Shewry P.R. (2007). A novel bioinformatics approach identifies candidate genes for the synthesis and feruloylation of arabinoxylan. *Plant Physiology*, 144, 43-53.
- Mittler R., Blumwald E. (2010). Genetic engineering for modern agriculture: Challenges and perspectives. *Annu. Rev. Plant Biol*, 61, 443–462.
- Mohammadkhani A., Stoddard F.L., Marshall D.R. (1998). Survey of amylose content in *Secale cereale*, *Triticum monococcum*, *T. turgidum* and *T. tauschii*. *J Cereal Sci*, 28, 273-280.
- Molina-Cano J.L., Moralejo M., Elia M., Munoz P., Russell J.R., Perez-Vendrell A.M. et al. (2007). QTL analysis of a cross between European and North American malting barleys reveals a putative candidate gene for beta-glucan content on chromosome 1H. *Molecular Breeding*, 19, 275–284.
- Molnár I., Vrána J., Burešová V., Cápál P., Farkas A., Darkó É. et al. (2016). Dissecting the U, M, S and C genomes of wild relatives of bread wheat (*Aegilops* spp.) into chromosomes and exploring their synteny with wheat. *The Plant Journal*, 88, 452–467.
- Molnár-Láng M., Linc G., Nagy E.D., Schneider A., Molnár I. (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.
- Moore MA., Park CB., Tsuda H. (1998). Soluble and insoluble fiber influences on cancer development. *Critical Review in Oncology Hematology*, 27, 229-242.
- Morales-Ortega A., Carvajal-Millan E., Lopez-Franco Y., Rascon-Chu A., Lizardi- Mendoza J., Torres-Chavez P. et al. (2013). Characterization of water extractable arabinoxylans from a spring wheat flour: rheological properties and microstructure. *Molecules*, 18, 8417-8428.

- Morell, M. K., Kosar-Hashemi, B., Cmiel, M., Samuel, M. S., Chandler, P., Rahman, S. et al. (2003). Barley *sex6* mutants lack starch synthase IIa activity and contain a starch with novel properties. *Plant Journal*, 34, 173–185.
- Morgan G., Riggs T.J. (1981). Effects of drought on yield and on grain and malt characters in spring barley. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 32, 339–346.
- Moriarty S., Temelli F., Vasanthan T., Ganzle M. (2011). Viscosity and solubility of β -glucan extracted under in vitro conditions from barley β -glucan-fortified bread and evaluation of loaf characteristics. *Cereal Chemistry*, 88, 421–428.
- Morita N., Maeda T., Hung P.V., Watanabe M., Handoyo T., Yamamori M. et al. (2003). Textural properties and microscope observation of noodles made from various novel wheat flours. *Proceedings of the 53rd Australian cereal chemistry conference*. pp. 153–156.
- Morita N., Maeda T., Miyazaki M., Yamamori M., Miura H., Ohtsuka I. (2002). Dough and baking properties of high amylose and waxy wheat flours. *Cereal Chemistry*, 79, 491–495.
- Moritz J.S., Parsons A.S., Buchanan N.P., Calvalcanti W.B., Cramer K.R., Beyer R.S. (2005). Effect of gelatinizing dietary starch through feed processing on zero- to three-week broiler performance and metabolism. *J Appl Poult Res*, 14, 47–54.
- Morrison W.R., Coventry A.M., Barnes P.J. (1982). The distribution of acyl lipids and tocopherols in flour millstreams. *J Sci Food Agric*, 33, 925–933.
- Morrison W.R., Gadan H. (1987). The amylose and lipid contents of starch granules in developing wheat endosperm. *J Cereal Sci*, 5, 263–275.
- Moss H.J. 1961. Milling damage and quality evaluation of wheat. *Austr. J. Exp. Agr. Animal Husb.*, 1, 133–139.
- 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.
- Myers A.M., Morell M.K., James M.G., Ball S.G. (2000). Recent progress toward understanding biosynthesis of the amylopectin crystal. *Plant Physiology*, 122, 989–997.
- Myllarinen P., Schulman A.H., Salovaara H., Poutanen K. (1998). The effect of growth temperature on gelatinization properties of barley starch. *Acta Agric Scand Sect B-Soil and Plant Sci*, 48, 85–90.
- Nakamura T., Yamamori M., Hirano H., Hidaka S., Nagamine T. (1995). Production of waxy (amylose-free) wheat. *Molecular and General Genetics*, 248, 253–259.
- Nakamura T., Yamamori, M., Hirano, H., Hidaka, S. (1993). Identification of three Wx proteins in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Biochemical Genetics* 31, 75–86.
- Nakamura Y. (2018). Rice starch biotechnology: Rice endosperm as a model of cereal endosperms. *Starch-Starke*, 70, 1600375.
- Nakamura, Y., Utsumi, Y., Sawada, T., Aihara, S., Utsumi, C., Yoshida, M. et al. (2010). Characterization of the reactions of starch branching enzymes from rice endosperm. *Plant and Cell Physiology*, 51, 776–794.
- Narasimhalu P., Kong D., Choo T.M., Ferguson T., Therrien M.C., Ho K.M., et al. (1995). Effects of environment and cultivar on total mixed-linkage- β -glucan content in eastern and western Canadian barleys (*Hordeum vulgare* L.). *Canadian Journal of Plant Science*, 75, 371–376.
- National Research Council (1998). Dietary reference intakes for thiamin, riboflavin, niacin, vitamin B6, folate, vitamin B12, pantothenic acid, biotin and choline. Institute of Medicine USA, Washington.
- Németh C., Freeman J., Jones H.D., Sparks C., Pellny T.K., Wilkinson M.D. et al. (2010). Downregulation of the CSLF6 gene results in decreased (1,3;1,4)- β -D-glucan in endosperm of wheat. *Plant Physiology*, 152, 1209–1218.
- Nicolas M.E., Gleadow R.M., Dalling M.J. (1985). Effect of postanthesis drought on cell-division and starch accumulation in developing wheat grains. *Ann Bot*, 55, 433–444.
- Nilssen A.K., Sahlström S., Knutsen S.H., Holtekjøl A.K., Kjersti Uhlen A. (2008). Influence of growth temperature on content, viscosity and relative molecular weight of water-soluble β -glucans in barley (*Hordeum vulgare* L.). *Journal of Cereal Science*, 48, 670–677.
- Nishi, A., Nakamura, Y., Tanaka, N., Satoh, H. (2001). Biochemical and genetic analysis of the effects of amylose-extender mutation in rice endosperm. *Plant Physiology*, 127, 459–472.
- Noort M.W.J., van Haaster D., Hemery Y., Schols H.A., Hamer R.J. (2010). The effect of particle size of wheat bran fractions on bread quality - Evidence for fibre protein interactions. *Journal of Cereal Science*, 52, 59–64.
- Nowotna A., Gambus H., Kratsch G., Krawontka J., Gambaú F., Sabat R. et al. (2007). Effect of nitrogen fertilization on the physico-chemical properties of starch isolated from German triticale varieties. *Starch/Stärke*, 59, 397–399.
- Nurmi T., Nyström I., Edelman M., Lampi A.-M., Piironen V. (2008). Phytosterols in wheat genotypes in the HEALTHGRAIN diversity screen. *J Agric Food Chem*, 56, 9710–9715.

- Nyström I., Paasonen A., Lampi A.-M., Piironen V. (2007). Total plant sterols, steryl ferulates and steryl glycosides in milling fractions of wheat and rye. *Cereal Sci*, 45, 106-115.
- Nyström L., Lampi A.-M., Andersson A.A.M., Kamal-Eldin A., Gebruers K., Courtin C.M. et al. (2008). Phytochemicals and dietary fiber components in rye varieties in the HEALTHGRAIN diversity screen. *J Agri Food Chem*, 56, 9758-9766.
- Obert J.C., Ridley W.P., Schneider R.W., Riordan S.G., Nemeth M.A., Trujillo W.A. et al. (2004). The composition of grain and forage from glyphosate tolerant wheat MON 71800 is equivalent to that of conventional wheat (*Triticum aestivum* L.). *J. of Agr Food Chem*, 52, 1375-1384.
- Ordaz-Ortiz J.J., Guillon F., Tranquet O., Dervilly-Pinel G., Tran V., Saulnier L. (2004). Specificity of monoclonal antibodies generated against arabinoxylans of cereal grains. *Carbohydrate Polymers*, 57, 425-433.
- Ordaz-Ortiz J.J., Saulnier L. (2005). Structural variability of arabinoxylans from wheat flour. Comparison of water-extractable and xylanase-extractable arabinoxylans. *J Cereal Sci*, 42, 119-125.
- 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.
- Osborne T.B. (1907). The proteins of the wheat kernel. Carnegie Institute, Washington D.C.
- Osborne T.B. (1924). The vegetable proteins. Longmans, Green and Co., London.
- Ozturk, S., Koksels, H., Ng, P.K.W. (2009). Farinograph properties and bread quality of flours supplemented with resistant starch. *International Journal of Food Science and Nutrition*, 60, 449-457.
- Paltakari J., Laine J., Östreberg M., Subramanian R., Terifolk J.-E. (UPM KYMMENE OYJ) (2012). Method for producing modified cellulose, US patent application 2012/0043039 A1, 2012-Feb-23.
- Pang H., Li W.H., Zhang H.B., Wang L., Yin Y.A., Yuan H.G. et al. (2010). Inheritance analysis of resistant starch content in kernels of wheat. *Hereditas*, 32, 170-176.
- Panozzo J.F., Eagles, H.A. (1998). Cultivar and environmental effects on quality characters in wheat. I. Starch. *Aust J Agric Res*, 49, 757-766.
- Park I., Kim S.H., Chung I.M., Shoemaker C.F. (2013). Effect of amylopectin long chain on measured amylose content and their correlation with pasting properties. *Starch/Starke*, 65, 227-235.
- Parker M.I. (1985). The relationship between A-type and B-type starch granules in the developing endosperm of wheat. *J Cereal Sci*, 3, 271-278.
- Parker M.I., Ng A., Waldron K.W. (2005). The phenolic acid and polysaccharide composition of cell walls of bran layers of mature wheat (*Triticum aestivum* L. cv. Avalon) grains. *J Sci Food Agric*, 85, 2539-2547.
- Paule C.M. (1977). Variability in amylose content of rice. MS thesis, University of the Philippines, Los Baños, Philippines.
- Payne P.I. (1987). Genetics of wheat storage proteins and the effect of allelic variation on bread-making quality. *Annual Review of Plant Physiology*, 38, 141-153.
- Payne P.I., Holt L.M., Jackson E.A., Law, C.N. (1984). Wheat storage proteins: their genetics and their potential for manipulation by plant breeding. *Phil Trans R Soc Lond B*, 304, 359-371.
- Payne P.I., Holt L.M., Law C.N. (1981). Structural and genetical studies on the high-molecular-weight subunits of wheat glutenin. Part I. Allelic variation in subunits amongst varieties of wheat (*Triticum aestivum*). *Theor Appl Genet*, 60, 229-236.
- Payne P.I., Holt L.M., Lister P.G. (1988). Gli-A3 and Gli-B3, two newly designated loci coding for omega-type gliadins and D subunits of glutenin. In *Proceedings of the 7th International Wheat Genetic Symposium* (eds. Miller, T.E. and Koebner, R.M.D) Bath Press, Bath, England pp. 999-1002.
- Pellny T.K., Lovegrove A., Freeman J., Tosi P., Love C.G., Knox J.P. et al. (2012). Cell walls of developing wheat starchy endosperm: comparison of composition and RNA-Seq transcriptome. *Plant Physiology*, 158, 612-627.
- Penalvo J.L., Adlercreutz H., Haajanan K.M., Botting N. (2005). Quantification of lignans in food using isotope dilution gas chromatography/mass spectrometry. *J Agric Food Chem*, 53, 9342-9347.
- Penalvo J.L., Adlercreutz H., Nurmi T., Haajanan K.M., Al-Maharik N., Botting N. (2004). Determination of lignans in human plasma by liquid chromatography with coulometric electrode array detection. *Anal. Biochem*, 332, 384-393.
- Peng M., Gao M., Baga M., Hucl P., Chibbar R.N. (2000). Starch-branching enzymes preferentially associated with A-type starch granules in wheat endosperm. *Plant Physiology*, 124, 265-272.
- Peng S.B., Huang J.L., Sheehy J.E., Laza R.C., Vispiera R.M., Zhong X. et al. (2004). Rice yields decline with higher night temperature from global warming. *Proc Natl Acad Sci USA*, 101, 9971-9975.
- Perlin A.S. (1951). Structure of the soluble pentosans of wheat flours. *Cereal Chemistry*, 28, 382-393.
- Philippe S., Barron C., Robert P., Daux M.F., Saulnier L., Guillon F. (2006a). Characterization using Raman microspectroscopy of arabinoxylans in the walls of different cell types during the development of wheat endosperm. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 54, 5113-5119.

- Philippe S., Saulnier L., Guillon F. (2006b). Arabinoxylan and (1-3, 1-4)- β -glucan deposition in cell walls during wheat endosperm development. *Planta*, 224, 449-461.
- Phillips J., Muir J.G., Birkett A., Lu Z.X., Jones G.P., O'Dea K. et al. (1995). Effect of resistant starch on faecal bulk and fermentation-dependent events in humans. *American Journal of Clinical Nutrition*, 62, 121-130.
- Piironen V., Lampi A.-M., Ekholm P., Salmenkallio-Marttila M., Liukkonen K.-H. (2009). Micronutrients and Phytochemicals in Wheat Grain. In: WHEAT: Chemistry and Technology, 4th ed., Eds Shewry P.R., Khan K. AACC Int., St Paul, MN.
- Piironen V., Syvaöja E., Varo P., Salminen K., Koivistoinen P. (1986). Tocopherols and tocotrienols in cereal products from Finland. *Cereal Chem*, 63, 78-81.
- Pirgozliev V.R., Rose S.P., Bedford M.R. (2010). The effect of amylose : amylopectin ratio in dietary starch on growth performance and gut morphology in broiler chickens. *Archiv Fur Geflugelkunde*, 74, 21-29.
- Pomeranz Y. (1988). Chemical composition of kernel structures. p. 97-158. in: *Wheat Chemistry and Technology*, 3rd ed., Vol. 1. Y. Pomeranz, Ed. Am. Assoc. Cereal Chem., St Paul, MN.
- Popineau Y., Pineau F. (1988). Changes of conformation and surface hydrophobicity of gliadins. *Lebensmittel Wissenschaft Technologie*, 21, 113-117.
- Primo-Martín C., Martínez-Anaya M.A. (2003). Influence of pentosanase and oxidases on water-extractable pentosans during a straight bread-making process. *Journal of Food Science*, 68, 31-41.
- Quraishi U.M., Murat F., Abrouk M., Pont C., Confolent C., Oury F.X. et al. (2011). Combined meta-genomics analyses unravel candidate genes for the grain dietary fiber content in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Functional Integrative Genomics*, 11, 71-83.
- Rahman S., Kosarhashemi B., Samuel M.S., Hill A., Abbott D.C., Skerritt J.H. et al. (1995). The major proteins of wheat endosperm starch granules. *Australian Journal of Plant Physiology*, 22, 793-803.
- Rakha A. (2013) Fibre-enriched and wholegrain bread. In: Delcour JA, Poutanen K (eds), *Fibre-rich and wholegrain foods - Improving quality* (First edit.). Woodhead Publishing Limited, Cambridge, UK, pp. 211-230
- Rakszegi M., Kisgyörgy B.N., Tearall K., Shewry P.R., Láng L., Phillips A. et al. (2010a). Diversity of agronomic and morphological traits in a mutant population of bread wheat studied in the Healthgrain program. *Euphytica*, 174, 409-421.
- Rakszegi M., Balazs G., Bekes F., Harasztos A., Kovacs A., Lang L. et al. (2014b). Modelling water absorption of wheat flour by taking into consideration of the soluble protein and arabinoxylan components. *Cereal Research Communications*, 42, 629-639.
- Rakszegi M., Bognár Z., Li Z., Békés F., Láng L., Bedő Z. (2010b). Effect of milling on the starch properties of winter wheat genotypes. *Starch-Stärke*, 62, 115-122.
- 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.
- 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.
- 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.
- Rakszegi M., Láng L., Bedő Z. (2006). Importance of starch properties in quality oriented wheat breeding. *Cereal Research Communications*, 34, 637-640.
- Rakszegi M., Lovegrove A., Balla K., Lang L., Bedo Z., Veisz O. et al. (2014a). Effect of heat and drought stress on the structure and composition of arabinoxylan and β -glucan in wheat grain. *Carbohydrate Polymers*, 102, 557- 565.
- 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.
- Ranhotra G.S., Gelroth J.A., Astroth K., Eisenbraun G.J. (1991). Effect of resistant starch on intestinal responses in rats. *Cereal Chemistry*, 68, 130-132.
- Ranhotra G.S., Gelroth J.A., Leinen S.D. (1997). Hypolipidemic effect of resistant starch in hamsters is not dose dependent. *Nutrition Research*, 17, 317-323.
- Regina A., Berbezy P., Kosar-Hashemi B., Li S., Cmiel M., Larroque O. et al. (2015). A genetic strategy generating wheat with very high amylose content. *Plant Biotechnology Journal*, 13, 1276-1286.
- Regina A., Bird A., Topping D., Bowden S., Freeman J., Barsby T. et al. (2006). High-amylose wheat generated by RNA interference improves indices of large-bowel health in rats. *PNAS USA*, 103, 3546-3551.
- Regina A., Kosar-Hashemi B., Li Z., Rampling L., Cmiel M., Gianibelli M.C. et al. (2004). Multiple isoforms of starch branching enzyme-I in wheat: Lack of the major SBE-I isoform does not alter starch phenotype. *Functional Plant Biology*, 31, 591-601.

- Regina A., Kosar-Hashemi B., Ling S., Li Z., Rahman S., Morell, M. (2010). Control of starch branching in barley defined through differential RNAi suppression of starch branching enzyme IIa and IIb. *Journal of Experimental Botany*, 61, 1469–1482.
- Renard C.M.G.C., Rouau X., Thibault J.F. (1990). Structure and properties of water-soluble pentosans from wheat flour. *Sci. Aliments*, 10, 283-292.
- Resurreccion A.P., Hara T., Juliano B.O., Yoshida S. (1977). Effect of temperature during ripening on grain quality of rice. *Soil Sci Plant Nutr*, 23, 109–112.
- Reynolds M., Dreccer F., Trethowan R. (2007). Drought-adaptive traits derived from wheat wild relatives and landraces. *Journal of Experimental Botany*, 58, 177–186.
- Rodin F., Dubois C., Pineau N., Schuchmann H.P., Palzer S. (2011). Expansion mechanism of extruded foams supplemented with a wheat bran. *J Food Eng*, 107, 80-89.
- Rodriguez-Ouijano M., Carrillo J.M. (1996). Relationship between allelic variation of Glu-1 and Gli-1/Glu-3 prolamin loci and gluten strength in hexaploid wheat. *Euphytica*, 91, 141-148.
- Roels S.P., Cleemput G., Vandewalle X., Delcour J.A. (1993). Bread volume potential of variable-quality flours with constant protein level as determined by fractions governing mixing time and baking absorption levels. *Cereal Chem.*, 70, 318–323.
- Rogers G.S., Gras P.W., Batey I.L., Milham P.J., Payne L., Conroy J.P. (1998). The influence of atmospheric CO₂ concentration on the protein, starch and mixing properties of wheat flour. *Aust J Plant Physiol*, 25, 387–393.
- Rosell C.M., Santos E., Collar C. (2009). Physico-chemical properties of commercial fibres from different sources: A comparative approach. *Food Research International*, 42, 176-184.
- Rosell C.M., Santos E., Collar C. (2010). Physical characterization of fiber-enriched bread doughs by dual mixing and temperature constraint using the Mixolab. *European Food Research Technology*, 231, 535-544.
- Rosicka-Kaczmarek J., Kwasniewska-Karolak I., Nebesny E., Miskiewicz K. (2013). Influence of variety and year of wheat cultivation on the chemical composition of starch and properties of glucose hydrolysates. *J Cereal Sci*, 57, 98–106.
- Rousset M., Carillo J.M., Qualset C.O., Kasarda D.D. (1992). Use of recombinant inbred lines of wheat for study of associations of high-molecular-weight glutenin subunit alleles to quantitative traits: 2. Milling and breadbaking quality. *Theor Appl Genet*, 83, 403-412.
- Saastamoinen M., Plaami S., Kumpulainen J. (1989). Pentosan and b-glucan content of Finnish winter rye varieties as compared with rye of six other countries. *Journal of Cereal Science* 10, 199e207.
- Salt L.J., Robertson J.A., Jenkins J.A., Mulholland F., Mills E.N.C. (2005). The identification of foam-forming soluble proteins from wheat (*Triticum aestivum*) dough. *Proteomics*, 5, 1612–1623.
- Santos E., Rosell C.M., Collar C. (2008). Gelatinization and retrogradation kinetics of high-fiber wheat flour blends: a calorimetric approach. *Cereal Chemistry*, 85, 455-463.
- Sanz-Penella J.M., Collar C., Haros M. (2008). Effects of bran and enzyme addition on dough functional performance and phytic acid levels in bread. *J Cereal Sci*, 48, 715-721.
- Sanz-Penella J.M., Wronkowska M., Soral-Smietana M., Collar C., Haros M. (2010). Impact of the addition of resistant starch from modified pea starch on dough and bread performance. *European Food Research and Technology*, 231, 499-508.
- Satoh H., Nishi A., Yamashita K., Takemoto Y. (2003). Starch-branching enzyme I-deficient mutation specifically affects the structure and properties of starch in rice endosperm. *Plant Physiology*, 133, 1111–1121.
- Saulnier L., Robert P., Grintchenko M., Jamme F., Bouchet B., Guillon F. (2009). Wheat endosperm cell walls: Spatial heterogeneity of polysaccharide structure and composition using micro-scale enzymatic fingerprinting and FT-IR microspectroscopy. *Journal of Cereal Science*, 50, 312–317.
- Saulnier L., Sado P.E., Branlard G., Charmet G., Guillon F. (2007). Wheat arabinoxylans: exploiting variation in amount and composition to develop enhanced varieties. *Journal of Cereal Science*, 46, 261–281.
- Savin R., Stone P.J., Nicolas M.E., Wardlaw I.F. (1997). Effects of heat stress and moderately high temperature on grain growth and malting quality of barley. *Australian Journal of Agricultural Research*, 48, 615–624.
- Scarpellini E., Deloove E., Vos R., Francois I., Delcour J.A., Broekaert W.F. et al. (2018). The effect of arabinoxyloligosaccharides on upper gastroduodenal motility and hunger ratings in humans. *Neurogastroenterol Motil*, 30: e13306.
- Schirmer M., Höchstötter A., Jekle M., Arendt E., Becker T. (2013). Physicochemical and morphological characterization of different starches with variable amylose/amylopectin ratio. *Food Hydrocolloids*, 32, 52-63.
- Schmiele M., Jaekel L.Z., Patricio S.M.C., Steel C.J., Chang Y.K. (2012). Rheological properties of wheat flour and quality characteristics of pan bread as modified by partial additions of wheat bran or whole grain wheat flour. *Int J Food Sci Technol*, 47, 2141–2150.

- 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.
- Schönhofen A., Hazard B., Zhang X., Dubcovsky J. (2016). Registration of common wheat germplasm with mutations in SBEII genes conferring increased grain amylose and resistant starch content. *Journal of Plant Registration*, 10, 200–205.
- Schönhofen A., Zhang X., Dubcovsky J. (2017). Combined mutations in five wheat Starch Branching Enzyme II genes improve resistant starch but affect grain yield and bread-making quality. *Journal of Cereal Science*, 75, 165–174.
- Schooneveld-Bergmans M.E.F., Dignum M.J.W., Grabber J.H., Beldman G., Voragen A.G.J. (1999). Studies on the oxidative cross-linking of feruloylated arabinoxylans from wheat flour and wheat bran. *Carbohydrate Polymers*, 38, 309–317.
- Schreiber M., Wright F., MacKenzie K., Hedley P.E., Schwerdt J.G., Little A. et al. (2014). The barley genome sequence assembly reveals three additional members of the *Cs1F* (1,3;1,4)- β -Glucan Synthase gene family. *PLoS ONE* 9(3): e90888.
- Schropp P., Wieser H. (1996). Effects of high molecular weight subunits of glutenin on the rheological properties of wheat gluten. *Cereal Chem*, 73, 410–413.
- Seilmeier W., Belitz H.D., Wieser H. (1991). Separation and quantitative determination of high-molecular-weight subunits of glutenin from different wheat varieties and genetic variants of the variety Sicco. *Zeitschrift für Lebensmittel Untersuchung und –Forschung*, 192, 124–129.
- Sestili F., Botticella E., Bedó Z., Phillips A., Lafiandra D. (2010). Production of novel allelic variation for genes involved in starch biosynthesis through mutagenesis. *Molecular Breeding*, 25, 145–154.
- Sestili F., Botticella E., Proietti G., Janni M., D’Ovidio R., Lafiandra D. (2012). Amylose content is not affected by overexpression of the *Wx-B1* gene in durum wheat. *Plant Breeding*, 131, 700–706
- Shamsi K., Petrosyan M., Noor-Mohammadi G., Haghparast A., Kobraee S., Rasekhi B. (2011). Differential agronomic responses of bread wheat cultivars to drought stress in the west of Iran. *African Journal of Biotechnology*, 10, 2708–2715.
- Shenoy H.A., Prakash J. (2007). Wheat bran (*Triticum aestivum*): composition, Functionality and Incorporation in unleavened bread. *Journal of Food Quality*, 25, 197–211.
- Shewry P.R. (2013). „Improving the content and composition of dietary fibre in wheat.”, in *Fibre-rich and wholegrain foods. Improving quality*, ed. J.A. Delcour, K. Poutanen, (Woodhead Publishing Limited 2013), p. 155.
- Shewry P.R., Bradberry D., Franklin J., White R.D. (1984). The chromosomal locations and linkage relationships of the structural genes for the prolamin storage proteins (secalins) of rye. *Theor Appl Genet*, 69, 63–69.
- Shewry P.R., Charmet G., Branlard G., Lafiandra D., Gergely S., Salgó A. et al. (2012). Developing new types of wheat with enhanced health benefits. *Trends in Food Science and Technology*, 25, 70–77.
- Shewry P.R., D’Ovidio R., Lafiandra D., Jenkins J.A., Mills E.N.C., Bekes F. (2009). “Wheat grain proteins”, in *Wheat: Chemistry and Technology*, ed. K. Khan and P.R. Shewry, (AACCC, St Paul, MN, USA), 223–298.
- Shewry P.R., Halford N.G., Lafiandra D. (2003a). “The genetics of wheat gluten proteins”, in *Advances in Genetics* Vol 49, ed. J.C. Hall, J.C. Dunlap and T. Friedman. (Academic Press), 111–184.
- Shewry P.R., Halford N.G., Tatham A.S. (1992). The high molecular weight subunits of wheat glutenin. *J Cereal Sci*, 15, 105–120.
- Shewry P.R., Halford N.G., Tatham A.S., Popineau Y., Lafiandra D., Belton P. (2003b). The high molecular weight subunits of wheat glutenin and their role in determining wheat processing properties. *Advances in Food and Nutrition Research*, 45, 219–302.
- Shewry P.R., Hawkesford M.J., Piironen V., Lampi A.M., Gebruers K., Boros D. et al. (2013). Natural Variation in Grain Composition of Wheat and Related Cereals. *J Agr Food Chem*, 61, 8295–8303.
- Shewry P.R., Hey S.J. (2015). The contribution of wheat to human diet and health. *Food and Energy Security*, 4, 178–202.
- Shewry P.R., Piironen V., Lampi A.M., Edelman M., Kariluoto S., Nurmi T. et al. (2010). The HEALTHGRAIN wheat diversity screen: effects of genotype and environment on phytochemicals and dietary fiber components. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58, 9291–9298
- Shewry P.R., Tatham A.S. (1990). The prolamin storage proteins of cereal seeds: structure and evolution. *Biochem. J*, 267, 1–12.
- Shewry P.R., Tatham, A.S. (1997). Biotechnology of wheat quality. *J Sci Food Agric*, 73, 397–406.
- Shewry P.R., Tatham, A.S. (1999). The Characteristics, Structures and Evolutionary Relationships of Prolamins. In: *Seed Proteins* (eds.: P.R. Shewry and R. Casey), Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, pp. 11–33.

- Shewry P.R., van Schaik F., Ravel C., Charmet G., Rakszegi M., Bedő Z. et al. (2011). Genotype and Environment Effects on the Contents of Vitamins B1, B2, B3 and B6 in Wheat Grain. *J Agr Food Chem*, 59, 10564-10571.
- Shi Y.C., Seib P.A., Bernardin J.E. (1994). Effects of temperature during grain filling on starches from 6 wheat cultivars. *Cereal Chem*, 71, 369-383.
- Shimbata T., Ai Y., Fujita M., Inokuma T., Vrinten P., Sunohara A. et al. (2012). Effects of homoeologous wheat starch synthase IIa genes on starch properties. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60, 12004-12010.
- Shimbata T., Nakamura T., Vrinten P., Saito M., Yonemaru J., Seto Y. et al. (2005). Mutations in wheat starch synthase II genes and PCR-based selection. *Theoretical and Applied Genetics*, 111, 1072-1079.
- Shu X.L., Rasmussen S.K. (2014). Quantification of amylose, amylopectin, and beta-glucan in search for genes controlling the three major quality traits in barley by genome-wide association studies. *Frontiers in Plant Science* 5, 197.
- Siebenmorgen T.J., Grigg B.C., Lanning S.B. (2013). Impacts of preharvest factors during kernel development on rice quality and functionality. *Annu Rev Food Sci Technol*, 4, 101-115.
- Sievert C., Pomeranz Y. (1990). Enzyme-resistant starch. II. Differential scanning calorimetry studies on heat-treated starches and enzyme-resistant starch residues. *Cereal Chemistry*, 68, 86-91.
- Silva R.R., Benin G., de Almeida J.L., Fonseca I.C.D., Zucareli C. (2014). Grain yield and baking quality of wheat under different sowing dates. *Acta Scientiarum-Agronomy*, 36, 201-210.
- Šimková H., Svensson J.T., Condamine P., Hříbová E., Suchánková P., Bhat P.R., et al. (2008). Coupling amplified DNA from flow-sorted chromosomes to high-density SNP mapping in barley. *BMC Genomics*, 9, 294.
- Singh C., Gupta A., Gupta V., Kumar P., Sendhil R., Tyagi B.S. et al. (2019). Genotype x environment interaction analysis of multi-environment wheat trials in India using AMMI and GGE biplot models. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 19, 309-318.
- Singh N., Pal N., Mahajan G., Singh S., Shevkani K. (2011). Rice grain and starch properties: Effects of nitrogen fertilizer application. *Carbohydr Polym*, 86, 219-225.
- Singh N.K., Shepherd K.W., Cornish G.B. (1991). A simplified SDS-PAGE procedure for separating LMW subunits of glutenin. *J Cereal Sci*, 14, 203-208.
- Singh S., Gupta A.K., Gupta S.K., Kaur N. (2010). Effect of sowing time on protein quality and starch pasting characteristics in wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes grown under irrigated and rain-fed conditions. *Food Chem*, 122, 559-565.
- Singh S., Singh G., Singh P., Singh N. (2008). Effect of water stress at different stages of grain development on the characteristics of starch and protein of different wheat varieties. *Food Chem*, 108, 130-139.
- Sivam A.S., Sun-Waterhouse D., Quek S., Perera C.O. (2010). Properties of bread dough with added fiber polysaccharides and phenolic antioxidants: a review. *J Food Sci*, 75, 163-74.
- Skendi A., Papageorgiou M., Biliaderis C.G. (2009). Effect of barley β -glucan molecular size and level on wheat dough rheological properties. *Journal of Food Engineering*, 91, 594-601.
- Slade A.J., McGuire C., Loeffler D., Mullenberg J., Skinner W., Fazio G. et al. (2012). Development of high amylose wheat through TILLING. *BMC Plant Biology*, 12, 69.
- Slavin J.L. (2002). Whole grains, dietary fiber, and resistant starch. In Marquart L., Slavin J.L., Fulcher R.G. (Eds.), *Whole-grain foods in health and disease* (pp. 283-299). St Paul, MN: American Association of Cereal Chemists Inc.
- Snape J.W., Hyne V., Aitken K.A. (1993). Targeting genes in wheat using marker mediated approaches. p. 749-759. in: *Proc. 8th Int. Wheat Genetic Symp. Vol II*. China Agricultural Sciencetech Press, Beijing, China.
- Steer T., Thane C., Stephen A., Jebb S. (2008). Bread in the diet: consumption and contribution to nutrient intakes of British adults. *Proceedings of the Nutrition Society* 67: E363. Cambridge University Press, UK
- Stoddard F.L., Sarker R. (2000). Characterization of starch in Aegilops species. *Cereal Chemistry*, 77, 445-447.
- Stone B., Morell M.K. (2009). Carbohydrate. pp. 299-362. in Khan K., Shewry P.R. eds. *Wheat Chemistry and Technology*, 4th edn. American Association of Cereal Chemists, St Paul, MN.
- Stone P.J., Nicolas M.E. (1995). A survey of the effects of high temperature during grain filling on yield and quality of 75 wheat cultivars. *Aust J Agric Res*, 46, 475-492.
- Stone W.L., Papas A. (2003). Tocopherols, tocotrienols and vitamin E. p. 53-72. in: *Lipids for Functional Foods and Nutraceuticals*. Gunstone E.D., Ed. The Oily Press, Bridgewater, England.
- Storsley J.M., Izydorczyk M.S., You S., Biliaderis C.G., Rossnagel B. (2003). Structure and physicochemical properties of β -glucans and arabinoxylans isolated from hull-less barley. *Food Hydrocolloids*, 17, 831-844.
- Sudha M.L., Vetrmani R., Leelavathi K. (2007). Influence of fiber from different cereals on the rheological characteristics of wheat flour dough and biscuit quality. *Food Chemistry*, 100, 1365-1370.

- Sun H.Y., Lu J.H., Fan Y.D., Zhao Y., Kong F., Li R.J. et al. (2008). Quantitative trait loci (QTLs) for quality traits related to protein and starch in wheat. *Prog Nat Sci*, 18, 825–831.
- Sun M.M., Abdula S.E., Lee H.J., Cho Y.C. Han L.Z., Kohet H.J et al. (2011). Molecular aspect of good eating quality formation in Japonica rice. *PLoS One*, 6, e18385.
- Surget A., Barron C. (2005). Histologie du grain de blé. *Industrie des Céréales*, 145, pp. 3-7
- Sutton H.K. (1991). Qualitative and quantitative variation among high molecular weight subunits of glutenin detected by reversed-phase high-performance liquid chromatography. *J Cereal Sci*, 14, 25-34.
- Suzuki Y., Sano Y., Ishikawa T., Sasaki T. (2004). Differences in starch characteristics of rice strains having different sensitivities to maturation temperatures. *J Agron Crop Sci*, 190, 218–221.
- Svihus B., Uhlen, AK., Harstad, OM. (2005). Effect of starch granule structure, associated components and processing on nutritive value of cereal starch: A review. *Anim Feed Sci Technol*, 122, 303–320.
- Swanston J.S., Ellis R.P., PerezVendrell A., Voltas J., MolinaCano J.L. (1997). Patterns of barley grain development in Spain and Scotland and their implications for malting quality. *Cereal Chemistry*, 74, 456–461.
- Swennen K., Courtin C.M., Lindemans G.C.J.E., Delcour J.A. (2006). Large scale production and characterization of wheat bran arabinoxyloligosaccharides. *J Sci Food Agric*, 86, 1722-1731.
- Taketa S., Yuo T., Tonooka T., Tsumuraya Y., Inagaki Y., Haruyama N. et al. (2012). Functional characterization of barley betaglucanless mutants demonstrates a unique role for CslF6 in (1,3;1,4)- β -D-glucan biosynthesis. *Journal of Experimental Botany*, 63, 381-392.
- Terao T., Miura S., Yanagihara T., Hirose T., Nagata K., Tabuchiet H. et al. (2005). Influence of free-air CO₂ enrichment (FACE) on the eating quality of rice. *J Sci Food Agric*, 85, 1861–1868.
- Tester R.F., Karkalas J. (2001). The effects of environmental conditions on the structural features and physico-chemical properties of starches. *Starch/Stärke*, 53, 513–519.
- Tester R.F., Morrison W.R., Ellis R.H., Piggott J.R., Batts G.R., Wheeler T.R. et al. (1995). Effects of elevated growth temperature and carbondioxide levels on some physicochemical properties of wheat-starch. *J Cereal Sci*, 22, 63–71.
- Tester RF. (1997). Influence of growth conditions on barley starch properties. *Int J Biol Macromol*, 21, 37–45.
- Tetlow I.J. (2011). Starch biosynthesis in developing seeds. *Seed Science Research*, 21(1), 5–32.
- Tetlow I.J., Emes M.J. (2014). A review of starch-branching enzymes and their role in amylopectin biosynthesis. *IUBMB Life*, 66, 546–558.
- Tetlow I.J., Morell M.K., Emes M.J. (2004a). Recent developments in understanding the regulation of starch metabolism in higher plants. *Journal of Experimental Botany*, 55, 2131–2145.
- Tetlow I.J., Wait R., Lu Z.X., Akkasaeng R., Bowsher C.G., Esposito S. et al. (2004b). Protein phosphorylation in amyloplasts regulates starch branching enzyme activity and protein-protein interactions. *Plant Cell*, 16, 694–708.
- Theander O., Aman P. (1979). Studies on dietary fibers: 1. Analysis and chemical characterization of water-soluble and water-insoluble dietary fibers. *Swedish Journal of Agricultural Research*, 9, 97-106.
- Thitisaksakul M., Jimene RC., Arias MC., Beckles DM. (2012). Effects of environmental factors on cereal starch biosynthesis and composition. *J Cereal Sci*, 56, 67–80.
- Thungo Z., Shimelis H., Odindo A.O., Mashilo J. (2019). Genotype-by-environment interaction of elite heat and drought tolerant bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes under non-stressed and drought-stressed conditions. *Acta Agriculturae Scandinavica*, 69, 725-733.
- Tian B., Deng Z.Y., Xie Q.G., Tian J.C. (2015). Genetic dissection of the developmental behaviour of total starch content and its components in wheat grain. *Crop & Pasture Science*, 66, 445–455.
- Tian B., Liu B., Zhu Z.L., Xie Q.G., Tian J.C. (2011). Conditional and unconditional QTL mapping of grain starch accumulation in wheat. *Sci Agric Sin*, 44, 4551–4559.
- Tian Z.X., Qian Q., Liu QQ., Yan MX., Liu X., Yan C. et al. (2009). Allelic diversities in rice starch biosynthesis lead to a diverse array of rice eating and cooking qualities. *Proc Natl Acad Sci USA*, 106, 21760–21765.
- Tighe P., Duthie G., Vaughan N., Brittenden J., Simpson W.G., Duthie S. et al. (2010). Effect of increased consumption of whole-grain foods on blood pressure and other cardiovascular risk markers in healthy middle-aged persons: a randomized controlled trial. *American Journal of Clinical Nutrition*, 92, 733-740.
- 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.
- Tomlinson K., Denyer K. (2003). Starch synthesis in cereal grains. *Advances in Botanical Research*, 40, 1–61.
- Toole G.A., Le Gall G., Colquhoun I.J., Nemeth C., Saulnier L., Lovegrove A. et al. (2010). Temporal and spatial changes in cell wall composition in developing grains of wheat cv. Hereward. *Planta*, 232, 677–689.

- Toole G.A., Wilson R.H., Parker M.L., Wellner N.K., Wheeler T.R., Shewry P.R. et al. (2007). The effect of environment on endosperm cell wall development in *Triticum aestivum* during grain filling: an infrared spectroscopic imaging study. *Planta*, 225, 1393–1403.
- Topping D.L., Clifton, P.M. (2001). Short-Chain Fatty Acids and Human Colonic Function: Roles of Resistant Starch and Nonstarch Polysaccharides. *Physiological Reviews*, 81, 1031-1064.
- 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., Békés F., Haraszi R., Gras P.W., Varga J., Salgó A. (2002). Application of Micro Z-arm mixer in wheat research – Effects of protein addition on mixing properties of wheat dough. *Periodica Polytechnica*, 46, 11–28.
- Tömösközi S., Kindler A., Varga J., Rakszegi M., Láng L., Bedő Z., Baticz R., Haraszi R. et al. (2004). Determination of bread-making quality of wheat flour dough with different macro and micro mixers. In: Lafiandra D., Masci S., D'Ovidio R. (eds), 'The Gluten Proteins', Proc. 8th Gluten Workshop. RS-C, Chambridge, UK, pp. 267–270.
- Tömösközi S., Nádosi M., Balázs G., Cavanagh C., Morgunov A., Salgó A. 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.
- Török K., Szentmiklóssy M., Tremmel-Bede K., Rakszegi M., Tömösközi S. (2019). Possibilities and barriers in fibre-targeted breeding: Characterisation of arabinoxylans in wheat varieties and their breeding lines. *Journal of Cereal Science*, 86, 117-123.
- 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.
- Tremmel-Bede K., Miko P., Megyeri M., Kovacs G., Howlett S., Pearce B. et al. (2016). Stability Analysis of Wheat Populations and Mixtures Based on the Physical, Compositional and Processing Properties of the Seeds. *Cereal Research Communications*, 44, 694-705.
- 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.
- Triboi E., Martre P., Triboi-Blondel A.M. (2003). Environmentally-induced changes in protein composition in developing grains of wheat are related to changes in total protein content. *Journal of Experimental Botany*, 54, 1731-42.
- Trogh I., Courtin C.M., Andersson A.A.M., Aman P., Sorensen J.F., Delcour J.A. (2004). The combined use of hull-less barley flour and xylanase as a strategy for wheat/hull-less barley flour breads with increased arabinoxylan and (1-3) (14)- β -D-glucan levels. *J Cereal Sci*, 40, 257–267.
- Turner A.S., Bradburne R.P., Fish L., Snape J.W. (2004). New quantitative trait loci influencing grain structure and protein content in bread wheat. *J Cereal Sci*, 40, 51-60.
- Türkösi E., Darko E., Rakszegi M., Molnar I. Molnár-Láng M., Cseh András (2018). Development of a new 7BS.7HL winter wheat-winter barley Robertsonian translocation line conferring increased salt tolerance and (1,3;1,4)- β -D-glucan content. *PLOS ONE*, , 13 : 11 p. e0206248.
- Umemoto T., Terashima K. (2002). Activity of granule-bound starch synthase is an important determinant of amylose content in rice endosperm. *Funct Plant Biol*, 29, 1121–1124.
- USDA, USDA National Nutrient Database for Standard Reference. Release 18 (2005). Online: www.nal.gov/fnic/foodcomp/search/.
- Uthayakumaran S., Beasley H.L., Stoppard F.L., Keentok M., Phan-Thien N., Tanner R.I. et al. (2002). Synergistic and additive effects of three high molecular weight glutenin subunit loci. I. Effects on wheat dough rheology. *Cereal Chem*, 79, 294-300.
- Uthayakumaran S., Gras P.W., Stoddard F.L., Békés F. (1999). Effect of varying protein content and glutenin-to-gliadin ratio on the functional properties of wheat dough. *Cereal Chemistry*, 76, 389–394.
- Uthayakumaran S., Newberry M., Keentok M., Stoddard F.L., Békés F. (2000a). Basic rheology of bread dough with modified protein content and glutenin-to-gliadin ratios. *Cereal Chem*, 77, 744-749.
- Uthayakumaran S., Stoddard F.L., Gras P.W., Békés F. (2000b). Effects of incorporated glutenins on functional properties of wheat dough. *Cereal Chemistry*, 77, 737-743.
- Uthayakumaran S., Tömösközi S., Tatham A.S., Savage A.W.J., Gianibelli M.C., Stoppard F.L. et al. (2001). Effects of gliadin fractions on functional properties of dough depending on molecular size and hydrophobicity. *Cereal Chem*, 78, 138-141.
- van den Berg H., Faulks R., Granado H.F., Hirschberg I., Olmedilla B., Sandmann G. et al. (2000). The potential for the improvement of carotenoid level in foods and the likely systemic effects. *J Sci Food Agric*, 80, 880-912.
- van der Kamp, J.W. (2009). The HEALTHGRAIN project: new insights in cereal grain fibres Introduction. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, 1, 261-262.

- Van Hung P.V., Yamamori M., Morita N. (2005). Formation of enzyme-resistant starch in bread as affected by high-amylose wheat flour substitutions. *Cereal Chemistry*, 82, 690–694.
- Viallis B., Berbezy P. (2020) Breeding Approaches for Nutritional Quality traits in wheat. *Cereal Foods World*, 65, 3.
- Virk D.S., Pandit D.B., Sufian M.A., Ahmed F., Siddique M.A.B., Samad M.A. et al. (2009). REML is an effective analysis for mixed modelling of unbalanced on-farm varietal trials. *Experimental Agriculture*, 45, 77–91.
- Vonyó V., Temesi Á. (2018). Milyen funkcionális élelmiszert dúsítson a funkcionális élelmiszergyártó? – Egy tudományos vita Magyarországi folytatása. *Táplálkozásmarketing*, 5, (1) 35–48.
- Vrinten P.L., Shimbata T., Yanase M., Sunohara A., Saito M., Inokuma T. et al. (2012). Properties of a novel type of starch found in the double mutant „sweet wheat”. *Carbohydrate Polymers*, 89, 1250–1260.
- Wan Y., Poole R.L., Huttly A.K., Toscano-Underwood C., Feeney K., Welham S. et al. (2008). Transcriptome analysis of grain development in hexaploid wheat. *BMC Genomics* 9, 121.
- Wang J., Hu P., Chen Z., Liu Q., Wei C. (2017). Progress in high-amylose cereal crops through inactivation of starch branching enzymes. *Frontiers in Plant Science*, 8, 469.
- Wang J., Rosell C.M., Benedito C., Barber D. (2002). Effect of the addition of different fibres on wheat dough performance and bread quality. *Food Chem*, 79, 221–226
- Wang M.W., Oudgenoeg G., van Vliet T., Hamer R.J. (2003). Interaction of water unextractable solids with gluten protein: effect on dough properties and gluten quality. *J Cereal Sci*, 38, 95–104.
- Wang X., He M., Li F., Liu Y., Zhang H., Liu C. et al. (2008a). Coupling effects of irrigation and nitrogen fertilization on grain protein and starch quality of strong-gluten winter wheat. *Front Agric China*, 2, 274–280.
- Wang Y.J., Wang C.Y., Zhang H., Li H., Liu X.L., Ji W.Q. (2015). Identification and evaluation of disease resistance and HMW-GS composition of *Aegilops geniculata* Roth. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 62, 1085–1093.
- Wang Z.H., Li S.X., Malhi S. (2008b). Effects of fertilization and other agronomic measures on nutritional quality of crops. *J Sci. Food Agric*, 88, 7–23.
- Ward J., Poutanen K., Gebruers K., Piironen V., Lampi A.M., Nyström L. et al. (2008). The HEALTHGRAIN cereal diversity screen: concept, results and prospects. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 56, 9699–9709.
- Wende I., Fang S., Shancheng S., Corke H., Beta T. (2005). Free radical scavenging properties and phenolic content of Chinese black-grained wheat. *J Agric Food Chem*, 53, 8533–8536.
- Wieser H., Seilmeier W., Belitz, H.D. (1994a). Use of RP-HPLC for a better understanding of the structure and the functionality of wheat gluten proteins. In: *HPLC of Cereal and Legume Proteins*. J.E. Kruger and J.A. Bietz eds., AACC, St. Paul, Minnesota, USA, pp.235–272.
- Wieser H., Seilmeier W., Kieffer R. (1994b). Relationship between the amount of gluten protein types and the rheological properties of different wheat cultivars. In: *Gluten Proteins 1993*, Assoc. Cereal Res.: Detmold, Germany, pp. 141–150.
- Wilson S.M., Burton R.A., Doblin M.S., Stone B.A., Newbigin E.J., Fincher G.J. et al. (2006). Temporal and spatial appearance of wall polysaccharides during cellularization of barley (*Hordeum vulgare*) endosperm. *Planta*, 224, 655–667.
- Wittmack L. (1879). *Monatsschrift des Vereines zur Beförderung des Gartenbaues in den Königl. Preussischen Staaten und der Gesellschaft der Gartenfreunde Berlins - Gesellschaft des Gartenfreunde Berlins. - Verein zur Beförderung des Gartenbaues in den Königlich Preussischen Staaten*. Berlin :P. Parey [etc.], 1879–1881. Multiple institutions BHL, New York Botanical Garden.
- Wong J.M.W., de Souza R., Kendall C.W.C., Emam A., Jenkins D.J.A. (2006). Colonic health: Fermentation and short chain fatty acids. *Journal of Clinical Gastroenterology*, 40, 235–243.
- Wood P.J. (2007). Cereal β -glucans in diet and health. *Journal of Cereal Science*, 46, 230–238.
- Wood P.J. (2010). Oat and Rye beta-Glucan: Properties and Function. *Cereal Chemistry*, 87, 315–330.
- Wood P.J., Weisz J., Beer M.U., Newman C.W., Newman R.K. (2003). Structure of (1-3)(1-4)- β -D-glucan in waxy and nonwaxy barley. *Cereal Chemistry*, 80, 329–332.
- Wu X.R., Maier A., Wu T.T., Li N.B., Pedersen J.F., Wang D. (2013). Evaluation of Nebraska waxy sorghum hybrids for ethanol production. *Cereal Chem*, 90, 198–203.
- Yabwalo D.N., Berzonsky W.A., Brabec D., Pearson T., Glover K.D., Kleinjan J.L. (2018). Impact of grain morphology and the genotype by environment interactions on test weight of spring and winter wheat (*Triticum aestivum* L.). *Euphytica*, 214, 125.
- Yamakawa H., Hirose T., Kuroda M., Yamaguchi T. (2007). Comprehensive expression profiling of rice grain filling related genes under high temperature using DNA microarray. *Plant Physiol*, 144, 258–277.

- Yamamori M., Fujita S., Hayakawa K., Matsuki J., Yasui T. (2000). Genetic elimination of starch granule protein, SGP-1, of wheat generates and altered starch with apparent high amylose. *Theoretical and Applied Genetics*, 101, 21–29.
- Yamamori M., Kato M., Yui M., Kawasaki M. (2006). Resistant starch and starch pasting properties of a starch synthaseIIa - deficient wheat apparent high amylose. *Australian J. of Agricultural Research*, 57, 531-535.
- Yan W., Tinker N.A. (2006). Biplot analysis of multi-environment trial data: Principles and applications. *Canad. J. of Plant Sci.* 86:623–645.
- Yang L.X., Wang Y.L., Dong G.C., Gu H., Huang J., Zhu J. et al. (2007). The impact of free-air CO₂ enrichment (FACE) and nitrogen supply on grain quality of rice. *Field Crops Res*, 102,128–140.
- Yasui T., Sasaki T., Matsuki J. (2002). Starch properties of a bread wheat (*Triticum aestivum* L.) mutant with an altered flour-pasting profile. *J Cereal Sci*, 35, 11-16.
- Yildirim M., Barutcular C., Koc M., Dizlek H., Hossain A., Islam M.S. et al. (2018). Assesment of the grain quality of wheat genotypes grown under multiple environments using GGE biplot analysis. *Fresenius Environmental Bulletin*, 27, 4830-4837.
- Yoo S.-H., Jane J.-L. (2002). Structural and physical characteristics of waxy and other wheat starches. *Carbohydrate Polymers*, 49(3), 297–305.
- 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.
- Zadoks J., Chang T., Konzak C. (1974). A decimal growth code for the growth stages of cereals. *Weed Research*, 14, 415–421.
- Zeeman S.C., Kossmann J., Smith A.M. (2010). Starch: Its metabolism, evolution, and biotechnological modification in plants. *Annual Review of Plant Biology*, 61, 209–234
- Zeng M., Morris C.F., Batey I.L., Wrigley C.W. (1997). Sources of variation for starch gelatinization, pasting, and gelation properties in wheat. *Cereal Chemistry*, 74, 63.
- Zeng W., Jiang N., Nadella R., Killen T.L., Nadella V., Faik A.A. (2010). Glucurono(arabino)xylan Synthase Complex from Wheat Contains Members of the GT43, GT47, and GT75 Families and Functions Cooperatively. *Plant Physiology*, 154, 78-97.
- Zhang B., Liu W., Chang S.X, Anthony O., Anyia A.O. (2010b). Water-deficit and high temperature affected water use efficiency and arabinoxylan concentration in spring wheat. *Journal of Cereal Science*, 52, 263-269.
- Zhang D., Moore W. (1999). Wheat bran particle size effects on bread baking performance and quality. *J Sci Food Agric*, 79, 805-809.
- Zhang N., Wang M., Fu J., Shen Y., Ding Y., Wu D. et al. (2020). Identifying genes for resistant starch, slowly digestible starch, and rapidly digestible starch in rice using genome-wide association studies. *Genes & Genomics*, 42, 1227-1238. doi: 10.1007/s13258-020-00981-1.
- Zhang T., Wang Z., Yin Y., Cai R., Yan S., Li W. (2010a). Starch content and granule size distribution in grains of wheat in relation to post-anthesis water deficits. *J Agron Crop Sci*, 196, 1–8.
- Zhang X., Cai J., Wollenweber B., Liu F., Dai T., Cao W. et al. (2013). Multiple heat and drought events affect grain yield and accumulations of high molecular weight glutenin subunits and glutenin macropolymers in wheat. *Journal of Cereal Science*, 57, 134-140.
- Zheng G-H., Hess R., Khare A., Hilbert R., Deguise M. (Cargill Inc.) (2004). Improved dietary fiber containing materials comprising low molecular weight glucan, PCT application WO 2004/086878 A3, 2004-Oct-14.
- Zhong L.J., Cheng F.M., Wen X., Sun Z.X., Zhang G.P. (2005). The deterioration of eating and cooking quality caused by high temperature during grain filling in early-season indica rice cultivars. *J Agron Crop Sci*, 191, 218–225.
- Zhong Y., Xu D., Hebelstrup K.H., Yang D., Cai J., Wang X. et al. (2018). Nitrogen topdressing timing modifies free amino acids profiles and storage protein gene expression in wheat grian. *BMC Plant Biology*, 18, 353.
- Zhou K., Su L., Yu I. (2004). Phytochemicals and antioxidant properties in wheat bran. *J Agric Food Chem*, 32, 6108-6114.
- Zhu J. (1995). Analysis of conditional genetic effects and variance components in developmental genetics. *Genetics*, 141, 1633–1639.
- Zhu L., Gu M., Meng X., Cheung S.C.K., Yu H., Huang J. et al. (2012). High-amylose rice improves indices of animal health in normal and diabetic rats. *Plant Biotechnology Journal*, 10, 353–362.
- Zhu Z.L., Liu B., Tian B., Xie Q.G., Li W.F., Tian J.C. (2011). Dynamic QTL mapping of wheat protein content in developing grains. *Sci Agric Sin*, 44, 3078–3085.
- Zimin A.V., Marçais G., Puiu D., Roberts M., Salzberg S.L., Yorke J.A. (2013). The MaSuRCA genome assembler. *Bioinformatics*, 29, 2669-77.
- Zobel H.F. (1988). Molecules and Granules – A comprehensive starch review. *Starch/Starke*, 40, 44-50.

11 MELLÉKLETEK

Melléklet 1. táblázat. A nagy amilóztartalmú búzatörzsek és a kontroll búzafajták termésének páronkénti összehasonlítása (Tukey HSD).

| (I) Genotípus | (J) Genotípus | Átlagos különbség (I-J) | Standard Hiba | Sig. ^a | A különbség 95%-os konfidencia-intervalluma ^a | |
|---------------|----------------|-------------------------|---------------|-------------------|--|-------------|
| | | | | | Alsó határ | Felső határ |
| UKRAINKA | SGP/LONA 1 | 0,729* | 0,298 | 0,025 | 0,101 | 1,357 |
| | SGP/LONA 2 | 0,575 | 0,298 | 0,070 | -0,053 | 1,203 |
| | SGP/LONA 3 | 0,824* | 0,298 | 0,013 | 0,196 | 1,452 |
| | SGP/LONA 4 | 0,424 | 0,298 | 0,172 | -0,204 | 1,052 |
| | SGP/LONA 5 | 0,764* | 0,298 | 0,020 | 0,136 | 1,392 |
| | SGP/LONA 6 | 0,692* | 0,298 | 0,033 | 0,064 | 1,319 |
| | SGP/LONA 7 | 0,595 | 0,298 | 0,062 | -0,033 | 1,223 |
| | SGP/UKRAINKA 1 | 0,650* | 0,298 | 0,043 | 0,022 | 1,278 |
| | SGP/UKRAINKA 2 | 0,645* | 0,298 | 0,045 | 0,017 | 1,273 |
| | SGP/UKRAINKA 3 | 0,725* | 0,298 | 0,026 | 0,097 | 1,353 |
| LONA | SGP/LONA 1 | 0,1019* | 0,298 | 0,003 | 0,391 | 1,647 |
| | SGP/LONA 2 | 0,865* | 0,298 | 0,010 | 0,237 | 1,493 |
| | SGP/LONA 3 | 0,1114* | 0,298 | 0,002 | 0,486 | 1,742 |
| | SGP/LONA 4 | 0,714* | 0,298 | 0,028 | 0,086 | 1,342 |
| | SGP/LONA 5 | 1,054* | 0,298 | 0,003 | 0,426 | 1,682 |
| | SGP/LONA 6 | 0,981* | 0,298 | 0,004 | 0,353 | 1,609 |
| | SGP/LONA 7 | 0,885* | 0,298 | 0,009 | 0,257 | 1,513 |
| | SGP/UKRAINKA 1 | 0,940* | 0,298 | 0,006 | 0,312 | 1,568 |
| | SGP/UKRAINKA 2 | 0,935* | 0,298 | 0,006 | 0,307 | 1,563 |
| | SGP/UKRAINKA 3 | 1,015* | 0,298 | 0,003 | 0,387 | 1,643 |
| SOLSTICE | SGP/LONA 1 | 0,755* | 0,298 | 0,021 | 0,127 | 1,383 |
| | SGP/LONA 2 | 0,601 | 0,298 | 0,059 | -0,027 | 1,229 |
| | SGP/LONA 3 | 0,850* | 0,298 | 0,011 | 0,222 | 1,478 |
| | SGP/LONA 4 | 0,450 | 0,298 | 0,149 | -0,178 | 1,078 |
| | SGP/LONA 5 | 0,790* | 0,298 | 0,017 | 0,162 | 1,418 |
| | SGP/LONA 6 | 0,718* | 0,298 | 0,028 | 0,090 | 1,345 |
| | SGP/LONA 7 | 0,621 | 0,298 | 0,052 | -0,007 | 1,249 |
| | SGP/UKRAINKA 1 | 0,676* | 0,298 | 0,036 | 0,048 | 1,304 |
| | SGP/UKRAINKA 2 | 0,671* | 0,298 | 0,038 | 0,043 | 1,299 |
| | SGP/UKRAINKA 3 | 0,751* | 0,298 | 0,022 | 0,123 | 1,379 |
| N11 | SGP/LONA 1 | 0,498 | 0,298 | 0,113 | -0,130 | 1,125 |
| | SGP/LONA 2 | 0,344 | 0,298 | 0,264 | -0,284 | 0,972 |
| | SGP/LONA 3 | 0,593 | 0,298 | 0,063 | -0,035 | 1,220 |
| | SGP/LONA 4 | 0,193 | 0,298 | 0,526 | -0,435 | 0,820 |
| | SGP/LONA 5 | 0,533 | 0,298 | 0,091 | -0,095 | 1,160 |
| | SGP/LONA 6 | 0,460 | 0,298 | 0,141 | -0,168 | 1,088 |
| | SGP/LONA 7 | 0,364 | 0,298 | 0,238 | -0,264 | 0,992 |
| | SGP/UKRAINKA 1 | 0,419 | 0,298 | 0,177 | -0,209 | 1,047 |
| | SGP/UKRAINKA 2 | 0,414 | 0,298 | 0,182 | -0,214 | 1,042 |
| | SGP/UKRAINKA 3 | 0,494 | 0,298 | 0,115 | -0,134 | 1,122 |
| NUO-MAIZI | SGP/LONA 1 | -0,229 | 0,298 | 0,453 | -0,857 | 0,399 |
| | SGP/LONA 2 | -0,383 | 0,298 | 0,216 | -1,010 | 0,245 |
| | SGP/LONA 3 | -0,134 | 0,298 | 0,659 | -0,762 | 0,494 |
| | SGP/LONA 4 | -0,534 | 0,298 | 0,091 | -1,162 | 0,094 |
| | SGP/LONA 5 | -0,194 | 0,298 | 0,524 | -0,822 | 0,434 |
| | SGP/LONA 6 | -0,266 | 0,298 | 0,383 | -0,894 | 0,362 |
| | SGP/LONA 7 | -0,363 | 0,298 | 0,240 | -0,990 | 0,265 |
| | SGP/UKRAINKA 1 | -0,308 | 0,298 | 0,316 | -0,935 | 0,320 |

| | | | | | | |
|---------|----------------|---------|-------|-------|--------|--------|
| | SGP/UKRAINKA 2 | -0,313 | 0,298 | 0,308 | -0,940 | 0,315 |
| | SGP/UKRAINKA 3 | -0,233 | 0,298 | 0,445 | -0,860 | 0,395 |
| BAI-HUO | SGP/LONA 1 | -0,384 | 0,298 | 0,214 | -1,012 | 0,244 |
| | SGP/LONA 2 | -0,538 | 0,298 | 0,089 | -1,165 | 0,090 |
| | SGP/LONA 3 | -0,289 | 0,298 | 0,346 | -0,917 | 0,339 |
| | SGP/LONA 4 | -0,689* | 0,298 | 0,033 | -1,317 | -0,061 |
| | SGP/LONA 5 | -0,349 | 0,298 | 0,257 | -0,977 | 0,279 |
| | SGP/LONA 6 | -0,421 | 0,298 | 0,175 | -1,049 | 0,207 |
| | SGP/LONA 7 | -0,518 | 0,298 | 0,100 | -1,145 | 0,110 |
| | SGP/UKRAINKA 1 | -0,463 | 0,298 | 0,139 | -1,090 | 0,165 |
| | SGP/UKRAINKA 2 | -0,468 | 0,298 | 0,135 | -1,095 | 0,160 |
| | SGP/UKRAINKA 3 | -0,388 | 0,298 | 0,210 | -1,015 | 0,240 |

Becsült marginális átlagok alapján

a. Többszörös/összetett összehasonlítást beállítva: legkisebb szignifikáns differencia (beállítás nélkül)

*. Az átlag különbség szignifikáns 0,05 valószínűségi szinten

b. Fügő változó: Termés

vastagított számok – szignifikánsan nem kisebb a termés a normál kontrollnál

Melléklet 2. táblázat. Tíz nagy arabinoxilán-tartalmú búzatörzs és a kontroll búzafajták beltartalmi tulajdonságai (2013–2017).

| Tulajdonságok | TOT-pentozán | | WE-pentozán | | Fehérje | | Sikér | | Keményítő | | Amilóz | | Ézerszemtömeg | | Vízfelvétel | |
|-------------------|--------------|-----|-------------|-----|---------|-----|-------|-----|-----------|-----|--------|-----|---------------|-----|-------------|-----|
| | mg/g | | mg/g | | % | | % | | % | | % | | g/1000szem | | % | |
| | Átlag | SD | Átlag | SD | Átlag | SD | Átlag | SD | Átlag | SD | Átlag | SD | Átlag | SD | Átlag | SD |
| LU/YU_3 | 21,0 | 1,2 | 9,0 | 1,3 | 13,0 | 1,2 | 34,5 | 4,6 | 57,9 | 1,3 | 22,1 | 0,1 | 49,1 | 2,3 | 61,5 | 2,7 |
| LU/YU_4 | 20,8 | 3,5 | 9,7 | 1,3 | 13,3 | 1,4 | 32,4 | 4,9 | 56,9 | 2,2 | 22,1 | 0,1 | 40,6 | 6,2 | 60,8 | 3,9 |
| LU/YU_6 | 20,5 | 3,8 | 9,1 | 2,1 | 12,9 | 0,5 | 30,8 | 0,6 | 57,0 | 0,5 | 22,1 | 0,1 | 43,5 | 3,8 | 59,4 | 0,3 |
| LU/YU_7 | 23,8 | 3,0 | 10,0 | 2,7 | 13,1 | 0,4 | 31,7 | 0,7 | 57,5 | 0,7 | 22,8 | 1,4 | 45,9 | 3,0 | 61,0 | 0,5 |
| LU/YU_8 | 20,5 | 2,5 | 9,2 | 2,2 | 13,2 | 0,9 | 31,7 | 1,6 | 57,4 | 1,7 | 22,1 | 0,1 | 43,0 | 2,1 | 62,1 | 3,6 |
| UK/YU_2 | 22,6 | 3,4 | 10,0 | 1,9 | 13,2 | 0,9 | 32,8 | 3,5 | 54,5 | 1,1 | 22,1 | 0,1 | 37,2 | 6,4 | 62,3 | 3,8 |
| UK/YU_4 | 20,6 | 2,4 | 9,5 | 2,1 | 12,0 | 1,0 | 27,5 | 2,3 | 57,3 | 1,2 | 22,1 | 0,1 | 40,0 | 4,4 | 58,4 | 1,1 |
| UK/YU_6 | 20,5 | 2,6 | 9,1 | 1,7 | 10,9 | 0,9 | 24,2 | 3,0 | 58,0 | 1,6 | 22,1 | 0,1 | 41,1 | 4,4 | 56,6 | 1,9 |
| UK/YU_8 | 22,3 | 0,9 | 9,4 | 2,1 | 12,0 | 0,3 | 28,0 | 1,0 | 57,3 | 0,6 | 22,1 | 0,1 | 44,0 | 1,6 | 59,0 | 0,9 |
| 1061-26/YU//YU_3 | 22,5 | 2,0 | 9,2 | 0,9 | 13,3 | 0,2 | 32,6 | 2,0 | 55,4 | 0,9 | 22,3 | 2,9 | 39,5 | 6,1 | 62,7 | 2,0 |
| MV-MAMBO | 18,2 | 3,9 | 6,9 | 1,7 | 12,0 | 0,6 | 30,9 | 3,7 | 57,8 | 0,9 | 21,7 | 2,3 | 47,7 | 1,4 | 59,3 | 3,8 |
| LUPUS | 20,2 | 3,0 | 8,4 | 1,9 | 14,4 | 1,0 | 33,8 | 4,2 | 56,8 | 1,4 | 21,2 | 1,9 | 42,9 | 4,3 | 61,4 | 1,3 |
| MV-EMESE | 19,9 | 4,7 | 7,8 | 2,1 | 13,5 | 0,9 | 32,5 | 4,3 | 57,2 | 1,0 | 23,3 | 3,1 | 47,4 | 3,1 | 61,0 | 0,4 |
| UKRAINKA | 18,6 | 3,2 | 6,7 | 2,2 | 13,6 | 2,3 | 30,4 | 3,1 | 56,8 | 1,0 | 20,8 | 1,6 | 42,0 | 4,1 | 60,6 | 1,9 |
| YUMAI-34 | 19,5 | 3,0 | 9,8 | 3,0 | 14,6 | 1,6 | 37,0 | 6,2 | 58,6 | 1,2 | 22,2 | 3,5 | 49,6 | 4,5 | 62,5 | 4,5 |
| LSD _{5%} | 2,17 | | 0,74 | | 0,45 | | 1,43 | | 0,55 | | 1,43 | | 2,65 | | 1,16 | |

Melléklet 3. táblázat. Tíz nagy arabinoxilán-tartalmú búzatörzs és a kontroll búzafajták feldolgozóipari tulajdonságai (2013–2017).

| Tulajdonságok | Hektoliterfőmög | | Lisztkihozatal | | Zeleny | | Sikerterülés | | GI | | Tésztaalakulás | | Stabilitás | | Ellágyulás_12 | | Értékszám | |
|-------------------|-----------------|------|----------------|------|--------|-----|--------------|-----|-------|------|----------------|-----|------------|-----|---------------|------|-----------|------|
| | kg/hl | | % | | ml | | mm | | | | perc | | perc | | FU | | | |
| | Átlag | SD | Átlag | SD | Átlag | SD | Átlag | SD | Átlag | SD | Átlag | SD | Átlag | SD | Átlag | SD | Átlag | SD |
| LU/YU_3 | 79,7 | 3,0 | 55,5 | 5,1 | 32,0 | 0,8 | 3,6 | 0,5 | 88,7 | 7,3 | 8,9 | 3,8 | 12,1 | 4,8 | 49,3 | 54,8 | 78,9 | 10,9 |
| LU/YU_4 | 77,5 | 6,3 | 53,5 | 2,5 | 38,5 | 9,7 | 3,8 | 0,5 | 93,4 | 5,7 | 12,4 | 7,3 | 11,9 | 6,1 | 17,0 | 20,7 | 89,8 | 12,0 |
| LU/YU_6 | 76,8 | 5,7 | 52,9 | 5,0 | 32,8 | 4,6 | 3,1 | 1,4 | 97,7 | 1,3 | 10,9 | 8,9 | 18,0 | 0,3 | 12,3 | 14,3 | 87,4 | 14,7 |
| LU/YU_7 | 78,2 | 4,8 | 50,7 | 6,1 | 32,1 | 1,3 | 3,8 | 0,5 | 94,6 | 1,9 | 13,8 | 0,5 | 13,9 | 0,1 | 14,3 | 5,3 | 90,7 | 0,8 |
| LU/YU_8 | 78,3 | 2,5 | 53,3 | 3,4 | 34,1 | 5,8 | 3,0 | 0,8 | 96,2 | 2,4 | 19,4 | 0,8 | 10,2 | 5,3 | 0,0 | 0,0 | 100,0 | 0,0 |
| UK/YU_2 | 76,8 | 3,1 | 53,4 | 3,4 | 23,5 | 5,1 | 4,5 | 1,0 | 90,8 | 3,2 | 11,4 | 1,5 | 14,1 | 2,2 | 21,5 | 43,0 | 90,2 | 3,5 |
| UK/YU_4 | 72,6 | 10,8 | 50,7 | 6,3 | 30,3 | 2,6 | 1,4 | 1,8 | 96,4 | 6,2 | 10,3 | 7,4 | 15,9 | 3,0 | 20,8 | 29,2 | 85,3 | 12,7 |
| UK/YU_6 | 71,6 | 9,6 | 53,3 | 6,2 | 29,0 | 6,8 | 2,3 | 0,9 | 98,0 | 3,2 | 7,7 | 8,0 | 15,8 | 4,6 | 25,3 | 28,4 | 83,0 | 12,0 |
| UK/YU_8 | 74,5 | 6,3 | 53,0 | 6,2 | 29,5 | 2,6 | 3,4 | 0,3 | 98,1 | 1,5 | 11,3 | 9,2 | 13,3 | 4,8 | 23,8 | 28,1 | 85,6 | 17,0 |
| 1061-26/YU//YU_3 | 72,9 | 9,0 | 49,0 | 2,2 | 29,3 | 3,3 | 3,8 | 0,9 | 86,0 | 7,0 | 14,5 | 2,3 | 13,6 | 2,5 | 26,8 | 48,9 | 93,3 | 5,3 |
| MV-MAMBO | 80,5 | 3,9 | 52,3 | 8,0 | 26,8 | 2,8 | 3,0 | 1,4 | 86,6 | 11,5 | 14,6 | 7,1 | 14,9 | 3,9 | 16,2 | 21,8 | 90,2 | 13,7 |
| LUPUS | 80,8 | 2,2 | 52,5 | 8,3 | 37,5 | 1,7 | 4,0 | 0,7 | 96,3 | 3,9 | 18,4 | 1,6 | 13,6 | 3,9 | 1,5 | 3,0 | 100,0 | 0,0 |
| MV-EMESE | 78,2 | 8,6 | 50,2 | 12,9 | 32,8 | 2,4 | 3,0 | 0,4 | 97,8 | 2,3 | 9,4 | 7,3 | 17,3 | 2,2 | 17,8 | 12,3 | 83,9 | 13,4 |
| UKRAINKA | 77,5 | 3,8 | 51,1 | 7,6 | 37,3 | 7,9 | 2,3 | 1,8 | 97,7 | 3,8 | 14,7 | 0,5 | 15,5 | 2,3 | 6,3 | 4,5 | 94,8 | 4,1 |
| YUMAI-34 | 78,8 | 5,3 | 52,2 | 8,5 | 40,5 | 8,7 | 3,8 | 1,9 | 92,6 | 6,4 | 14,6 | 3,5 | 9,6 | 3,9 | 12,3 | 24,5 | 91,9 | 5,7 |
| LSD _{5%} | 2,66 | | 2,99 | | 3,39 | | 0,57 | | 2,69 | | 2,52 | | 1,76 | | 11,14 | | 4,53 | |

Melléklet 4. táblázat. A nagy arabinoxilán-tartalmú búzatörzsek és a kontroll búzafajták termésének páronkénti összehasonlítása (Tukey HSD).

| Páronkénti összehasonlítás ^b | | | | | | |
|---|------------------|-------------------------|---------------|-------------------|--|-------------|
| (I) Genotípus | (J) Genotípus | Átlagos különbség (I-J) | Standard Hiba | Sig. ^a | A különbség 95%-os konfidencia-intervalluma ^a | |
| | | | | | Alsó határ | Felső határ |
| MV-NADOR | LUPUS | 1,83 | 0,68 | 0,76 | -0,85 | 4,51 |
| | YUMAI-34 | 3,55* | 0,74 | 0,00 | 0,63 | 6,47 |
| | UKRAINKA | 0,86 | 0,64 | 1,00 | -1,67 | 3,39 |
| | UK/YU_6 | 2,26 | 0,78 | 0,62 | -0,84 | 5,36 |
| | UK/YU_7 | 1,49 | 0,68 | 0,98 | -1,19 | 4,17 |
| | UK/YU_3 | 0,81 | 0,78 | 1,00 | -2,29 | 3,91 |
| | UK/YU_4 | 2,22 | 0,78 | 0,67 | -0,88 | 5,31 |
| | UK/YU_8 | 1,01 | 0,78 | 1,00 | -2,09 | 4,11 |
| | LU/YU_11 | 1,49 | 0,78 | 1,00 | -1,61 | 4,59 |
| | LU/YU_5 | 1,76 | 0,78 | 0,97 | -1,34 | 4,86 |
| | LU/YU_7 | 2,07 | 0,78 | 0,80 | -1,03 | 5,17 |
| | LU/YU_10 | 1,31 | 0,84 | 1,00 | -2,04 | 4,66 |
| | LU/YU_8 | 1,07 | 0,84 | 1,00 | -2,28 | 4,41 |
| | LU/YU_4 | 1,97 | 0,78 | 0,88 | -1,13 | 5,06 |
| | MA/YU_1 | 0,48 | 0,78 | 1,00 | -2,61 | 3,58 |
| | MV-EMESE | 2,60 | 0,74 | 0,18 | -0,32 | 5,52 |
| | MV-MAMBO | 1,46 | 0,74 | 1,00 | -1,46 | 4,38 |
| | UK/YU_15 | 1,77 | 0,84 | 0,99 | -1,57 | 5,12 |
| | LU/YU_6 | 1,19 | 0,78 | 1,00 | -1,91 | 4,29 |
| | EM/YU_1 | 2,40 | 0,74 | 0,34 | -0,52 | 5,32 |
| | EM/YU_2 | 1,40 | 0,78 | 1,00 | -1,70 | 4,49 |
| | UK/YU_9 | 2,08 | 0,78 | 0,79 | -1,02 | 5,18 |
| | UK/YU_2 | 2,27 | 0,84 | 0,77 | -1,07 | 5,62 |
| | UK/YU_13 | 1,11 | 0,84 | 1,00 | -2,24 | 4,45 |
| | UK/YU_11 | 2,54 | 0,74 | 0,22 | -0,38 | 5,46 |
| | UK/YU_14 | 0,90 | 0,84 | 1,00 | -2,45 | 4,24 |
| | UK/YU_10 | 1,22 | 0,74 | 1,00 | -1,70 | 4,14 |
| | UK/YU_1 | 2,67 | 0,84 | 0,40 | -0,68 | 6,02 |
| | UK/YU_5 | 2,79 | 0,84 | 0,30 | -0,56 | 6,13 |
| | UK/YU_16 | 1,61 | 0,78 | 0,99 | -1,49 | 4,71 |
| | UK/YU_12 | 4,12* | 0,84 | 0,00 | 0,78 | 7,47 |
| | LU/YU_9 | 1,82 | 0,78 | 0,95 | -1,28 | 4,92 |
| | LU/YU_3 | 2,50 | 0,78 | 0,38 | -0,60 | 5,60 |
| | LU/YU_2 | 3,65* | 0,78 | 0,00 | 0,55 | 6,75 |
| | LU/YU_1 | 2,11 | 0,78 | 0,77 | -0,99 | 5,21 |
| | MA/YU_3 | 2,86 | 0,84 | 0,25 | -0,49 | 6,20 |
| | LU/YU_12 | 1,78 | 0,94 | 1,00 | -1,95 | 5,50 |
| | MA/YU_2 | 3,12 | 0,84 | 0,11 | -0,22 | 6,47 |
| | 1061-26/YU//YU_2 | 5,17* | 0,84 | 0,00 | 1,83 | 8,52 |
| | 1061-26/YU//YU_1 | 1,87 | 0,84 | 0,97 | -1,47 | 5,22 |

| | | | | | | |
|----------|------------------|--------|------|------|-------|-------|
| LUPUS | MV-NADOR | -1,83 | 0,68 | 0,76 | -4,51 | 0,85 |
| | YUMAI-34 | 1,72 | 0,77 | 0,97 | -1,33 | 4,78 |
| | UKRAINKA | -0,97 | 0,68 | 1,00 | -3,65 | 1,71 |
| | UK/YU_6 | 0,43 | 0,81 | 1,00 | -2,79 | 3,66 |
| | UK/YU_7 | -0,34 | 0,71 | 1,00 | -3,17 | 2,49 |
| | UK/YU_3 | -1,02 | 0,81 | 1,00 | -4,24 | 2,20 |
| | UK/YU_4 | 0,39 | 0,81 | 1,00 | -2,84 | 3,61 |
| | UK/YU_8 | -0,82 | 0,81 | 1,00 | -4,04 | 2,41 |
| | LU/YU_11 | -0,34 | 0,81 | 1,00 | -3,57 | 2,88 |
| | LU/YU_5 | -0,07 | 0,81 | 1,00 | -3,30 | 3,15 |
| | LU/YU_7 | 0,24 | 0,81 | 1,00 | -2,98 | 3,47 |
| | LU/YU_10 | -0,52 | 0,87 | 1,00 | -3,98 | 2,94 |
| | LU/YU_8 | -0,76 | 0,87 | 1,00 | -4,23 | 2,70 |
| | LU/YU_4 | 0,14 | 0,81 | 1,00 | -3,09 | 3,36 |
| | MA/YU_1 | -1,35 | 0,81 | 1,00 | -4,57 | 1,88 |
| | MV-EMESE | 0,77 | 0,77 | 1,00 | -2,28 | 3,83 |
| | MV-MAMBO | -0,37 | 0,77 | 1,00 | -3,43 | 2,68 |
| | UK/YU_15 | -0,06 | 0,87 | 1,00 | -3,52 | 3,41 |
| | LU/YU_6 | -0,64 | 0,81 | 1,00 | -3,87 | 2,58 |
| | EM/YU_1 | 0,57 | 0,77 | 1,00 | -2,49 | 3,62 |
| | EM/YU_2 | -0,43 | 0,81 | 1,00 | -3,66 | 2,79 |
| | UK/YU_9 | 0,25 | 0,81 | 1,00 | -2,97 | 3,47 |
| | UK/YU_2 | 0,44 | 0,87 | 1,00 | -3,02 | 3,91 |
| | UK/YU_13 | -0,72 | 0,87 | 1,00 | -4,18 | 2,74 |
| | UK/YU_11 | 0,71 | 0,77 | 1,00 | -2,34 | 3,77 |
| | UK/YU_14 | -0,93 | 0,87 | 1,00 | -4,39 | 2,53 |
| | UK/YU_10 | -0,61 | 0,77 | 1,00 | -3,66 | 2,45 |
| | UK/YU_1 | 0,84 | 0,87 | 1,00 | -2,62 | 4,30 |
| | UK/YU_5 | 0,96 | 0,87 | 1,00 | -2,50 | 4,42 |
| | UK/YU_16 | -0,22 | 0,81 | 1,00 | -3,44 | 3,01 |
| | UK/YU_12 | 2,29 | 0,87 | 0,82 | -1,17 | 5,76 |
| | LU/YU_9 | -0,01 | 0,81 | 1,00 | -3,23 | 3,21 |
| | LU/YU_3 | 0,67 | 0,81 | 1,00 | -2,56 | 3,89 |
| | LU/YU_2 | 1,82 | 0,81 | 0,97 | -1,40 | 5,05 |
| | LU/YU_1 | 0,28 | 0,81 | 1,00 | -2,94 | 3,50 |
| | MA/YU_3 | 1,03 | 0,87 | 1,00 | -2,44 | 4,49 |
| | LU/YU_12 | -0,05 | 0,96 | 1,00 | -3,88 | 3,78 |
| | MA/YU_2 | 1,29 | 0,87 | 1,00 | -2,17 | 4,76 |
| | 1061-26/YU//YU_2 | 3,34 | 0,87 | 0,08 | -0,12 | 6,81 |
| | 1061-26/YU//YU_1 | 0,04 | 0,87 | 1,00 | -3,42 | 3,51 |
| YUMAI-34 | MV-NADOR | -3,55* | 0,74 | 0,00 | -6,47 | -0,63 |
| | LUPUS | -1,72 | 0,77 | 0,97 | -4,78 | 1,33 |
| | UKRAINKA | -2,70 | 0,74 | 0,13 | -5,62 | 0,23 |
| | UK/YU_6 | -1,29 | 0,86 | 1,00 | -4,72 | 2,13 |
| | UK/YU_7 | -2,06 | 0,77 | 0,78 | -5,12 | 0,99 |
| | UK/YU_3 | -2,74 | 0,86 | 0,39 | -6,17 | 0,68 |

| | | | | | | |
|----------|------------------|-------|------|------|-------|------|
| | UK/YU_4 | -1,34 | 0,86 | 1,00 | -4,76 | 2,09 |
| | UK/YU_8 | -2,54 | 0,86 | 0,58 | -5,97 | 0,88 |
| | LU/YU_11 | -2,07 | 0,86 | 0,93 | -5,49 | 1,36 |
| | LU/YU_5 | -1,80 | 0,86 | 0,99 | -5,22 | 1,63 |
| | LU/YU_7 | -1,48 | 0,86 | 1,00 | -4,91 | 1,94 |
| | LU/YU_10 | -2,24 | 0,92 | 0,91 | -5,89 | 1,41 |
| | LU/YU_8 | -2,49 | 0,92 | 0,76 | -6,14 | 1,16 |
| | LU/YU_4 | -1,59 | 0,86 | 1,00 | -5,01 | 1,84 |
| | MA/YU_1 | -3,07 | 0,86 | 0,17 | -6,50 | 0,35 |
| | MV-EMESE | -0,95 | 0,82 | 1,00 | -4,22 | 2,31 |
| | MV-MAMBO | -2,10 | 0,82 | 0,86 | -5,36 | 1,17 |
| | UK/YU_15 | -1,78 | 0,92 | 1,00 | -5,43 | 1,87 |
| | LU/YU_6 | -2,37 | 0,86 | 0,74 | -5,79 | 1,06 |
| | EM/YU_1 | -1,16 | 0,82 | 1,00 | -4,42 | 2,11 |
| | EM/YU_2 | -2,16 | 0,86 | 0,88 | -5,58 | 1,27 |
| | UK/YU_9 | -1,47 | 0,86 | 1,00 | -4,90 | 1,95 |
| | UK/YU_2 | -1,28 | 0,92 | 1,00 | -4,93 | 2,37 |
| | UK/YU_13 | -2,45 | 0,92 | 0,80 | -6,10 | 1,21 |
| | UK/YU_11 | -1,01 | 0,82 | 1,00 | -4,28 | 2,25 |
| | UK/YU_14 | -2,66 | 0,92 | 0,63 | -6,31 | 1,00 |
| | UK/YU_10 | -2,33 | 0,82 | 0,67 | -5,60 | 0,93 |
| | UK/YU_1 | -0,88 | 0,92 | 1,00 | -4,54 | 2,77 |
| | UK/YU_5 | -0,76 | 0,92 | 1,00 | -4,42 | 2,89 |
| | UK/YU_16 | -1,94 | 0,86 | 0,97 | -5,37 | 1,48 |
| | UK/YU_12 | 0,57 | 0,92 | 1,00 | -3,08 | 4,22 |
| | LU/YU_9 | -1,73 | 0,86 | 0,99 | -5,16 | 1,69 |
| | LU/YU_3 | -1,06 | 0,86 | 1,00 | -4,48 | 2,37 |
| | LU/YU_2 | 0,10 | 0,86 | 1,00 | -3,33 | 3,52 |
| | LU/YU_1 | -1,44 | 0,86 | 1,00 | -4,87 | 1,98 |
| | MA/YU_3 | -0,70 | 0,92 | 1,00 | -4,35 | 2,95 |
| | LU/YU_12 | -1,78 | 1,01 | 1,00 | -5,78 | 2,22 |
| | MA/YU_2 | -0,43 | 0,92 | 1,00 | -4,08 | 3,22 |
| | 1061-26/YU//YU_2 | 1,62 | 0,92 | 1,00 | -2,03 | 5,27 |
| | 1061-26/YU//YU_1 | -1,68 | 0,92 | 1,00 | -5,33 | 1,97 |
| UKRAINKA | MV-NADOR | -0,86 | 0,64 | 1,00 | -3,39 | 1,67 |
| | LUPUS | 0,97 | 0,68 | 1,00 | -1,71 | 3,65 |
| | YUMAI-34 | 2,70 | 0,74 | 0,13 | -0,23 | 5,62 |
| | UK/YU_6 | 1,40 | 0,78 | 1,00 | -1,69 | 4,50 |
| | UK/YU_7 | 0,63 | 0,68 | 1,00 | -2,05 | 3,31 |
| | UK/YU_3 | -0,05 | 0,78 | 1,00 | -3,15 | 3,05 |
| | UK/YU_4 | 1,36 | 0,78 | 1,00 | -1,74 | 4,45 |
| | UK/YU_8 | 0,15 | 0,78 | 1,00 | -2,94 | 3,25 |
| | LU/YU_11 | 0,63 | 0,78 | 1,00 | -2,47 | 3,73 |
| | LU/YU_5 | 0,90 | 0,78 | 1,00 | -2,20 | 4,00 |
| | LU/YU_7 | 1,21 | 0,78 | 1,00 | -1,89 | 4,31 |
| | LU/YU_10 | 0,45 | 0,84 | 1,00 | -2,89 | 3,80 |

| | | | | | | |
|----------|------------------|-------|------|------|-------|------|
| | LU/YU_8 | 0,21 | 0,84 | 1,00 | -3,14 | 3,55 |
| | LU/YU_4 | 1,11 | 0,78 | 1,00 | -1,99 | 4,21 |
| | MA/YU_1 | -0,38 | 0,78 | 1,00 | -3,47 | 2,72 |
| | MV-EMESE | 1,74 | 0,74 | 0,94 | -1,18 | 4,66 |
| | MV-MAMBO | 0,60 | 0,74 | 1,00 | -2,32 | 3,52 |
| | UK/YU_15 | 0,91 | 0,84 | 1,00 | -2,43 | 4,26 |
| | LU/YU_6 | 0,33 | 0,78 | 1,00 | -2,77 | 3,43 |
| | EM/YU_1 | 1,54 | 0,74 | 0,99 | -1,38 | 4,46 |
| | EM/YU_2 | 0,54 | 0,78 | 1,00 | -2,56 | 3,63 |
| | UK/YU_9 | 1,22 | 0,78 | 1,00 | -1,88 | 4,32 |
| | UK/YU_2 | 1,42 | 0,84 | 1,00 | -1,93 | 4,76 |
| | UK/YU_13 | 0,25 | 0,84 | 1,00 | -3,10 | 3,60 |
| | UK/YU_11 | 1,69 | 0,74 | 0,96 | -1,24 | 4,61 |
| | UK/YU_14 | 0,04 | 0,84 | 1,00 | -3,31 | 3,39 |
| | UK/YU_10 | 0,36 | 0,74 | 1,00 | -2,56 | 3,28 |
| | UK/YU_1 | 1,81 | 0,84 | 0,98 | -1,54 | 5,16 |
| | UK/YU_5 | 1,93 | 0,84 | 0,96 | -1,42 | 5,28 |
| | UK/YU_16 | 0,75 | 0,78 | 1,00 | -2,34 | 3,85 |
| | UK/YU_12 | 3,26 | 0,84 | 0,07 | -0,08 | 6,61 |
| | LU/YU_9 | 0,96 | 0,78 | 1,00 | -2,14 | 4,06 |
| | LU/YU_3 | 1,64 | 0,78 | 0,99 | -1,46 | 4,74 |
| | LU/YU_2 | 2,79 | 0,78 | 0,16 | -0,30 | 5,89 |
| | LU/YU_1 | 1,25 | 0,78 | 1,00 | -1,85 | 4,35 |
| | MA/YU_3 | 2,00 | 0,84 | 0,94 | -1,35 | 5,35 |
| | LU/YU_12 | 0,92 | 0,94 | 1,00 | -2,81 | 4,64 |
| | MA/YU_2 | 2,27 | 0,84 | 0,78 | -1,08 | 5,61 |
| | 1061-26/YU//YU_2 | 4,32* | 0,84 | 0,00 | 0,97 | 7,66 |
| | 1061-26/YU//YU_1 | 1,02 | 0,84 | 1,00 | -2,33 | 4,36 |
| MV-EMESE | MV-NADOR | -2,60 | 0,74 | 0,18 | -5,52 | 0,32 |
| | LUPUS | -0,77 | 0,77 | 1,00 | -3,83 | 2,28 |
| | YUMAI-34 | 0,95 | 0,82 | 1,00 | -2,31 | 4,22 |
| | UKRAINKA | -1,74 | 0,74 | 0,94 | -4,66 | 1,18 |
| | UK/YU_6 | -0,34 | 0,86 | 1,00 | -3,76 | 3,09 |
| | UK/YU_7 | -1,11 | 0,77 | 1,00 | -4,17 | 1,94 |
| | UK/YU_3 | -1,79 | 0,86 | 0,99 | -5,22 | 1,63 |
| | UK/YU_4 | -0,39 | 0,86 | 1,00 | -3,81 | 3,04 |
| | UK/YU_8 | -1,59 | 0,86 | 1,00 | -5,01 | 1,84 |
| | LU/YU_11 | -1,11 | 0,86 | 1,00 | -4,54 | 2,31 |
| | LU/YU_5 | -0,84 | 0,86 | 1,00 | -4,27 | 2,58 |
| | LU/YU_7 | -0,53 | 0,86 | 1,00 | -3,95 | 2,90 |
| | LU/YU_10 | -1,29 | 0,92 | 1,00 | -4,94 | 2,36 |
| | LU/YU_8 | -1,54 | 0,92 | 1,00 | -5,19 | 2,12 |
| | LU/YU_4 | -0,63 | 0,86 | 1,00 | -4,06 | 2,79 |
| | MA/YU_1 | -2,12 | 0,86 | 0,91 | -5,54 | 1,31 |
| | MV-MAMBO | -1,14 | 0,82 | 1,00 | -4,41 | 2,12 |
| | UK/YU_15 | -0,83 | 0,92 | 1,00 | -4,48 | 2,82 |

| | | | | | | |
|--------------|------------------|-------|------|------|-------|------|
| | LU/YU_6 | -1,41 | 0,86 | 1,00 | -4,84 | 2,01 |
| | EM/YU_1 | -0,20 | 0,82 | 1,00 | -3,47 | 3,06 |
| | EM/YU_2 | -1,21 | 0,86 | 1,00 | -4,63 | 2,22 |
| | UK/YU_9 | -0,52 | 0,86 | 1,00 | -3,95 | 2,90 |
| | UK/YU_2 | -0,33 | 0,92 | 1,00 | -3,98 | 3,32 |
| | UK/YU_13 | -1,49 | 0,92 | 1,00 | -5,14 | 2,16 |
| | UK/YU_11 | -0,06 | 0,82 | 1,00 | -3,32 | 3,21 |
| | UK/YU_14 | -1,70 | 0,92 | 1,00 | -5,35 | 1,95 |
| | UK/YU_10 | -1,38 | 0,82 | 1,00 | -4,64 | 1,89 |
| | UK/YU_1 | 0,07 | 0,92 | 1,00 | -3,58 | 3,72 |
| | UK/YU_5 | 0,19 | 0,92 | 1,00 | -3,46 | 3,84 |
| | UK/YU_16 | -0,99 | 0,86 | 1,00 | -4,41 | 2,44 |
| | UK/YU_12 | 1,52 | 0,92 | 1,00 | -2,13 | 5,17 |
| | LU/YU_9 | -0,78 | 0,86 | 1,00 | -4,21 | 2,64 |
| | LU/YU_3 | -0,10 | 0,86 | 1,00 | -3,53 | 3,32 |
| | LU/YU_2 | 1,05 | 0,86 | 1,00 | -2,37 | 4,48 |
| | LU/YU_1 | -0,49 | 0,86 | 1,00 | -3,92 | 2,93 |
| | MA/YU_3 | 0,26 | 0,92 | 1,00 | -3,39 | 3,91 |
| | LU/YU_12 | -0,82 | 1,01 | 1,00 | -4,82 | 3,17 |
| | MA/YU_2 | 0,52 | 0,92 | 1,00 | -3,13 | 4,17 |
| | 1061-26/YU//YU_2 | 2,57 | 0,92 | 0,70 | -1,08 | 6,22 |
| | 1061-26/YU//YU_1 | -0,73 | 0,92 | 1,00 | -4,38 | 2,92 |
| MV- MAMBO | MV-NADOR | -1,46 | 0,74 | 1,00 | -4,38 | 1,46 |
| | LUPUS | 0,37 | 0,77 | 1,00 | -2,68 | 3,43 |
| | YUMAI-34 | 2,10 | 0,82 | 0,86 | -1,17 | 5,36 |
| | UKRAINKA | -0,60 | 0,74 | 1,00 | -3,52 | 2,32 |
| | UK/YU_6 | 0,80 | 0,86 | 1,00 | -2,62 | 4,23 |
| | UK/YU_7 | 0,03 | 0,77 | 1,00 | -3,02 | 3,08 |
| | UK/YU_3 | -0,65 | 0,86 | 1,00 | -4,07 | 2,78 |
| | UK/YU_4 | 0,76 | 0,86 | 1,00 | -2,67 | 4,18 |
| | UK/YU_8 | -0,45 | 0,86 | 1,00 | -3,87 | 2,98 |
| | LU/YU_11 | 0,03 | 0,86 | 1,00 | -3,40 | 3,45 |
| | LU/YU_5 | 0,30 | 0,86 | 1,00 | -3,13 | 3,72 |
| | LU/YU_7 | 0,61 | 0,86 | 1,00 | -2,81 | 4,04 |
| | LU/YU_10 | -0,15 | 0,92 | 1,00 | -3,80 | 3,50 |
| | LU/YU_8 | -0,39 | 0,92 | 1,00 | -4,04 | 3,26 |
| | LU/YU_4 | 0,51 | 0,86 | 1,00 | -2,92 | 3,93 |
| | MA/YU_1 | -0,98 | 0,86 | 1,00 | -4,40 | 2,45 |
| | MV-EMESE | 1,14 | 0,82 | 1,00 | -2,12 | 4,41 |
| | UK/YU_15 | 0,31 | 0,92 | 1,00 | -3,34 | 3,97 |
| | LU/YU_6 | -0,27 | 0,86 | 1,00 | -3,70 | 3,15 |
| | EM/YU_1 | 0,94 | 0,82 | 1,00 | -2,33 | 4,20 |
| | EM/YU_2 | -0,06 | 0,86 | 1,00 | -3,49 | 3,36 |
| | UK/YU_9 | 0,62 | 0,86 | 1,00 | -2,80 | 4,05 |
| | UK/YU_2 | 0,81 | 0,92 | 1,00 | -2,84 | 4,47 |
| | UK/YU_13 | -0,35 | 0,92 | 1,00 | -4,00 | 3,30 |

| | | | | | | |
|--|------------------|-------|------|------|-------|------|
| | UK/YU_11 | 1,08 | 0,82 | 1,00 | -2,18 | 4,35 |
| | UK/YU_14 | -0,56 | 0,92 | 1,00 | -4,21 | 3,09 |
| | UK/YU_10 | -0,24 | 0,82 | 1,00 | -3,50 | 3,03 |
| | UK/YU_1 | 1,21 | 0,92 | 1,00 | -2,44 | 4,86 |
| | UK/YU_5 | 1,33 | 0,92 | 1,00 | -2,32 | 4,98 |
| | UK/YU_16 | 0,15 | 0,86 | 1,00 | -3,27 | 3,58 |
| | UK/YU_12 | 2,66 | 0,92 | 0,62 | -0,99 | 6,31 |
| | LU/YU_9 | 0,36 | 0,86 | 1,00 | -3,06 | 3,79 |
| | LU/YU_3 | 1,04 | 0,86 | 1,00 | -2,39 | 4,46 |
| | LU/YU_2 | 2,19 | 0,86 | 0,87 | -1,23 | 5,62 |
| | LU/YU_1 | 0,65 | 0,86 | 1,00 | -2,77 | 4,08 |
| | MA/YU_3 | 1,40 | 0,92 | 1,00 | -2,25 | 5,05 |
| | LU/YU_12 | 0,32 | 1,01 | 1,00 | -3,68 | 4,32 |
| | MA/YU_2 | 1,66 | 0,92 | 1,00 | -1,99 | 5,32 |
| | 1061-26/YU//YU_2 | 3,71* | 0,92 | 0,04 | 0,06 | 7,37 |
| | 1061-26/YU//YU_1 | 0,42 | 0,92 | 1,00 | -3,24 | 4,07 |

Melléklet 5. táblázat. A tartalékfehérjék bioszintéziséért felelős néhány gén kromoszomális elhelyezkedése a hexaploid búza és az *Ae. umbellulata* genomjában.

| Funkció | Gén | Génbanki szám* | Kromoszóma | | |
|-----------------------------|-----------------------------------|----------------|--------------------|------------------------|----|
| | | | <i>T. aestivum</i> | <i>Ae. umbellulata</i> | |
| Fehérje-bioszintézis | | | | | |
| HMW gluteninek | Glu-1Ax1 | X61009 | 1A | 1U | |
| | Glu-1Ax2 | M22208.2 | 1A | 1U | |
| | Glu-B1-1b | X13927.3 | 1B | 1U | |
| | Glu-1D-1d | X12928.5 | 1D | 1U | |
| | Glu-D1-2b | X12929.2 | 1D | 1U | |
| | | X03041.1 | 1D | 1U | |
| | Glu-1Ux | AF476961.1 | - | 1U | |
| | Glu-1Uy | AF476962.1 | - | 1U | |
| | LMW gluteninek | | AB062868.1 | 1D | 1U |
| | | AB062872.1 | 1D | 1U | |
| | | JX163862.1 | 1B | 1U | |
| | | HM055909.1 | 1DS | 1U | |
| | | Y17845.1 | 1BS | 1U | |
| | | U86026.1 | 1DS | 1U | |
| | | X13306.1 | 1DS | 1U | |
| | | AB062875.1 | 1DS | 1U | |
| | | U86028.1 | 1DS | 1U | |
| | | X07747.1 | 1AS | 1U | |
| | | AB062873.1 | 1DS | 1U | |
| γ-gliadinok | Csoport/Mintázat/Alcsoport | | | | |
| | C10/C10-P1/SG-1 | AJ937838.1 | 1DS | 1U | |
| | C9/C9-P2/SG-2 | AF234646.1 | 1DS | 1U | |
| | C9/C9-P3/SG-3 | FJ006638.1 | 1DS | 1U | |
| | C9/C9-P4/SG-4 | FJ006605.1 | 1DS | 1U | |
| | C9/C9-P4/SG-6 | AF234647.1 | 1BS | 1U | |
| | C9/C9-P4/SG-7 | FJ006596.1 | 1DS | 1U | |
| | C8/C8-P5/SG-8 | AF175312.1 | 1DS | 1U | |
| | C8/C8-P5/SG-9 | AF120267.1 | 1DS | 1U | |
| | C8/C8-P5/SG-12 | AF234649.1 | 1DS | 1U | |
| | C8/C8-P5/SG-13 | AF234643.1 | 1AS | 1U | |
| | C7/C7-P6/SG-14 | AJ416336.1 | 1DS | 1U | |
| | C7/C7-P7/SG-15 | M16064.1 | 1DS | 1U | |
| | α-gliadinok | | AJ133612.1 | 6AS | 1U |
| | | | DQ166377.1 | 6AS | 1U |
| | | K03074.1 | 2BS | 1U | |
| | | M11075.1 | 6AS | 1U, 2U | |
| | | U08287.1 | 6AS | 1U, 3U | |
| | | X01130.1 | 6AS | 1U, 3U | |
| | | U50984.1 | 6AS | 1U, 3U | |
| | | X02539.1 | 6AS | 1U, 3U | |

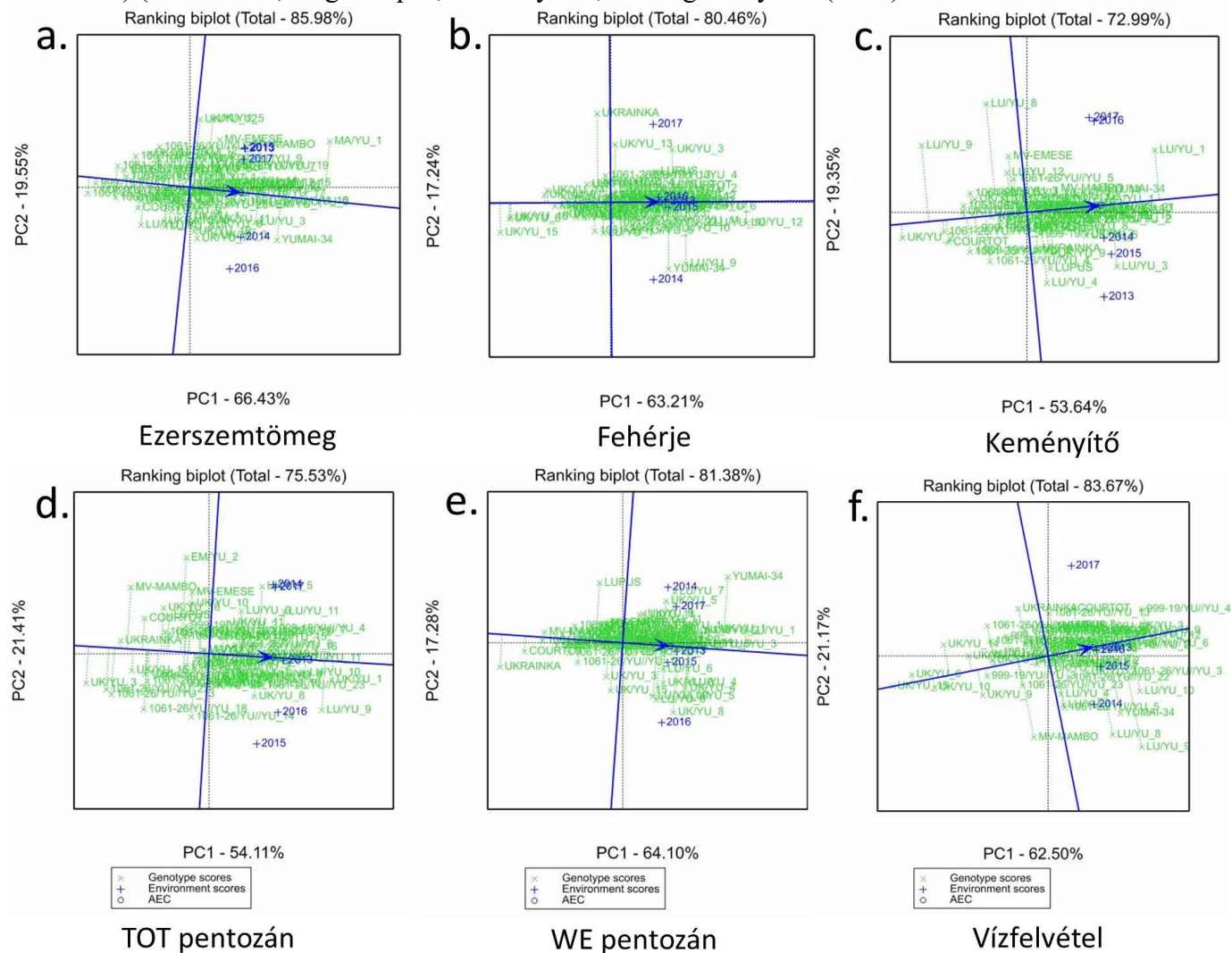
*: NCBI (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/>)

Melléklet 6. táblázat. A β -glükán és az arabinoxilán bioszintéziséért felelős néhány ismert gén kromoszomális elhelyezkedése a hexaploid búza és az *Ae. umbellulata* genomjában.

| Funkció | Gén | Génbanki szám* | Kromoszóma | |
|---|----------------------------------|-----------------------|--------------------|------------------------|
| | | | <i>T. aestivum</i> | <i>Ae. umbellulata</i> |
| β-glükán-bioszintézis | <i>OsCslF1</i> | AF432502.1 | 2AS, 2BS | 2U |
| | <i>OsCslF2</i> | AF432503.1 | 2BL | 2U |
| | <i>HvCslF3</i> | EU267179.1 | 2AS, 2BS, 2DS | 2U |
| | <i>HvCslF4</i> | EU267180.1 | 2AS, 2BS | 2U |
| | <i>HvCslF6</i> | EU267181.1 | 7DL | 7UL |
| | <i>HvCslF7</i> | EU267182.1 | 5BL | 5U |
| | <i>HVCslF8</i> | EU267183.1 | 2AS, 2BS, 2DS | 2U |
| | <i>HVCslF9</i> | EU267184.1 | 1AS, 1BS, 1DS | 1U |
| | <i>HvCslF10</i> | EU267185.1 | 2AS, 2BS, 2DS | 2U |
| | <i>HvCslF11</i> | - | 7DL, 7BL | 6U |
| | <i>HvCslF12</i> | - | 2AS, 2BS, 2DS | 2U |
| | <i>HvCslF13</i> | - | 2AL, 2BL | 2U |
| | <i>HvCslH1</i> | - | 2AL, 2BL, 2AL | 2U |
| | Arabinoxilán-bioszintézis | <i>TaGT43-2D</i> | HF913567.1 | 4AS |
| <i>TaGT43-2B</i> | | HF913568.1 | 4AS | 4U |
| <i>TaGT43-2A</i> | | HF913569.1 | 4AS | 4U |
| <i>TaGT43-4</i> | | HM236487.1 | 7AL, 7BL, 7DL | 7UL |
| <i>TaGT47-2B</i> | | HF913570.1 | 3B | 3U |
| <i>TaGT47-2D</i> | | HF913571.1 | 3AL | 3U |
| <i>TaGT47-2A</i> | | HF913572.1 | 3AL | 3U |
| <i>TaGT47-12</i> | | HM236486.1 | 3AL, 3B, 3DL | 6U |
| <i>TaGT47-13</i> | | HM236485.1 | 3AL, 3B, 3DL | 3U |
| <i>TaGT61-1</i> | | FR873610.1 | 1BL | 6U |
| <i>TaGT61-2</i> | | FR846232.1 | 6AL | 4U |
| <i>TaGT75-1</i> | | HM236488.1 | 2AL, 2BL, 2DL | 2U |
| <i>TaGT75-4</i> | | HM236489.1 | 4AL, 4BS, 4DS | 6U |
| <i>TaBAHD1A</i> | | Traes_3AS_75E04A7F4** | 3AS | 3U |

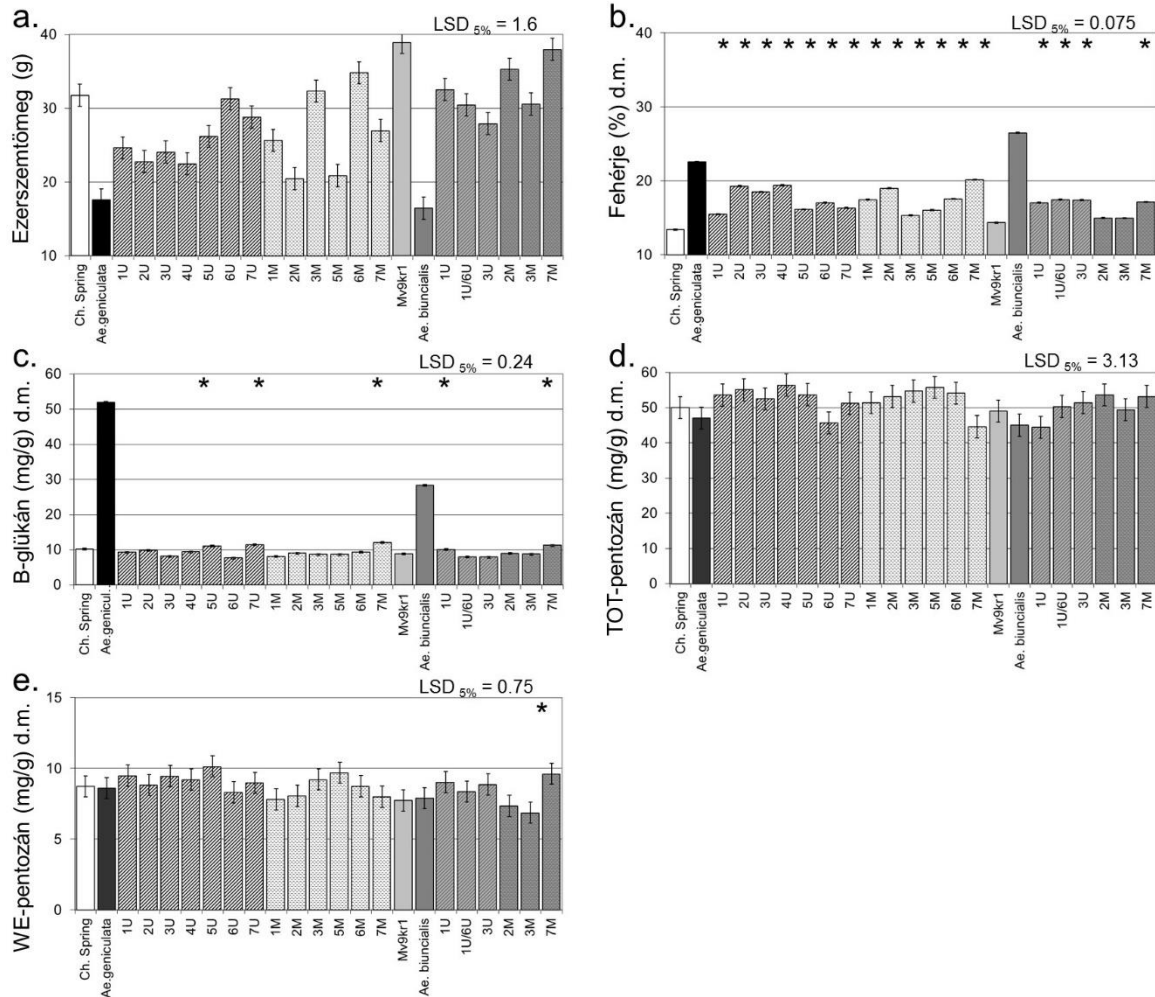
*: NCBI (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/>); **: EnsemblPlants (<http://plants.ensembl.org/>)

Melléklet 1. ábra. A 36 búzatörzs és a szülő kontrollok beltartalmi tulajdonságainak stabilitás-vizsgálata GGE biplot analízissel (a. ezerszemtömeg, b. fehérjetartalom, c. Keményítőtartalom, d. teljes pentozántartalom (TOT-pentozán), e. vízoldható pentozántartalom (WE-pentozán), f. liszt vízfelvétele) (2013–2017). **x**-genotípus, **+**- környezet, **o**- átlag környezet (AEC).



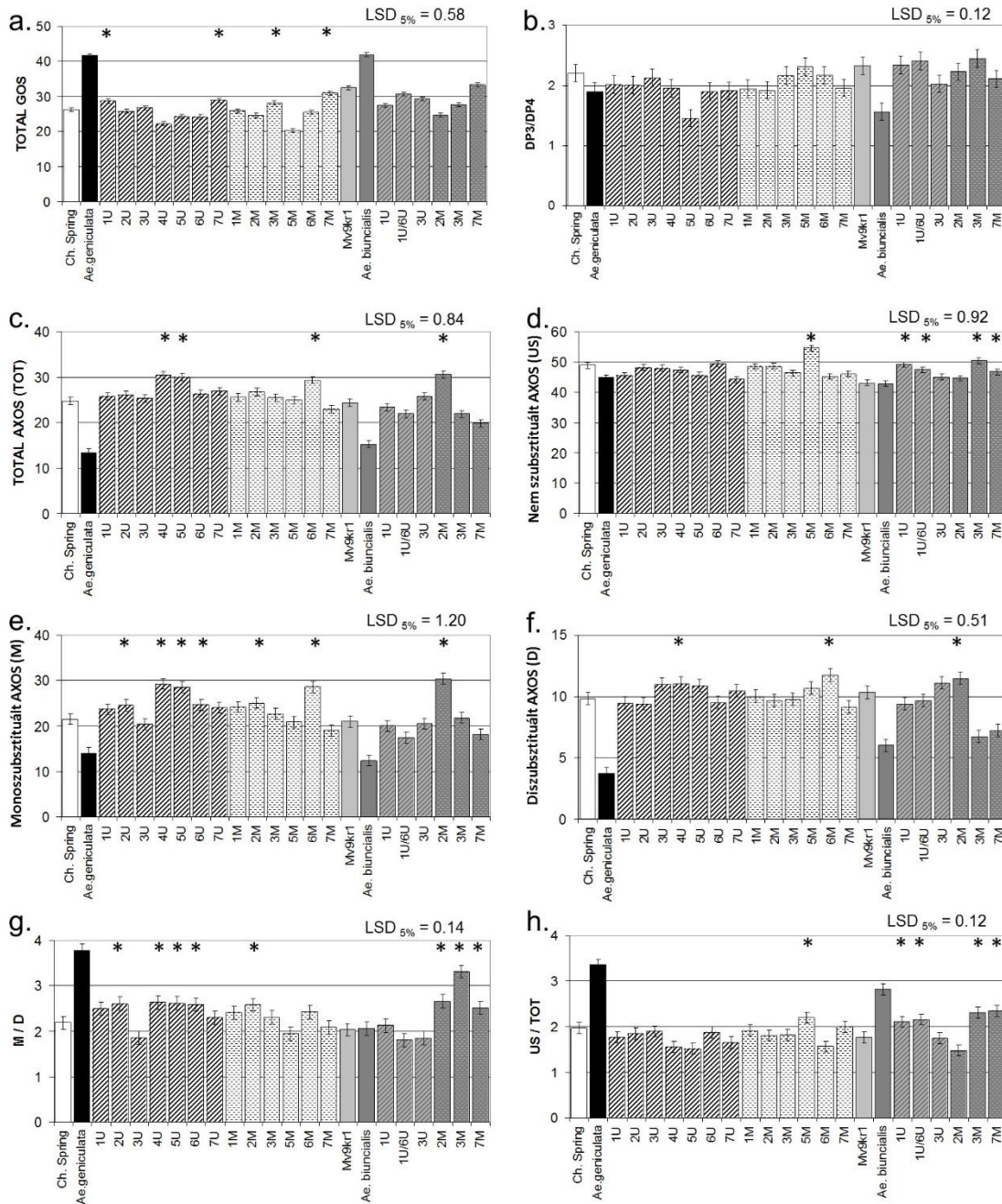
Melléklet 2. ábra. Két búzatörzs (cv. Chinese Spring és Mv9kr1), két *Aegilops* faj (*Ae. geniculata*, *Ae. biuncialis*) és búza–*Aegilops* kromoszóma addíciós vonalak beltartalmi összetétele érett állapotban, szántóföldi kísérletben, a 2012/2013 szezonban, ahol a. Ezerszemtömeg, b. Fehérje, c. β -glükán, d. TOT-pentozán, e. WE-pentozán-tartalom. (LSD – legkisebb szignifikáns különbség, TOT – teljes, WE – vízoldható).

*a búza kontrollnál (*T. aestivum*) szignifikánsan nagyobb.



Melléklet 3. ábra. Arabinoxilánmolekula-egységek mennyisége és enzimes ujjlenyomata két búza genotípusban (cv. Chinese Spring és Mv9kr1), két *Aegilops* fajban (*Ae. geniculata*, *Ae. biuncialis*) és búza–*Aegilops* kromoszóma addíciós vonalakban, érett állapotban.

a. β -glükán-molekulaegységek mennyisége enzimes emésztés után (GOS), b. DP3 és DP4 egységek aránya, c. TOT-AXOS, d. arabinóz szubsztitúció nélküli AXOS (US), e. Monoszubsztituált AXOS (M), f. Diszubsztituált AXOS (D), g. M/D arány, h. US/TOT arány.



Az AXOS arabinóz-szubsztitúció nélküli, a monoszubsztituált, a diszubsztituált xilóz láncainak mennyisége a görbe alatti területek értékéből származik, és az alábbiak szerint számoljuk őket:

$$(M) = (XA^3XX) + 2(XA^3A^3XX) + 2(XA^3XA^3XX) + (XA^3A^{2+3}X) + (XA^3XA^{2+3}XX),$$

$$(D) = (XA^{2+3}XX) + (XA^3A^{2+3}X) + (XA^3XA^{2+3}XX),$$

$$(US) = X+XX+XXX, \text{ valamint}$$

$$(TOT) = X+XX+XXX+XA^3XX+XA^3A^3XX+XA^3XA^3XX+(XA^{2+3}XX) + (XA^3A^{2+3}XX) + (XA^3XA^{2+3}XX)$$