



Élelmiszertudományi Kar

Doktori értekezés

**MÓDSZER KENYÉRBÉLZET ÁLLOMÁNYJELLEMZŐINEK
MEGHATÁROZÁSÁRA**

Készítette:

Lambertné Meretei Anikó

Konzulensek:

dr. Fekete András
egyetemi tanár

dr. Baranyai László
egyetemi docens

Budapesti Corvinus Egyetem
Élelmiszertudományi Kar
Fizika-Automatika Tanszék

Budapest, 2012

A doktori iskola

megnevezése: Élelmiszertudományi Doktori Iskola

tudományága: Élelmiszertudományok

vezetője: Fodor Péter, DSc
egyetemi tanár
Budapesti Corvinus Egyetem
Élelmiszertudományi Kar
Alkalmazott Kémia Tanszék

Témavezetők: Fekete András, DSc
egyetemi tanár

Baranyai László, PhD
egyetemi docens

Budapesti Corvinus Egyetem
Élelmiszertudományi Kar
Fizika-Automatika Tanszék

A doktori iskola- és a témavezető jóváhagyó aláírása:

A jelölt a Budapesti Corvinus Egyetem Doktori Szabályzatában előírt valamennyi feltételnek eleget tett, a műhelyvita során elhangzott észrevételeket és javaslatokat az értekezés átdolgozásakor figyelembe vette, ezért az értekezés védési eljárásra bocsátható.

.....

Az iskolavezető
jóváhagyása

.....

.....

A témavezetők jóváhagyása

A Budapesti Corvinus Egyetem Élettudományi Területi Doktori Tanács 2012. október 2-i határozatában a nyilvános vita lefolytatására az alábbi bíráló Bizottságot jelölte ki:

BÍRÁLÓ BIZOTTSÁG:

Elnöke

Vatai Gyula, DSc

Tagjai

Seres István, PhD

Gyimes Ernő, PhD

Mohos Ferenc, CSc

ifj. Biacs Péter, PhD

Opponensek

Véha Antal, CSc

Szalai Lajos, CSc

Titkár

Zsomné Muha Viktória, PhD

TARLOMJEGYZÉK

1. Bevezetés	5
2. Irodalmi áttekintés	6
2.1. Sütőipari termékek minősítése	6
2.1.1. Érzékszervi minősítés	7
2.1.2. Fizikai jellemzők	8
2.2. Mérési módszer kiválasztásának szempontjai:	9
2.3. A kenyérbélzet tulajdonságai	11
2.3.1. A kenyérbél kolloidikája.....	11
2.3.2. A kenyér bélzetének reológiai tulajdonságai	15
2.3.3. A kenyérbélzet mechanikai tulajdonságai.....	20
2.4. A mérési elvek áttekintése	21
2.5. Kenyérbélzet vizsgálatára alkalmazott módszerek	23
2.5.1. Húzó igénybevétel	24
2.5.2. Kompressziós vizsgálatok	25
2.6. Az irodalom értékelése.....	28
3. Célok.....	29
4. Anyagok és módszerek.....	30
4.1. Mérőműszerek bemutatása.....	30
4.1.1. Az <i>Elastigráf</i>	30
4.1.2. A <i>TA.XT2</i> állománymérő.....	31
4.2. <i>Elastigráf</i> elvű mérés megvalósítása állománymérővel	34
4.3. Mérési módszer fejlesztése	35
4.3.1. Mérőfej kiválasztása	35
4.3.2. Terhelőerő meghatározása	36
4.3.3. Terhelési idő meghatározása	37
4.3.4. Mérési sebesség és a mintaelőkészítés menetének meghatározása.....	38
4.4. Módszer alkalmazhatóságának vizsgálata	39
4.5. Az új módszer kapcsolata más kenyérvizsgálati módszerekkel.....	40
4.5.1. <i>American Institute of Baking</i> szabványán alapuló módszer	41
4.5.2. <i>Texture Profile Analysis</i> vagy két harapás teszt	41
4.5.3. Tartós terhelés.....	43
4.6. Az adatok értékelése	43
5. Eredmények és értékelés	44
5.1. <i>Elastigráf</i> adaptációja precíziós állománymérő műszerre (<i>TA.XT2-re</i>).....	44
5.2. Mérési módszer fejlesztése	48
5.2.1. A mérőfej kiválasztása	49
5.2.2. Terhelőerő meghatározása	50
5.2.3. A terhelési idő meghatározása.....	50
5.2.4. Mérési sebesség meghatározása	57
5.2.5. A mintaelőkészítés és a terhelési mód hatásának vizsgálata	65
5.3. A módszer alkalmazhatóságának vizsgálata	79
5.4. Az új módszer kapcsolata más módszerekkel.....	90
5.4.1. Az új módszer kapcsolata az <i>AIB</i> szabvánnyal	90
5.4.2. Az új módszer kapcsolata a <i>TPA</i> módszerrel.....	92
6. Javaslatok további tudományos munkára és a gyakorlat számára.....	99
7. Összefoglalás.....	100
8. Új tudományos eredmények.....	102
9. Irodalomjegyzék.....	103
10. Melléklet.....	108

1. BEVEZETÉS

A kenyér ősidők óta az emberek alapvető élelmiszere, nagy energiaértéke mellett ma már egyre jobban előtérbe kerül az egészséges táplálkozásban betöltött szerepe is. A magasabb kiörlésű lisztből készült kenyerek ásványi-anyag, vitamin és élelmirost tartalmuknál fogva táplálkozás-élettanilag értékesebbek, mint a kisebb hamutartalmú fehér lisztből sütöttek.

Minden fogyasztónak egyéni véleménye van arról, hogy milyen is a jó kenyér. A pékségek sokféle kenyértípus gyártásával igyekeznek az eltérő igényeket kielégíteni. A sütőipari termékek általában természetes vagy mesterséges térfogatnövelő szerek hozzáadásával készülnek. A kelesztés során számos szén-dioxid buborék keletkezik a tésztában, ez adja a termékek bélzetének jellegzetes felépítését. A térfogat szoros kapcsolatban van a lazítottság mértékével, amit viszont a felhasznált adalékanyagok jelentősen befolyásolnak. A bélzetlazítottság minimális mértékét, a kenyér térfogatát jogszabály nem írja elő. A piaci verseny hatására a gyártók túlzott mértékben megnövelik a termékek térfogatát, amely a kenyér használati és élvezeti értékének csökkenését eredményezheti. A túllazított bélzet morzsalékos, nehezen szeletelhető, mechanikai szilárdsága kicsi, rugalmatlan.

A Magyar Élelmiszerkönyv a fogyasztók védelmében szigorú előírásokat tartalmaz, a kenyérről szemben támasztott követelményeket is meghatározott irányelvek alapján írja le. Ilyen például a kenyér alakja; íze és illata; héjának színe; valamint a bélzet színe, állománya, és rugalmassága. A kenyér minőségét a bélzettulajdonságok befolyásolják a legnagyobb mértékben. A fogyasztók elvárásai alapján az a bélzet tekinthető jó minőségűnek, amelynél a deformáló erő hatására bekövetkező alakváltozás nagy, tehát puha, és a teljes deformáción belül nagy a rugalmas alakváltozás részaránya, tehát rugalmas. A bélzet rugalmasságának meghatározására, a Magyar Szabvány az Elasztigráf alkalmazását követeli meg. Ezzel a berendezéssel határozták meg a bélzet reológiai tulajdonságát jellemző relatív rugalmasság minimális értékét is, amelyet a Magyar Élelmiszerkönyv legalább 0,8-nek ír elő. Ez azt jelenti, hogy a termék akkor felel meg a szabványban feltüntetetteknek, ha bélzete az összenyomást követően legalább 80 %-ban visszanyeri eredeti magasságát.

A gyártók körében egyre népszerűbb adalékanyagok használatával a mai kenyerek bélszerkezete ennek az elvárásnak általában már nem felel meg, jóval lágyabb, lyukacsosabb mint a régi kenyereké. A teljes deformáció értéke kívül esik az Elasztigráffal mérhető tartományon, a relatív rugalmasság meghatározása így bizonytalanná vált, ezért ez a műszer már nem alkalmas a ma forgalomban lévő kenyerek minősítésére.

Mint már említettem, a bélszerkezet nagy mértékben befolyásolja a vásárlók minőségről alkotott véleményét, a kenyér állományának vizsgálata ezért rendkívül fontos feladat. Munkám célja egyszerű és megbízható mérési módszer kidolgozása kenyérbélzet minőségi jellemzőinek meghatározására.

2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

2.1. Sütőipari termékek minősítése

A kenyér eredete rendkívül mély gyökerekig nyúlik vissza. Több ezer éves történelme azt igazolja, hogy az emberiség táplálkozásában mindig jelentős szerepet játszott, és még ma is a fogyasztók egyik alapvető élelmiszere. Éppen ezért nagyon fontos, hogy a termék - az állandóan változó fogyasztói igények, és az egyre inkább nyereségorientált piac mellett - megőrizze a minőségét.

Ennek megvalósítására törekszik a Magyar Élelmiszerkönyv, amely meghatározott irányelvek alapján írja le a kenyérről szemben támasztott követelményeket. Ilyen például a kenyér alakja, íze és illata, héjának színe, valamint a bélzet színe, állománya, és rugalmassága.

Ez utóbbi jellemző rendkívül fontos, ezt támasztja alá egy 1830-ból ránk maradt emlék, amelyben egy pékmester így nyilatkozik a jó kenyérről: „Az jó kenyérnek azt tartjuk, amely domború, héja se nem lágy, se nem felette kemény, sárga, vagy barna, de nem fekete, égett, oszt nincs elválva a béltől, sőt a béle szivós, oszt nem morzsolódik, meg ha bélit benyomják, ismét felduzzad, úgy magától...” (Csepregi Gy. 2003).

A kenyér megfelelő minőségének biztosítása változatlanul fontos szempont. A sütőipari késztermékek minőségének a szabványokban és egyéb előírásokban rögzített követelményeknek meg kell felelniük. A minőségvizsgálat módszereit is szabványok írják elő. A Magyar Élelmiszerkönyv pontos határértékeket és definíciókat ad meg a kenyér különböző minőségi jellemzőire. A 2-81 számú irányelv a sütőipari termékekre vonatkozó előírásokat tartalmazza. Az első részben általános előírásokat közöl a termékek köréről, az élelmezés-egészségügyi követelményekről, a felhasználható anyagokról, a csomagolásról, a tárolásról és szállításról, a forgalomba hozatalról valamint a jelölésről. Ezt fogalom meghatározás követi, ami a sütőipari termékekkel kapcsolatos kifejezéseket, jellemzőket, tulajdonságokat definiálja, mint pl. alaki hányados, bélzet, cserepesedés, héj, nyúlósodás, szalonnás bélzet stb.

A Magyar Élelmiszerkönyv 2-81/01 előírása kifejezetten a kenyerekkel, mint termékcsoporttal foglalkozik. E szerint a fejezet szerint a kenyereknek az alábbi feltételeknek kell megfelelniük:

a) Érzékszervi jellemzők alapján:

- *Alak*: a kenyértípusra jellemző, szabályos, arányosan domború, nem lehet: torz.
- *Héj*: a kenyértípusra jellemző színű, fényes, sima vagy cserepes esetleg szórt és/vagy vágott; nem lehet: végig repedt, kormos, szennyezett, égett, ázott, átnedvesedett, vagy feltűnően sérült.

- *Bélzet*: a kenyérbél átsült, héjtól nem elváló, felhasznált liszt jellegének megfelelő színű, egyöntetű állományú, rugalmas, csomómentes; nem lehet szalonnás, ragacsos, morzsálódó, széteső, nem tartalmazhat idegen anyagokat, csomókat és nem lehet mikroorganizmusok által károsított.
- *Íz és szag*: a kenyértípusra jellemző aromájú, nem lehet: idegen ízű és szagú.

b) Fizikai és kémiai jellemzők alapján

- Szárazanyagra vonatkoztatott *konyhasótartalom* legalább 1,5 %, legfeljebb 2,5 %
- Szárazanyagra vonatkoztatott *homoktartalom* érzékszervekkel nem lehet észlelhető, de legfeljebb 0,04 %
- *Alaki hányados* legfeljebb 2,2
- *Bélzetrugalmasság* (R/D) legalább 0,8
- *Savfok* legalább 3,0; a legalább 50 % BL 55 típusú lisztet tartalmazó kenyérnél legalább 2,5 (ebben az esetben a minőségmegőrzési időtartam legfeljebb: 24 óra)

A sütőipari gyakorlatban a minőség-ellenőrzés első lépése a kisütéskor történő szemrevételezés. A készterméknek meg kell felelnie a gyártmánylapon feltüntetett követelményeknek és természetesen a Magyar Élelmiszerkönyv előírásainak is. Nézzük meg részletesebben, mit is takarnak az érzékszervi és a fizikai jellemzők.

2.1.1. Érzékszervi minősítés

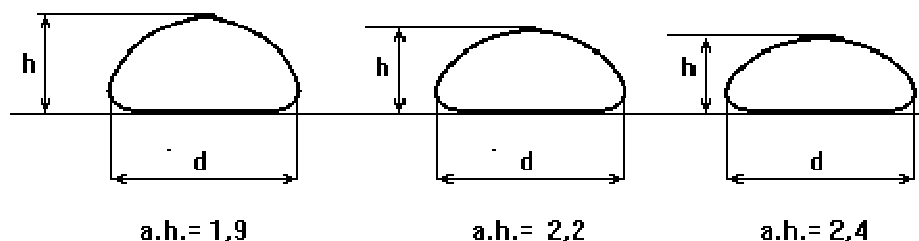
A sütőipari termékeknél nagy jelentősége van az érzékszervi minősítésnek. A termék alakját, héjának tulajdonságait, ízét, illatát bélzettulajdonságait pontozással értékelik. A pontokat tulajdonságcsopontonként adják. Egy-egy tulajdonságcsoporthoz legfeljebb 5 pont adható. Az elérhető összpontszám legfeljebb 20 lehet. Ezt az egyes tulajdonságcsoporthoz tartozó átlagpontszámok és súlyozó faktorok szorzatainak összegzésével nyerik. A kenyérfélék súlyozó faktorai az alábbiak:

- alak 0,6
- héj 0,6
- bélzet 1,4
- illat 0,4
- íz 1,01

A súlyozó faktorok nagysága az érzékszervi tulajdonságok fontosságát fejezi ki a fogyasztók megítélése szempontjából. Látható, hogy a legnagyobb súlyozó faktor a bélzettulajdonságokhoz tartozik, tehát a bélzet minősége döntő szerepet játszik a fogyasztók véleményében.

2.1.2. Fizikai jellemzők

Az *alaki hányados* a kenyér alakjára jellemző, dimenzió nélküli szám. Szabadon vetett kenyernél alkalmazzák, meghatározása a termék hosszanti irányában mért legnagyobb szélességéből (d) és legnagyobb magasságából (h) történik. A két érték hányados adja az alaki hányadost, melynek értéke – mint láttuk – legfeljebb 2,2 lehet.



1. ábra: Alaki hányados: a) jó, b) még éppen elfogadható, c) nem jó (Szalai nyomán, 2001)

A kenyér másik lényeges jellemzője a *térfogata*. A térfogatot általában a szabványban rögzített magkiszorításos módszerrel határozzák meg, cipóknál és 1 kg-os szabadon vetett kenyereknél azonban lehetőség van a geometriai paraméterek alapján történő térfogatbecslésre is.

A kenyérbélzet rugalmasságát a speciálisan erre a célra kialakított Elasztigráffal határozzák meg. A berendezés felépítését, működését Az Anyagok és módszerek című fejezetben későbbiekben ismertetem. A műszer az elasztigramnak nevezett diagramot rajzolja fel, melynek jellemző értékeit elasztigráf egységben fejezik ki, az erről leolvasható paraméterek a teljes deformáció (D) és a plasztikus alakváltozás (P), a kettő különbségéből számolható a rugalmas alakváltozás (R) mértéke. A rugalmas és teljes deformáció hányadosa (R/D) a *relatív rugalmasság*. Az Elasztigráf segítségével jól követhetők a kenyérbélzet tulajdonságainak változásai tárolás során. (Szalay, 2001), alkalmazása azonban a mai kenyereknél egyre több problémát vet fel. A ma gyártott friss kenyerekkel ez a vizsgálat már nem minden esetben végezhető el. Ennek több oka is van. A műszer nyomólapjának elmozdulását kb. 30 mm-re korlátozták (ez 1000 elasztigráf egységnek felel meg). Ez azt jelenti, hogy a maximális, megengedett deformáció értéke az 50 mm-es mintánál 60 %. Optimális esetben a kenyérbél a terhelést követően 80 %-ban visszaalakul, tehát a relatív rugalmasság értéke 0,8.

A mai termékek bélszerkezete sokkal lágyabb, mint a korábbi kenyereknél, az 1875g-os terhelésre a határértéknél nagyobb mértékű alakváltozást szenved. Mivel a műszer skálája limitált, nem képes ábrázolni a bélzetben fellépő alakváltozások mértékét, így a mai kenyerek bélzete a műszerrel mérhető tartományon kívül esik. Ezért vált szükségessé új, alkalmas módszer kidolgozása. (Szalai, 2003)

2.2 Mérési módszer kiválasztásának szempontjai:

Az élelmiszerek minősítésénél a három fő szempont a megjelenés, az íz és az állomány. Ha ebből a három faktorból akár csak egyetlen egy nem éri el a megfelelő szintet, akkor az élelmiszer nem kerül fogyasztásra, vagy ha igen, akkor negatív visszajelzést eredményez a fogyasztók részéről. A bélzettulajdonságok igazából a kenyér állományvizsgálatával jellemezhetőek. Az állomány nem írható le egyetlen tulajdonsággal, sokkal inkább több jellemző együtteseként fogható fel. Az állománynak a következő jellegzetességei vannak:

- a fizikai tulajdonságok egy csoportja
- az élelmiszer szerkezetéből ered
- a mechanikai vagy a reológiai tulajdonságokhoz sorolható
- érzékszervi analízissel jól meghatározható.

Az állomány objektív mérésénél, a megfelelő mérési módszer kiválasztásánál a következő szempontokat kell figyelembe vennünk (Bourne, 2002):

1.) a vizsgált anyag természete

A vizsgált anyag halmazállapota, tulajdonságai és szerkezete (folyékony, szilárd, rideg, plasztikus, homogén, heterogén) alapvetően meghatározzák, milyen mérőműszert választunk. Szilárd és félszilárd élelmiszerek esetén általában egytengelyű összenyomást használunk, míg viszkózus anyagoknál a vizsgálati módszer jellemzően forgó mozgáson alapul.

2.) a mérés célja

A következő lépésben el kell döntenünk, hogy a kialakított mérést milyen célra kívánjuk majd használni: minőségellenőrzésre, szabványok kidolgozására, termékfejlesztésre esetleg alap kutatásra. Minőségellenőrzésre inkább az egyszerűbb, de gyors módszerek alkalmasak. Összetettebb problémák esetén, melyek megoldása kutatólaboratóriumokban történik vagy termékfejlesztésnél célszerűbb összetettebb, kifinomultabb műszereket, módszereket alkalmazni.

3.) a módszer pontosságának meghatározása

Nem elhanyagolható szempont az sem, hogy milyen pontossággal kívánunk mérni. A vizsgált anyagra jellemző szórás, az ismétlések száma és a minta mérete mind meghatározzák az elérhető pontosságot. A legtöbb élelmiszere jellemző a nagy variabilitás, a variációs koefficiens értéke 10-20 %, egyes esetekben ennél magasabb is lehet. Éppen ezért olyan műszerre és módszerre van szükség, amely gyorsan dolgozik, ezáltal nagy ismétlésszámot tesz lehetővé. A pontosság itt másodlagos szerepet játszik, hiszen nem sok értelme lenne az állományjellemzők 1 %-os pontossággal történő meghatározásának 20 %-os szórás mellett.

4.) roncsolásos vagy roncsolásmentes legyen-e a vizsgálat

A roncsolásos vizsgálatok – ahogyan a névből is következik – roncsolják a minta szerkezetét, ezért egy mintát csak egyszer mérhetünk vele, nem alkalmasak ismételt mérés elvégzésére. Ezzel szemben a roncsolásmentes vizsgálatok során a mintát olyan csekély igénybevételnek tesszük ki hogy egy mintán a mérés többször is elvégezhető és az ismételt mérés az előzőekkel közel azonos eredményt ad. Mivel az élelmiszerek nagy részének állományáról a rágás során kapjuk a legtöbb információt, a roncsolásos mérés logikus választásnak tűnik.

5.) költségek

A berendezés ára, a karbantartási és üzemeltetési költségek is meghatározhatják, hogy milyen mérés mellett döntünk. Ezt befolyásolja még, hogy a berendezést rendszeresen vagy csak alkalmanként használjuk-e, és a mérés elvégzése igényel-e képzett munkaerőt vagy sem.

6.) idő

Mennyi idő áll rendelkezésre a tesztek elvégzésére? A rutinszerű minőségellenőrzési vizsgálatok gyorsan elvégezhető és kiértékelhető mérést igényelnek. Kutatási, termékfejlesztési célokra több állományjellemző együttes meghatározására van szükség, ami időigényesebb méréssel valósítható csak meg.

Ha mindezeket a fő szempontokat figyelembe vesszük és a kérdésekre határozott válaszokat sikerült adni, valószínűleg már meg is találtuk az ideális mérőműszert. Természetesen a választott berendezés alkalmasságáról minden esetben meg kell győződnünk, ami további lépéseket igényel.

1.) megfelelő mérési elv kiválasztása

A vizsgált termék tulajdonságai alapvetően meghatározzák az alkalmazott mérési elvet. Például a rugalmas anyagokat nem célszerű töréstesztnek alávetni, a rideg anyagoknál a lyukasztási próba kevésbé használható és kenyerek, kekszek vizsgálatára az extrúziós mérési módszer teljesen alkalmatlan. Sokszor segít, ha megfigyeljük, hogyan végzik az érzékszervi minősítést. Ha a bírálók finoman összenyomják a terméket, akkor érdemes megfontolni a deformációs vizsgálat alkalmazását. Ha minősítés során meghajlítják vagy eltörik a mintát, akkor ezt az elvet célszerű alkalmazni. Ha beleharapnak a mintába, akkor a vágás/nyírás elvén alapuló méréseknek az előzetes vizsgálatoknak mindenképpen helye van.

2.) kiválasztott műszerek, mérési elvek tesztelése

Mire a mérési módszer kidolgozásában eddig jutunk, valószínűleg már csak néhány berendezés és mérési elv maradt, amire módszerünket építhetjük. Ezek mindegyikének alkalmazhatóságát gondosan meg kell vizsgálnunk. Amennyiben valamelyik nem ad megfelelő eredményt elegendő számú, gondosan végzett mérés után sem, azt a műszert, vagy mérési elvet a további vizsgálatokból ki kell zárunk. Ha univerzális mérőműszerünk van – mint amilyen az Instron és

a Lloyd UTM vagy a TA-XT2 Texture analyser – egyszerűbb a dolgunk. Ez esetben más mérőfejjel, más beállításokkal esetleg más mérési móddal próbálkozhatunk.

3.) finomítások

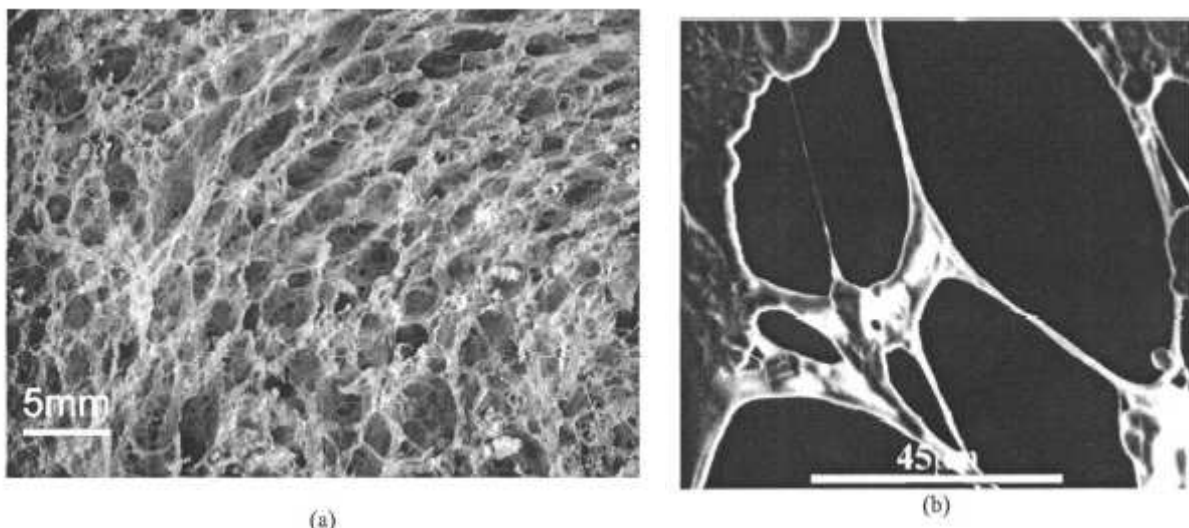
A választott berendezés és mérési összeállítás tesztelése a következő feladat. Ebben a lépésben határozzuk meg a mérés pontos menetét, a mintaelőkészítés módját, a mérés sebességét, idejét, az alkalmazott erők nagyságát stb. Ha az összes finomítást elvégeztük és pontosan meghatároztuk az összes lehetséges paramétert, akkor módszerünk készen áll arra, hogy a meghatározott célnak megfelelően a gyakorlati életben használhassuk.

Munkámban a kenyérbélzet vizsgálatának tükrében ezekre a kérdésekre kerestem választ.

2.3. A kenyérbélzet tulajdonságai

2.3.1 A kenyérbél kolloidikája

A kolloidika a természetes és mesterséges anyagok eloszlási állapotával foglalkozik. A kenyérbélzet lágy szilárd anyag, (Scanlon et al., 2000) sok más élelmiszerhez hasonlóan makroszkopikus szinten egy szilárd és egy fluid fázisból áll (Campbell és Mougeot, 1999). A szilárd fázist a pórusok anyaga a fluid fázist pedig levegő alkotja. Ha egy kenyérszelet felületét nézzük szembetűnő, hogy a szilárd fázis összefüggő szerkezetet alkot, a levegőbuborékok zártak. A három dimenziós szerkezetet tekintve ez azonban csak részben igaz, hiszen a pórusok egy része egymással összefügg, ezt mikroszkópos szerkezetvizsgálatok bizonyítják. A két frakció térfogataránya és kapcsolatuk jellege határozza meg a kenyér szerkezetét és így a mechanikai tulajdonságait.



2. ábra: a) a bélzet kamerával rögzített képe (Liu et al, 2003) és b) egy pórus pásztázó elektronmikroszkópos képe (Stokes és Donald , 2000)

A kialakuló szerkezetet a nyersanyagok és a készítés során alkalmazott technológiai paraméterek nagymértékben befolyásolják, érdemes tehát áttekintenünk, hogyan alakul ki a fent említett két fázis.

A kenyerek alapvető összetevői a liszt, a víz, az élesztő és a só. Annak érdekében, hogy ezekből a komponensekből a kenyérbélzet szerkezete kialakuljon, különféle műveleteket kell elvégeznünk és egy sor átalakulási folyamatnak kell lezajlania. A késztermék kialakulásának jellegzetes szakaszai a következők:

- 1.) alapanyagok összekeverése és a tészta kialakulása (dagasztás, tésztaérés)
- 2.) a jellegzetes hab állag kialakulása (kelesztés, pihentetés)
- 3.) a porózus szerkezet stabilizálása (sütés).

Most nézzük meg részletesen a fent említett három szakaszt.

1.) dagasztás, tészta kialakulása

A kenyérbélzet készítés első szakaszában a megfelelően előkészített nyersanyagokat összekeverik. A tészta szerkezetének kialakításához mechanikai munka befektetésére van szükség, ezt dagasztó vagy keverő berendezéssel biztosítják. A dagasztás során indulnak el azok a lényeges fizikai és kémiai változások, melyek a tésztaérés végére teljessé válnak és melyek eredményeként kialakul a további feldolgozásra alkalmas tészta.

a.) Hidratáció: A keverés alatt nemcsak a nyersanyagok homogenizálása történik meg. Ekkor kezdődik el a hidratáció is, melynek során a liszt különböző összetevői vizet kötnek meg. A fehér búzaliszt kb. 71 %-a szénhidrát (ennek nagy része keményítő), 13 %-a fehérje, 1 %-a lipid, nedvességtartalma kb. 14 %. A tésztát alkotó víz legnagyobb részét a fehérjemolekulák hidrofíl csoportjai kötik meg, a keményítőszemcsék hidratálódása is jelentős.

b.) A síkérháló kialakulása: A lisztben található fehérjék két csoportra oszthatók, vannak vízoldhatók és vízben oldhatatlanok. Ez utóbbiak átalakulásával magyarázható, hogyan alakul ki a lisztből és a vízből a tészta jellemző, homogén, térhálós szerkezete (Weegels et al., 1996). A keverés során a fehérjék – melyek a lisztben lévő lipidekkel és a szénhidrátok egy részével komplexet alkotnak – összefüggő, viszkoelasztikus, síkérhálósá alakulnak. Ez a fehérjemátrix zárja magába a levegőbuborékokat, a keményítőszemcséket és más alkotókat mint pl. a korparészecskéket és azt a folyadékfázist is, ami később a pórusok kialakításában fontos szerepet játszik.

A kenyérbélzet szerkezete szempontjából nagyon lényeges, hogy a dagasztás során a síkérháló kialakulása optimális legyen. Zghal és munkatársai (1999) megállapították, hogy a glutén minősége döntően meghatározza a késztermék sűrűségét. A dagasztóberendezést elhagyó rugalmas, térhálós szerkezetű anyag alkotja tehát a későbbiekben a kenyérbélzet pórusfalát. A késztermék térfogata tulajdonképpen a tészta nyújthatóságát jellemzi (Gandikota és MacRitchie, 2005), ennek

mértéke pedig attól függ, milyen vékonyra lehet a kialakult glutén-keményítő mátrixot nyújtani anélkül, hogy elszakadna.

c.) *A levegőzárványok kialakulása:* A tészta korábban még nem említett, de lényeges összetevője a levegő. A levegő két forrásból származhat a tésztában: vagy a lisztreszecskek közötti levegő szorul be a kialakuló síkérhálóba, vagy a keverés alatt a tészta mozgása során a környezetből kerül be oda. Mivel a további folyamatok során a levegőbuborékok száma nem, csak a térfogata változik, lényeges, hogy a dagasztás során a lehető legtöbb levegőt jutassuk a kialakuló fehérjemátrixba.

2.) a porózus szerkezet kialakulása

Függetlenül attól, hogy a levegő az intenzív keverés során kerül a tésztába vagy a dagasztás-nyújtás során aprózodnak el a nagy légbuborékok, a kezdeti légzárványok száma jelentősen befolyásolja a késztermék minőségét (Shah et al., 1998). Az élesztő által termelt széndioxid egy része a tésztában lévő nedvességben feloldódik, másik része a dagasztás során kialakult légzárványokban gyűlik össze, ennek hatására a pórusok kitágulnak, ezáltal a tészta sűrűsége csökken. Ez a folyamat a kelesztés során megy végbe. A gázbuborékok növekedésének mértéke függ a tésztában elfoglalt helyüktől, a felszínhez közel ugyanis kisebb nyomás nehezedik a pórusfalakra, így könnyebben kitágulnak. Ennek következtében a fluid fázis egy része, a tészta alsóbb régióinak irányába vándorol (Bloksma, 1981). A búzalisztből készült tészták viszkozitása azonban elég magas ahhoz, hogy ez az átrendeződés a tészta szerkezetében ne okozzon lényeges változást (Kokelaar és Prins 1995).

3.) a porózus szerkezet stabilizálódása

A sütés során közölt hő hatására a tészta anyaga jelentős változáson megy keresztül. A sütés kezdeti szakaszában az élesztősejtek gáztermelése fokozódik a tészta kelés folytatódik. A hőmérséklet további emelkedésével az élesztősejtek elpusztulnak, a tészta térfogatnövekedés azonban a gázok tágulása miatt ekkor a legnagyobb. Ennek a térfogatnövekedésének a héjképződés szab határt (Zhang et al., 2007) A tésztában a legjelentősebb változások 60-80 °C-on mennek végbe. Ekkor a síkérfehérjék kicsapódnak, elveszítik nyújthatóságukat, megszilárdulnak, a felvett vizet leadják. Ezt a vizet a keményítő megköti, gellé duzzad, a tészta viszkózus tulajdonságai erősödnek, rugalmassága csökken (Mondal és Datta, 2008). A fehérjék kicsapódása és keményítő duzzadása következtében a tészta megszilárdul, e két folyamat eredményeként alakul ki a kenyérbél. A pórusfalak egy része a növekvő nyomás hatására átszakad, a cellák egy része összeolvad.

Az eddig leírtak alapján a kenyérbél tehát rendkívül összetett kolloid rendszer. Polidiszperz, keményítő és fehérje részeket tartalmazó liofil hidrogél. A termékbélre jellemző, hogy a szilárd

fázisban levegőbuborékok vannak elosztatva. Ezért akár szilárd habnak is tekinthetnénk, azonban a szilárd fázis szintén összetett. Vázát fehérjemolekulákból álló hidratált, denaturált síkergél alkotja, amelyben elcsirizesedett keményítőszemcsék találhatók diszpergált fázisként. A fehérjégél szintén összetett. A folyékony fázisban nem kolloid jellegű komponensek is találhatók, mint például különböző sók.

A liogélek változó rendszerek, az idő függvényében lassú átalakuláson mennek keresztül. Egyik rájuk jellemző folyamat az, amelynek során a liogél zsugorodni kezd, amelynek az oka elsősorban a diszpergált részecskék tömörülése, valamint a diszperziós közeget képző folyadék egy részének elpárolgása a rendszerből. Ez a jelenség a szinerézis, ami az öregedés folyamatának is az alapja.

Az öregedés során az elcsirizesedett keményítő, az általa megkötött víz bizonyos részét elengedi, miközben összezsugorodik. Gasztonyi és Bogdáné (1985) megállapítása szerint így a kenyérbél nedvességtartalma nem változik (tehát nem szárad!), viszont megváltozik a víz jelenlétének módja. A kenyér héja elveszíti fényét, megpuhul, szívóssá válik, a bélzet szerkezete szintén átalakul, morzsalékos, majd szikkadt lesz. Ez a jelenség negatív irányban hat a termék minőségére, csökkenti a kenyér élvezeti értékét. A folyamat visszafordíthatatlan, nem állítható meg, csak lassítható. Öregedéskésleltető eljárások közül eredményesen alkalmazzák a különböző adalékokat, amelyek többsége felületaktív anyag (pl. glicerin-monosztearát), de hatékony lehet kismennyiségű zsiradék adagolása is.

A fagyasztásnak szintén öregedéslassító hatása van. Csökkenti a bekövetkező fizikai változások sebességét, hiszen a víz átrendeződés -7 és $+60$ °C között megy végbe gyors ütemben. Ezáltal a bélzet szerkezete tovább megőrzi eredeti, vagy ahhoz közeli állapotát.

Az öregedés folyamatát csökkenti az alacsony amilóztartalmú búzák alkalmazása is. A teljesen waxy búzák nagyon kevés amilózt tartalmaznak. Az amilóz-amilokpektin arányának változása miatt a keményítő gélesedési, duzzadási tulajdonságai megváltoznak, ami módosítja a késztermék állományának jellemzőit. Waxy búza felhasználása éppen ezért csökkenti a keményítő retrogradációjának beindulását (Graybosch, 1998). Számos kísérlet irányult a waxy búzáknak a kenyér eltarthatóságára gyakorolt hatásának vizsgálatára. A waxy búza lisztjét tartalmazó kenyerek kisülés után puhábbnak bizonyultak, mint a vad típusú búzáknak lisztjéből készültek (Morita et al., 2002; Yi et al., 2009). Csökkentett amilóztartalmú liszt alkalmazása a francia kenyereknél lágyabb bélzetszerkezetet eredményezett (Park and Baik, 2007). Waxy búzaliszt 10-50 % -os adagolása mellett a fehér kenyerek térfogata sütés után nagyobb volt (Bhattacharya et al., 2002; Morita et al., 2002); bár a cipók a tárolás során összeestek és a sütést követő 24 órában jelentősen összetöppörödtek (Lee et al., 2001; Morita et al., 2002). Az alacsony amilóztartalmú lisztből készült

kenyerek bélzete a kontrollcsoporthoz viszonyítva sokkal nyitottabbnak és porózusabbnak mutatkozott (Lee et al., 2001; Hung et al., 2007).

2.3.2. A kenyér bélzetének reológiai tulajdonságai

A reológia az anyagok külső erők hatására bekövetkező alakváltozásait, deformációját, folyási tulajdonságait tanulmányozza az időhatás figyelembevételével. A termékekre jellemző reológiai tulajdonságok kiválóan alkalmazhatók az élelmiszerek jellemzésére valamint minősítésére.

Mint láttuk a kenyér minőségét alapvetően befolyásolják a bélzet fizikai tulajdonságai. A fogyasztók elvárásai alapján az a bélzet tekinthető jó minőségűnek, melynél a deformáló erő hatására létrejövő alakváltozás nagy és a teljes alakváltozáson belül nagy a rugalmas deformáció részaránya. A bélzet kialakulása azonban mint láttuk, összetett folyamat, régóta ismert, hogy a tészta reológiai tulajdonsága a kenyérgyártás minden lépésében fontos szerepet játszik. A tészta és a kenyér reológiai tulajdonságainak meghatározása azonban korántsem egyszerű folyamat. A kenyértészta számos összetevőből felépülő, többfázisú rendszer. Már az összetevők tulajdonságai is nagyban befolyásolják reológiai tulajdonságait, ezáltal a tészta feldolgozhatóságát, alakíthatóságát. Ezen tulajdonságok jó részét a különböző összetevők kölcsönhatásai határozzák meg. Majdnem az összes komponens hozzájárul a tészta reológiájának kialakulásához, a legnagyobb befolyást azonban a liszt, a víz, az élesztő és a levegő gyakorolja a kialakuló szerkezetre.

A liszt esetében a főszerepet a fehérje frakció, a glutenin és a gliadin játsza. A gliadin kisebb molekulájú fehérjék csoportja, elsősorban a tészta viszkózus tulajdonságaiért felelős. A glutenin molekulásúlya jóval nagyobb, mint a gliadiné és a tészta elasztikus tulajdonságait befolyásolja. Ezek a sikérfehérjék a vízzel térhálós szerkezetet alakítanak ki, az így kialakult fehérjemátrixba épül aztán be a többi komponens és ez zárja magába a levegőt és a később keletkező gázokat is.

A víz szintén meghatározó komponens, szerepe van a sikérfehérjék és a keményítő hidratációjában, valamint az élesztő tevékenysége során keletkező szén-dioxid feloldásában is. Ha a tésztakészítéskor nem áll elegendő víz rendelkezésre, a sikérfehérjék nem tudnak teljesen hidratálódni, ezért a tészta rugalmas tulajdonságai nem jutnak érvényre. Ha azonban a vizet túladagoljuk, akkor a tészta viszkózus tulajdonságai kerülnek előtérbe, a tészta kevésbé kel meg, ragacsos lesz.

A dagasztás során ügyelni kell a megfelelő mennyiségű levegő tésztába juttatására is, itt a levegő oxigéntartalma fontos. Elegendő oxigén jelenlétében a kialakuló tészta rugalmasabb lesz, ezáltal nyújthatósága, gázvisszatartó képessége javul.

Az élesztő tevékenysége meghatározó folyamat a tészta szerkezetének kialakulásában. A sejtek által termelt szén-dioxid a jelenlévő vízben feloldódik így csökkenti a pH-t. Ez a csökkenés a sikérfehérjék konfigurációját enyhén megváltoztatja, így hatással van a reológiai tulajdonságokra is

(Tanaka et al. 1967, Harinder és Bains 1990). A tésztaérés és kelesztés során az élesztő működésének következtében a tészta elasztikus tulajdonságai egyre hangsúlyosabbá válnak, a viszkózus tulajdonságai kevésbé dominálnak (Hoseney et al., 1979).

A fent említett komponensek a kenyérfőzés folyamata során kölcsönhatásba lépnek egymással, átalakulnak ezzel a tészta és a késztermék reológiai tulajdonságait a teljes gyártás során meghatározzák. Az intenzív dagasztás fő feladata az összetevők homogén keverékké dolgozása és a levegő tésztába való bejuttatása. A művelet során a fehérjemolekulák szétnyílnak, az aktív csoportok szabaddá válnak, a víz egyenletesen eloszlik a kolloid szerkezetben. Az intenzív dagasztás végén kapott pasztaszerű anyag síkérhálóval még nem rendelkezik és nem is mutatja a jellegzetes tészta tulajdonságokat. Az ezt követő néhány percben és a tésztaérés során a fehérjék duzzadása teljessé válik, kialakul a síkér jellegzetes, térhálós szerkezete (Szalai, 2001)

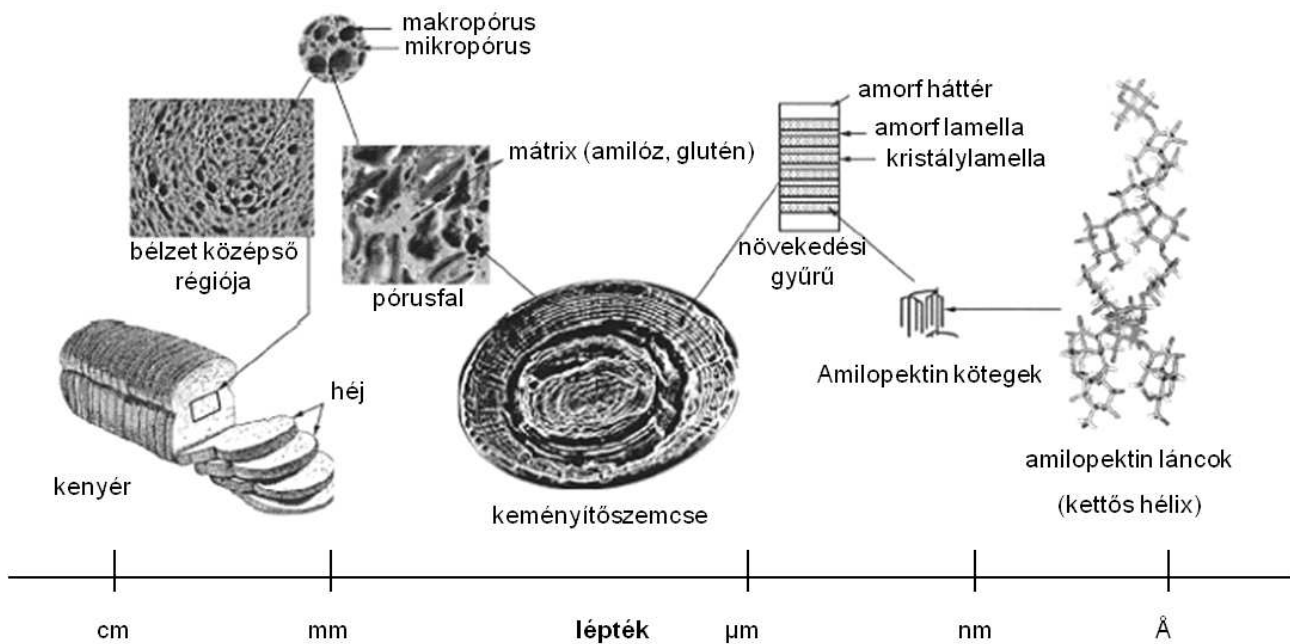
Az érett tészta reológiai tulajdonságai különösen fontosak a gyártás következő lépéseiben. A tésztaosztás és gömbölyítés során nagyon lényeges a viszkoelasztikus tulajdonságok egyensúlya. Ha a tészta túl viszkózus, akkor túlságosan folyik ezen lépések során, a kialakított formát nem tartja meg. Ha a tészta rugalmas tulajdonsága nagyon domináns, akkor a gömbölyítés nehézkessé válik, nem lehet a kívánt formát kialakítani.

A fenti két művelet során a tészta szerkezete az erős igénybevétel miatt sérül, ezért a további lépések megkezdése előtt köztés pihentetésre van szükség. Természetesen ez is fontos szerepet játszik a megfelelő reológiai tulajdonságok kialakulásában. A kirugózásnak van ekkor nagy jelentősége, hiszen lényeges, hogy a pihentetés végére a tészta visszanyerje rugalmasságát, szerkezete regenerálódjon.

A következő művelet a második gömbölyítés és a hosszformázás – a tésztaosztáshoz és a gömbölyítéshez hasonlóan – itt szintén fontos a viszkózus és elasztikus tulajdonságok egyensúlya, hogy a kívánt formát elérjük.

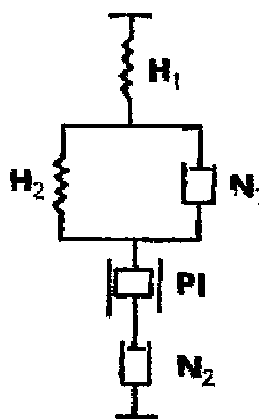
A kelesztés során alakul ki a termék jellegzetes, végleges alakja. Ekkor a rugalmas tulajdonságnak kell jobban érvényesülnie a viszkózussal szemben, a tésztának a keletkező gázokat vissza kell tartania, a pórusok tágulását lehetővé kell tennie.

A sütés alatt a tészta reológiája drasztikusan megváltozik, amíg kenyérré alakul. A sütés ideje és hőmérséklete nagy szerepet játszik ezekben a változásokban (Moore és Hoseney, 1986, Junge és Hoseney, 1981). A viszkózus tulajdonságok aránya a rugalmassal szemben jelentősen csökken a tészta melegezése során, különösen igaz ez 55 és 75 °C között (Dreese et al., 1988). A rugalmas tulajdonság erősödése a síkérfehérjék denaturálódásának és az egyéb komponensekkel történő kölcsönhatásának köszönhető. Az így kialakuló kenyérbélzet – mint már említettük – komplex kolloid rendszernek tekinthető: szilárd hab, melynél a levegőbuborékok a szilárd vázban vannak elosztatva, ugyanakkor a szilárd váz további belső szerkezettel is rendelkezik. (3. ábra).



3. ábra: a kenyérbélzet felépítése (Liu és Scanlon nyomán, 2003)

Ennek következtében a reológiai tulajdonságai szintén összetettek. Az áttekinthetőség érdekében megalkották a termék reológiai modelljét, amely két Hooke, két Newton és egy plasztikus elem kapcsolásával érhető el. A testeket sorba és párhuzamosan egymáshoz illesztve kapott modell kiválóan jellemzi a kenyérbél tulajdonságait. (4. ábra)



4. ábra: A kenyérbél mechanikai modellje (Gasztonyi és Bogdáné nyomán, 1985)

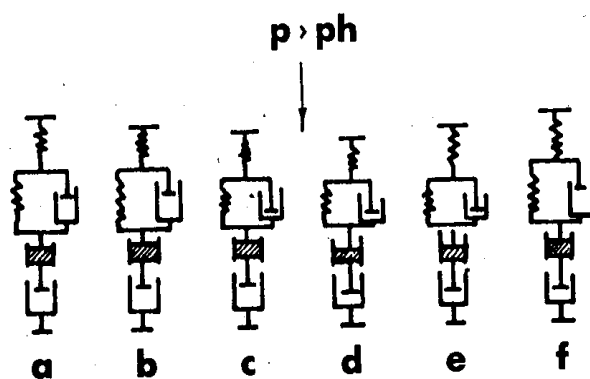
Hooke-test: mechanikai modellje a rugó, amellyel a kenyérbél elasztikus tulajdonsága jellemezhető. A deformációs erő és a deformáció között egyenes arányosság van, terhelés megszűnése után a rugó tökéletesen visszanyeri eredeti alakját.

Newton-test: mechanikai modellje a folyadékfék, amely egy hengerben mozgó dugattyú. A hengerben folyadék található. A modellel a kenyérbél folyási tulajdonsága jellemezhető, amely egy folyamatosan előrehaladó, irreverzibilis alakváltozás. A deformációs erő a nyírófeszültség, amely lineáris kapcsolatot mutat a nyírósebességgel. Ugyan kezdetben a terhelés hatására az alakváltozás gyorsul, azonban az egyensúly rövid idő elteltével beáll, és egyenletes mozgás alakul ki.

Plasztikus-test: mechanikai modellje a felületen nyugvó szilárd test, amely a súrlódási erő legyőzése után hozható csak mozgásba (Vitális Dezsőné, 1993). A kenyérbél plasztikus tulajdonságát jelképezi. A terhelésre bekövetkező alakváltozás növekvő sebességű, folyamatosan előrehaladó és irreverzibilis.

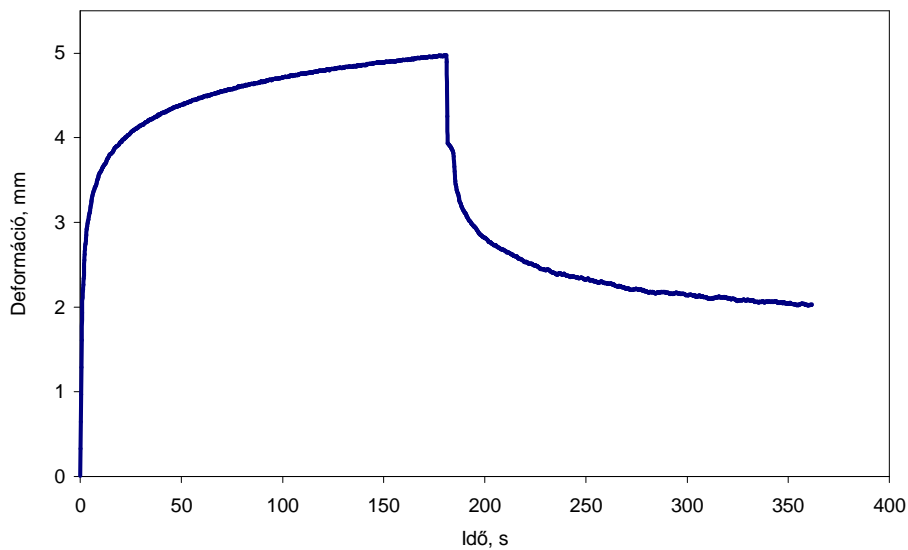
A kenyérbélzet szerkezete összetett, reológiai modelljéből következik, hogy leginkább az elasztikus és a viszkózus tulajdonságok dominálnak. Így a kenyér bélzete viszkoelasztikus jellemzőket mutat, azonban bizonyos mértékben a plaszticitás is jelentkezik. Viselkedése arra utal, hogy az elasztikus deformáció gátolja a folyást. A terhelés megszűnte után a deformáció rohamosan csökken, bár van visszamaradó deformáció (László és Zana, 1990).

A bélzet terhelésre adott reakciója nyomon követhető az 5. ábrán. Ebben az esetben a deformáló feszültség (p) nagyobb a határfeszültségnél (p_h). Ez azt eredményezi, hogy terheléskor rugalmas, késleltetett rugalmas, valamint plasztikus alakváltozás lép fel. Tehermentesítéskor a rugalmas deformáció megszűnik. Azonban a modell nem képes visszanyerni eredeti alakját, a bélzet maradó alakváltozást, plasztikus deformációt szenved.



5. ábra: A kenyérbél modelljének deformációja $p > p_h$ mellett (Gasztonyi és Bogdáné nyomán, 1985)

A kenyérbélzet reológiai tulajdonságait vizsgálva megállapítható, hogy a deformáló erő hatására először hirtelen alakváltozás lép fel, ezt pedig egy lassuló deformálási sebességnek megfelelő szakasz követi.



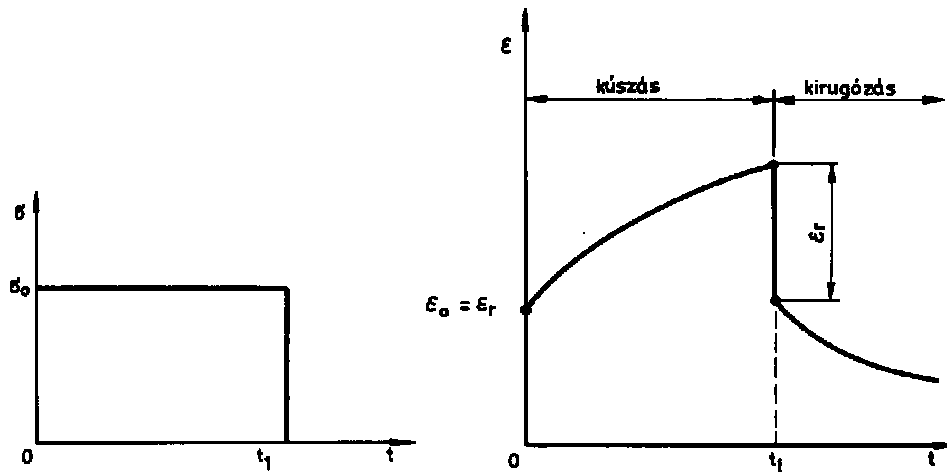
6. ábra: Kenyérbélzet jellemző deformáció idő görbéje

Ha t időpontban a terhelést megszüntetjük, a deformáció egy része hirtelen megszűnik, majd további deformáció csökkenés következik, végül a görbe valamilyen határérték felé tart (6. ábra). Megállapítható, hogy a fellépő alakváltozás egyrészt rugalmas másrészt plasztikus deformáció. A rugalmas deformáció részben Hooke-testre jellemző elasztikus deformáció, részben pedig késleltetett rugalmas alakváltozás. A deformáló feszültség csökkentésével elérhető egy olyan határfeszültség, melynél a fellépő alakváltozás teljesen reverzibilis, plasztikus deformáció tehát nem lép fel.

Az idő függvényében vizsgálva a deformációt, három fontos jelenséget tapasztaltak, amelyek befolyásolják a bélzet alakváltozását:

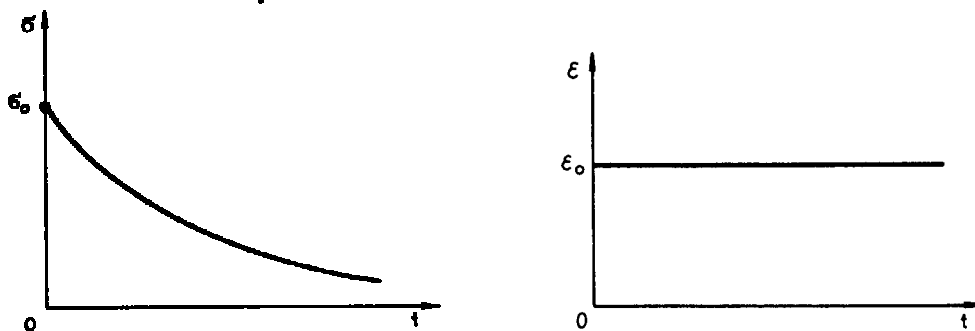
Kúszás: Sitkei (1981) megállapítása szerint kúszáson az anyagok folyamatos deformációját értjük állandó feszültség hatására. Ez a kenyér esetében azt jelentené, hogy az állandó értéken tartott nyomóerővel való terhelés addig tartana, amíg az egyre növekvő sebességű alakváltozás töréssel nem végződné.

Kirugózás: ha a kúszási vizsgálat megszakad azzal, hogy tehermentesítjük a bélzetet, a rugalmas deformáció megszűnik és megkezdődik a kúszási deformáció folyamatos csökkenése az idő függvényében. Ez a kirugózás, amelynek során a kúszási deformáció bizonyos része még hosszú idő elteltével is megmarad. Ennek mértéke adja a plasztikus deformációt. (7. ábra)



7. ábra: A kirugózás változása az időben (Sitkei, 1981)

Relaxáció: szintén a kenyérbél egyik jellemző tulajdonsága akkor, ha azt vizsgáljuk az idő függvényében, hogy állandó deformáció mellett hogyan változik a feszültség. Az eredmény csökkenő tendenciát mutat. (8. ábra)



8. ábra: A relaxációs folyamat (Sitkei, 1981)

2.3.3. A kenyérbélzet mechanikai tulajdonságai

A kenyér mechanikai tulajdonságait a pórusfalak anyaga és a kenyérkészítés műveletei során kialakuló szerkezet egyaránt befolyásolja, bár a tárolás során bekövetkező változásokat kizárólag a pórusfalakban lejátszódó folyamatok számlájára írják. A kenyérbélzet két fázisa közül ugyanis csak a szilárd fázis fizikai tulajdonságai változnak, ezért pedig a keményítő átalakulása a felelős (Zeleznek és Hoseney, 1986). A bélzet szerkezetében a száradás is lényeges változást okoz, ami a bélzet keményedésében jelentkezik (Piazza és Masi, 1995) és számítógépes látórendszerrel is nyomon követhető (Zghal et al., 1999). A pórusfalak tulajdonságainak leírásához kizárólag a szilárd fázison végzett mérések kívánatosak. A legegyszerűbb és legelterjedtebb módszer az összenyomott

kenyérbél vizsgálata (Hallberg és Chinachoti, 1992; Scanlon et al., 2000). Ezekben a kísérletekben a bélzet tömörítésének foka 5-től (Scanlon et al., 2000) 7-en át (Baik és Chinachoti, 2000) egészen az igen drasztikus 20-40-ig terjed. A másik lehetőség, a bélzethez hasonló nedvességtartalmú keményítőgélek mechanikai tulajdonságainak vizsgálata (Keetels, et al., 1996a). Ez a megközelítés azon alapul, hogy a kenyérbélzet szilárd fázisának jelentős részét keményítőpolimer alkotja. (Keetels et al., 1996b) A tömörítés haszna, hogy megszünteti a kenyérbélzet makroszkopikus szerkezetét, azonban az is elképzelhető, hogy az ilyen módon átrendeződött felépítés olyan változásokat okoz a szilárd fázis tulajdonságaiban (Hug-Iten et al., 1999), ami a keményedés folyamatát lényegesen befolyásolhatja.

A mechanikai tulajdonságok mérése nemcsak a sütőipari minőségbiztosítás szempontjából fontos. Ezen tulajdonságok leírásával meghatározható a különböző összetevők vagy a technológiai paraméterek hatása is. A kenyér kompozit szilárd anyag, melyben levegővel teli pórusok ágyazódnak egy viszkoelasztikus, szilárd vázba. A kenyérbél porózus anyagának mechanikai viselkedése meglehetősen komplex. A kenyér bélzete nemlineáris viszkoelasztikus anyag (Hibberd és Parker, 1985) csak egy nagyon szűk terhelési tartományban viselkedik rugalmasan (Lásztity, 1980) vagy mutat lineáris viszkoelasztikus tulajdonságokat (Persaud et al., 1990). A bélzet feszültség – alakváltozás görbéjének jellemzése nem egyszerű feladat. A porózus szerkezet miatt terhelés hatására többféle feszültség komplex kombinációja lép fel a kenyér belsejében (Lásztity, 1980) ráadásul a pórusok inhomogén eloszlása ezt a hatást csak fokozza. Hibberd és Parker (1985) a kenyerek keménységnek variabilitását befolyásoló tényezőket vizsgálta. Megállapították, hogy a porózus szerkezet heterogenitása egy kenyéren belül a szeletek között nagyobb eltérést mutat, mint a kenyerek között. Megfigyelték, hogy az összenyomáskor mért keménység a kenyér középső szeleteinél a legnagyobb. A kenyérbélzet mechanikai viselkedésének kvantitatív leírása mégis kívánatos, hiszen rugalmas tulajdonságait a kenyér minőségének kulcsfontosságú tényezőjeként tartják számon (Nussinovitch et al., 1992; Piazza és Masi, 1995)

2.4. A mérési elvek áttekintése

Most, hogy részletesen megismerkedtünk a kenyérbélzet tulajdonságaival, tekintsük át az állománymérésnél alkalmazott módszereket. A mechanikai tulajdonságok meghatározása többféle módszerrel történhet. A legtöbb állománymérési módszer az erő mérésén alapul. Ilyen módszerek a következők (Bourne, 1990):

Penetrometriás vizsgálat (Puncture principle): a mérőfej mintába történő benyomásához szükséges erőt méri. Széles körben alkalmazzák zöldségeknél, gyümölcsöknél, és géleknél.

Extrúzió (Extrusion principle): erő hatására a vizsgált élelmiszer egy perforált, vízszintes vagy függőleges nyílásokkal vagy lyukakkal ellátott formán folyik át. Általában bevonómasszák, töltelékek vizsgálatára használják

Vágó igénybevétel (Cutting-shear principle): a minta átvágásához szükséges erőt vizsgálja. Elsősorban húsok és húskészítmények állománymérésénél alkalmazzák.

Enyhe összenyomás (Gentle compression principle): kis erővel terhelik a mintát, lehetőleg úgy, hogy ne okozzon maradandó változást a szerkezetben. A mérés két módban végezhető, vagy egy adott deformáció eléréséhez szükséges erőt mérik, vagy a deformációt mérik, amit a konstans terhelés okoz.

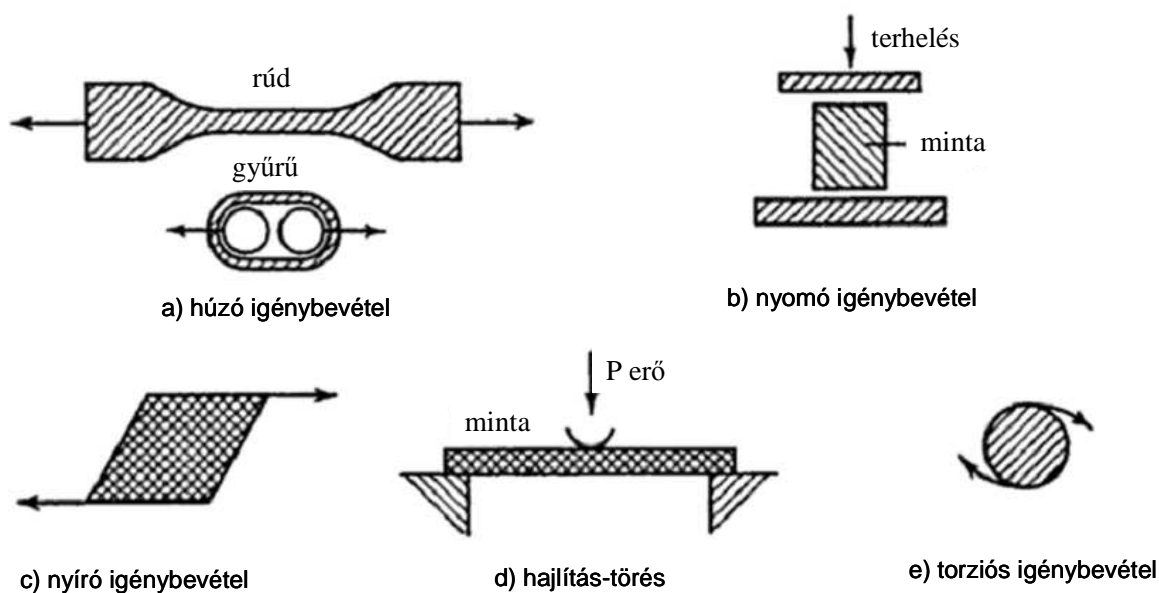
Erős összenyomás (Crushing principle): A mintát olyan mértékű terhelésnek teszik ki, ami a szerkezetét már roncsolja. Ez a mérési mód a Texture Profile Analysis alapja.

Húzás (Tensile principle): a minta elszakításához szükséges erőt méri. Alkalmanként kenyérbélzet és kenyértészta vizsgálatára alkalmazzák, más élelmiszereknél ritkán használják.

Hajlítás, törés (Bending-snapping principle): a minta hajlításához vagy eltöréséhez szükséges erőt vizsgálja. A mintadarab általában rúd, henger vagy lap formájú. Általában kekszekenél és más, rideg, törékeny élelmiszernél használják.

Torziós vizsgálat (Torque principle): A minta egy részének a többi részhez képest egy adott irányba történő elfordításához, csavarásához szükséges erőt vizsgálja. Tészták, gélek állományvizsgálatára elterjedten alkalmazzák, a szilárd élelmiszereknél kevésbé elterjedt.

A főbb mérési elvek sematikus elrendezését a 9. ábra szemlélteti.



9. ábra: A mechanikai vizsgálatok főbb mérési elveinek áttekintése

A távolságmérésen alapuló módszerek is fontos szerepet játszanak az állomány meghatározásában. Ilyen elvet használnak a hossz-, a terület- és a térfogatmérésnél.

Találkozhatunk időmérésen alapuló módszerekkel is, ezek általában egy bizonyos út megtételéhez szükséges időt mérik (pl. Ostwald-féle viszkoziméter).

Az állomány jellemzésére ezeken kívül más, az eddigiektől teljesen eltérő módszert is használnak. Ilyenek például az akusztikus, az ultrahangos és optikai módszerek.

2.5. Kenyérbélzet vizsgálatára alkalmazott módszerek

Az irodalomban a kenyérbélzet vizsgálatára leggyakrabban kompressziós vagy penetrációs mérést alkalmaznak. Találkozunk húzó igénybevételen alapuló vizsgálatokkal is, bár ez kevésbé jellemző. A továbbiakban áttekintem a leggyakrabban használt módszereket.

A kenyér bonyolult szerkezetű, összetett rendszer. Külső hatásokra fellépő viselkedését számos tényező befolyásolja. Ilyenek például a kenyér összetétele, gyártástechnológiája, a termék tárolásának módja, valamint különböző fizikai paraméterek, mint például a hőmérséklet, és az idő. A termék állapota nem állandó, inkább folyamatosan változó. Ennek következtében a vizsgálatok során a kutatóknak sok feltételezéssel kell élniük, és eredményeik gyakran csak az adott feltételek mellett érvényesek. Gyakran a fellépő jelenségek vizsgálatához tapasztalatokon alapuló módszerekhez kell folyamodniuk. Macsihin (1987) részletesen ismerteti a kenyér állományára irányuló törekvéseket, művében több szerző munkásságát is megemlíti:

Rebingyer és Szemenkó ötletén alapul az empirikus, kúpos plasztométer, illetve penetrométer kifejlesztése. A műszerrel tanulmányozható az anyag egyik fontos reológiai jellemzője, a nyírószilárdság (folyáshatár), amellyel az anyagszerkezet szilárdsága mérhető. Kísérleteket folytattak félautomatikus penetrométer alkalmazhatóságára különböző élelmiszereknél. Az eredmények azt igazolták, hogy a műszerrel kiválóan feltérképezhetőek a termék mechanikai tulajdonságai. Többek között vizsgálták a berendezéssel a kenyérbél, valamint a kenyérbél reológiai jellemzőit egyaránt.

Kulman és Lásztity mélyrehatóan vizsgálták azt a jelenséget, amely a kenyérbél viselkedését írja le terhelés, majd tehermentesítés hatására. A bélzet szerkezetében nyomásra hirtelen alakváltozás jön létre, majd egy lassuló ütemű deformáció. Az erőhatás megszűntetését a kirugózás követi. A deformáció egy része pillanatszerűen megszűnik, majd további csökkenő sebességű alakváltozás tapasztalható. A bélzet azonban nem képes eredeti formáját teljesen visszanyerni. A folyamat végén irreverzibilis alakváltozás figyelhető meg. Ez a visszamaradó, plasztikus deformáció. Megállapítható tehát, hogy a bélzeten a terhelés hatására, a tehermentesítést követően egyrészt rugalmas, másrészt plasztikus alakváltozás lép fel. Ezekből a paraméterekből határozható meg a kenyérbél mechanikai tulajdonságát jellemző relatív rugalmasság.

Nyikolajev behatóan tanulmányozta a kenyérbél nyomó igénybevételére fellépő teljes és rugalmas deformációját a tárolás ideje, átsütöttsége, receptúrája és egyéb tényezők függvényében. Munkája során megállapította, hogy a bélzet deformáció-csökkenése a tehermentesítés utána a friss kenyereknél a legnagyobb. Nyikolajev módszert dolgozott ki a rugalmas-plasztikus deformáció vizsgálatára, valamint mérőműszereket tervezett egyirányú nyomásvizsgálatokhoz.

Szurasov rozskenyér bélzetét tanulmányozta. A méréshez szükséges kenyeret szabványos receptúra szerint készítette. A mintákat meghatározott paraméterek alapján kimetszette a kenyér bélzetéből, majd a berendezés két párhuzamos fémlapja közé helyezte. A felső lap rögzítve volt, míg az alsót egy emelőasztal mozgatta. Így a mintát egyirányú nyomásnak vetette alá. Az így kapott nyomódiagramokon inflexiós pontokat figyelt meg, amelyeket a bélszerkezet nyomás hatására történő roncsolódásával magyarázott. Az anyagon terhelés hatására alakváltozás lép fel. A bélzetbe zárt jelentős mennyiségű levegő fokozatosan kipurolódik, a pórushéjak szétrepedeznek. A mérést addig folytatta, amíg a minta teljesen összenyomódott. Diagramjai alapján meghatározta a kenyérbélre jellemző rugalmassági határértékeket, valamint a rugalmassági modulusokat.

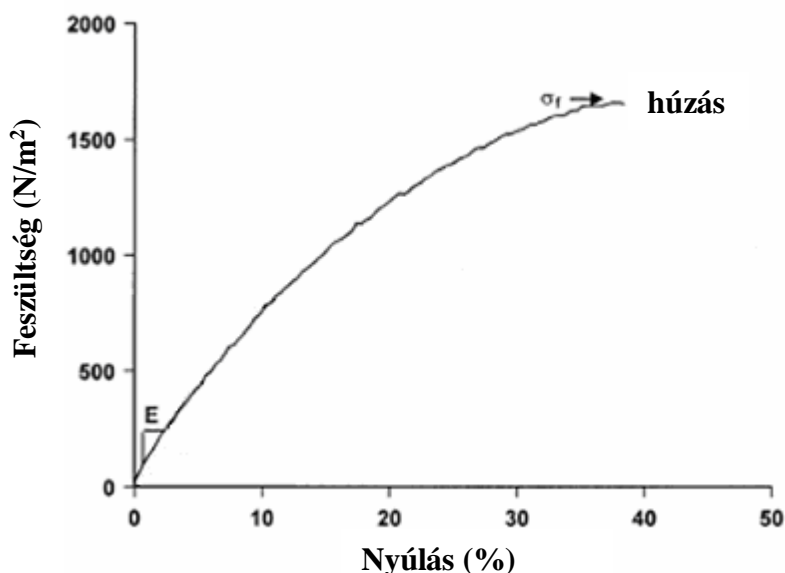
A friss kenyér bélzetének szerkezete nagymértékben eltér a tárolt kenyéretől, valamint a kenyér típusa is befolyásolja a bélzet viselkedését. *Gupta és Tscheuschner* vizsgálatainak tárgyát ennek a különbségnek a feltérképezése adta. A kutatók Instron típusú készüléket használtak, ezzel a berendezéssel vették fel a nyomófeszültség-fajlagos deformáció diagramokat. Megállapították, hogy az alakváltozás folyamata három szakaszra bontható. Kezdetben a bélzeten elasztikus, majd késleltetett rugalmas, végül plasztikus deformáció jelentkezik. Méréseik alátámasztották tehát, hogy a bélzet mechanikai tulajdonságait meglehetősen befolyásolja a tárolási idő és az összetétel egyaránt.

2.5.1. Húzó igénybevétel

Ezt a mérési elvet ritkán használják kenyér és más, szivacsos szerkezetű élelmiszer állományvizsgálatára. A korlátozott felhasználásnak egyik oka a minta befogásából ered. A lágú kenyérbélzet mérőműszerbe történő rögzítése nehézkes, mivel a kiszúrt mintadarab két vége nem elég merev (Chen et al., 1994) valamint a befogásnál a mintában olyan feszültségek ébredhetnek, amik a minta középső részétől távol okoznak szakadást. Másrészt, ahhoz, hogy a mérést megbízhatóan, jól reprodukálhatóan lehessen végezni elengedhetetlen, hogy a minta méretére, alakjára és stabilitására vonatkozó előírásokat maradéktalanul betartsuk. Ez a legtöbb élelmiszernél, annak jellegzetes, inhomogén szerkezet miatt nehezen kivitelezhető (Goh et al., 2000). Ezen nehézségek ellenére, a húzó igénybevételre alapuló vizsgálatoknak számos előnye is van. Olyan paramétereket eredményez, melyek könnyen értelmezhetőek (Nussinovitch et al., 1990) és általában jobban tükrözi a vizsgált anyag alapvető mechanikai tulajdonságait. Kenyér esetén a húzó igénybevételre alapuló vizsgálat a minta elszakításához szükséges munka meghatározásának

eszköze lehet. Ez a jellemző jól használható a kenyérbélzet kohéziójának és tépéssel szembeni ellenállásának leírására (Scanlon et al., 1997).

A 10. ábrán a húzó igénybevétel szakítási görbéje látható. A görbe kezdeti lineáris szakaszából meghatározható a Young-modulus értéke a szakadás bekövetkezésénél pedig a szakítófeszültség olvasható le.



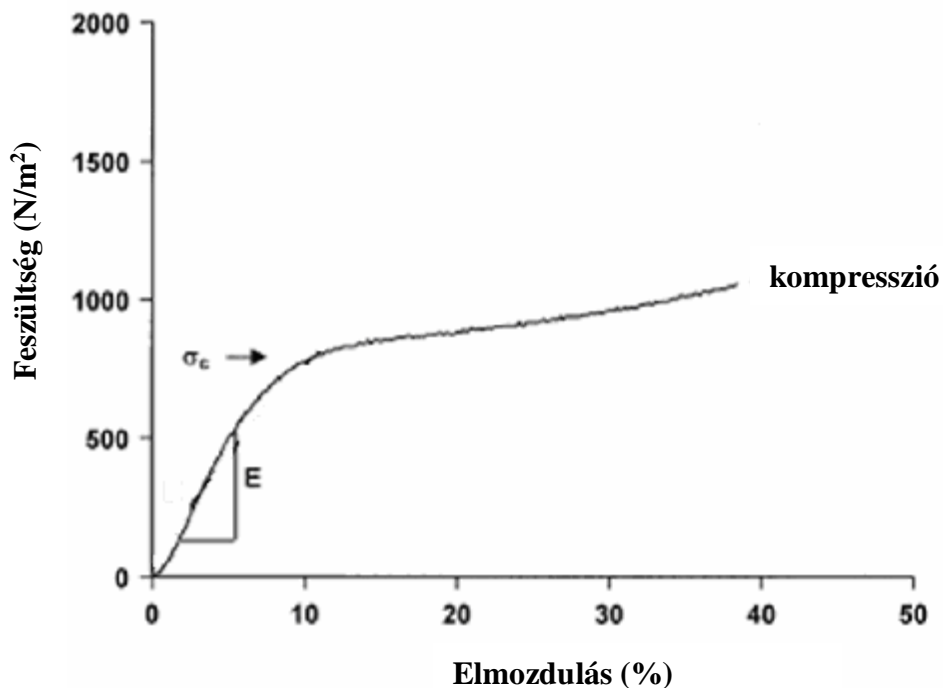
10. ábra: A húzó igénybevétel szakítási görbéje

Erős hasonlóság mutatkozik a Hibberd és Parker (1985) által kompressziós vizsgálattal meghatározott kritikus nyomófeszültség (1050 N/m^2) és a Scanlon és munkatársai (2000) által meghatározott átlagos szakítófeszültség (1100 N/m^2) értéke között. Szakításvizsgálat esetén a Young-modulus értéke nagyüzemi technológiával előállított, erős és extra erős lisztekből készült 1 napos kenyerek esetén $10,6$ és $12,5 \text{ kN/m}^2$ között volt (Scanlon et al., 2000). Zghal és munkatársai (2001) ugyanilyen lisztekből laboratóriumi körülmények között sült kenyeret vizsgált azzal a különbséggel, hogy ők a húzóerőt a kenyér függőleges tengelyének irányába fejtették ki. A vizsgálat során a Young-modulus értéke $7-8 \text{ kN/m}^2$ -nek adódott. Mindkét tanulmány egyetért azonban abban, hogy a szakításvizsgálat esetén meghatározott modulusok hasonló nagyságrendűek, mint a Hibberd és Parker által meghatározott, kompressziós vizsgálatokból nyert modulusok értéke.

2.5.2. Kompressziós vizsgálatok

A kenyérbélzet állományának vizsgálatára a legelterjedtebb módszer a nyomó igénybevételen alapuló eljárás, melynek során modulusok értékét határozzák meg. A bélzetminta párhuzamos síklapok közti egytengelyű nyomóvizsgálata is alkalmas a mechanikai tulajdonságok meghatározására (Piazza és Masi, 1995). Ezen műszeres vizsgálatok a tapintáson vagy kóstoláson alapuló szubjektív állományvizsgálatokhoz hasonló módon működnek. Az így meghatározott

keményység az érzékszervi minősítés eredményeivel szoros korrelációt mutat (Brady és Mayer, 1985). A kompressziós vizsgálatok népszerűek a kutatók körében, mert egyszerűen kivitelezhető és kis mintamennyiségen is elvégezhető. A 11. ábra egy kenyérbélzetre jellemző feszültség-elmozdulás görbét mutat. A kompressziós vizsgálatoknál meghatározott két jellemző tulajdonság, a Young-modulus és a kritikus nyomófeszültség a görbéről egyértelműen meghatározható.



11. ábra: Kenyérbélzetre jellemző feszültség-elmozdulás görbe

Kenyérbél-kockák kompressziós vizsgálata során Hibberd és Parker (1985) megállapították, hogy a kenyérbélzet anizotróp tulajdonságokat mutat. Ha a kenyér hosszanti tengelyével párhuzamosan terheljük a bélzetmintát, akkor a Young-modulus értéke 2-3-szor, a kritikus feszültség értéke 2-2,5-szer nagyobb lesz, mintha a másik két irányba végeztük volna a terhelést. A hossz tengely irányába mért Young-modulusok értéke friss kenyér esetén 8 és 18 kN/m² közé, a kritikus nyomófeszültség értéke pedig 760 és 1350 N/m² közé esett. Keetels és munkatársai (1996b) búzakeményítőből készült kenyerek bélzetét vizsgálta. Hossz tengely irányába történő összenyomásnál a rugalmassági modulus értéke 18 kN/m² volt.

A kompressziós vizsgálatoknak számtalan előnye van. Egyszerű, kis mennyiségű mintán is elvégezhető, a minta könnyen előkészíthető éppen ezért elterjedten alkalmazzák.

Ezen az elven alapul az irodalomban gyakran említett American Association of Cereal Chemists (AACC) 74-09-es szabványa valamint az ehhez nagyon hasonló (1. táblázat) American Institute of Baking (AIB 2001) kenyérvizsgálati módszere is.

1. táblázat: Az AACC szabvány és az AIB kenyérvizsgálati módszer beállításai

	AACC 74-09-es szabvány	AIB kenyérvizsgálati módszer
mérési minta	2 db 1,25 mm vastag kenyérszelet egymásra fektetve	2 db 1,25 mm vastag kenyérszelet egymásra fektetve
mérési mód	erőmérés kompressziós módban-visszatérés kiindulási pontra,	erőmérés kompressziós módban-visszatérés kiindulási pontra,
mérőfej	36 mm henger lekerekített éllel (P/36R)	1" akril henger (P/1)
mérőfej sebessége a mérés előtt	1 mm/s	2 mm/s
mérőfej sebessége a mérés alatt	1,7 mm/s	1,7 mm/s
mérőfej sebessége a mérés végén	10 mm/s	10 mm/s
trigger erő	0,05 N	0,10 N
mintavételezés	250 mérés/s	200 mérés/s
alkalmazott deformáció	kiindulási szeletvastagság 40%-a	6, 25 mm (25%)
meghatározott jellemző	a 25% deformáció eléréséhez szükséges erő	a 25% deformáció eléréséhez szükséges erő

A szintén kedvelt Texture Profile Analysis – más néven két harapás teszt – is nyomó igénybevételt alkalmaz. Ezt a módszert kifejezetten a rágás modellezésére, az érzékszervi tulajdonságok minél pontosabb leírására dolgozták ki. Éppen ezért gyakran alkalmazzák az érzékszervi minősítéssel párhuzamosan az állomány objektív leírására (Rizello et al., 2010; Gámbaro et al., 2004; Rosenthal, 1999).

Garimella Purna és munkatársai (2011) a waxy búzák lisztjéből készült kenyerek tulajdonságait vizsgálták. Az állományvizsgálatot az AACC 74-09-es szabvány alapján végezték TA.XT2 állománymérővel, 36 mm-es mérőfej alkalmazásával. A deformáció mértéke 7 mm volt, az ennek eléréséhez szükséges erő a keménység. Kenyerenként 3 mérést végeztek, ezek átlagát tekintették az adott kenyérré jellemző értéknek.

Torbica és tsai (2010) gluténmentes kenyereket vizsgáltak az AACC 74-09-es szabványa alapján. Mivel a vizsgált minta mindössze 90 g tésztából készült és átmérője valamint magassága 6 cm volt, a mérési módszert kissé átdolgozták. A méréseket nem a kenyérbélzeten, hanem a teljes kenyéren végezték, szabványban előírtnál kisebb, 0,5" (12,7 mm) átmérőjű mérőfejjel. Véleményük szerint az így kapott keménységértékek a termék egészének állományát jellemzik, valamint ilyen módon lehetőség nyílik a rághatóság megítélésére is.

Demirkesen és munkatársai (2010) rizslisztből, különböző sűrítőanyagok és emulgeátorok felhasználásával készült gluténmentes kenyereket vizsgáltak. A különböző receptúrák alapján 2-2 db 100 g-os próbapötöt sütöttek, a méréseket ezeken végezték. A minták keménységét egy 50 N-os mérőcellát tartalmazó Lloyd TA plus állománymérő berendezés segítségével határozták meg. A

méréseket friss kenyéren végezték 1 órával a kisütés után. A próbacipó közepéből 25x25x25 mm-es mintát vágta ki, amelyet 10 mm-es mérőfejjel 25 % deformáció eléréséig terheltek 55 mm/min előtolási sebesség mellett.

Hüttner és munkatársai (2010) három országból származó zablisztból készült kenyerek tulajdonságait vizsgálták. Minden lisztmintából 3-3 kenyeret sütöttek, a kenyerek középső 3 szeletén végezték a reológiai vizsgálatokat. A méréseket 25 kg-os mérőcellával felszerelt TA.XT2i típusú állománymérővel végezték TPA mérési módban a következő beállításokkal: 35 mm átmérőjű alumínium mérőfej, mozgási sebessége a mérés előtt és után valamint a mérés során 2 mm/s, 20 g triggererő. A kompresszió 40 % deformáció (kb. 10 mm) eléréséig tartott, a két terhelés között 5 s várakozási idő telt el. A felvett görbéről a keménység, adhézió, kohézió és rágási energia értékét határozták meg.

2.6. Az irodalom értékelése

A jó minőségű kenyér előállítása napjainkban is fontos feladat. Az egészséges táplálkozás és a speciális táplálkozási igények kielégítése folyamatos kihívás elé állítja a sütőipart. A fogyasztók megítélése szerint a rugalmas bélzetű, nem morzsálódó kenyér tekinthető megfelelő minőségűnek. Ennek megvalósítása a magas rosttartalmú és a gluténmentes kenyerek esetén nem egyszerű feladat.

Az Elasztigráf a mai kenyerek mérésére nem csak korlátozott érzékenysége, hanem felépítése miatt sem alkalmas, éppen ezért szükségessé vált egy egyszerű, számítógépes program segítségével könnyen kiértékelhető eljárás kidolgozása.

Mint láttuk, a kenyér bélzete viszkoelasztikus tulajdonságokat mutat, az ilyen anyagok jellemző tulajdonsága a kúszás és a kirugózás. Komplex kolloid rendszer, egy szilárd és egy fluid fázisból áll, szerkezete inhomogén. Ezek a jellemzők döntően meghatározzák az alkalmazható mérési módszereket.

A feldolgozott irodalom alapján kenyérbélzet vizsgálatára az összenyomáson alapuló mérések a legmegfelelőbbek. Az ilyen típusú vizsgálatok egyszerűen kivitelezhetőek, nem igényelnek speciális minta-előkészítést, eredményük könnyen értelmezhető.

Lényeges kérdés, hogy a hazai gyakorlatban sikerrel alkalmazott Elasztigráf, kiváltható-e sorozatgyártású állománymérő műszerrel, így a méréshatár kiterjeszhető, az adatok elektronikus értékelése megoldható.

A mérési elvet alapul véve, a módszert finomítva véleményem szerint megvalósítható egy olyan vizsgálati eljárás, amely a kenyérbélzet tulajdonságait több jellemzővel, objektívan írja le. Ehhez a megfelelő mérőfej, terhelőerő, terhelési idő és előtolási sebesség meghatározása elengedhetetlenül szükséges.

3. CÉLOK

Az irodalmi áttekintés alapján a következő célokat tűztem ki:

- Új kompressziós mérési módszer kidolgozása az Elasztigráf mérési elve alapján, amely alkalmas a kenyérbélzet állományjellemzőinek meghatározására, különös tekintettel a mérőfej méretére és alakjára, a terhelőerőre és a terhelési időkre.
- Az új mérési módszerhez új minta-előkészítési eljárás kidolgozása, amellyel pontos és megbízható mérési eredmény nyerhető, valamint a mintaméret és alak (pl. bélzetkorong, vagy kenyérszelet) mérési eredményekre gyakorolt hatásának megállapítása.
- Az új módszerhez alkalmazott kompressziós sebesség hatásának megállapítása, összefüggések meghatározása a mérési sebesség a mért jellemzők között.
- A kidolgozott új mérési módszer alkalmazhatóságának megállapítása különböző kenyértípusoknál.
- Az új módszer alkalmazhatóságának összehasonlítása más, a kenyér vizsgálatára elfogadott és alkalmazott módszerekkel.

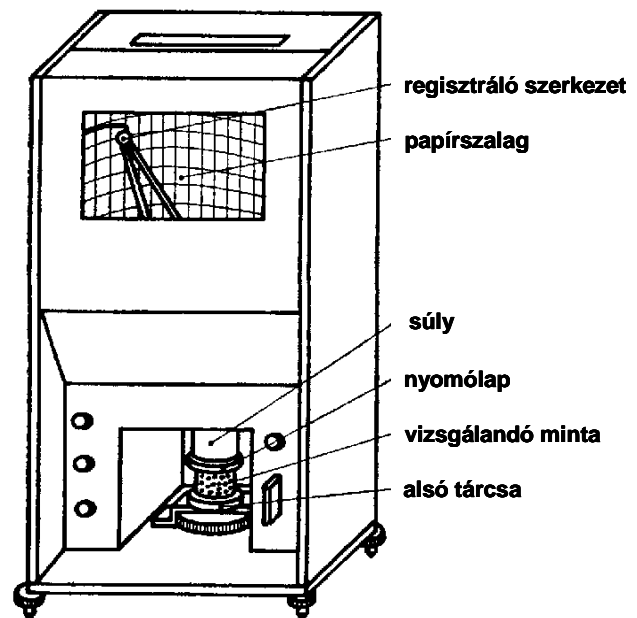
4. ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

A fejezet első felében bemutatom a mérésekhez használt berendezéseket és az eredmények kiértékelésének módszerét. A továbbiakban pedig az eredmények fejezetben szereplő sorrendben ismertetem a felhasznált anyagokat, a műszerek beállításait és a kiértékelés módját, amennyiben az az alapesettől eltérő.

4.1. Mérőműszerek bemutatása

4.1.1. Az Elasztigráf

A bélszerkezet reológiai sajátosságainak megismerését segíti ez a tapasztalati eljárás alapuló műszer. Felépítése és használata egyszerű, szerkezeti vázlata az 12. ábrán látható.



12. ábra: Az Elasztigráf és szerkezeti vázlata (Szalai nyomán, 2001)

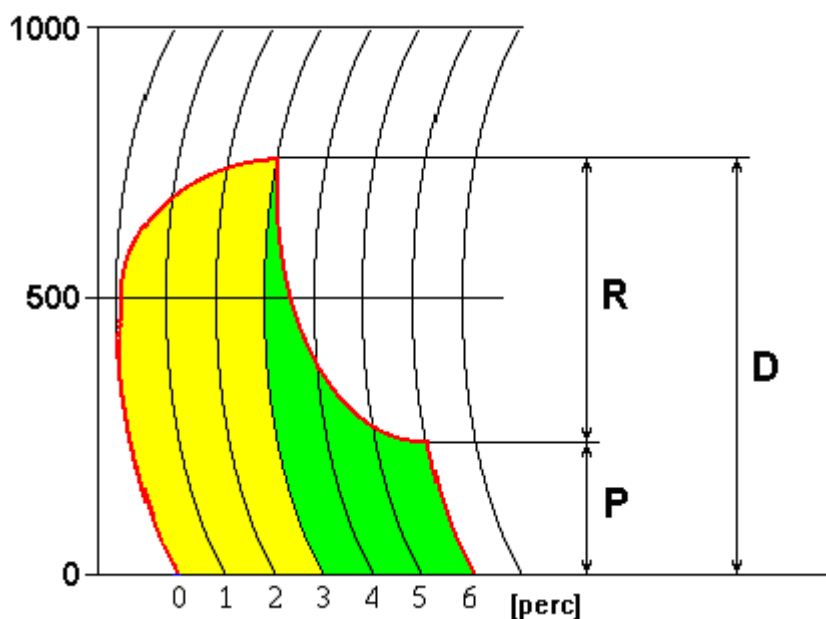
A mintaelőkészítéshez speciális kiszűrőszerszámot használunk, melynek segítségével az 50 mm vastag kenyérszelet közepéből, a héjtól egyenletes távolságra készítünk egy 56,5 mm átmérőjű bélzethengert. Az így kapott mintát a berendezés alsó tárcsájára helyezzük, majd ráengedjük a nyomólapot úgy, hogy a bélzethenger felső részét érintse, de ne nyomja össze azt. A regisztráló szerkezet író tollát a 0 értékhez állítjuk.

A mérés megkezdésekor a minta felületére, 1875 g súlyt ejtünk, a terhelés 3 percig tart, leteltét a készülék jelzi. Ekkor a súlyt leemeljük, a terhelést megszüntetjük, a berendezés további 3

percig regisztrálja a minta magasságváltozását. A mérés végén (6 perc elteltével) a készülék automatikusan kikapcsol.

Terhelés hatására a kenyérbél viszkoelasztikus tulajdonságánál fogva kezdetben gyors, majd lassuló alakváltozást szenved, a fellépő deformáció egy határértékhez tart. Tehermentesítéskor a bélzet eredeti magasságának egy részét azonnal visszanyeri, majd lassú kirugózási folyamat következik, kiindulási magasságát a minta azonban nem nyeri vissza. A terhelési idő alatt bekövetkező alakváltozás a teljes deformáció, a megmaradó változás képezi a plasztikus deformációt, míg a visszaalakulás a rugalmas deformációt jelenti.

A berendezés az egész mérés alatt papírszalagra rögzíti a kapott eredményeket. Az így kapott elasztigramról (13. ábra) leolvasható a teljes (D), a rugalmas (R) valamint a plasztikus (P) deformáció értéke is, melyek értékes információkat adnak a bélszerkezet viselkedéséről. Az adatok dimenzióját a műszer elasztigráf egységben (EE) adja meg, a maximálisan mérhető elmozdulás 30 mm, ami 1000 elasztigráf egységnek felel meg.



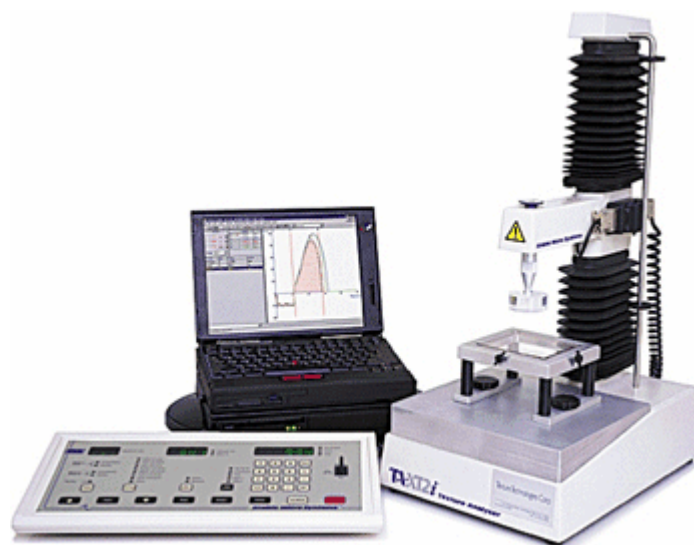
13. ábra: Egy sematikus elasztigram (Szalai, 2003)

A rugalmas és teljes alakváltozás viszonya a relatív rugalmasság, amelynek minimális értékét a Magyar Élelmiszerkönyv 0,8-nek határozta meg.

4.1.2. A TA.XT2 állománymérő

Az elasztigráfos mérést Stable Micro Systems TA.XT2 típusú sorozatgyártású állománymérő (14. ábra) segítségével modelleztem. A műszerrel – számos beállítási lehetőségnek köszönhetően – többféle mérést lehet végezni. Vizsgálhatjuk az adott nyomóerő hatására fellépő deformációt, vagy azt, hogy egy adott deformáció eléréséhez mekkora terhelőerő szükséges. A

berendezés alkalmas bizonyos paraméterek időbeli változásának tanulmányozására is, mint például a kúszás és a kirugózás.



14. ábra: A precíziós állománymérő

A műszer számítógépes mérőrendszer része, a paraméterek beállítását és a kiértékelést Texture Expert for Windows program segítségével egyszerűen és kényelmesen végezhetjük el. Itt megadhatjuk a kívánt mérési módot (roncsolásos, ciklikus, stb.), a mérőfej és a minta összes számunkra lényeges tulajdonságát (méretek, tömeg, érintkezési felület, magasság stb.) Az eredmények értékelése során számos eszköz áll a rendelkezésünkre. Kijelölhetünk pontokat a felvett görbén, meghatározhatjuk távolságukat, a köztük lévő görbeszakaszok meredekségét, a görbeszakaszok alatti terület nagyságát, stb. Az így nyert adatokat a további feldolgozás érdekében más programok számára értelmezhető formában exportálhatjuk. Lehetőségünk van a kiértékelés egyes lépéseit, azok sorrendjét, a kívánt adatok meghatározását makró formájában rögzíteni. Az így létrehozott makró a továbbiakban bármikor futtatható, ez a nagy ismétlésszámú mérések értékelését rendkívül meggyorsítja.

A berendezéshez tartozó mérőfejek segítségével a legkülönbözőbb anyagok paramétereinek széles skálája vizsgálható. A mérőfej cseréje esetén a műszer kalibrálása természetesen elengedhetetlen. A mérőprogrammal mind a súlyra (nullpont és 5 kg erővel terhelt állapot) mind a magasságra történő kalibráció könnyedén elvégezhető.

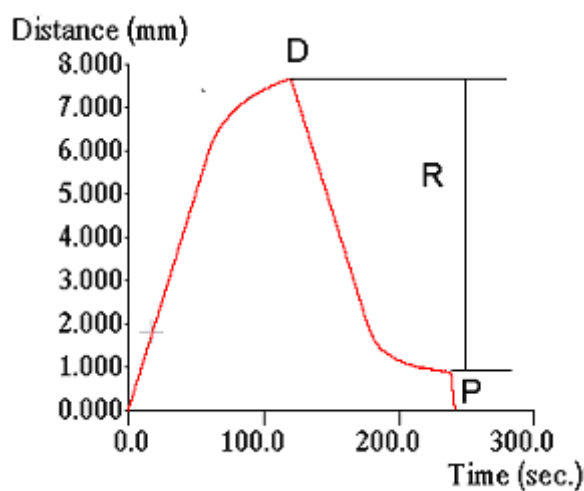
A BCE ÉTK Fizika-Automatika Tanszékén rendelkezésre álló TA.XT2 állományvizsgáló 25 kg-os mérőcellával rendelkezik. Erőmérésnél felbontása 1 g, pontossága 0,025 %. Az elmozdulást 0,1-524 mm között tudja rögzíteni, felbontása 0,0025 mm. A készülék felépítését tekintve egy érzékelő és egy mozgó részből áll. A berendezés állandó sebességgel mozgatja a mérőfejet, a mérés során azonban a szonda sebessége változtatható. Megadható a behatolás előtti, a behatolás

közbeni sebesség, valamint az, hogy a mérőfej a tehermentesítés után milyen ütemben hagyja el a vizsgálandó anyagot. A sebesség értéke 0,1-10 mm/s között változtatható.

A mérés során az adatok rögzítése általában egy előre meghatározott triggererő átlépése után kezdődik, tehát amikor a szonda eléri a mérendő anyag felületét. A penetrométer rúdon elhelyezett elektronika érzékeli a vizsgált anyagban terhelés hatására ébredő erőt, amelyet erősítőn keresztül egy analóg-digitális átalakítóra vezet. Az így kapott jeleket a számítógép dolgozza fel. A mérőszonda sebessége megközelítőleg az anyagban ébredő erővel, valamint a mérőfej elmozdulása a deformáció mértékével egyezik meg.

Az Elasztigráf állománymérővel történő szimulációja során relaxációs mérési módban P/75-ös mérőfejet használtam, ami egy 75 mm átmérőjű korong. Ez az Elasztigráf felső tárcsájának felel meg. A terhelés itt is 1875 g, amit az előírt 3 percig tartottam a mintán. Ezután a terhelést megszüntettem és 3 percig figyeltem a bélzethenger visszaalakulását. Relaxációs mérésnél a programban a terhelés mértéke és a vizsgálati idő megadható, a műszer ezek után a mérést automatikusan végzi, az Elasztigráftól eltérően itt sem a terhelés ráadásánál sem annak levételénél nincs szükség kézi beavatkozásra.

A deformáció idő görbét a mérőprogram vette fel (15. ábra), a görbéről megállapítható a teljes deformáció, a rugalmas és a rugalmatlan alakváltozás mértéke.



15. ábra: Deformáció-idő jelleggörbe relaxációs mérési módban

Az ábráról leolvasható az 5 N terhelés során bekövetkező teljes deformáció értéke (D), a tehermentesítés után visszamaradó alakváltozás, a plasztikus deformáció (P), valamint a kettő különbsége, a rugalmas deformáció (R). A rugalmas és a teljes deformáció hányadosával az Elasztigráffal mérhető relatív rugalmasság értékének megfelelő mérőszámot kapunk.

4.2. Elasztigráf elvű mérés megvalósítása állománymérővel

Ehhez a mérési sorozathoz négy különböző kenyértípust használtunk fel, eltérő összetételük miatt eltérő bélzetszerkezetet feltételeztünk. A kenyereket egy pékségből szereztük be, összetételük a gyártó közlése alapján a következő volt:

- barna kenyér, 70% rozsliszt tartalommal,
- rozsos kenyér, 35% rozsliszt tartalommal,
- félbarna kenyér 15% rozsliszt tartalommal,
- fehér kenyér 100% búzalisztból.

Az Elasztigráf működését korábban már ismertettem. A TA.XT2 állománymérőt hasonló módon kellett beállítanom, mint az Elasztigráfot, tehát 1875 g-os terhelést kell a mintára ejtenünk, a terhelést 180 másodpercig tartanunk, majd a terhelést hirtelen megszüntetnünk és a minta visszaalakulását vizsgálnunk további 180 másodpercig.

A TA.XT2 berendezés – mint már említettem – többféle beépített mérési móddal rendelkezik. Ezek egyike a relaxációs mérési mód, melynél a berendezés a minta kúszását és kirugózását tudja vizsgálni. A két lényeges megadható paraméter itt a terhelőerő nagysága és a terhelés és tehermentesítés ideje.

A beállítások megválasztásánál azonban több tényező is nehézséget okozott. Mivel az állománymérő műszernél a terhelés mintára helyezését és eltávolítását léptetőmotor végzi, ezért a minta pillanatszerű terhelése és tehermentesítése nem megoldható. Annak érdekében, hogy a terhelés és tehermentesítés minél gyorsabb legyen, a mérés során a mérőfej mozgásának sebességét maximálisra, 10 mm/s-ra választottam. További sajátossága a TA.XT2 precíziós penetrométernek, hogy konstans erőt csak bizonyos határok között (+0,01 N, -0,05 N) képes tartani, valamint, ha a terhelő erő 0 N-ra csökken, akkor nem végez mérést, tehát tehermentesítéskor nem pontosan nulla, hanem nulla közeli értéken tartja a terhelést.

Ezeket figyelembe véve a berendezés beállításai a következők voltak:

- mérési mód: relaxációs mérés,
- terhelőerő: 18,39 N (1875 g),
- mérés ideje: 180 s,
- mérőfej sebessége a mérés előtt: 2 mm/s,
- mérőfej sebessége a mérés alatt: 10 mm/s,
- mérőfej sebessége a mérés végén: 2 mm/s,
- trigger erő: 0,05 N,
- mintavételezés: 100 mérés/s,
- mérőfej: P75, 75 mm átmérőjű alumínium korong.

Minden terméket friss állapotban, a sütés napján vizsgáltam, mind az elasztigráfos, mind a penetrométeres mérést elasztigráfos próbatesten (átmérő 56,5 mm, magasság 50 mm) végeztem, mindkét műszerrel termékenként 5-5 ismétléssel.

4.3. Mérési módszer fejlesztése

Mivel az elasztigráfos méréseknél a mintaelőkészítés nehézkes és időigényes, a mintaelőkészítés egyszerűsítése fontos feladatomból volt. Az Elasztigráf viszonylag nagy méretű (átmérő 56,5 mm, magasság 50 mm) bélzethengerrel dolgozik, így egy kenyérből maximum 4-5 minta nyerhető. A minta kiszúrása közben a kiszúrószerszám elmozdulhat, nem egyenletes terhelés esetén a kivágott bélzethenger torz, ferde lesz, ami a mérés megbízhatóságát rontja. Nemzetközi gyakorlatban mind az American Association of Cereal Chemists (AACC) mind az American Institute of Baking (AIB) elfogadott kenyérvizsgálati módszerében kenyérszeleteken határozza meg a bélzet reológiai tulajdonságait.

Méréseimet tehát a továbbiakban kenyérszeleten kívántam folytatni. A kenyerek szeletelését Hauser típusú háztartási szeletelőgéppel végeztem. A szeletek vastagsága 15 mm volt. Kenyérszeletek vizsgálatához azonban az elasztigráf elvén működő módszer finomítása mindenképpen szükséges. Lényeges kérdés volt a megfelelő mérőfej, az alkalmazandó erő és mérési idő meghatározása.

4.3.1. Mérőfej kiválasztása

Könnyen belátható, hogy kenyérszelet méréséhez célszerű a kenyérszelet felületénél kisebb mérőfejet használni. Figyelembe kell vennünk azonban a kenyérbélzet inhomogenitását is. Különösen a fehér és a félbarna kenyerek bélzetére jellemző, hogy porozitásuk nem egyenletes, gyakran előfordulnak bennük nagyobb lyukak. Ez kis átmérőjű mérőfej alkalmazása esetén hibás mérést eredményezhet. Ha a mérőfejet a kenyérszelet felületét megközelítő méretűre választjuk, akkor a héj körüli régiók magasabb keménysége miatt kaphatunk téves eredményt.

A mérőfej kiválasztásához félbarna kenyeret használtam, mivel ennek bélzete a fehér kenyéréhez hasonlóan laza, viszont annál valamivel egyenletesebb. Kenyerenként (mérőfejenként) 15-15 szeletet vizsgáltam. A mérésekhez egyszerűen kivitelezhető, elfogadott módszert kívántam alkalmazni, ezért kísérleteinket az American Institute of Baking kenyérvizsgálati módszerére alapoztam. Ennek megfelelően a TA.XT2 precíziós penetrométer beállításai a következők voltak:

- mérési mód: erőmérés kompressziós módban- visszatérés kiindulási pontra,
- mérőfej sebessége a mérés előtt: 2 mm/s,
- mérőfej sebessége a mérés alatt: 1,7 mm/s,

- mérőfej sebessége a mérés végén: 10 mm/s,
- trigger erő: 0,10 N,
- mintavételezés: 200 mérés/s,
- alkalmazott deformáció: kiindulási szeletvastagság 25 %-a.

A mérésekhez különböző átmérőjű mérőfejeket használtunk (16. ábra):

- P10 – 10 mm átmérőjű ebonit henger,
- P25 – 25 mm átmérőjű alumínium henger,
- A/BE35 – 35 mm átmérőjű plexi korong,
- A/BE45 – 45 mm átmérőjű plexi korong,
- P 75 – 75 mm átmérőjű alumínium korong.



16. ábra: Az alkalmazott mérőfejek

A mérés során a felvett erő-idő diagramból az adott 25 % deformáció eléréséhez szükséges erőt határoztam meg minden mérőfejnél. A megfelelő átmérőt a szórások és a hibasávok meghatározása alapján választottam ki.

4.3.2. Terhelőerő meghatározása

Mérési módszerem finomításának következő lépése a megfelelő terhelőerő értékének meghatározása. Egyértelmű, hogy az elasztigráfos mintatest 50 mm-es magasságához alkalmazott 1875 g terhelés az általam vizsgálni kívánt 15 mm-es kenyérszeleteknél nem alkalmazható, mivel ennél a szeletvastagságnál ez a terhelés túl nagy deformációt okozna. Az Elasztigráf esetén a maximális deformáció, amit a berendezés mérni tud, 60 %. Méréseim során arra kerestem választ,

mekkora az a terhelőerő, ami a legpuhábbnak ítélt fehér kenyér esetén sem okoz nagyobb deformációt, mint a fent említett 60 %. A kísérletet fehér kenyéren végeztem, majd a választott erőérték alkalmazhatóságát félbarna, rozsos és barna kenyéren is teszteltem. Az ismétlések száma fehér és félbarna kenyérnél 15-15, a rozsos és barna kenyereknél 12-12 volt a termékek eltérő mérete miatt.

Méréseimhez az optimálisnak talált 35 mm-es mérőfejet használtam, a mérési elrendezés a 17. ábrán látható. A mérőfej mozgási sebessége a mérés előtt 2 mm/s, a terhelés alatt 0,5 mm/s, tehermentesítéskor 2 mm/s volt. A deformáció maximális, megengedett értékét 60 %-ra állítottam be. Természetesen itt is az adott deformáció eléréséhez szükséges erőt mértük, tehát a választott mérési mód erőmérés kompressziós módban volt.



17. ábra: Mérési elrendezés precíziós penetrométernél

A mérések második felében azt vizsgáltam, hogy a fehér kenyérnél meghatározott 5 N terhelőerő mekkora deformációt okoz a félbarna, rozsos és barna kenyereknél. Ehhez a kísérlethez szintén a 35 mm-es mérőfejet használtam, a berendezés beállítása is a fentivel azonos volt azzal a különbséggel, hogy itt az adott erő hatására bekövetkező deformáció mértékét határoztam meg.

4.3.3. Terhelési idő meghatározása

Mint korábban említettem, a rutinszerű minőségellenőrzési vizsgálatok gyorsan elvégezhető és kiértékelhető mérést igényelnek. Kutatási, termékfejlesztési célokra több állományjellemző együttes meghatározására van szükség, ami időigényesebb méréssel valósítható csak meg.

A kenyér összetett reológiai anyagnak tekinthető, így a terhelés-tehermentesítés hatására bekövetkező deformáció nemcsak a nyomóerő mértékétől, hanem az időhatástól is függ. Az elasztigráf-elvű mérés alapja két, időtől függő jelenségre épül, ezek pedig a kúszás és a kirugózás. A mérési időnek tehát elegendően hosszúnak kell lenni ahhoz, hogy ezek a folyamatok megfelelően végbemegehessenek, viszont ügyelni kell arra is, hogy a mérés minél gyorsabban elvégezhető legyen. Előzetes vizsgálataink során, a mérési módszer finomításának harmadik lépéseként feladatomban volt az optimális terhelési idő megadása.

Ennél a mérési sorozatnál is igyekeztem különböző bélzetszerkezetű termékeket vizsgálni. Ezekbe a kísérletekbe a fehér, a rozsos és a barna kenyereket vontam be. Fehér kenyéرنél 12, barna és rozskenyéرنél 10-10 szeletet vizsgáltunk. Az előzetesen már kiválasztott 35 mm-es mérőfej és 5 N terhelőerő alkalmazása mellett 30, 60, 90, és 120 másodperces terhelési időket vizsgáltam. A műszert relaxációs mérési módban használtam, a mérőfej sebessége a mérés előtt 2 mm/s, terhelés közben 0,2 mm/s, tehermentesítést követően 2 mm/s volt.

A felvett deformáció-idő diagram segítségével a többféle jellemző határozható meg: Az ábráról leolvasható az 5 N terhelés során bekövetkező teljes deformáció értéke (D), a tehermentesítés után visszamaradó alakváltozás, a plasztikus deformáció (P), valamint a kettő különbsége, a rugalmas deformáció (R). A rugalmas és a teljes deformáció hányadosa pedig a relatív rugalmasság.

4.3.4. Mérési sebesség és a mintaelőkészítés menetének meghatározása

Elasztigráffal történő méréskor a súly tulajdonképpen ráesik a próbatestre, tehát a terhelés nagyon nagy sebességgel történik. Az állománymérővel végzett vizsgálatoknál – a berendezés működési elvéből adódóan – a pillanatszerű megterhelés nem kivitelezhető. A mérőfej maximális sebessége 10 mm/s, a mozgását léptetőmotor végzi. A kidolgozott mérési módszernél a méréseket 15 mm vastag kenyérszeleteken végezzük. Ennél a mintamagasságnál a 10 mm/s mérési sebesség nem megfelelő, hiszen ezt az utat ilyen sebességnél a mérőfej 1,5 s alatt teszi meg, így az elektronikának túl kevés ideje van beavatkozni, ami a mérés pontatlanságát növelheti. Mindenképpen szükséges tehát a mérési sebesség csökkentése.

Az Elasztigráf felső tárcsájának átmérője nagyobb, mint a minta felülete, így a terhelés teljes egészében, akadálytalanul nyomja össze a vizsgált bélzethengert. Kenyérszeleteken végzett méréseknél azonban a mérőfej a szelet felületénél kisebb, annak középső régiójába hatol be, a környező bélzetrészek a terhelés egy részének hatását ellensúlyozzák. Felvetődik tehát a kérdés, hogy ezek tükrében lehetséges-e a méréseket bélzetkorong helyett kenyérszeleten elvégezni.

Kísérleteimet félbarna kenyéren végeztem, mérési sorozatonként 15-15 ismétléssel. A mérések első felében a 15 mm vastag kenyérszelet közepéből 35 mm átmérőjű korongot vágtam ki kiszúrószerszám segítségével. Az állománymérőt a kidolgozott módszernek megfelelően relaxációs mérési módban használtuk, a terhelőerő értéke 5 N, a terhelés és tehermentesítés ideje 60 s. A mérésekhez P75-ös (75 mm átmérőjű alumínium korong) mérőfejet használtam, mozgási sebessége a mérés előtt és után 2 mm/s, mérés közben az első mérési sorozatnál 0,2 mm/s a másodikonál 1,7 mm/s volt. A 0,2 mm/s-os sebességgel kvázistatikus mérést kívántam megvalósítani, az 1,7 mm/s pedig az AACC valamint az AIB kenyérvizsgálati módszerénél alkalmazott érték.

Ugyanilyen sebesség-, erő- és időértékekkel a méréseket 15 mm vastag kenyérszeleteken is elvégeztem. Itt az alkalmazott mérőfej az előzetes vizsgálatokban kiválasztott A/BE 35-ös, 35 mm átmérőjű plexikorong volt.

A felvett deformáció-idő diagram alapján a teljes, a plasztikus és a rugalmas alakváltozás mértékét illetve a relatív rugalmasságot határoztam meg.

4.4. Módszer alkalmazhatóságának vizsgálata

Hat különböző típusú - fehér, házi jellegű, barna, rozsos, burgonyás valamint rozs –kenyeret választottam ehhez a méréshez. Mind a hat kenyeret a sütés napján, a közeli élelmiszerboltban vásároltam.

A méréseket 15 mm vastagságú kenyérszeleteken végeztem. Az mintaszám fehér kenyérnél 24, barna és rozsos kenyérnél 20-20, a burgonyásnál 22, a házi jellegűnél 30 a rozskenyérnél pedig 27 volt. A magas ismétlésszám miatt a mérés hosszadalmas volt, ezért külön figyelmet fordítottam a termékek száradásának kiküszöbölésére. Ehhez a kenyérszeleteket az egész mérés folyamán polietilén tasakokban tároltam, így biztosítva a kenyerek frissességét.

Az állománymérőt a kidolgozott mérési módszernek megfelelően a következőképpen állítottam be:

- mérési mód: relaxációs mérés,
- terhelőerő: 5 N,
- mérés ideje: 60 s,
- mérőfej sebessége a mérés előtt: 2 mm/s,
- mérőfej sebessége a mérés alatt: 0,2 mm/s,
- mérőfej sebessége a mérés végén: 2 mm/s,
- trigger erő: 0,05 N,
- mintavételezés: 100 mérés/s,
- mérőfej: A/BE 35, 35 mm átmérőjű plexi korong.

A mérés során felvett deformáció – idő görbéből megállapítható a teljes deformáció, a rugalmas és a plasztikus alakváltozás mértéke. A kenyerek rugalmasságának jellemzésére általam használt jellemző a rugalmassági fok, ami a rugalmas alakváltozás és a teljes deformáció hányadosa.

A kenyérbél rugalmasságát számos tényező befolyásolja, többek között a termék szerkezete, így a porozitása is. Ez a bélzet lyukacsosságát jelenti. Ennek értékéből következtethetünk a

szerkezet gáztartó képességére, vagyis arra, hogy a kelesztés és sütés során képződő légbuborékokból mennyit képes a késztermék magában tartani.

A Magyar Szabvány 20501/3-82 számú irányelve alapján minden kenyértípusra és minden szeletre meghatároztam a porozitás értékét.

A mintavételhez a kenyérszeletek középső részéből, megfelelő távolságra a héjtól, 60 mm átmérőjű korongokat metszettem ki. A kiszúrt mintáknak kiszámoltam a térfogatát, lemértem a tömegét. Ezt követően az előkészített bélzethengereket hőálló fémedényekbe raktam, majd szárító szekrénybe helyeztem és 130 °C-on, megközelítőleg 1,5-2 órán keresztül szárítottam.

A folyamat időtartama a kenyérbél nedvességtartalmától függött. 1,5 óra elteltével próbamérést végeztem. Elektronikus mérleggel lemértem egy minta tömegét, majd visszahelyeztem a szárítószekrénybe. 10 perc elteltével megismételtem a mérést. Ha nem történt jelentős tömegcsökkenés, a minta kiszáradt. A szárítás általi tömegvesztés az eredeti tömeg %-ban fejeztem ki.

Az így kapott nedvességtartalomból, a szabványban feltüntetett táblázat segítségével, határoztam meg minden szelet bélzetének az abszolút sűrűségét. Ezt követően az alábbi képlet alapján számoltam ki a bélszerkezetre jellemző porozitást:

$$P = [(1 - (m/F * V)] * 100 \%$$

ahol **m**: a minta tömege, g,

F: a kenyérbél abszolút sűrűsége (fajsúly), g/cm³,

V: a kiszúrt minta térfogata, cm³.

A bélzet porozitása a minta nedvességtartalmából és tömegéből, szintén a szabványban feltüntetett táblázat alapján, interpolálással is megadható.

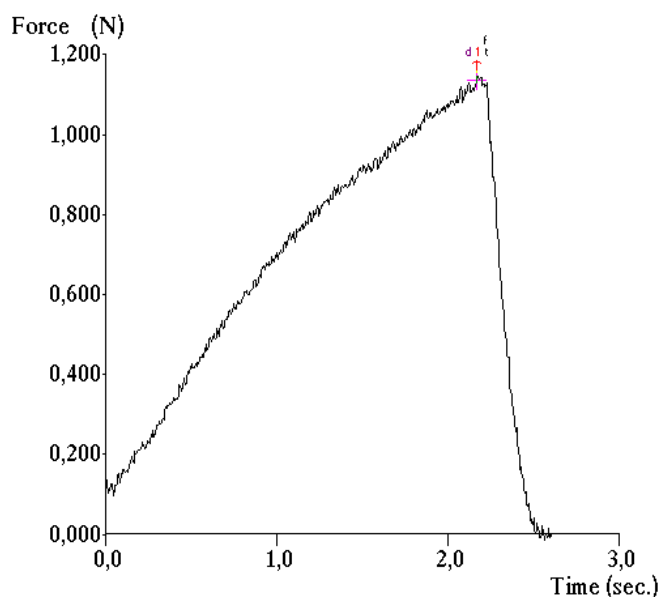
4.5. Az új módszer kapcsolata más kenyérvizsgáló módszerekkel

Kísérleteim során fehér, rozsos és barna kenyér tulajdonságait vizsgáltam a sütés napján. A kenyereket 15 mm-es szeletekre vágtam, a kenyér két végén 30-30 mm-es darabot kihagytam a vizsgálatból. Mindig a kenyérszelet közepét terheltem. Az ismétlések száma fehér kenyéرنél 40, rozsos és barna kenyereknél 36-36.

A szerkezet vizsgálatát precíziós állománymérővel – Stable Micro Systems TA-XT2 – végeztem, a mérésekhez 35 mm átmérőjű plexi mérőfejet használtam különböző mérési módokban.

4.5.1 American Institute of Baking szabványán alapuló módszer

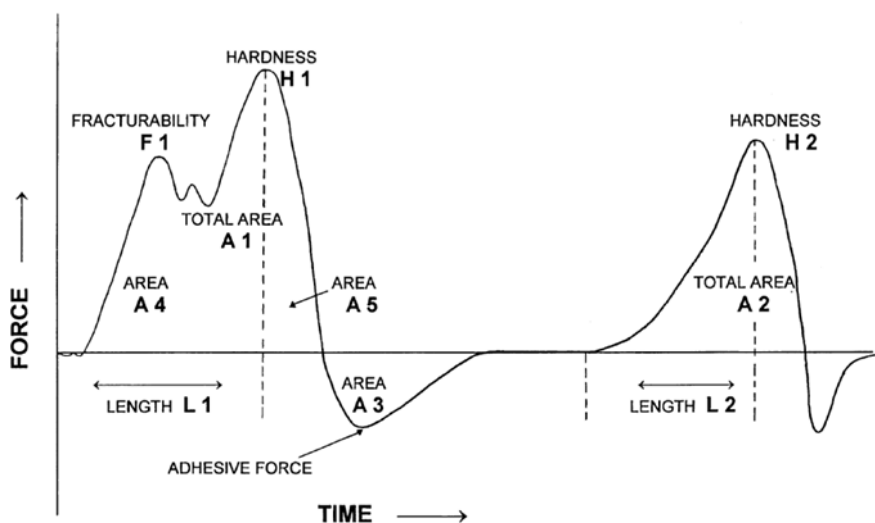
A TA.XT2 beállításait a 4.3.1. pontban már ismertettem. A mérésekhez 35 mm-es plexi korong mérőfejet használtam. A kenyérszeletet 25 %-os deformáció eléréséig terheltek, majd a mérőfejet visszahúztuk. Az erő-idő diagram (18. ábra) maximális értéke a keménységet jellemzi.



18. ábra: Az AIB módszer erő – idő diagramja

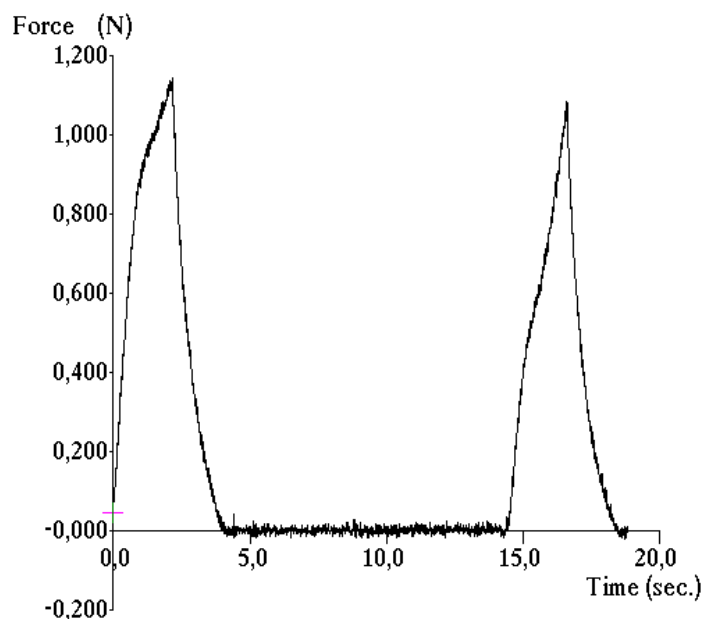
4.5.2. Texture Profile Analysis vagy két harapás teszt

A TPA módszer során a mintát egymás után kétszer meghatározott mértékű deformációnak tesszük ki. A két terhelés között rövid várakozási idő telik el. Mivel az erő deformáció görbe a kettős terhelés miatt nehezen értékelhető, a mérőfej mozgási sebessége pedig a teljes mérés során azonos, az eltelt idő arányos a deformáció értékével. A TPA módszer általánosított erő-idő diagramja és az erről leolvasható adatok a 19. ábrán láthatóak.



19. ábra: A Texture Profile Analysis általános erő-idő diagramja

A felvett erő-idő diagramból (20. ábra) így több, a vizsgált anyagra jellemző paraméter olvasható le illetve számolható.



20. ábra: A TPA módszer mérések során felvett jellegzetes erő - idő diagramja

Ezek a paraméterek a következők (2. táblázat):

Keményység (Hardness): az az erő, ami egy adott mértékű deformáció eléréséhez szükséges. A grafikonon a keménységet az első csúcs nagysága írja le.

Rugalmasság (Springiness): a minta eredeti alakba történő visszaalakulását jellemzi a terhelést követően. A rugalmasság a rugalmas és plasztikus alakváltozás mértéke.

Kohézió (Cohesiveness): a mintában uralkodó belső kötőerőt jellemzi. Kohézió = két csúcs alatti terület hányadosa.

Rágási ellenállás (Gumminess): az az erő, ami a minta rágásához szükséges. Rágási ellenállás=keménység*kohézió.

Rágáshoz szükséges energia (Chewiness): az az energia, ami a minta lenyelhetővé tételéhez szükséges. Rágási energia = rágási ellenállás * rugalmasság

Mechanikai jellemző	Mért változó	SI mértékegység
Keménység	erő	N
Rugalmasság	távolság	mm
Kohézió	erők aránya	dimenziómentes
Rágási ellenállás	erő	N
Rágáshoz szükséges energia	munka	$N \times mm$ (mJ)

2. táblázat: A TPA módszerrel meghatározott jellemzők és azok SI mértékegységei

A készülék beállítása a következő volt:

- mérési mód: TPA1,
- mérőfej sebessége a mérés előtt: 2 mm/s,
- mérőfej sebessége a mérés alatt: 0,2 mm/s,
- Mérőfej sebessége a mérés végén: 2 mm/s,
- deformáció mértéke: 25 %,
- trigger erő: 0,05 N,
- várakozási idő a két terhelés között: 10 s,
- mintavételezés: 200 mérés/s,
- Mérőfej: A/BE 35, 35 mm átmérőjű plexi korong.

4.5.3. Tartós terhelés

Ennél a mérési sorozatnál a kidolgozott, új mérési módszert alkalmaztuk. A mintán 5 N terhelést tartottunk 1 percen keresztül, majd egy percre vizsgáltuk a minta visszaalakulását. Az állománymérő beállítása és az eredmények értékelése a 4.4. pontban leírtaknak megfelelően történt.

4.6. Az adatok értékelése

Az adatok értékelése SPSS és R statisztikai programmal illetve Excel táblázatkezelővel történt. Az adatsorokat azok átlagával, szórásával és variációs koefficiensével jellemeztem.

A megfelelő mérési paraméterek kiválasztásánál az eredményeket grafikusán is ábrázoltam. A sebesség és a mintaelőkészítés hatásának vizsgálatokor az eltérések kimutatására kétmintás t-próbát, az összefüggések meghatározására regresszió analízist alkalmaztam, az illesztés helyességének ellenőrzésére diagnosztikus ábrákat készítettem.

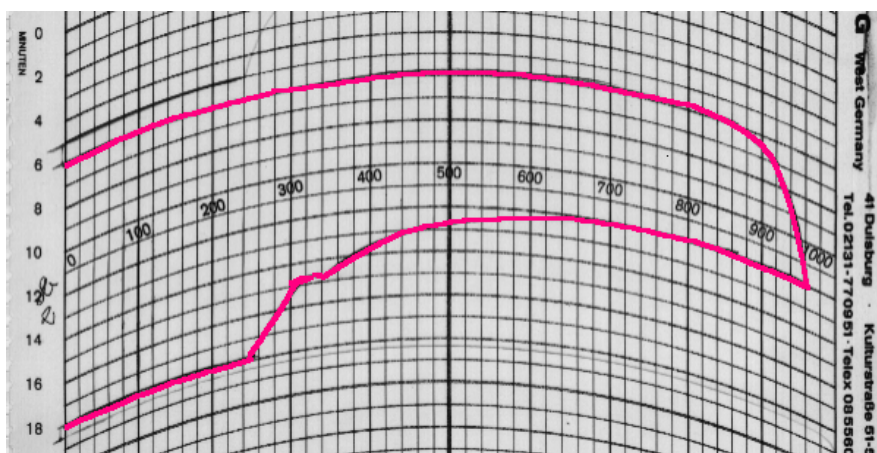
A különböző kenyértípusok vizsgálatánál az egyes jellemzők alapján a kenyértípusok közötti eltérések megállapítására varianciaanalízist, a különbségek pontosabb feltárására Tukey-próbát végeztem, végül az összes mért jellemző figyelembe vételével diszkriminancia analízis segítségével ellenőriztem a módszer alkalmazhatóságát.

5. EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉS

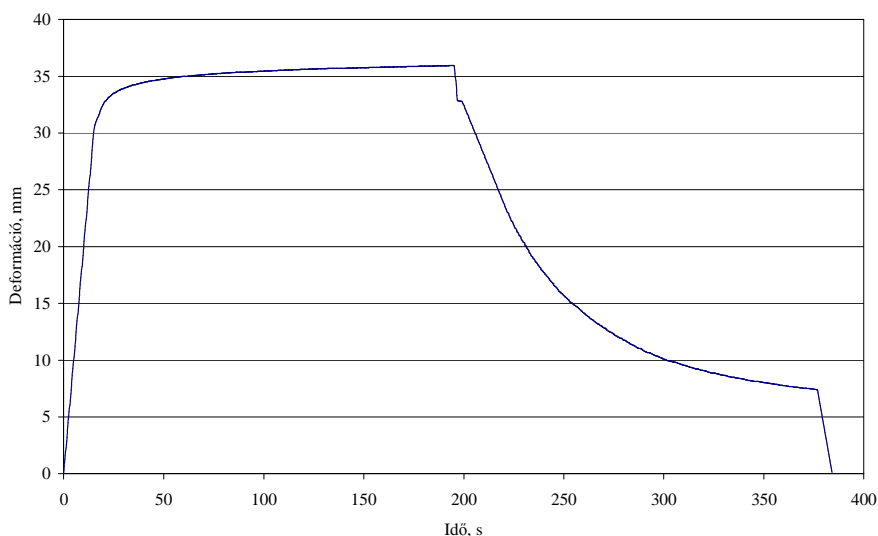
5.1 Elasztigráf adaptációja precíziós állománymérő műszerre (TA.XT2-re)

Kenyérbélzet vizsgálata

Az elasztigráfos mérési módszernek precíziós állománymérővel történő szimulációja során négyféle kenyérből (fehér, félbarna, rozsos és barna kenyér) mindkét műszeren kenyerenként 5 - 5 párhuzamos mérést végeztem. A mérések eredményeként kapott elasztigramokat és idő-deformáció görbéket összehasonlítottam. A 21. ábra a félbarna kenyér elasztigramja, a 22. ábrán ugyanennek a kenyérnek a precíziós állománymérővel mért idő-deformáció görbéje látható.



21. ábra: félbarna kenyér elasztigramja



22. ábra: A félbarna kenyér idő-deformáció görbéje

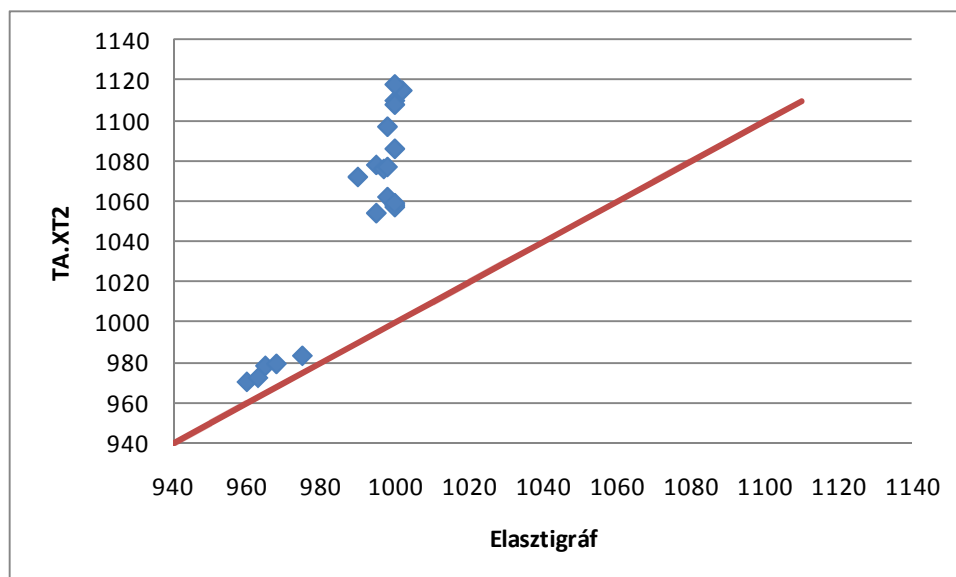
A két görbe lefutását összehasonlítva megállapítható, hogy az elasztigramot 90°-kal elforgatva a precíziós állománymérővel mért idő-deformáció görbéhez hasonló lefutású görbét kapunk. A 13. ábrán feltüntetett jellemző értékek mindkét diagramon jól láthatóak, leolvashatóak.

Eltérés a deformáció dimenziójában van, az elasztigramon elasztigráf egységben, a precíziós állománymérő (TA.XT2) idő-deformáció görbéjén milliméterben adott a deformáció. A milliméterben adott deformáció értékek azonban átszámíthatóak elasztigráf egységre (1000 EE = 30 mm), így a mért értékek már összehasonlíthatóak.

Mivel mind az elasztigramon, mind az idő-deformáció görbén a két jellegzetes, közvetlenül meghatározható pont a teljes és a plasztikus deformáció mértéke, a két módszer egyezőségét ezen paraméterek felhasználásával vizsgáltam.

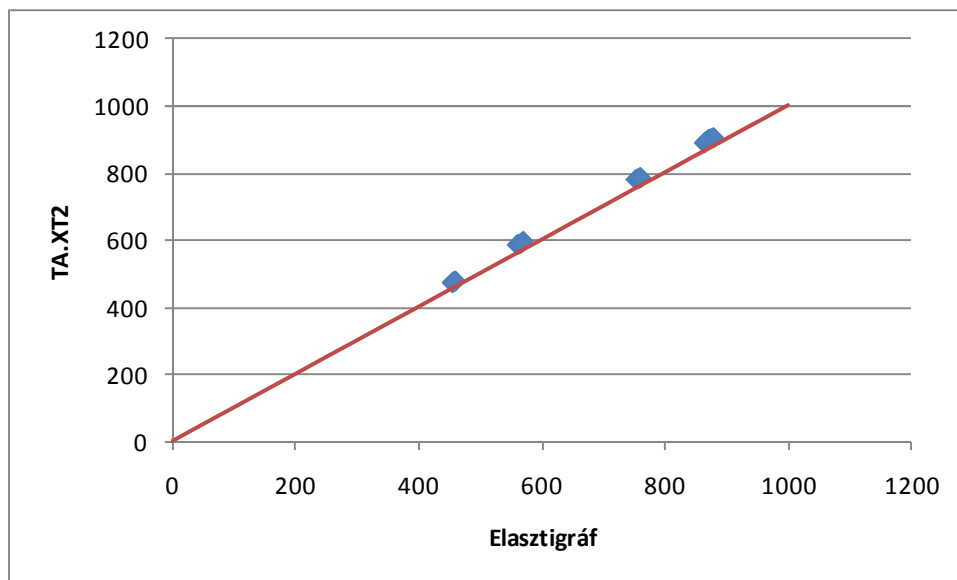
Először a két berendezéssel meghatározott teljes és plasztikus deformáció értékek közötti összefüggés megállapítására szórásdiagramokat készítettem (23. és 24. ábra). Ideális esetben - ha a berendezésekkel teljesen ugyanazt az értéket kapjuk az említett két jellemzőre - az adatpontok az origón átmenő 1 meredekségű egyenesre esnek.

A teljes deformáció esetén (23. ábra) a 950-1000 elasztigráf egység tartományban az adatpontok – a barna kenyér értékei – az $y=x$ egyenletű egyenes közelében helyezkednek el. Látható azonban, hogy a mérési pontok nagy része az egyenestől távol esik. Ez nem meglepő, hiszen az Elasztigráf méréshatára 1000 EE, a TA.XT2 állományvizsgálónál viszont ebben a deformáció-tartományban nincs felső határ. Ezek az eredmények megerősítik, hogy a szabványban előírt Elasztigráf már nem alkalmas a mai kenyerek állományának jellemzésére, hiszen az alkalmazott terhelés hatására olyan mértékű deformációt szenvednek, melynek mértéke a berendezés méréshatárán kívül esik.



23. ábra: A teljes deformáció szórásdiagramja

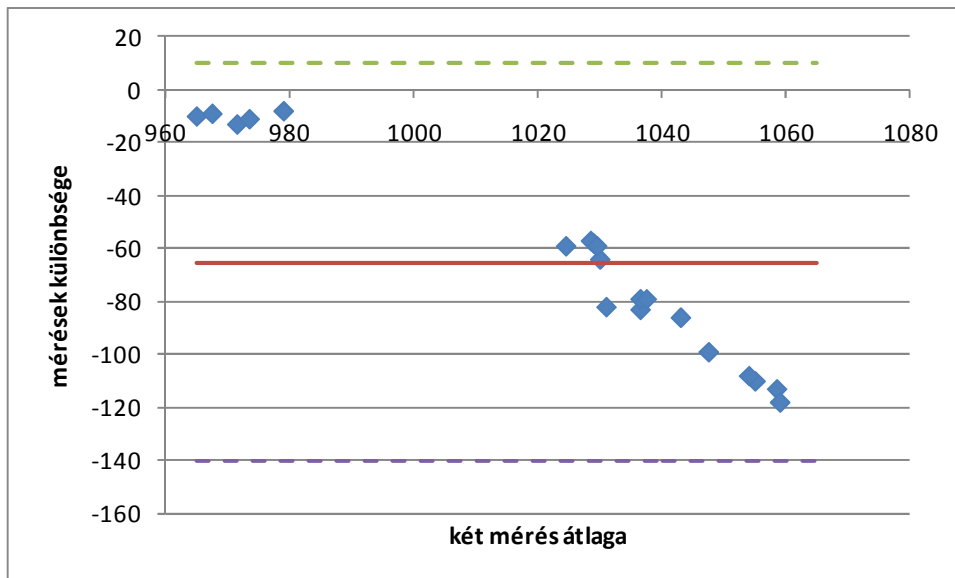
A plasztikus deformáció esetén (24. ábra) a mérési pontok szinte teljesen az 1 meredekségű egyenesre esnek. Ezt a jellemzőt tehát a két berendezés minden esetben közel azonosnak mérte, ebből arra következtetünk, hogy a TA.XT2 állományvizsgálóval az elasztigráfos mérési módszer megvalósítható, ennek segítségével az Elasztigráf szűk méréstartománya kiterjeszhető.



24. ábra: A plasztikus deformáció szórásdiagramja

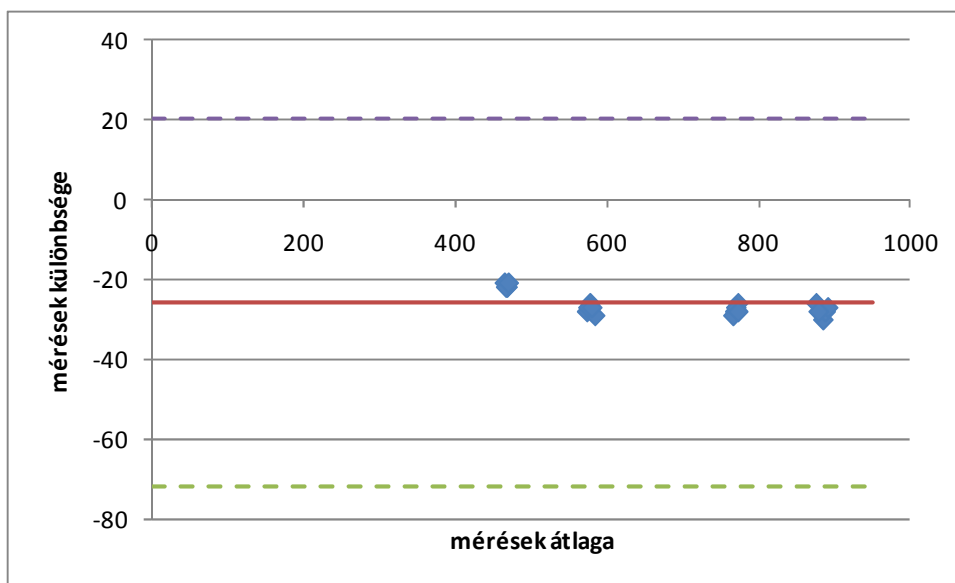
Két mérési módszer egyezőségének vizsgálatára a Bland –Altman féle ábrát az élettudományokban elterjedten alkalmazzák. Ez szintén egy szórásdiagram, az x tengelyen a két mérés átlagával, az y tengelyen a két mérés különbségével. Ezt a diagramot itt is a teljes és a plasztikus deformáció egyezőségének vizsgálatára használtam.

A teljes deformáció esetén (25. ábra) megfigyelhető, hogy az említett 950-1000 elasztigráf egység tartományában az eltérések közel azonosak, szórásuk viszonylag kicsi. Az elasztigráf méréstartományát meghaladó esetekben természetesen a mérési eredmények különbsége nő, hiszen míg ez a berendezés a maximális 1000 egységet mutatja, a TA.XT2 a tényleges deformációt rögzíti.



25. ábra: A teljes deformáció Bland-Altman diagramja: a folytonos vonal a különbségek átlagát, a szaggatott vonalak a ± 2 SD határt mutatják

A plasztikus deformáció esetén (26. ábra) a két berendezéssel meghatározott értékek különbsége a teljes méréstományban közel állandó, szórása viszonylag kicsi, a mért értékek lényegében azonosnak tekinthetők. Ez is alátámasztja, hogy az Elasztigráf a TA.XT2 állománymérővel kiváltható.



26. ábra: A plasztikus deformáció Bland-Altman diagramja: a folytonos vonal a különbségek átlagát, a szaggatott vonalak a ± 2 SD határt mutatják

Az elasztigráfos mérések kiértékelésénél azonban nem a teljes és a plasztikus deformáció értéke alapján, hanem a relatív rugalmasság alapján alkotnak véleményt a kenyérről. A mérések eredményeként kapott D (teljes deformáció) és R (rugalmas deformáció) értékek valamint a relatív rugalmasság (R/D) átlagait az 3. táblázatban foglaltam össze.

3. táblázat. A teljes deformáció (D), rugalmas deformáció (R) és a relatív rugalmasság (R/D) átlaga

Kenyértípus	TA.XT2			Elasztigráf		
	D	R	R/D	D	R	R/D
Barna	976	384	0,40	966	401	0,42
Rozsos	1058	579	0,58	999	541	0,54
Félbarna	1078	294	0,29	996	239	0,24
Fehér	1110	212	0,19	1000	130	0,13

A szabvány szerint két párhuzamos mérés eredménye között az eltérés a középértékekhez viszonyítva D érték esetén $\pm 20\%$ lehet, az R értékek eltérésére nincs előírás. Mivel a további vizsgálatainkhoz a precíziós állománymérőt használjuk, ehhez viszonyítottuk az Elasztigráf eredményeit. Megállapítható, hogy a teljes deformáció (D) értékei az előírt eltérésen belül vannak. A relatív rugalmasságban (R/D) az eltérés a középértékhez viszonyítva $\pm 5\%$ lehet. Az általunk kapott eredmények ennek az előírásnak nem felelnek meg, a TA.XT2 precíziós állománymérő és az Elasztigráf R/D értékei között 5% -nál nagyobb az eltérés. Ez abból ered, hogy mind az R értékek számolásához, mind a relatív rugalmasság meghatározásához felhasználjuk a teljes deformációt (D). Mivel ezek eredményei között az elasztigráf méréstartományát meghaladó értékek is szerepelnek könnyen belátható, hogy ezekben az esetekben – a teljes deformációhoz hasonlóan – a rugalmas deformáció esetén is jelentős eltérés tapasztalható a két berendezéssel mért adatok között.

Összességében megállapítható, hogy a TA.XT2 állománymérő alkalmasnak bizonyult az Elasztigráf helyettesítésére, ennek segítségével más, az elasztigráfos mérésre alapozott vizsgálatok is elvégezhetők. A szűk méréshatárból eredő hátrányok kiküszöbölhetők, az Elasztigráfnál alkalmazott táblázatok átdolgozhatók, így a régi mérési elv megtartásával a mai kenyerek állománya nagy pontosságú méréssel jellemezhető.

5.2 Mérési módszer fejlesztése

Mivel az elasztigráfos méréseknél a minta előkészítés nehézkes és időigényes, ezen művelet egyszerűsítését fontos feladatnak tartottam. Az Elasztigráf viszonylag nagy méretű (átmérő 56,5 mm, magasság 50 mm) bélzethengerrel dolgozik, így egy 1 kg-os fehér vagy félbarna kenyérből maximum 4-5 minta nyerhető. A barna és rozsos kenyereknél kisebb súlyuk és térfogatuk miatt ez az arány még rosszabb. A minta kiszúrása közben a kiszúró szerszám elmozdulhat, nem egyenes terhelés esetén a kivágott bélzethenger torz, ferde lesz, ami a mérés megbízhatóságát rontja. Nemzetközi gyakorlatban mind az American Association of Cereal Chemists (AACC), mind az American Institute of Baking (AIB) elfogadott kenyérvizsgálati módszerében kenyérszeleteken határozzák meg a bélzet reológiai tulajdonságait.

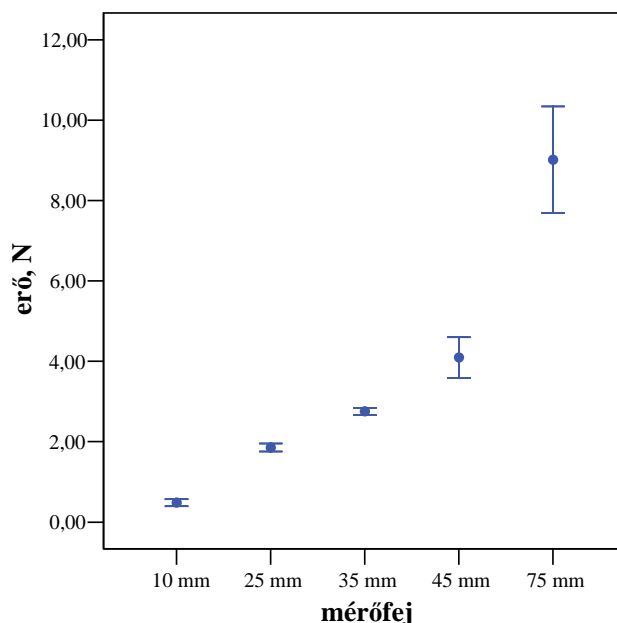
Méréseimet tehát a továbbiakban kenyérszeleten kívántam folytatni, ehhez azonban az Elasztigráf elvén működő módszer finomítására volt szükség. Lényeges kérdés volt a megfelelő

mérőfej, az alkalmazandó erő, mérési sebesség és mérési idő meghatározása. Vizsgáltam továbbá, hogy mennyiben befolyásolja az eredményeket, ha a mérést nem kivágott korongon, hanem teljes szeleten végezzük.

5.2.1. A mérőfej kiválasztása

A különböző mérőfejekkel 25 %-os deformáció eléréséhez szükséges erőt vizsgáltuk. Természetesen nem elhanyagolható az érintkezési felületen a terhelés hatására fellépő feszültség nagysága sem, ezért a mérőfej kiválasztásánál ezt is figyelembe vettem. Az a mérőfej tekinthető ideálisnak, amelynek átmérője elég nagy ahhoz, hogy az esetleg előforduló nagyobb pórusok a mérést ne zavarják, de elég kicsi ahhoz, hogy a héj közeli régiók elkerülhetők legyenek.

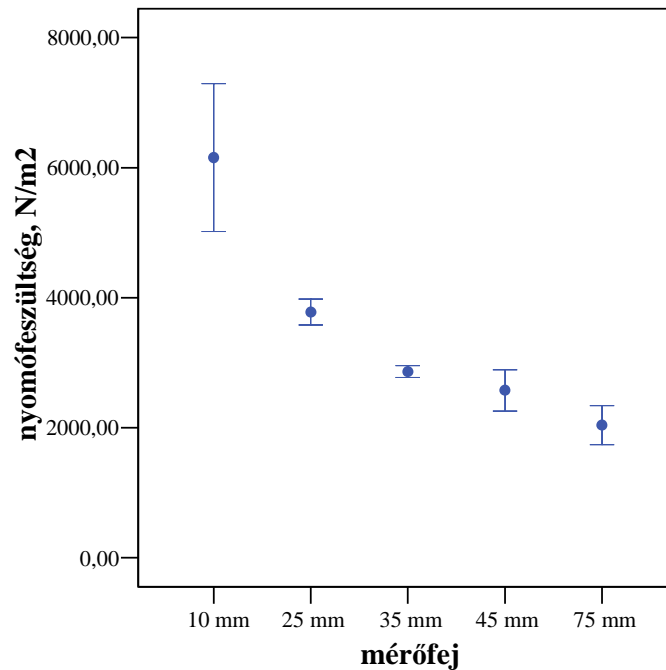
A 27. ábra az egyes mérőfejek esetén mért erőértékek átlagait és hibasávjait mutatja 95 %-os megbízhatósági szinten, félbarna kenyérmél.



27. ábra. Nyomóerő átlagértékei a mérőfej átmérő függvényében és a hibasáv 95 %-os megbízhatósági szinten, félbarna kenyérmél

A 27. ábrából látható, hogy a 10, a 25 és a 35 mm-es mérőfejek esetén a mért erőértékek viszonylag szűk hibasávban változnak.

A 28. ábra a terhelőfeszültség átlagait és hibasávjait szemlélteti. Ebben az esetben egyértelműen a 35 mm átmérőjű mérőfej bizonyult a legjobbnak, hiszen 95 %-os megbízhatósági szinten itt a legkeskenyebb a hibasáv.



28. ábra: Az egyes mérőfejek esetén fellépő terhelőfeszültség átlagai és hibasávjai 95 %-os megbízhatósági szinten, félbarna kenyérnél

A 28. ábrán bemutatott eredményeket figyelembe véve további méréseimhez a 35 mm átmérőjű mérőfejet alkalmaztam, így kizárható a nagyobb pórusok és a héjhoz közeli régiók hatása is, valamint az ismételt mérések szórása jelentősen csökkenthető.

5.2.2. Terhelőerő meghatározása

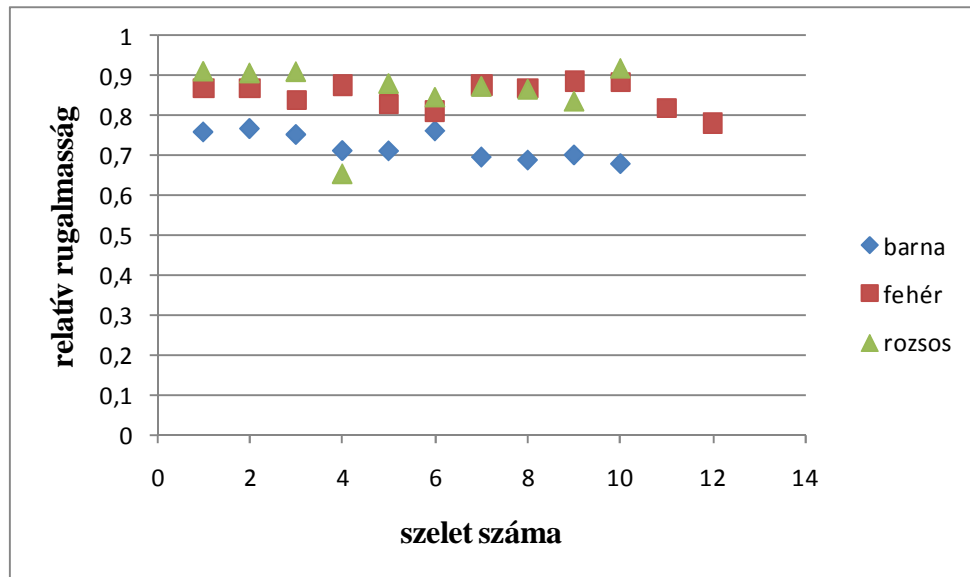
Könnyen belátható, hogy a nagy mintánál alkalmazott 1875 g-os terhelés a maximum 15 mm magas szeleteknél milyen drasztikus változást okozna. Éppen ezért elkerülhetetlen a terhelőerő csökkentése. A megfelelő terhelőerőt az erő-deformáció jelleggörbék elemzésével állapítottam meg. Olyan értéket kerestem, amely elég kicsi ahhoz, hogy a laza szerkezetű, puha fehér és félbarna kenyerek esetében ne okozzon 60 %-nál nagyobb deformációt, viszont elég nagy ahhoz, hogy alkalmazásával a keményebb, nagyobb mennyiségű rozslisztet tartalmazó termékek esetén is mérhető deformációt érjünk el. Ezek alapján az 5 N terhelőerőt ítéltük elfogadhatónak, mert ekkora terhelés a fehér kenyér esetén kb. 40%, míg rozskenyér esetén kb. 15 % deformációt eredményez.

5.2.3. A terhelési idő meghatározása

Az elasztigráfos mérésnél a terhelés és a tehermentesítés egyaránt 3 percig tart, így az egyes vizsgálatok elvégzéséhez 6 perc szükséges. Ehhez adódik még hozzá a minta előkészítés ideje. A minőségellenőrzésnél fontos szempont, hogy a mérések ideje a lehető legrövidebb legyen, így ha beavatkozásra van szükség, az minél előbb megtörténjen. A 15-16 mm magas kenyérszelet szerkezete mechanikai hatásokkal szemben kevésbé ellenálló, mint az 50 mm magas bélzet henger,

ezért a szelet esetén a kúszás és kirugózás folyamata rövidebb terhelési idő mellett is jól jellemezhető. Kísérleteim ezen része a megfelelő mérési idő megállapítására irányult.

Első lépésben egy rövid, 30 másodperces és egy viszonylag hosszú 120 másodperces mérési sorozatot végeztünk.



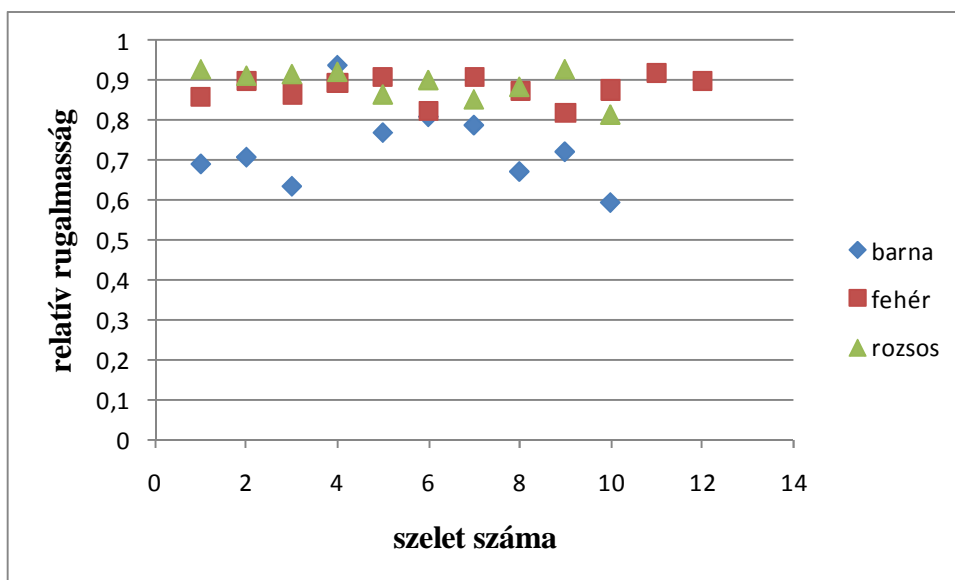
29. ábra: Három kenyértípus relatív rugalmassága 30 s terhelési időnél, a kenyér hosszanti tengelye mentén

A 30 másodperces terhelésnél megfigyelhető (29. ábra), hogy az egyes kenyértípusokon belüli szeletek relatív rugalmasságának értéke széles sávban - 0,65 és 0,95 között - változik. Ennek az oka az, hogy a bélszerkezet ilyen rövid terhelésre nem képes úgy reagálni, hogy az így kapott eredmények alkalmasak legyenek a kenyér minőségének jellemzésére.

A legnagyobb eltérés a barna kenyérnél tapasztalható, emellett a rozsos kenyér adatai is tág határok között mozognak. Fehér kenyérnél viszonylag szűk sávban helyezkednek el a mérési pontok. Ez a terhelési idő céljainknak nem felel meg, mivel olyan módszert igyekeztem kidolgozni, amely mindegyik terméktípusnál egyaránt használható.

Hasonló jelenség figyelhető meg a 120 másodperces terhelési időnél (30. ábra). A különböző kenyértípusokon belüli szeletek relatív rugalmasságának a szórása szintén nagy.

A 120 másodperc túlságosan soknak bizonyult. A bélzet olyan hosszú idejű nyomásnak volt kitéve, hogy az a szerkezetben maradandó változásokat okozott.

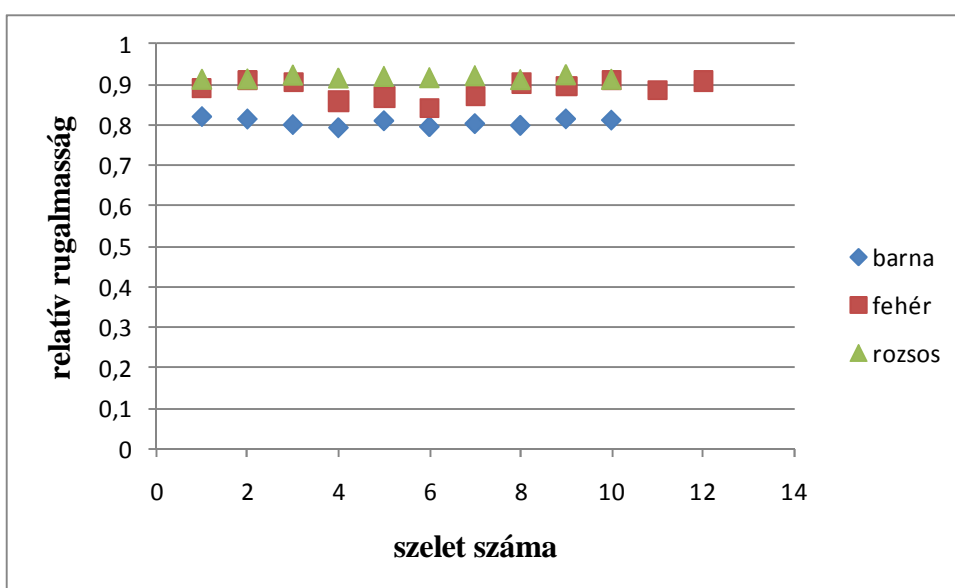


30. ábra: Három különböző kenyértípus relatív rugalmassága 120 s terhelési időnél, a kenyér hosszanti tengelye mentén

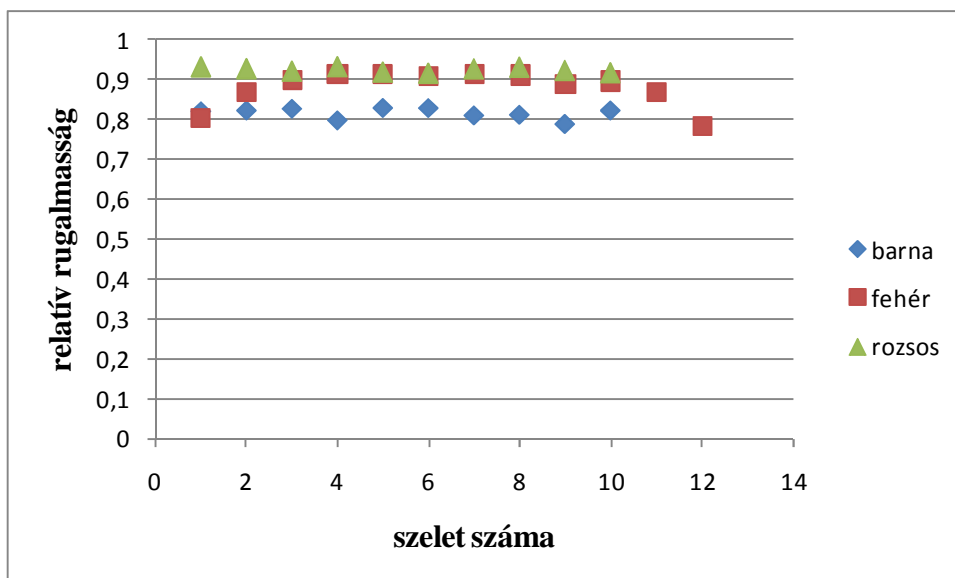
A barna kenyér egyes szeleteinek a relatív rugalmassága tág határok - 0,85 és 0,6 - között változik. Bélzete kevésbé tudott ellenállni ilyen hosszú idejű terhelésnek, szerkezetében szemmel látható szakadás következett be. Relatív rugalmassága is kisebb volt, mint a fehér illetve a rozsos kenyereknél.

Mivel a 30 másodperc túl rövidnek, a 120 másodperc túl hosszúnak bizonyult, a két határ között kerestem az optimális terhelési időt (31. ábra és 32. ábra).

A méréseket 60 majd 90 másodpercig tartó terheléssel folytattam. A kenyértípusok egyes szeleteinek relatív rugalmassága mindkét esetben 0,8 és 0,95 között, viszonylag szűk határok között változott. Nem jellemzők a kiugró értékek, amelyek kétségessé tennék a módszer megbízhatóságát.

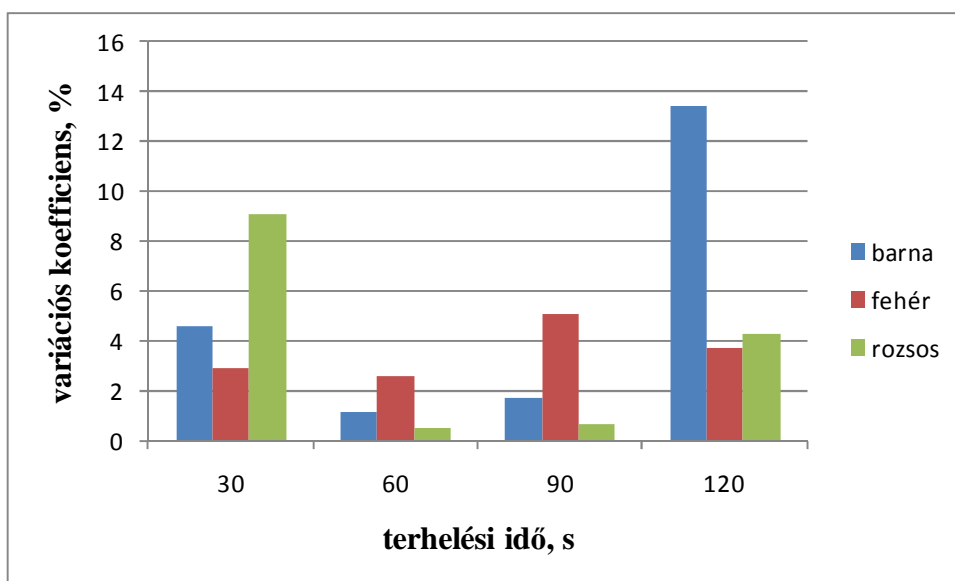


31. ábra: Három különböző kenyértípus relatív rugalmassága 60 s terhelési időnél, a kenyér hosszanti tengelye mentén



32. ábra: Három különböző kenyértípus relatív rugalmassága 90 s terhelési időnél, a kenyér hosszanti tengelye mentén

A variációs koefficiensek értékeinek alakulása is megerősíti eddigi következtetéseimet (33. ábra). A 30 másodperces terhelésnél sem a kúszás, sem a kirugózás folyamata nem megy végbe, mind a teljes és a rugalmas deformáció, mind a relatív rugalmasság értékeiben nagy ingadozás figyelhető meg. Hasonló bizonytalanság tapasztalható az említett paraméterekben 120 másodperces terhelés esetén is. A bélzet inhomogenitása, a pórusok méretének egyenetlensége hosszabb idejű terhelés esetén jobban érvényesül a bélszerkezetben szakadások, maradandó változások léphetnek fel.



33. ábra: A relatív rugalmasság variációs koefficienseinek értéke három kenyértípusnál a terhelési idő függvényében

A 60 másodperces terhelési idő esetén a variációs koefficiens értéke minden vizsgált kenyértípusnál 3 %, 90 másodperc esetén pedig 5,1 % alatt maradt. Mindkét terhelési idő esetén a kúszás és kirugózás folyamata megfelelő mértékben lejátszódott ahhoz, hogy a teljes és a rugalmas deformáció értékei megbízhatóak legyenek.

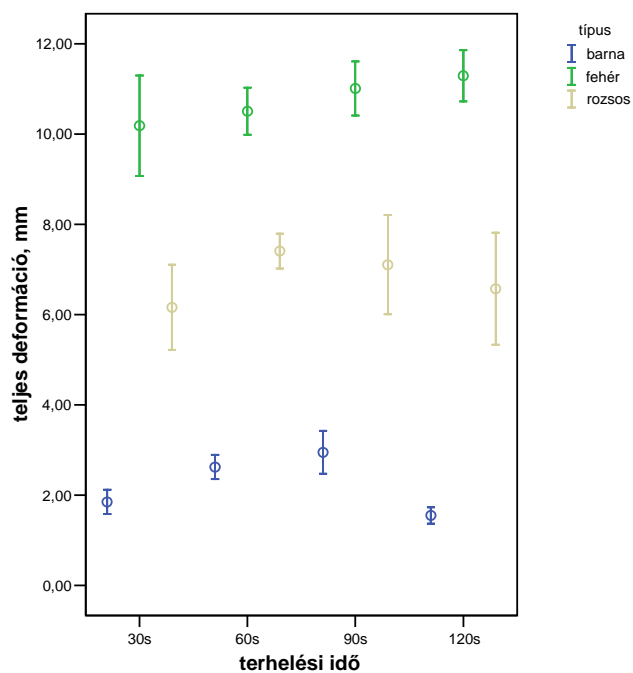
Ha áttekintjük a teljes, plasztikus és rugalmas deformáció értékeinek variációs koefficienseit is (4. táblázat), azt tapasztaljuk, hogy 60 s terhelési idő esetén a koefficiens értéke minden paraméternél, minden kenyértípusnál 15 % alatt marad, ami a többi mérési időnél nem mondható el. A 30 másodperces mérési időnél a CV értéke 2,9-46,58 %, a 90 másodpercesnél 0,65-46,76 %, 120 másodpercnél pedig 3,68-47,02 % között változott.

4. táblázat. A teljes, plasztikus és rugalmas alakváltozás és a relatív rugalmasság variációs koefficienseinek értéke az egyes mérési időknél mindhárom vizsgált kenyértípusra

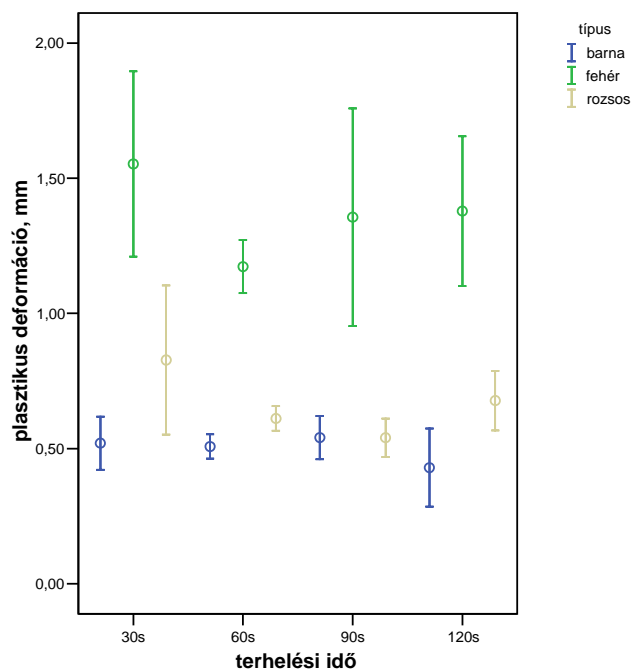
Terhelési idő, s	D			P		
	barna	fehér	rozsos	barna	fehér	rozsos
30	20,37772	18,51907	21,36652	26,40567	32,214	46,58506
60	14,29851	7,812431	7,271781	12,40053	13,17104	10,45449
90	22,58571	8,570067	21,6004	20,7458	46,76255	18,25079
120	16,32971	7,897513	26,40376	47,0216	31,67651	22,68205
	R			R/D		
	barna	fehér	rozsos	barna	fehér	rozsos
30	19,49269	17,31589	25,8361	4,625815	2,909622	9,07278
60	14,94542	9,937684	7,138009	1,136513	2,565746	0,499733
90	23,24383	4,378222	21,97999	1,739625	5,036355	0,644553
120	12,47681	7,258654	29,22851	13,40639	3,684082	4,293963

A 4. táblázat eredményeit megerősíti az egyes mért jellemzők átlagainak és ± 2 SD hibasávjainak ábrázolása is (34-35. ábra).

Megfigyelhető, hogy a teljes deformációt tekintve (34. ábra) a háromféle kenyértípus mindegyik mérési idő esetén jól elkülöníthető. Rozsos kenyérnél egyértelműen látszik, hogy a 60 másodperces mérés esetén a legkeskenyebb a hibasáv. Fehér kenyér esetén a 30 s-os mérésnél viszonylag széles a ± 2 SD tartomány, a többi esetben lényeges különbség nem látható. A barna kenyér teljes deformáció értékei az összes mérési idő esetén szűk tartományban változnak.

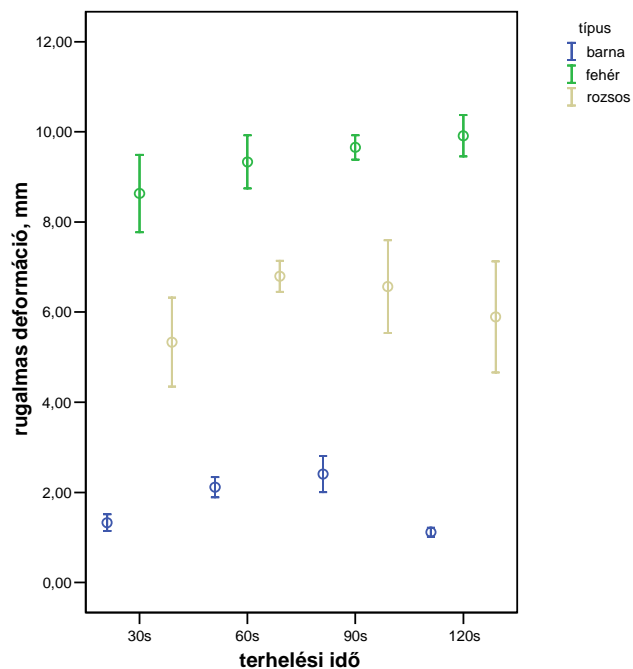


34. ábra: A teljes deformáció átlagai és a ± 2 SD hibásávjai 95 %-os megbízhatósági szinten három különböző kenyértípus esetén



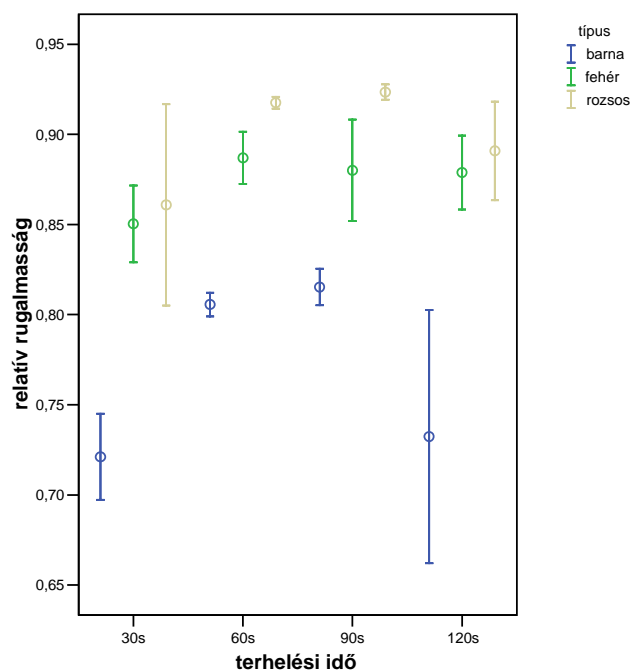
35. ábra: A plasztikus deformáció (átlag és a ± 2 SD hibásáv 95 %-os megbízhatósági szinten) a terhelési idő függvényében három különböző kenyértípus esetén

A plasztikus deformáció értékeiben (35. ábra) extrém széles hibasávok is előfordulnak. Megfigyelhető, hogy a rozsos és a barna kenyér értékei itt nem különülnek el olyan egyértelműen, mint a teljes deformációnál. A fehér kenyéرنél egyértelműen a 60 s-os mérési időnél kapjuk a legmegbízhatóbb eredményeket.



36. ábra: A rugalmas deformáció átlagai és a ± 2 SD hibasávjai 95 %-os megbízhatósági szinten három különböző kenyértípus esetén

A rugalmas deformáció alapján (36. ábra) a három kenyértípus ismét jól elkülöníthető. A hibasávok alakulása a teljes deformációhoz hasonló, barna kenyérenél minden esetben elfogadható, rozsos kenyérenél a 60 s-os mérés a legkedvezőbb. Fehér kenyérenél viszont a 30 másodperces mérési idő kevésbé határozottan tér el a 60 és a 120 másodpercestől, itt 90 másodpercnél a legkeskenyebb a hibasáv.



37. ábra: A relatív rugalmasság átlagai és a ± 2 SD hibasávjai 95 %-os megbízhatósági szinten három különböző kenyértípus esetén

A 30 és 120 másodperces mérési idő esetén a relatív rugalmasságnál nagyon széles hibasávok is megfigyelhetők (37. ábra). A fehér és a rozsos kenyér között szignifikáns különbség nincs. Kilencven másodpercnél már kedvezőbbek az eredmények, itt a három kenyértípus elkülönül egymástól és a hibasávok is keskenyebbek.

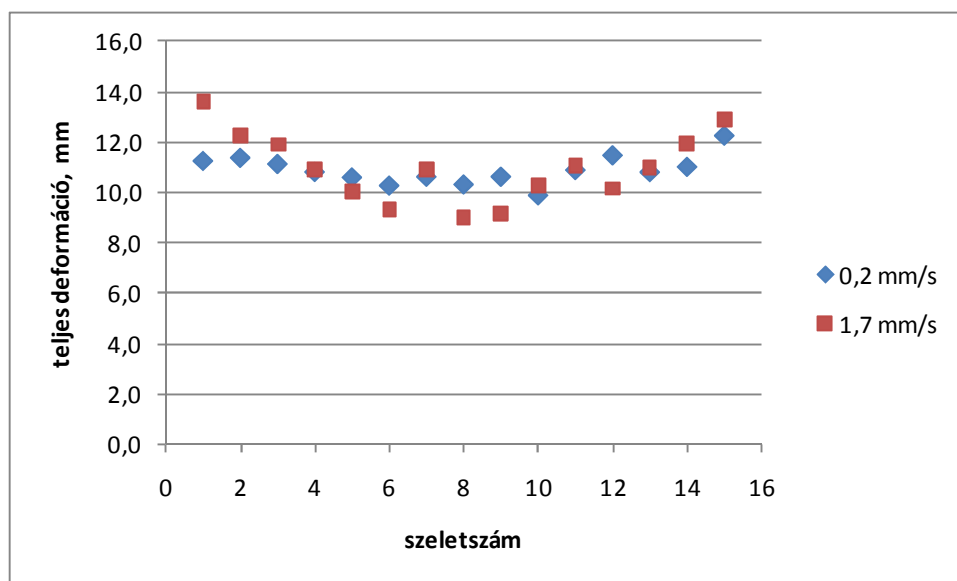
Összességében a 60 s-os mérési időt tartom a legmegfelelőbbnek, itt nemcsak a kenyértípusok különböztethetők meg, hanem a ± 2 SD tartományok is szűkebbek.

Összefoglalóan megállapítható, hogy a 60 másodperces terhelés-tehermentesítés esetén a mért jellemzők szórása elfogadhatóan szűk tartományban változik, a hibasáv ebben az esetben a legkisebb, és ezen időtartam alatt mind a kúszás, mind a kirugózás folyamata is lejátszódik. További méréseinkhez tehát a 60 másodperces mérési időt választottunk, így egy mérés időtartama alig több mint két perc az Elasztigráf 6 perces mérési idejével szemben. A rövid mérési idő lehetővé teszi a kidolgozott módszer minőségellenőrzési rendszerbe való illesztését, ugyanakkor a termékfejlesztés területén is alkalmazható.

5.2.4. Mérési sebesség meghatározása

A megfelelő penetrációs sebesség meghatározásánál két sebességértéket vizsgáltam. A 0,2 mm/s sebesség kvázistatikus mérést takar, itt a terhelés és a tehermentesítés is nagyon lassan következik be. A másik sebesség az AIB és AACC szabványokban ajánlott 1,7 mm/s volt. Céлом annak meghatározása, hogy van-e lényeges különbség a kétféle sebességgel mért jellemzők értéke között. A méréseket korongon és szeleten is elvégeztem.

A kísérletek első felében az Elasztigráf próbatestéhez közelebb álló, 15 mm magas, 35 mm átmérőjű bélzetkorongon végeztem méréseket az említett két sebességgel. A teljes, plasztikus és rugalmas deformáció, valamint a relatív rugalmasság értékeit a 38-41. ábrák mutatják.



38. ábra: A teljes deformáció alakulása a kenyér hosszanti tengelyén különböző mérési sebességeknél,

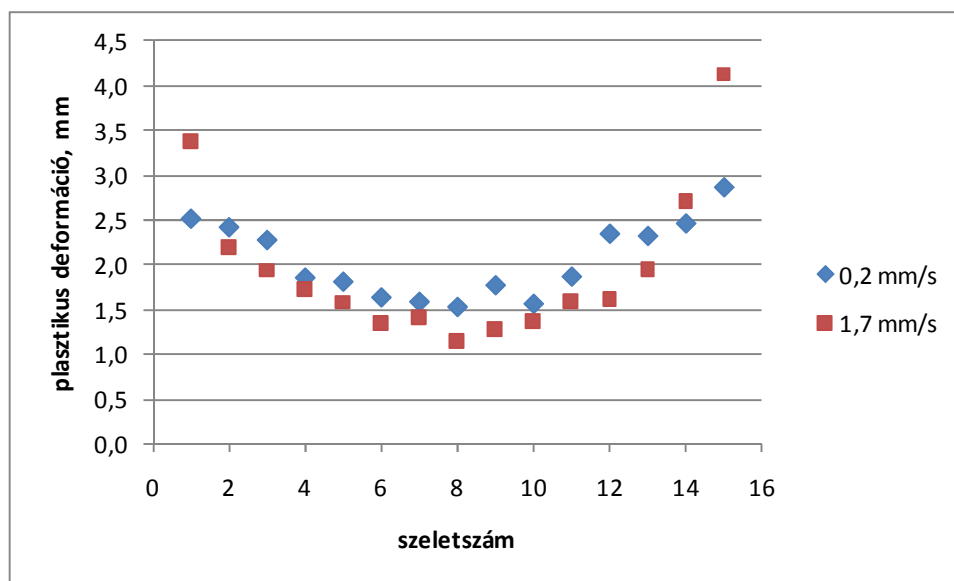
a méréseket korongon végeztem

A teljes deformáció (38. ábra) kvázistatikus mérésnél viszonylag szűk sávban változik, a kenyér közepén kisebb, két végén nagyobb értéket mutat. Ez a kenyérré jellemző lefutás a nagyobb sebességnél is megvan, de az értékek szórása itt valamivel nagyobb. A t-próba eredménye alapján (5.táblázat) a különböző mérési sebességnek nincs szignifikáns hatása a teljes deformációra.

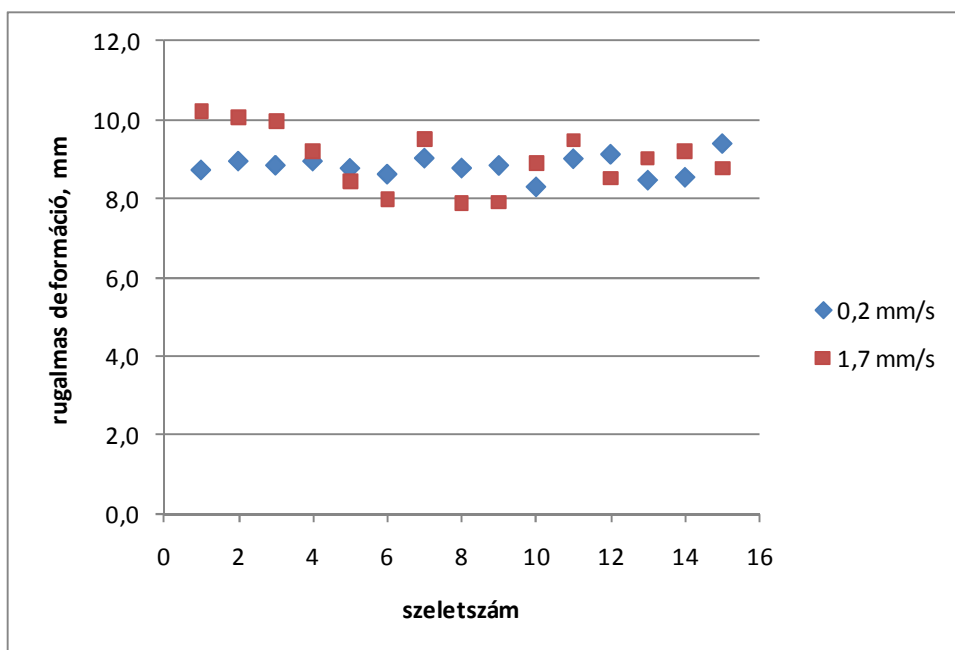
5. táblázat. A kétmintás t-próba eredményei 0,2 és 1,7 mm/s-os mérési sebességnél teljes deformációra, a méréseket kenyér korongon végeztük

		Independent Samples Test								
		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means					95% Confidence Interval of the Difference	
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	Lower	Upper
teljes deformáció	Equal variances assumed	7,273	,012	-,230	28	,820	-,08773	,38165	-,86950	,69404
	Equal variances not assumed			-,230	18,993	,821	-,08773	,38165	-,88655	,71108

A plasztikus (39. ábra) és a rugalmas deformáció (40. ábra) esetén is elmondható, hogy a kisebb sebesség esetén az értékek szórása kisebb, mint a nagyobb sebességnél, de a kenyéren belül a lefutás hasonló.



39. ábra: A plasztikus deformáció alakulása a kenyér hosszanti tengelyén különböző mérési sebességeknél, a méréseket korongon végeztem



40. ábra: A rugalmas deformáció alakulása a kenyér hosszanti tengelyén különböző mérési sebességeknél, a méréseket korongon végeztem

A t-próba alapján a sebességnek a 0,2-1,7 mm/s-os sebességek hatása között nincs szignifikáns különbség (6. és 7. táblázat).

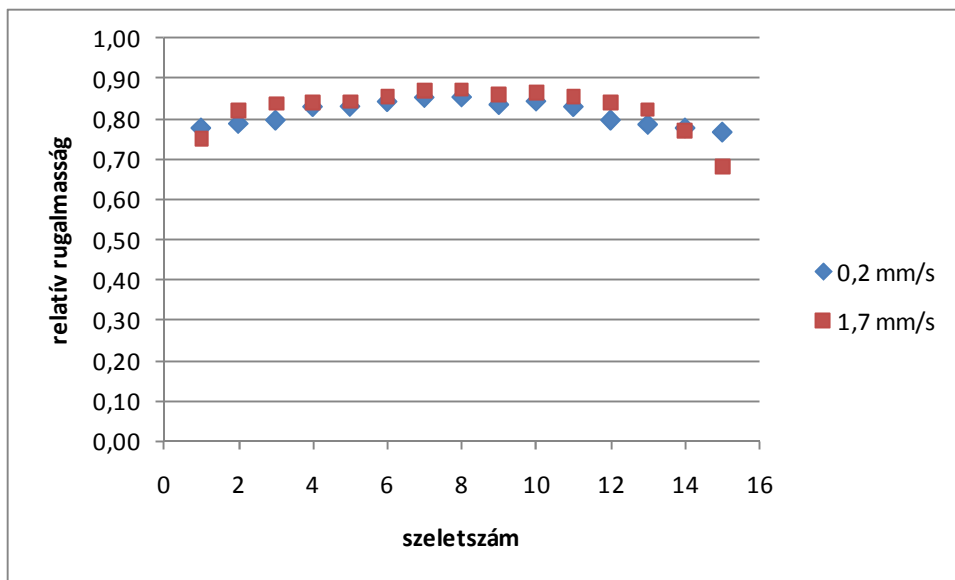
6. táblázat A kétmintás t-próba eredményei 0,2 és 1,7 mm/s-os mérési sebességnél plasztikus deformációra, a méréseket kenyér korongon végeztem

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means							
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference		
										Lower	Upper
plasztikus deformáció	Equal variances assumed	2,354	,136	,387	28	,702	,09427	,24355	-,40462	,59315	
	Equal variances not assumed			,387	20,751	,703	,09427	,24355	-,41259	,60112	

7. táblázat A kétmintás t-próba eredményei 0,2 és 1,7 mm/s-os mérési sebességnél rugalmas deformációra, a méréseket kenyér korongon végeztem

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means							
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference		
										Lower	Upper
rugalmas deformáció	Equal variances assumed	11,971	,002	-,867	28	,394	-,18213	,21019	-,61269	,24843	
	Equal variances not assumed			-,867	17,559	,398	-,18213	,21019	-,62453	,26026	

A 41. ábra a relatív rugalmasság alakulása látható. Értéke a középső szeleteknél valamivel nagyobb, mint a szélsőknél. Itt egyértelműen megmutatkozik, hogy a sebesség az általam vizsgált két érték esetén nem befolyásolja a mért értéket, ezt az elvégzett t-próba is alátámasztja (8. táblázat).



41. ábra: A relatív rugalmasság alakulása a kenyér hosszanti tengelyén különböző mérési sebességeknél, a méréseket korongon végeztem

8. táblázat: A kétmintás t-próba eredményei 0,2 és 1,7 mm/s-os mérési sebességnél rugalmassági fokra, a méréseket kenyér korongon végeztem

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
rugalmassági fok	Equal variances assumed	1,102	,303	-,859	28	,398	-,01353	,01576	-,04582	,01875
	Equal variances not assumed			-,859	22,215	,400	-,01353	,01576	-,04620	,01914

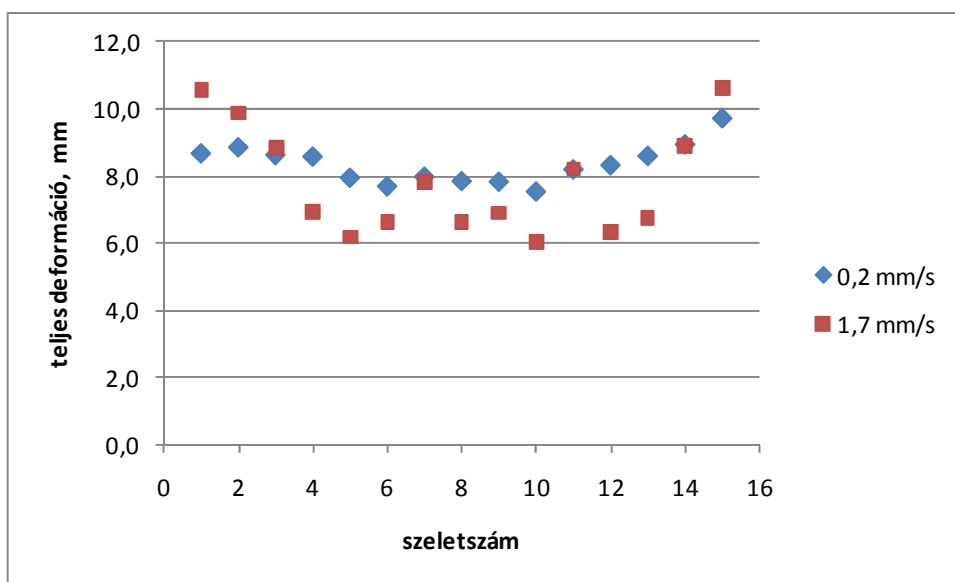
Az egyes jellemzők átlagait, szórását és variációs koefficienseit a 9. táblázatban foglaltam össze. Alacsonyabb sebességnél a szórás minden paraméter esetén kisebb, a variációs koefficiens értéke ugyancsak kisebb.

9. táblázat: A teljes, plasztikus és rugalmas deformáció valamint a rugalmassági fok átlaga, szórása és a variációs koefficiens értékei 0,2 és 1,7 mm/s-os mérési sebességnél, a kísérletet bélzetkorongon végeztem

	D		P		R		R/D	
	0,2 mm/s	1,7 mm/s	0,2 mm/s	1,7 mm/s	0,2 mm/s	1,7 mm/s	0,2 mm/s	1,7 mm/s
átlag	10,87467	10,9625	2,053833	1,959667	8,820833	9,002833	0,812368	0,825988
szórás	0,583239	1,358187	0,426807	0,841255	0,275225	0,766207	0,030243	0,052993
CV, %	5,363283	12,38939	20,78099	42,92847	3,120171	8,51073	3,722794	6,415738

Ugyanezekkel a sebességértékekkel kenyérszeleten is elvégeztem a mérést. A teljes, plasztikus és rugalmas deformáció, valamint a relatív rugalmasság alakulását a 42-45. ábra szemlélteti. Az egyes jellemzők kenyéren belüli lefutása hasonlóan alakul, mint korong esetén. Itt is elmondható, hogy 1,7 mm/s sebességnél az adatok szórása valamivel nagyobb, mint 0,2 mm/s-nál.

A teljes deformáció (42. ábra) lefutása egy kenyéren belül ebben az esetben is mutatja azt a jellegzetességet, hogy a középső szeleteknél kisebb értékeket kapunk, mint a szélsőknél. Ez mindkét alkalmazott sebességre igaz. Érdeemes megfigyelni, hogy az adatok terjedelme (minimum és maximum értékének különbsége) az 1,7 mm/s-nál kétszer akkora, mint 0,2 mm/s alkalmazása esetén. Nagyobb sebességnél az esetek felében a teljes deformáció értéke kisebb, mint alacsonyabb sebességnél, ami arra utal, hogy a kúszás folyamata kvázistatikus mérés esetén jobban kibontakozik.



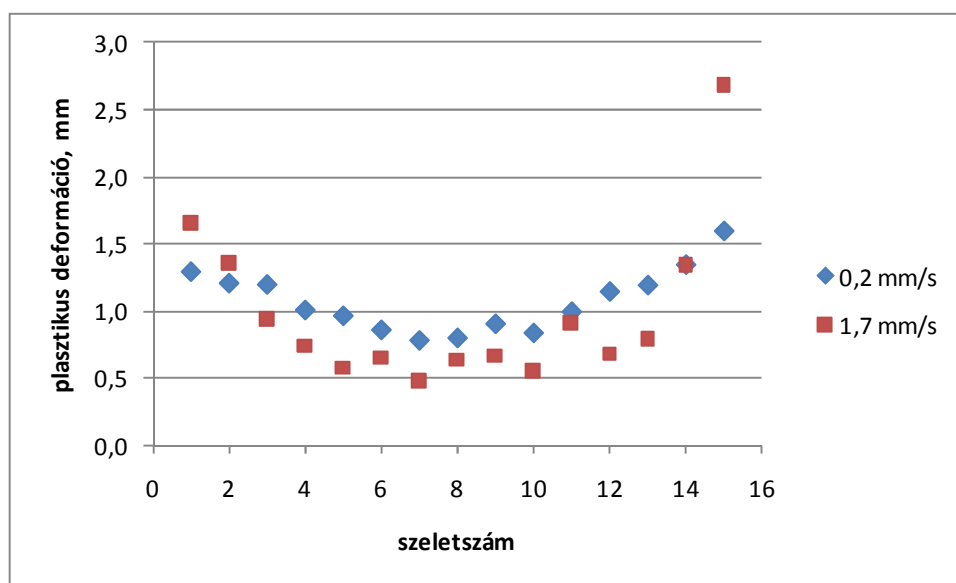
42. ábra: A teljes deformáció alakulása a kenyér hosszanti tengelyén különböző mérési sebességeknél, a méréseket egész kenyérszeleten végeztem

A kétmintás t-próba alapján (10. táblázat) azonban a sebességnek a kenyérszelet vizsgálatánál sincs szignifikáns hatása az eredményekre. A korongon végzett mérésekhez hasonlóan a két minta szórása itt is eltérő, amint az a Levene-próba eredményeiből egyértelműen megállapítható. Ez jól alátámasztja a grafikus ábrázolásnál megfigyelhető eltéréseket.

10. táblázat: A kétmintás t-próba eredményei 0,2 és 1,7 mm/s-os mérési sebességnél teljes deformációra, a méréseket kenyérszeleten végeztem

		Independent Samples Test									
		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						95% Confidence Interval of the Difference	
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	Lower	Upper	
teljes deformáció	Equal variances assumed	16,761	,000	1,259	28	,218	,55320	,43942	-,34692	1,45332	
	Equal variances not assumed			1,259	17,600	,225	,55320	,43942	-,37150	1,47790	

A plasztikus deformáció (43. ábra) értéke az esetek túlnyomó részében az 1,7 mm/s sebesség alkalmazása mellett kisebb volt, mint a kvázistatikusnak mondható, 0,2 mm/s sebességgel végzett méréseknél. Az adatok terjedelme viszont 2,7-szerese a lassú tehermentesítés esetén kapott adatokénak.



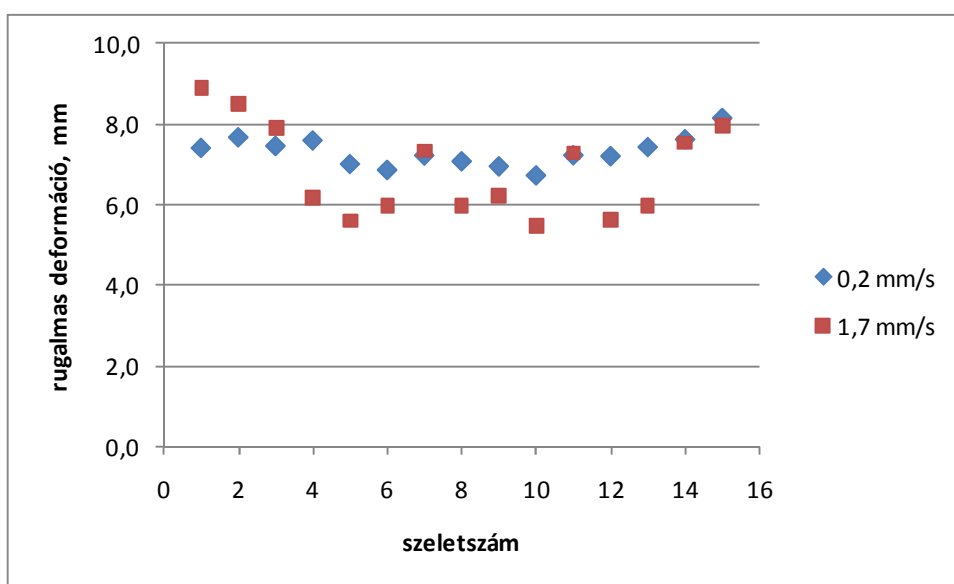
43. ábra: A plasztikus deformáció alakulása a kenyér hosszanti tengelyén különböző mérési sebességeknél, a méréseket egész kenyérszeleten végeztem

A Levene-teszt eredménye megerősíti a kétféle sebességgel mért plasztikus deformáció szórásának különbözőségét. A sebességnek a vizsgált tartományban azonban nincs szignifikáns hatása az eredményekre (11. táblázat).

11. táblázat: A kétmintás t-próba eredményei 0,2 és 1,7 mm/s-os mérési sebességnél plasztikus deformációra, a méréseket kenyérszeleten végeztem

		Independent Samples Test								
		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means					95% Confidence Interval of the Difference	
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	Lower	Upper
plasztikus deformáció	Equal variances assumed	4,535	,042	,550	28	,587	,08907	,16202	-,24282	,42095
	Equal variances not assumed			,550	18,354	,589	,08907	,16202	-,25086	,42899

Nagyobb sebességnél a mérések felében a rugalmas deformáció is kisebb, mint a kvázistatikus mérés eredményeinél (44. ábra). A terjedelem itt közel 2,5-szer nagyobb, az előzőekhez hasonlóan a két minta szórása ebben az esetben is különböző (12. táblázat).



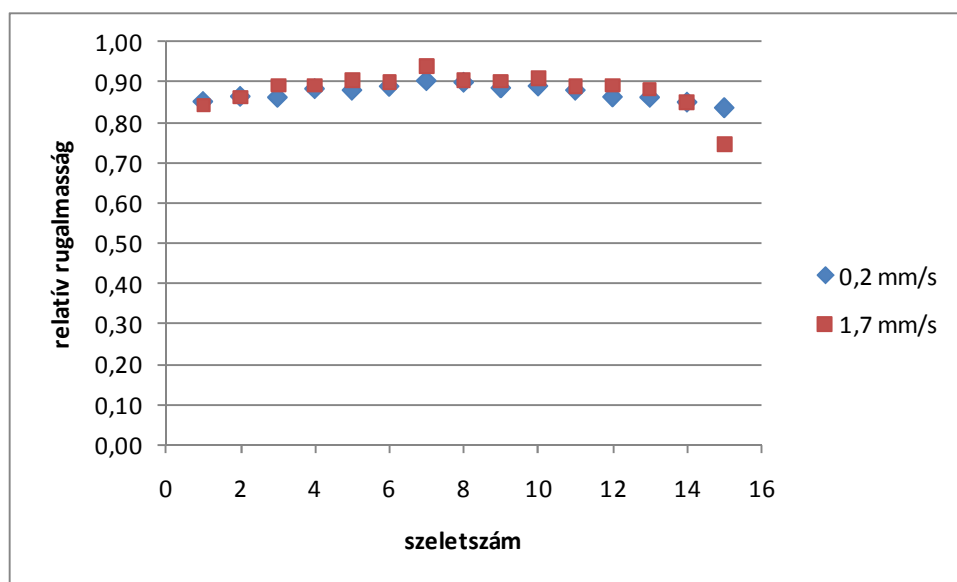
44. ábra: A rugalmas deformáció alakulása a kenyér hosszanti tengelyén különböző mérési sebességeknél, a méréseket egész kenyérszeleten végeztem

A vizsgált tartományban azonban a sebességnek a rugalmas deformációra sincs szignifikáns hatása (12. táblázat).

12. táblázat: A kétmintás t-próba eredményei 0,2 és 1,7 mm/s-os mérési sebességnél rugalmas deformációra, a méréseket kenyérszeleten végeztem

		Independent Samples Test								
		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means					95% Confidence Interval of the Difference	
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	Lower	Upper
rugalmas deformáció	Equal variances assumed	31,650	,000	1,497	28	,146	,46393	,30996	-,17100	1,09887
	Equal variances not assumed			1,497	16,870	,153	,46393	,30996	-,19042	1,11829

A relatív rugalmasságok egyezősége már az eredmények grafikus ábrázolásánál is szembevető (45. ábra). Az eddigi paraméterek látványos különbözősége ellenére ez az egyezés nem meglepő. A nagyobb sebességnél tapasztalt kisebb teljes deformációhoz kisebb plasztikus és rugalmas deformáció is tartozik, így a rugalmassági fok – ami a rugalmas és a teljes deformáció aránya – közel azonos az eltérő sebességeknél.



45. ábra: A relatív rugalmasság alakulása a kenyér hosszanti tengelyén különböző mérési sebességeknél, a méréseket egész kenyérszeleten végeztem

Az 1,7 mm/s-os mérésnél azonban az értékek jóval szélesebb tartományban (0,747-0,938) változnak, mint kvázistatikus mérésnél, ahol a terjedelem mindössze 0,066. A Levene próba alapján itt a szórások a többi paramétertől eltérően azonosnak tekinthetők. A grafikus ábrázolás eredményét a t-próba megerősíti, a vizsgált tartományban a sebességnek ennél a jellemzőnél sincs szignifikáns hatása (13. táblázat).

13. táblázat: A kétmintás t-próba eredményei 0,2 és 1,7 mm/s-os mérési sebességnél rugalmassági fokra, a méréseket kenyérszeleten végeztem

		Independent Samples Test									
		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						95% Confidence Interval of the Difference	
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	Lower	Upper	
rugalmassági fok	Equal variances assumed	2,440	,130	-.612	28	,546	-.00760	,01242	-.03304	,01784	
	Equal variances not assumed			-.612	19,082	,548	-.00760	,01242	-.03359	,01839	

Az előzőekhez hasonlóan a mért jellemzők átlagát, szórását és a variációs koefficienseket a 14. táblázatban foglaltuk össze. Kisebb sebesség alkalmazásánál a szórás és a variációs koefficiensek értéke kisebb, mint a nagyobb mérési sebességnél. A t-próbák eredménye alapján azonban a sebességnek a szeleten végzett méréseknél sincs szignifikáns hatása.

14. táblázat: A teljes, plasztikus és rugalmas deformáció valamint a rugalmassági fok átlaga, szórása és a variációs koefficiens értékei 0,2 és 1,7 mm/s-os mérési sebességnél, a kísérletet kenyérszeleten végeztem

	D		P		R		R/D	
	0,2 mm/s	1,7 mm/s	0,2 mm/s	1,7 mm/s	0,2 mm/s	1,7 mm/s	0,2 mm/s	1,7 mm/s
átlag	8,3655	7,812333	1,07016	0,981	7,29534	6,831333	0,873155	0,880663
szórás	0,578802	1,600424	0,232638	0,582695	0,367823	1,142809	0,019151	0,044126
CV, %	6,918917	20,48586	21,73862	59,39809	5,041886	16,72893	2,193335	5,010503

A korongokon és a kenyérszeleteken végzett vizsgálatok esetén is elmondható, hogy a kisebb sebesség mellett a mért jellemzők szórása kisebb. Ezt valószínűleg az okozza, hogy míg a kvázistatikus mérésnél a terhelés lassú, a bélzet szerkezetének van ideje alkalmazkodni, a gyors terhelés esetén viszont a pórusfalak könnyebben károsodnak, szakadnak. Annak ellenére, hogy a sebességnek nincs szignifikáns hatása az értékekre, az előbb említett okok miatt a módszerhez a 0,2 mm/s-os sebességet tartottam megfelelőnek.

Ha a 9. és 14. táblázat értékeit összehasonlítjuk, látható, hogy korongnál a teljes, a plasztikus és a rugalmas deformáció értéke is nagyobb, mint a szeleten végzett vizsgálatok esetén. A relatív rugalmasság értéke azonban a szeletnél látszólag nagyobb, mint korongnál. Ezek alapján felvetődik a kérdés, hogy valóban van-e szignifikáns eltérés a korongon és a szeleten végzett mérések eredménye között.

5.2.5. A mintaelőkészítés és a terhelési mód hatásának vizsgálata

Munkám egyik célja a mintaelőkészítés folyamatának leegyszerűsítése, ezért a méréseket a korábban említett AIB és AACC szabványhoz hasonlóan kenyérszeleten kívántam folytatni. Ehhez azonban meg kellett vizsgálnunk, milyen változást okoz az eredményekben, ha nem bélzetkorongot, hanem a teljes kenyérszelet közepét terheljük. Az előző mérési sorozatban a vizsgálatokat 15 mm vastag kenyérszelet mellett 35 mm átmérőjű, 15 mm magas korongon is elvégeztem 0,2 valamint 1,7 mm/s-os sebességgel. Az eredményeket most azonban a mintaelőkészítés hatásának szempontjából értékelem.

A mérési sebesség meghatározásánál megfigyelhető volt, hogy a jellemzők értékei korong és szelet esetén eltérőek voltak. Az átlagokat, szórásokat és a variációs koefficiens értékét az 15. táblázatban foglaltam össze. Látható, hogy a szórás és a CV értéke mindkét sebességnél korong esetén kisebb. Ez alól a relatív rugalmasság kivétel, itt a szeletnél kisebb a variációs koefficiens értéke.

15. táblázat: A korongon és kenyérszeleten mért teljes, plasztikus és rugalmas deformáció valamint a rugalmassági fok átlaga, szórása és a variációs koefficiensek értékei 0,2 és 1,7 mm/s-os mérési sebességnél

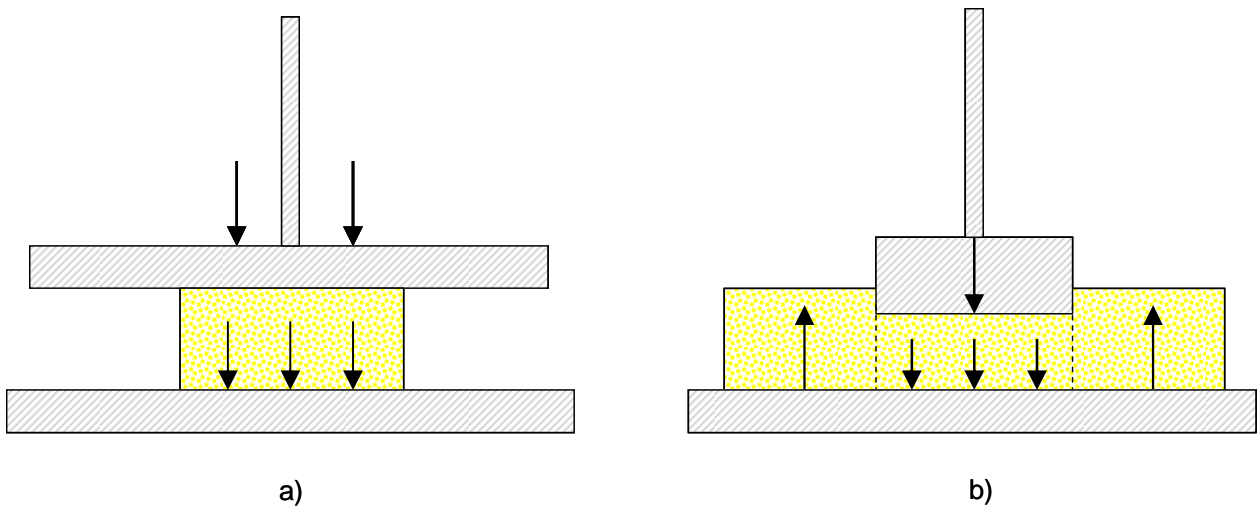
0,2 mm/s	D		P		R		R/D	
	Korong	szelet	Korong	szelet	Korong	szelet	Korong	szelet
átlag	10,87467	8,3655	2,053833	1,07016	8,820833	7,29534	0,812368	0,873155
szórás	0,583239	0,578802	0,426807	0,232638	0,275225	0,367823	0,030243	0,019151
CV, %	5,363283	6,918917	20,78099	21,73862	3,120171	5,041886	3,722794	2,193335
1,7 mm/s	D		P		R		R/D	
	Korong	szelet	Korong	szelet	Korong	szelet	Korong	szelet
átlag	10,9625	7,812333	1,959667	0,981	9,002833	6,831333	0,825988	0,880663
szórás	1,358187	1,600424	0,841255	0,582695	0,766207	1,142809	0,052993	0,044126
CV, %	12,38939	20,48586	42,92847	59,39809	8,51073	16,72893	6,415738	5,010503

Az elvégzett statisztika elemzés eredménye megerősíti, hogy a korongon és a szeleten végzett vizsgálatok eredményei között szignifikáns különbség van (16. táblázat).

16. táblázat: A szórásanalízis és a kétmintás t-próba eredményei 0,2 és 1,7 mm/s mérési sebesség mellett korongon és kenyérszeleten mért teljes, plasztikus és rugalmas deformáció valamint relatív rugalmasság értékekre

0,2 mm/s	Levene-teszt		kétmintás t-próba eredménye		
	F	p	próba	t érték	p
D	0,075	0,786	t-próba	11,828	0,000
P	12,466	0,001	Welch-próba	7,84	0,000
R	1,368	0,252	t-próba	12,859	0,000
R/D	10,294	0,003	Welch-próba	-6,585	0,000
1,7 mm/s	Levene-teszt		kétmintás t-próba eredménye		
	F	p	próba	t érték	p
D	1,071	0,31	t-próba	5,812	0,000
P	1,194	0,284	t-próba	3,703	0,001
R	6,198	0,019	Welch-próba	6,113	0,000
R/D	0,422	0,521	t-próba	-3,079	0,005

Ez nem meglepő, hiszen korong esetén kompressziós, szelet esetén pedig penetrációs vizsgálatot végzünk. A két vizsgálati módszernél az erőhatások eltérők, a különbséget elsősorban ez okozhatja. Ha azonban létezik valamilyen összefüggés a kétféle módon kapott értékek között, akkor a vizsgálatok szeleten ugyanolyan jól elvégezhetők, mint korongon. Az összefüggés-keresésnél a korongon mért értékekhez hasonlítottuk a szeleten mért értékeket.

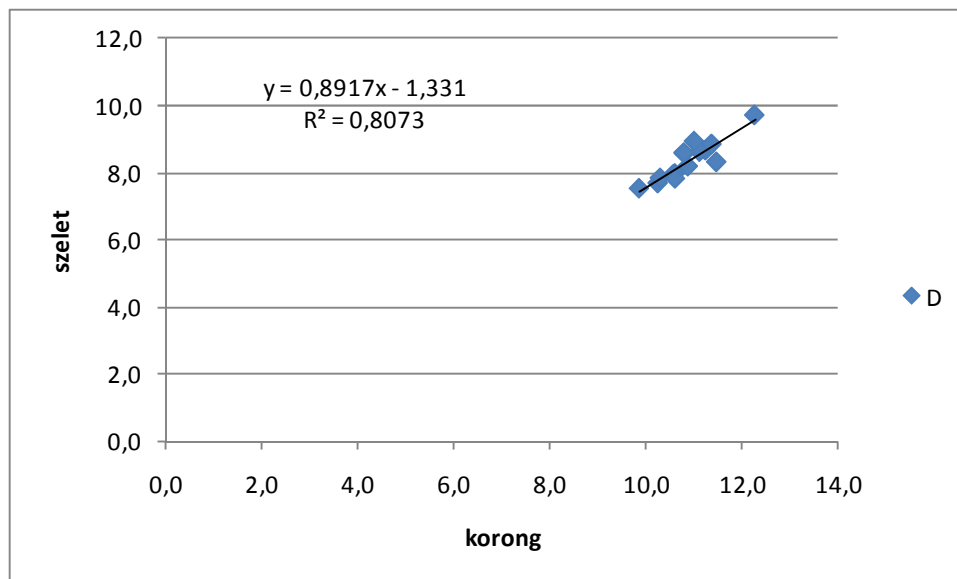


46. ábra: A kompressziós (a) és a penetrációs (b) vizsgálatok során fellépő erőhatások

5.2.5.1. Korongon és teljes kenyérszeleten 0,2 mm/s mérési sebességgel kapott eredmények összehasonlítása

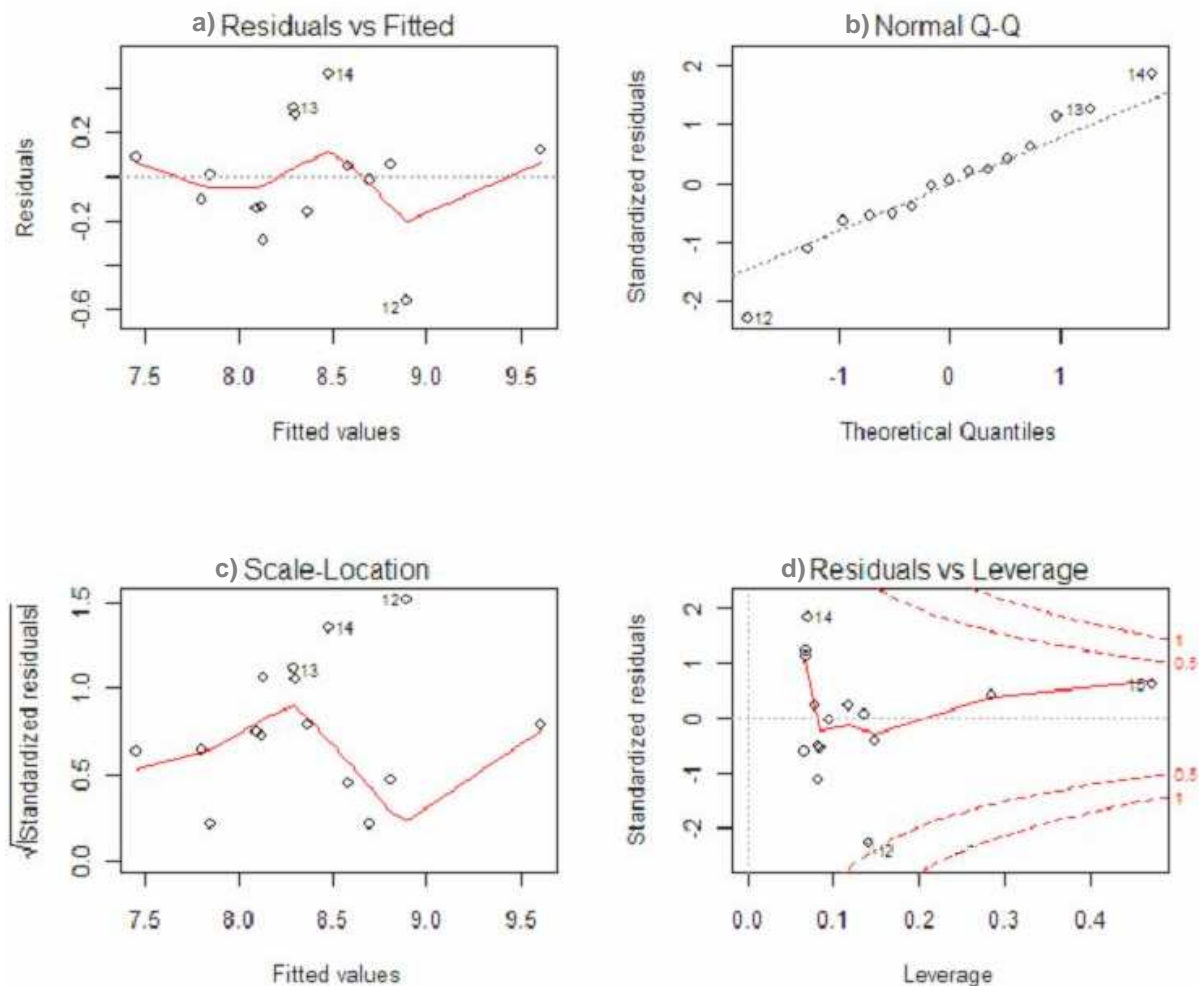
Kísérleteim első felében 0,2 mm/s-os előtolási sebességet alkalmaztunk, ezzel kvázistatikus . mérést igyekeztem megvalósítani.

Az egész kenyérszeleten és korongon mért teljes deformáció között szoros összefüggés adódott (47. ábra). Az illesztett modell helyességének ellenőrzésére diagnosztikus ábrákat készítettem (48. ábra).



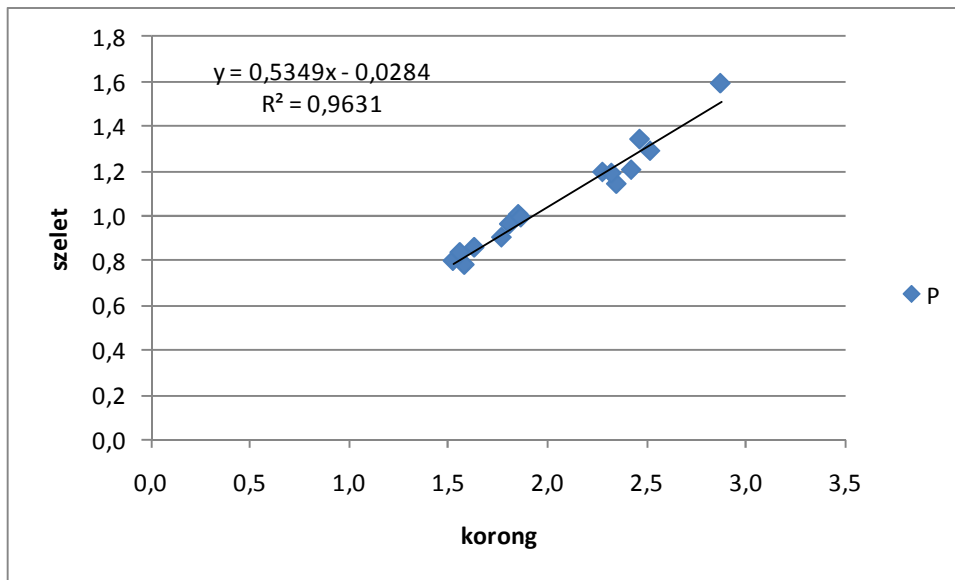
47. ábra: A teljes deformáció korongon és egész kenyérszeleten mért értékeinek összefüggése 0,2 mm/s-os mérési sebességnél

A reziduum-becsült érték, valamint a Q-Q diagram alapján az alkalmazott lineáris modell az összefüggést jól jellemzi. A standardizált reziduum-hatóerő ábrán torzító pont nem jelenik meg, bár a 12. szelet értékei a Cook-féle D-érték határához közel esik, és 15. pont hatóereje nagy.

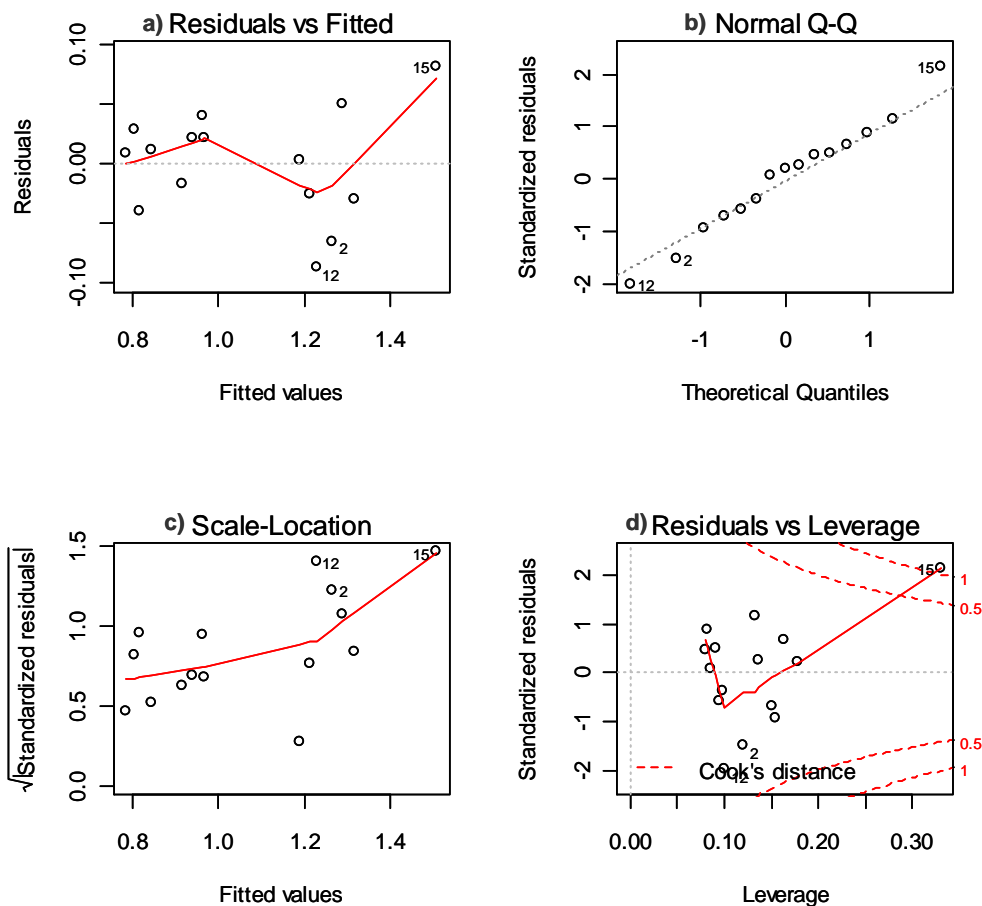


48. ábra: A korongon és egész kenyérszeleten mért teljes deformáció értékekre illesztett modell diagnosztikus ábrái: a) reziduum-becsült érték ábra, b) QQ-ábra, c) szórás-becsült érték ábra és d) standardizált reziduum-hatóerő ábra (itt a piros szaggatott vonal a Cook-féle D érték határait jelzi)

A plasztikus deformáció értékei között szintén szoros összefüggés áll fenn (49. ábra). Kiugró értéket az elemzés során nem találtunk. A diagnosztikus ábrák (50. ábra) az illesztett modell helyességét erősítik ugyan, de a 15. mérési pont határozottan torzító, ezért ezt érdemes az elemzésből kihagynunk.

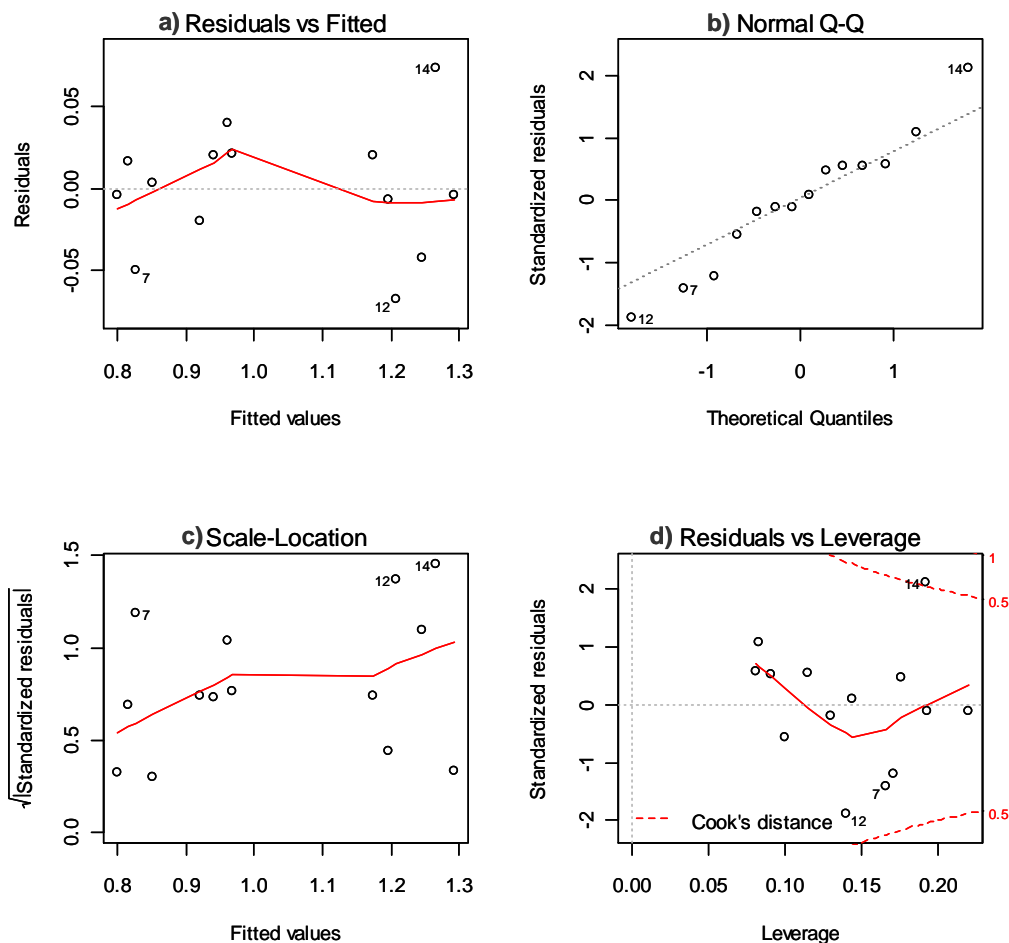


49. ábra: A plasztikus deformáció korongon és egész kenyérszeleten mért értékeinek összefüggése 0,2 mm/s-os mérési sebességnél



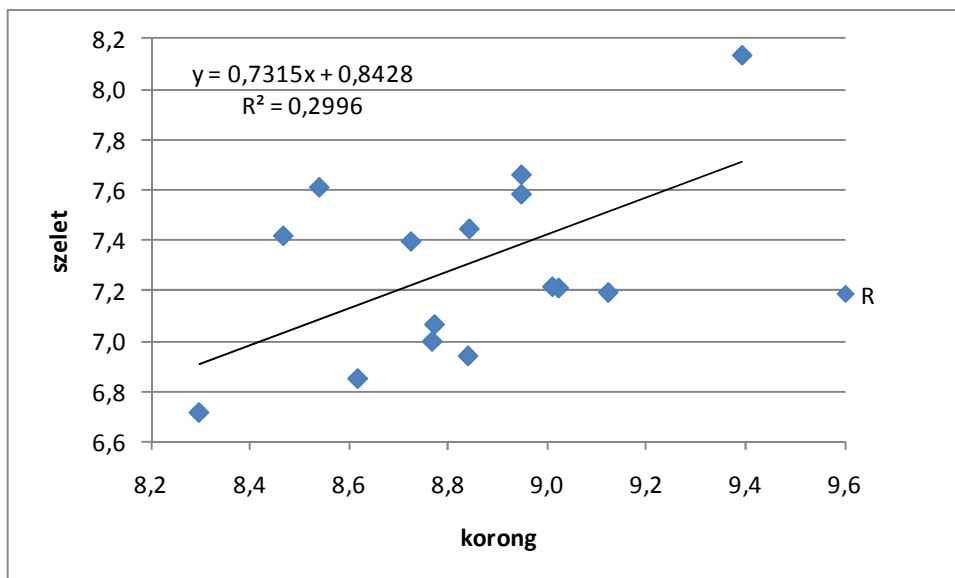
50. ábra: A korongon és egész kenyérszeleten mért plasztikus deformáció értékekre illesztett modell diagnosztikus ábrái: a) reziduumbecsült érték ábra, b) QQ-ábra, c) szórás-becsült érték ábra és d) standardizált reziduumbecült érték ábra (mérési sebesség 0,2 mm/s)

A 15. pont elhagyásával felállított modell diagnosztikája az 51. ábrán látható. Ahogyan az a reziduum-becsült érték és a szórás-becsült érték diagramon látható, a korrigált modell jobban leírja a fennálló összefüggést, a determinációs együtt ható értéke alig változik ($R^2=0.9614$).



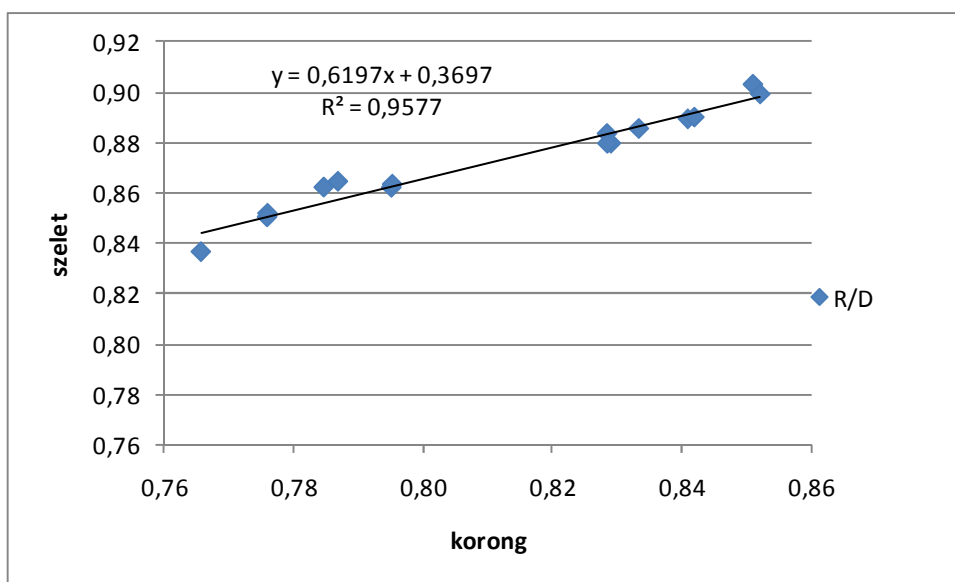
51. ábra: A korongon és egész kenyérszeleten mért plasztikus deformáció értékekre illesztett modell diagnosztikus ábrái a 15. pont elhagyásával: a) reziduum-becsült érték ábra, b) QQ-ábra, c) szórás-becsült érték ábra és d) standardizált reziduum-hatóerő ábra (mérési sebesség 0,2 mm/s)

A korongon és szeleten mért rugalmas deformáció értékei között nem mutatható ki kapcsolat (52. ábra). Ez a paraméter a teljes és a plasztikus deformáció különbségéből adódik. Ha az említett két paraméter hasonló trendet követ, a különbség-értékek egy konstanshoz közelítenek. A gyenge kapcsolat oka az lehet, hogy a kétféle minta előkészítésnél két konstans körüli értékünk van a rugalmas deformációra, így szisztematikus változásuk nem figyelhető meg. Ezt erősíti meg a rugalmas alakváltozás terjedelme a vizsgált mintánál, amely korong esetén 1,1 mm, szeletnél 1,4 mm, a kettő közötti eltérés meglehetősen kicsi.

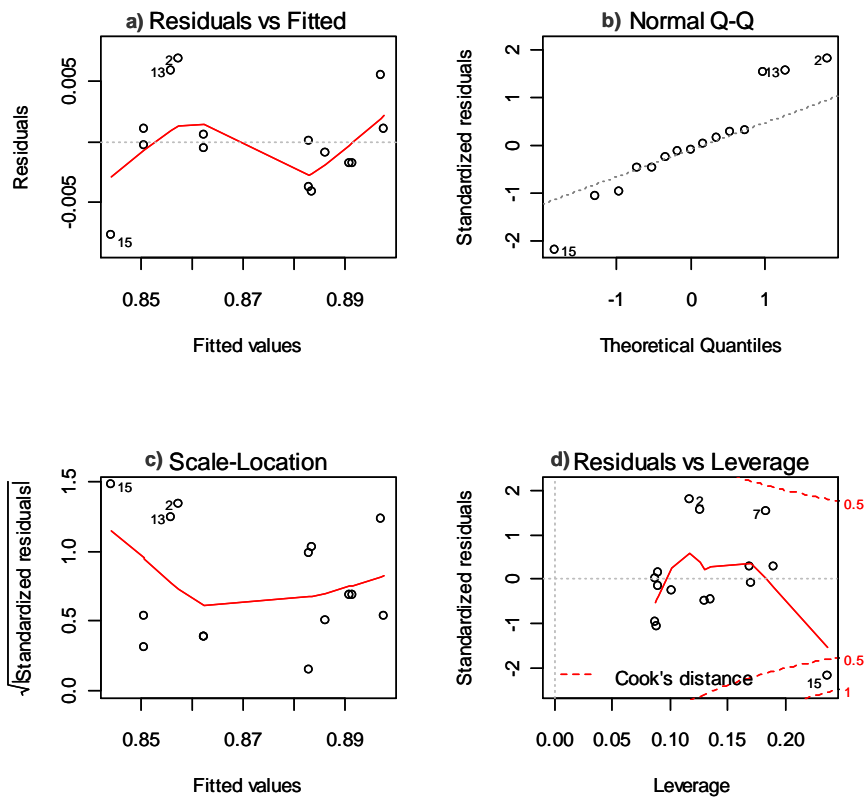


52. ábra: A rugalmas deformáció korongon és egész kenyérszeleten mért értékeinek összefüggése 0,2 mm/s-os mérési sebességnél

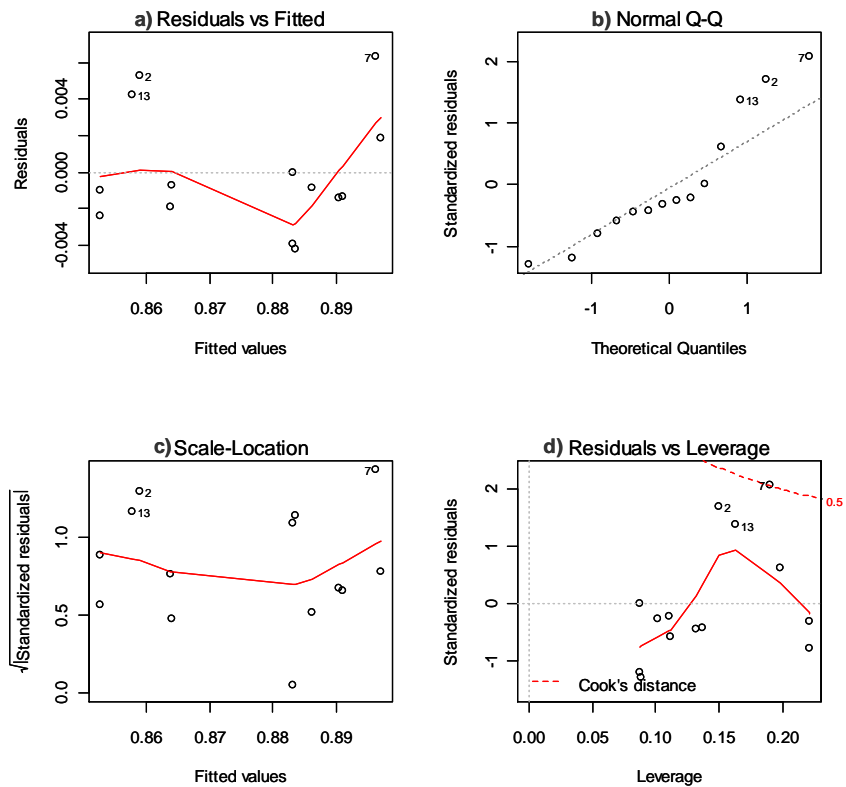
Szoros kapcsolat figyelhető meg viszont a relatív rugalmasság értékei között (53. ábra). Az illesztett lineáris modell helyességének vizsgálatakor (54. ábra) a standardizált reziduum- becült érték diagramon a 15. pont itt is torzító pontként jelentkezik, ezért a modellillesztést ebben az esetben is elvégeztem ezen pont kihagyásával.



53. ábra: A relatív rugalmasság korongon és egész kenyérszeleten mért értékeinek összefüggése 0,2 mm/s-os mérési sebességnél



54. ábra: A korongon és egész kenyérszeleten mért relatív rugalmasság értékekre illesztett modell diagnosztikus ábrái: a) reziduum-becsült érték ábra, b) QQ-ábra, c) szórás-becsült érték ábra és d) standardizált reziduum-hatóerő ábra (mérési sebesség 0,2 mm/s)

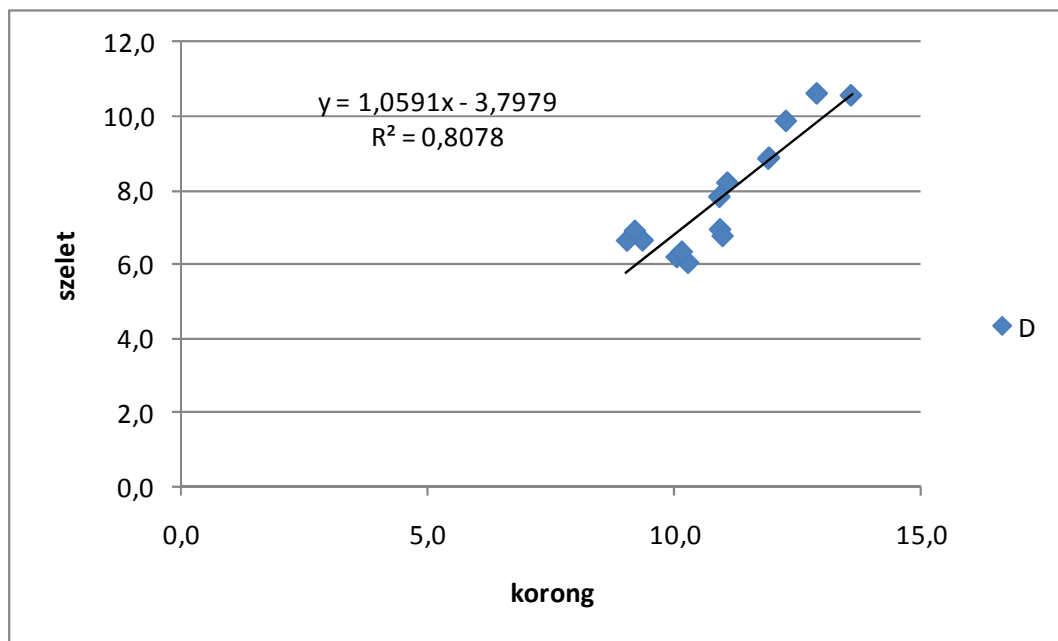


55. ábra: A korongon és egész kenyérszeleten mért relatív rugalmasság értékekre illesztett modell diagnosztikus ábrái a 15. pont elhagyásával: a) reziduum-becsült érték ábra, b) QQ-ábra, c) szórás-becsült érték ábra és d) standardizált reziduum-hatóerő ábra

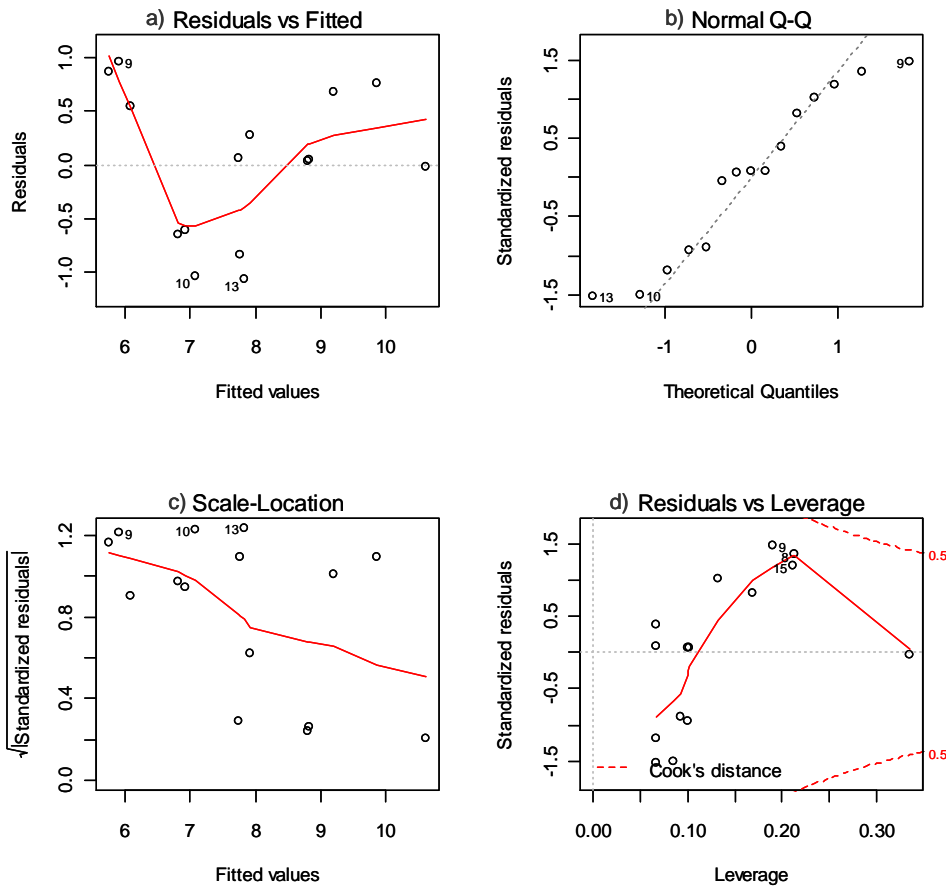
A 15. pont elhagyásával készített modell diagnosztikáját az 55. ábra mutatja be. A hibaértékek itt keskenyebb tartományban helyezkednek el és a szórásuk is kisebb, mint az előző esetben. A determinációs együttható (R^2) értéke 0.9627. A standardizált reziduum-hatóerő ábrán azonban a 7. mérési pont a Cook féle D érték határának közelébe esik. Az alacsony mintaszám miatt a modell nem elég robusztus, így egyetlen pont elhagyása is viszonylag nagy változást okoz.

5.2.5.2. Korongon és teljes kenyérszeleten 0,2 mm/s mérési sebességgel kapott eredmények összehasonlítása

A kétféle mintaelőkészítés teljes deformáció értékei között ennél a mérési sebességnél is szoros kapcsolat figyelhető meg (56. ábra). Kiugró pontokat nem találtam, a diagnosztikus ábrán (57. ábra) torzító pont nem jelenik meg, az illesztett modell elfogadhatóan írja le az összefüggést.

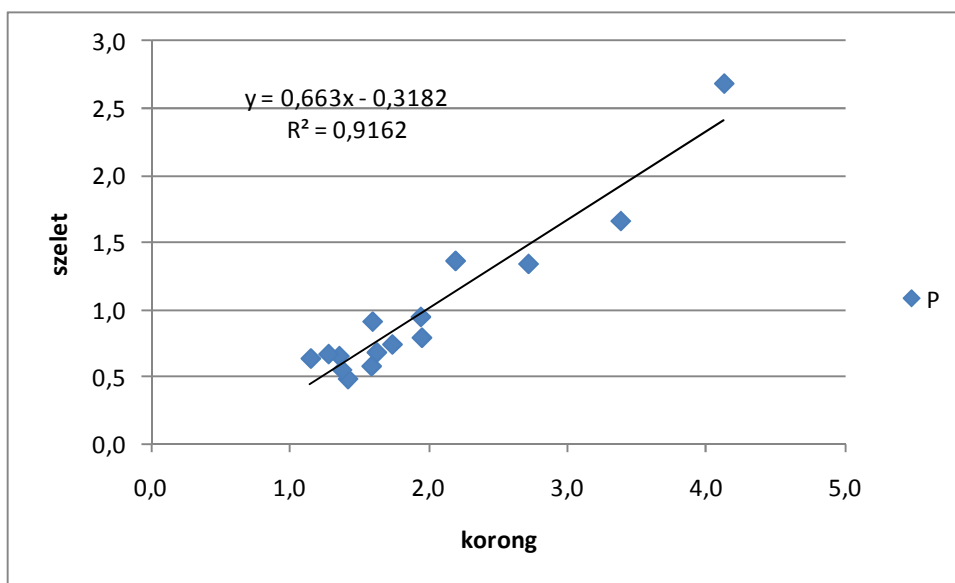


56. ábra: A teljes deformáció korongon és egész kenyérszeleten mért értékeinek összefüggése 1,7 mm/s-os mérési sebességnél



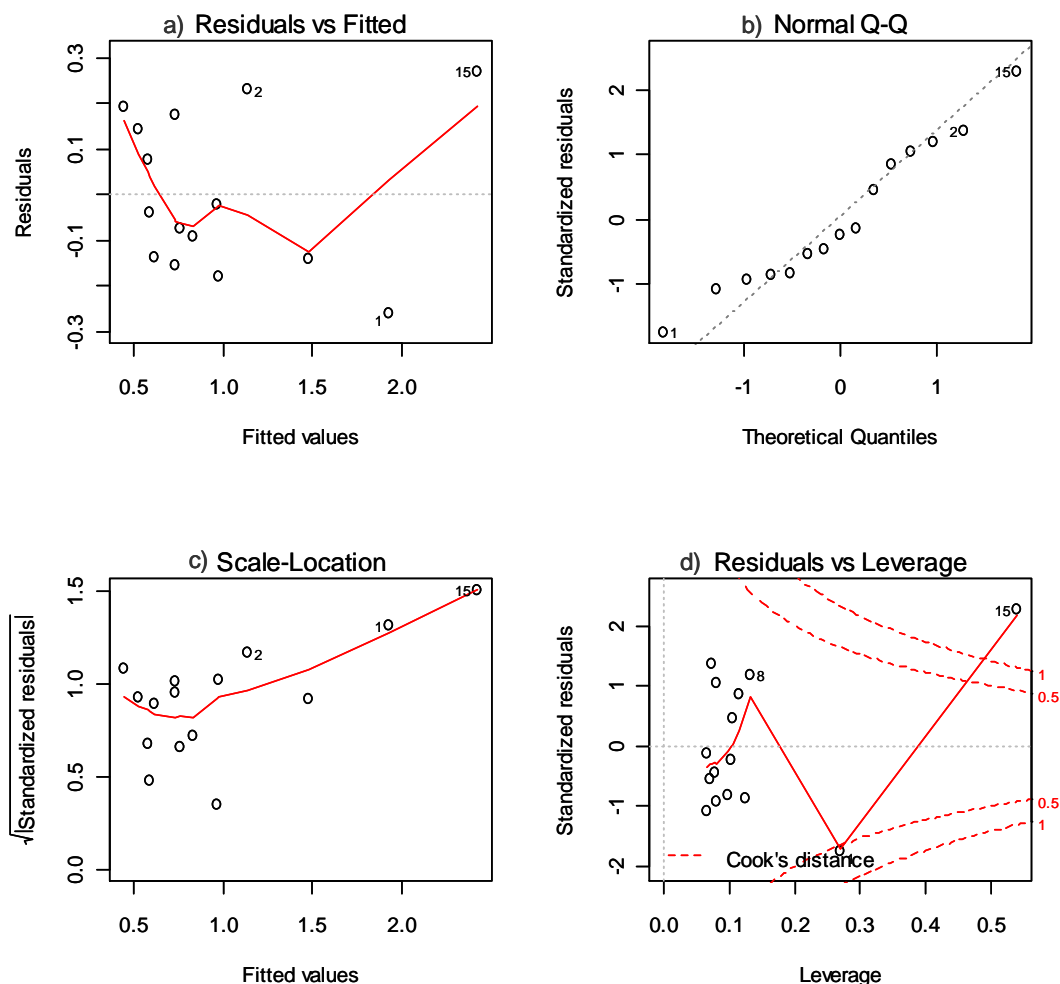
57. ábra: A korongon és egész kenyérszeleten mért teljes deformáció értékekre illesztett modell diagnosztikus ábrái: a) reziduum-becsült érték ábra, b) QQ-ábra, c) szórás-becsült érték ábra és d) standardizált reziduum-hatóerő ábra (mérési sebesség 1,7 mm/s)

Plasztikus deformáció esetén szintén szoros kapcsolat áll fenn a korongon és szeleten mért értékek között (58. ábra).



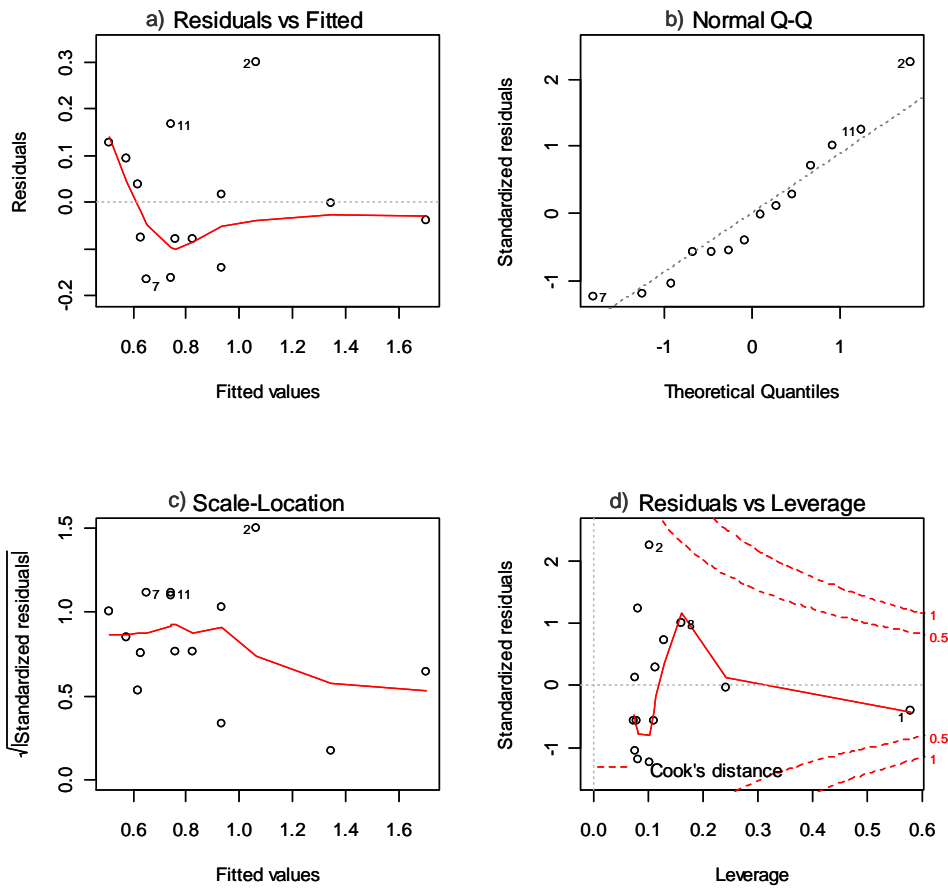
58. ábra: A plasztikus deformáció korongon és egész kenyérszeleten mért értékeinek összefüggése 1,7 mm/s-os mérési sebességnél

Az 59. ábra diagramjai segítségével a modell illesztésének helyessége ellenőrizhető. Az előzetesen kiugró értéknek detektált 15. mérési pont egyben torzító pont is, ezért az illesztést ezen mérési eredmény kihagyásával is elvégeztük.



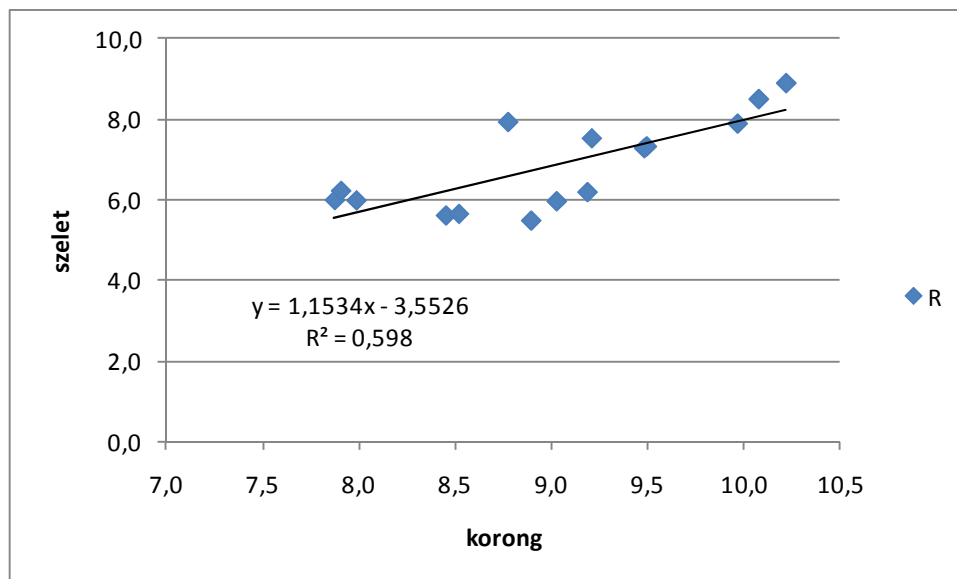
59. ábra: A korongon és egész kenyérszeleten mért plasztikus deformáció értékekre illesztett modell diagnosztikus ábrái: a) reziduum-becsült érték ábra, b) QQ-ábra, c) szórás-becsült érték ábra és d) standardizált reziduum-hatóerő ábra (mérési sebesség 1,7 mm/s)

A 60. ábrán az új illesztés diagnosztikája látható. Ezek alapján a módosított modell megfelelőbb a korong és a szelet plasztikus deformációja közti összefüggés leírására. Bár így a determinációs együttható értéke 0,854-re csökken, a kapcsolat a két érték között még így is szorosnak mondható.



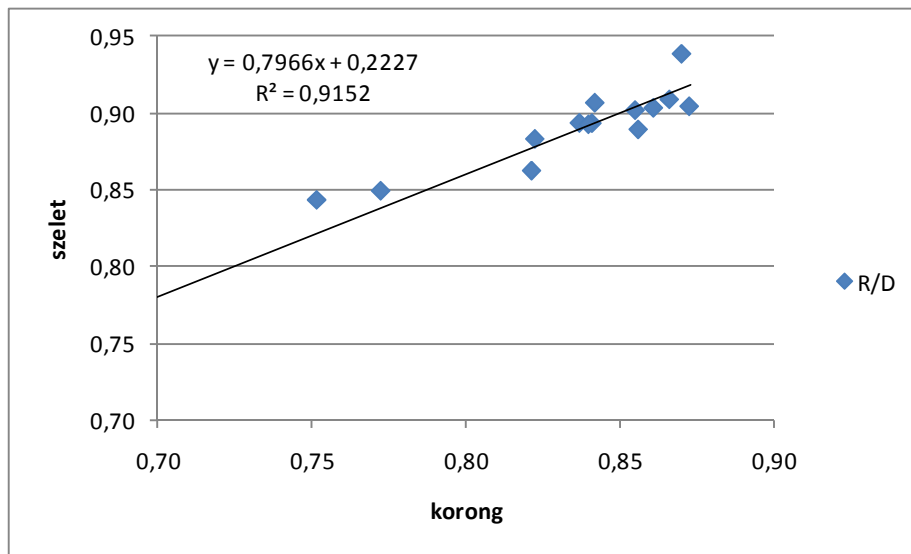
60. ábra: A korongon és egész kenyérszeleten mért plasztikus deformáció értékekre illesztett modell diagnosztikus ábrái a 15. pont elhagyásával: a) reziduum-becsült érték ábra, b) QQ-ábra, c) szórás-becsült érték ábra és d) standardizált reziduum-hatóerő ábra (mérési sebesség 1,7 mm/s)

Ennél a sebességnél gyenge kapcsolat figyelhető meg a kétféle előkészítéssel kapott rugalmas alakváltozás értékek között (61. ábra). Ez – az előzőekhez hasonlóan – a rugalmas deformációk konstans körüli értékével magyarázható.

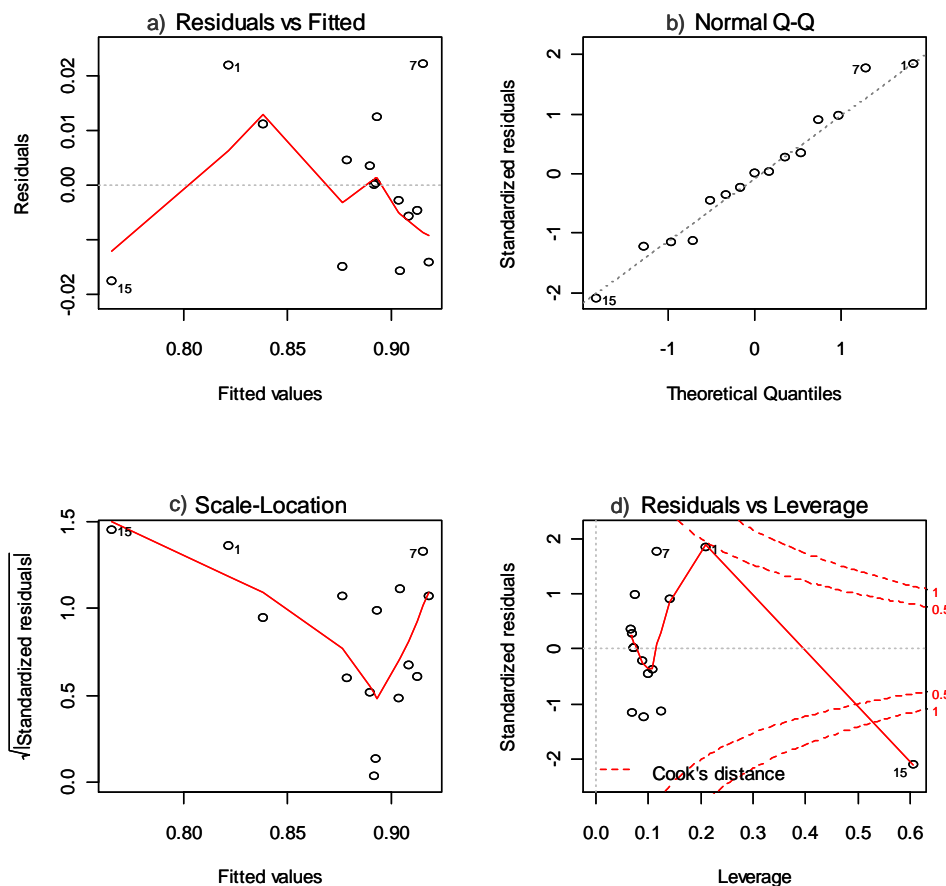


61. ábra: A rugalmas deformáció korongon és egész kenyérszeleten mért értékeinek összefüggése 1,7 mm/s-os mérési sebességnél

Az egész kenyérszeletre és korongra kapott relatív rugalmasság között szoros az összefüggés (62. ábra). Az illesztett modell helyességének ellenőrzésre készített diagnosztikus ábrák az 63. ábrán láthatók.



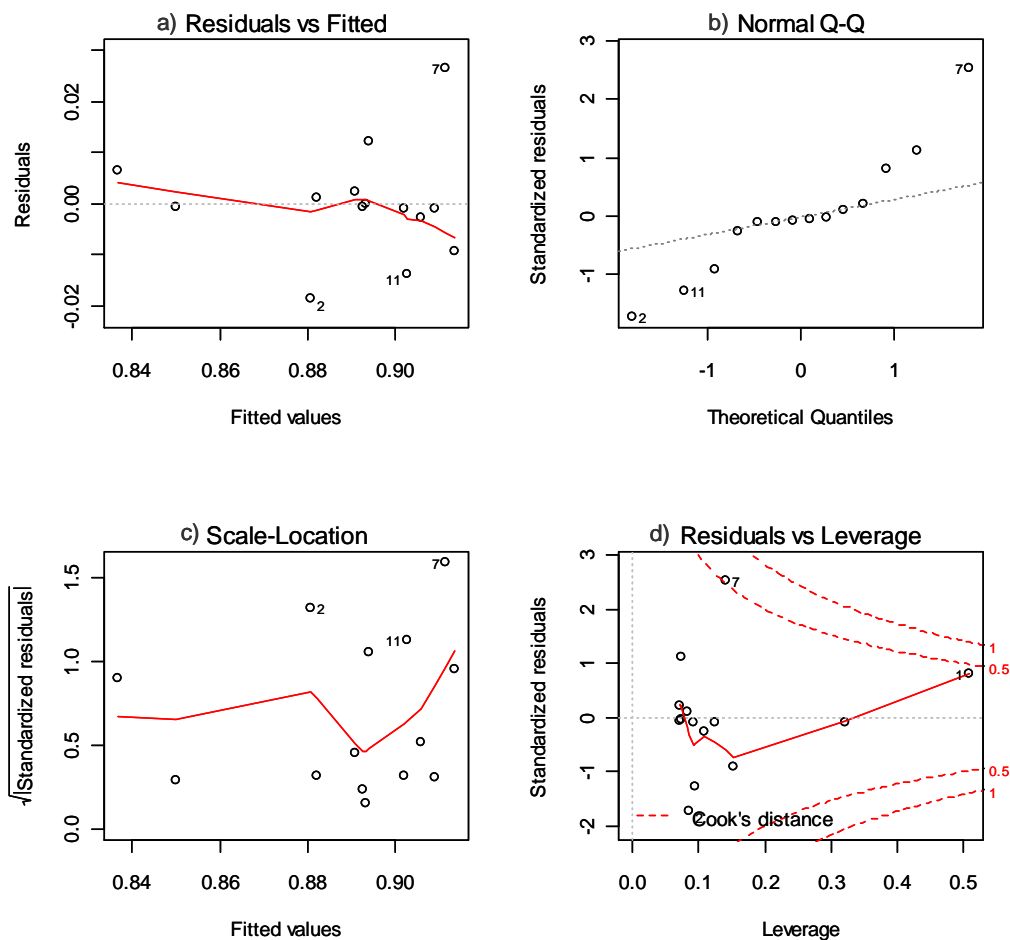
62. ábra: A relatív rugalmasság korongon és egész kenyérszeleten mért értékeinek összefüggése 1,7 mm/s-os mérési sebességnél



63. ábra: A korongon és egész kenyérszeleten mért relatív rugalmasság értékekre illesztett modell diagnosztikus ábrái: a) reziduum-becsült érték ábra, b) QQ-ábra, c) szórás-becsült érték ábra és d) standardizált-reziduum-hatóerő ábra (mérési sebesség 1,7 mm/s)

A Q-Q diagram alapján elmondható, hogy az alkalmazott lineáris modell az összefüggést jól jellemzi, a reziduum – becült érték diagram azonban nem meggyőző. A standardizált reziduum – hatóerő ábrán a 15. mérési pont torzító pontként jelenik meg, és az első szelet értéke a Cook-féle D-érték határához közel esik.

Mivel az említett 15 mérési pont egyben kiugró érték is volt, az illesztést ezen pont elhagyásával is elvégeztem. A determinációs együttható értéke így 0,915-ről 0,811-re változott, a kétféle mintaelőkészítés értékei között a kapcsolat még így is kellően szoros.



64. ábra: A korongon és egész kenyérszeleten mért relatív rugalmasság értékekre illesztett modell diagnosztikus ábrái a 15. pont elhagyásával: a) reziduum-becült érték ábra, b) QQ-ábra, c) szórás-becült érték ábra és d) standardizált reziduum-hatóerő ábra (mérési sebesség 1,7 mm/s)

Az 64. ábra az új modell diagnosztikáját szemlélteti. Ebben az esetben egyértelműen torzító pont már nem látható, bár az első és a 7. szelet értékei a Cook-féle D-érték határához közel esnek.

Az értékelés során több helyen kiugró vagy torzító pontként jelentkezett a 15. szelet eredménye. Ennek oka valószínűleg az, hogy a kenyér két végén a mérésből kihagyott szeletek száma nem volt azonos. Az utolsó szelet felülete így esetleg a többi vizsgált szelethez képest valamivel kisebb lehetett, így a héj közeli régió hatása jobban érvényesült. Az alacsony

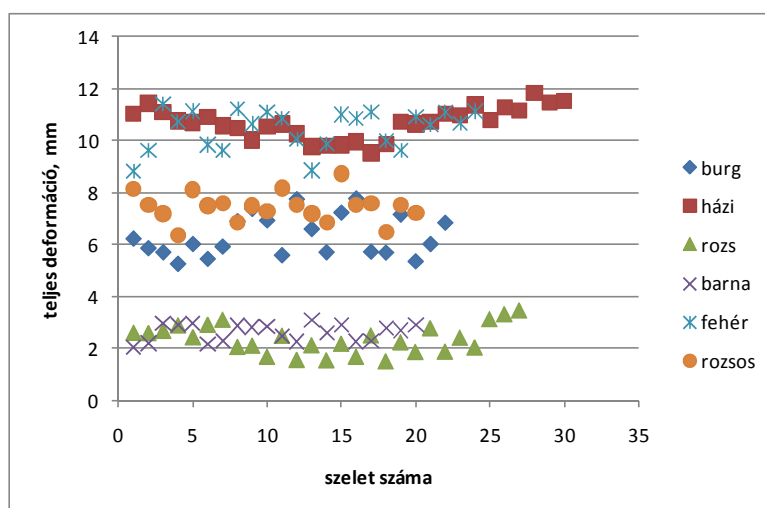
mintaelemszám miatt a felállított modell kevésbé volt robusztus, egyetlen mérési pont elhagyása is jelentős változást okozott. Célszerű tehát minél több ismétlésre és nagyon gondos mintaelőkészítésre törekedni.

Összegzésként elmondható, hogy korong és szelet vizsgálatánál a mérés során felvett idő-deformáció diagramról közvetlenül leolvasható teljes és plasztikus deformáció értékei között szoros kapcsolat van. Ugyanez igaz a relatív rugalmasság értékeire is, tehát a kétféle mintaelőkészítési és mérési módszerrel meghatározott paraméterek megfeleltethetők egymásnak. A rugalmas alakváltozás értékei közötti hiányzó vagy gyenge kapcsolat a kapott eredményeket érdemben nem befolyásolja. Ezek alapján a vizsgálatok egész kenyérszeleten is elvégezhetőek, kísérleteimben a továbbiakban ennek megfelelően jártam el.

5.3. A módszer alkalmazhatóságának vizsgálata

Az eddigi vizsgálatok a mérés paramétereinek meghatározására irányultak. Ezek eredményei alapján a kifejlesztett, precíziós penetrométerre alapozott új módszer a következő: a terhelőerő értéke 5 N, a terhelés és a tehermentesítés ideje 60 s, a mérőfej mozgási sebessége 0,2 mm/s. A méréseket kenyérszelet közepén, 35 mm-es mérőfejjel végezzük. Az új mérési módszer alkalmazhatóságának megerősítésére a mérési idő meghatározásánál használt barna, fehér, és rozsos kenyér mellett további három típus (házi jellegű, rozs és burgonyás) tulajdonságait is megvizsgáltam. Itt is – mint az eddigi kísérleteknél – mind a négy jellemző alakulását elemeztem.

A teljes deformáció az idő-deformáció görbéről közvetlenül leolvasható, értékei a hat kenyértípusra a 65. ábrán láthatók.



65. ábra: Hat különböző kenyértípus teljes deformációja

A teljes deformáció alapján a hatféle kenyértípus látszólag három csoportra oszlik. A fehér (porozitása 84,5 %) és a házi jellegű (porozitása 86 %), a rozsos (porozitása 83,5 %) és a burgonyás (porozitása 81 %), valamint a rozs (porozitása 75 %) és barna (porozitása 74 %) kenyér hasonló

tulajdonságokat mutat, ennek magyarázata a hasonló összetétel. A főként búzalisztból készült termékek (fehér és házi jellegű) több sikefehérjét tartalmaznak. A tészta gáztartó képessége nagy, a késztermék szerkezete lazább, a bélzet puhább. Ilyen tulajdonságok mellett az 5 N terhelőerő nagyobb deformációt okoz. A barna és a rozskenyér főként rozslisztből készül, melynek sikefehérjé tartalma alacsony. Szerkezetük tömörebb, bélzetük keményebb. Az alkalmazott terhelés ezeknél a kenyereknél kisebb mértékű alakváltozást okoz, mint a fehér lisztből készült termékekénél.

A kenyértípusok közötti eltérések statisztikai vizsgálatánál a varianciaanalízis eredményei szerint (17. táblázat) a teljes deformáció alapján a hat csoport közül legalább kettő szignifikánsan eltér egymástól.

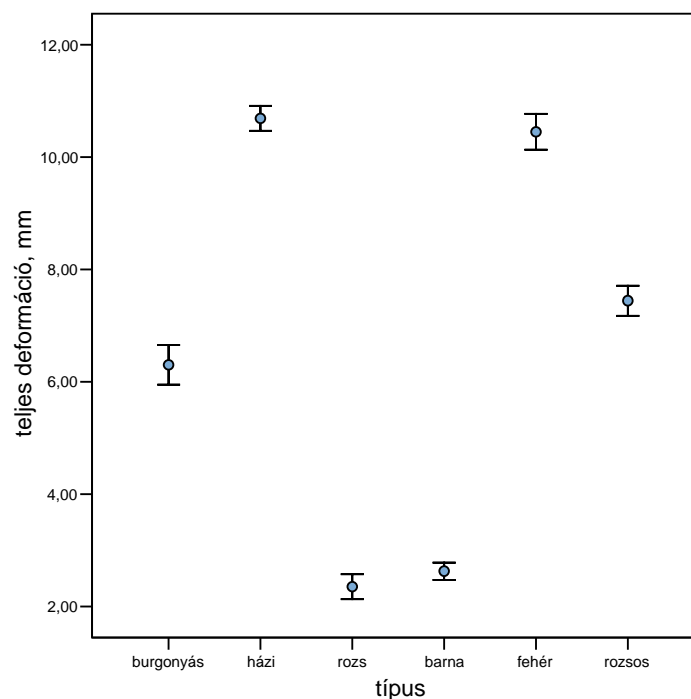
17. táblázat: Variancia-analízis eredménye a teljes deformáció értékeire hat különböző kenyértípusnál

ANOVA

teljes deformáció

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	1669,767	5	333,953	854,898	,000
Within Groups	53,517	137	,391		
Total	1723,284	142			

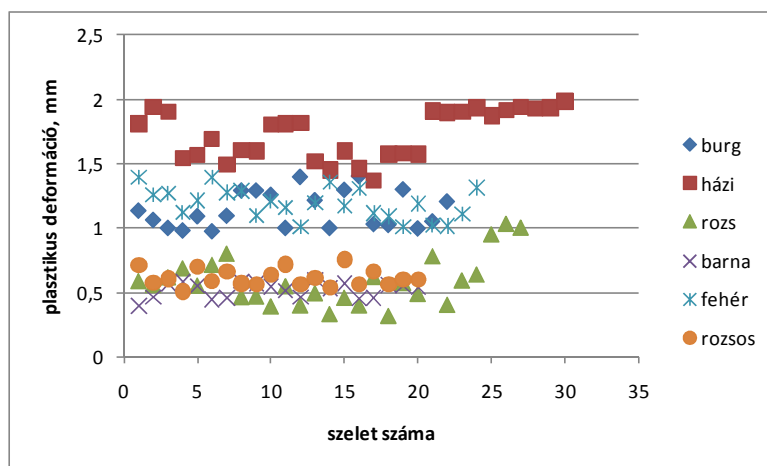
Az eltérések elemzését error bar ábrázolás segítségével végeztem (66. ábra). Az eredményben – ahogyan azt a grafikus ábrázolás már előrevetítette – itt is megfigyelhető a három csoport, a burgonyás és rozsos kenyerek, a házi jellegű és fehér valamint a barna és rozskenyerek értékei keveredhetnek egymással. Az említett három csoport azonban valóban különbözik egymástól.



66. ábra: Error bar a hat különböző kenyértípus teljes deformációjának értékeléséhez

Annak meghatározására, hogy pontosan mely csoportok különböznek egymástól, Tukey-próbát végeztem (24. táblázat, melléklet). Az eredmények alapján a házi jellegű és a fehér, valamint a rozs és barna kenyerek között nem mutatható ki szignifikáns különbség.

A plasztikus deformáció értékeit (67. ábra) figyelembe véve a házi jellegű kenyér látszólag különvált a többi kenyértől, a plasztikus deformáció értéke itt a legmagasabb. Ennek oka az erősen lazított bélzet, a vékony pórusfalak a mechanikai hatásoknak kevésbé tudnak ellenállni, a szerkezet könnyebben károsodik. Egymáshoz hasonló tulajdonságokat mutat a burgonyás és fehér kenyér, valamint a barna, a rozs és a rozsos kenyér.



67. ábra: Hat különböző kenyértípus plasztikus deformációja

A varianciaanalízis eredménye szerint ebben az esetben is kimutatható szignifikáns különbség a kenyértípusok között (18. táblázat).

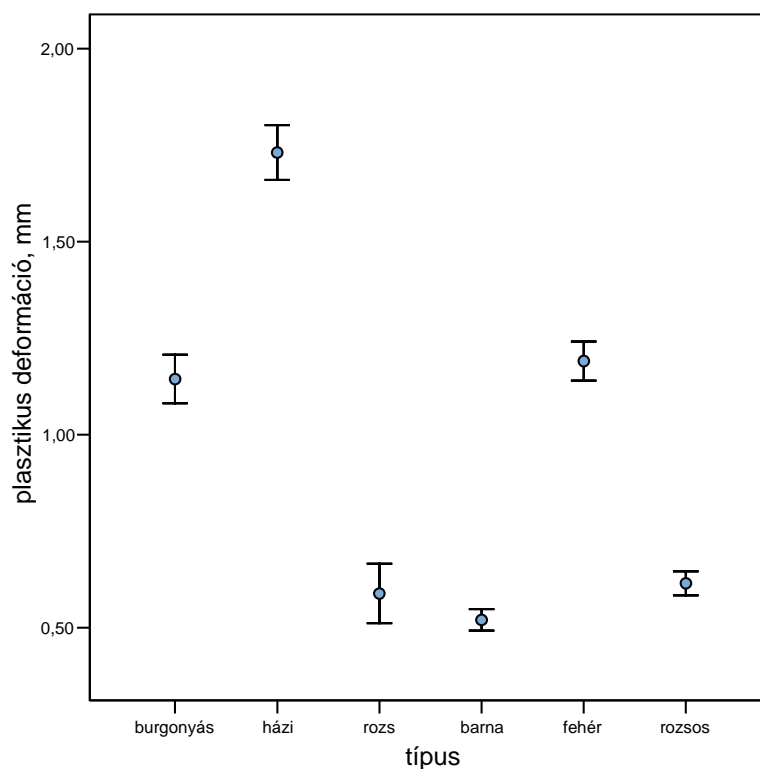
18. táblázat: Variancia-analízis eredménye a plasztikus deformáció értékeire hat különböző kenyértípusnál

ANOVA

plasztikus deformáció					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	29,503	5	5,901	276,060	,000
Within Groups	2,928	137	,021		
Total	32,431	142			

Az error bar ábrázolásból (68. ábra) arra következtethetünk, hogy a házi jellegű kenyér lényegesen eltér a többitől, a burgonyás és fehér kenyér között nincs egyértelmű különbség és a rozs

és a barna kenyér is hasonlóságot mutat. Ez utóbbi kettőhöz áll közel a rozsos kenyér plasztikus deformációja is.

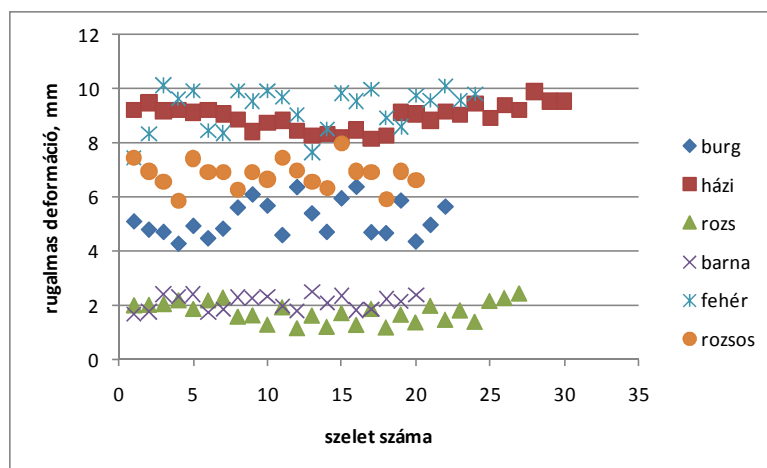


68. ábra: Error bar a hat különböző kenyértípus plasztikus deformációjának értékeléséhez

A Tukey-próba megerősítette, hogy a házi jellegű kenyér teljesen megkülönböztethető a többi öt típustól. A fehér és a burgonyás kenyér értékei valóban keverednek egymással, ugyanez mondható el a barna és rozs kenyereknél is, ezektől a rozsos kenyér plasztikus deformációja sem különbözik szignifikánsan (25. táblázat, melléklet).

A rugalmas deformáció számított érték, a teljes és a plasztikus deformáció különbsége adja. Értékei a hat kenyértípusra a 69. ábrán láthatók.

A kenyerek itt a teljes deformációnál megfigyelt módon sorolhatók három nagyobb csoportba. A fehér és a házi jellegű kenyér értékei közel állnak egymáshoz, a burgonyás kenyér a rozsos kenyérral mutat hasonlóságot. A rozs és a barna kenyér rugalmas deformációja a legalacsonyabb, az ok itt is a magas rozsliszt-tartalom, melynek következtében a tészta kevésbé rugalmas, gáztartó képessége alacsony.



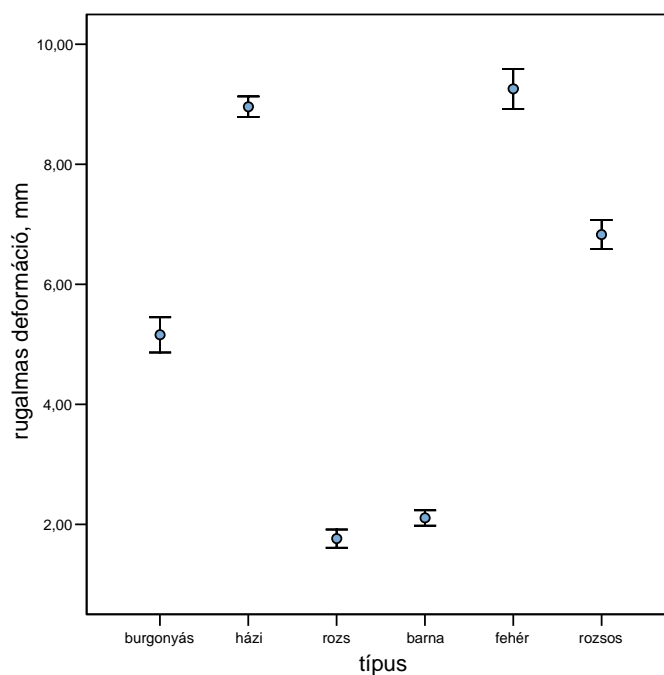
69. ábra: Hat különböző kenyértípus rugalmas deformációja

A varianciaanalízis F próbájának eredménye itt is szignifikáns (19. táblázat). Az error bar ábrázolásból (70. ábra) megállapítható, hogy a házi és fehér valamint a barna és rozs kenyerek eredményei nagyon hasonlóak, köztük valószínűleg nincs szignifikáns különbség.

19. táblázat: Varianciaanalízis eredménye a rugalmas deformáció értékeire hat különböző kenyértípusnál

ANOVA

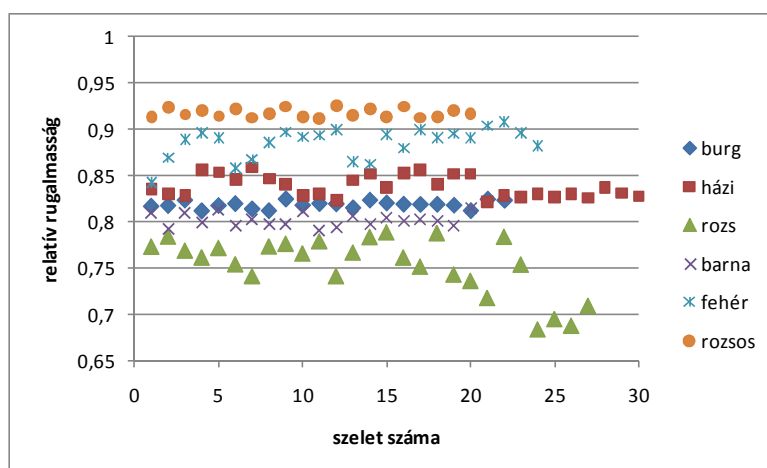
rugalmas deformáció					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	1329,355	5	265,871	914,503	,000
Within Groups	39,830	137	,291		
Total	1369,185	142			



70. ábra: Error bar a hat különböző kenyértípus rugalmas deformációjának értékeléséhez

A Tukey-próba megerősíti az error bar ábrázolás eredményeit, a házi és a fehér, valamint a barna és a rozsos kenyerek nem választhatók el egymástól. A rozsos és a burgonyás kenyerek azonban egymástól is és a többi 4 kenyértípustól is teljesen elkülöníthetők (26. táblázat, melléklet).

A relatív rugalmasság szintén számított érték, a rugalmas és a teljes deformáció hányadosa. Ez alapján úgy tűnik, hogy a kenyereket már nehezebb nagyobb csoportokba besorolni (71. ábra). Egymáshoz közel állnak a fehér és a rozsos kenyér értékei. Szintén hasonlóan tűnik a házi jellegű és a burgonyás kenyér is, ehhez a kettőhöz áll közel a barna kenyér relatív rugalmassága. Ennek oka a szerkezeti sajátosságokban keresendő. Míg a barna kenyér összetételénél fogva, a magas rozsliszt-tartalom miatt nem olyan rugalmas, mint a fehér kenyér, a házi jellegű kenyérenél ezt a túlzott lazítottságból eredő vékony, sérülékeny pórusfalakkal lehet magyarázni. A burgonyás kenyér burgonyapelyhet tartalmaz, ami a tésztát kissé elnehezíti, így a késztermék kevésbé lesz rugalmas. A rozskenyerek relatív rugalmassága a legkisebb.



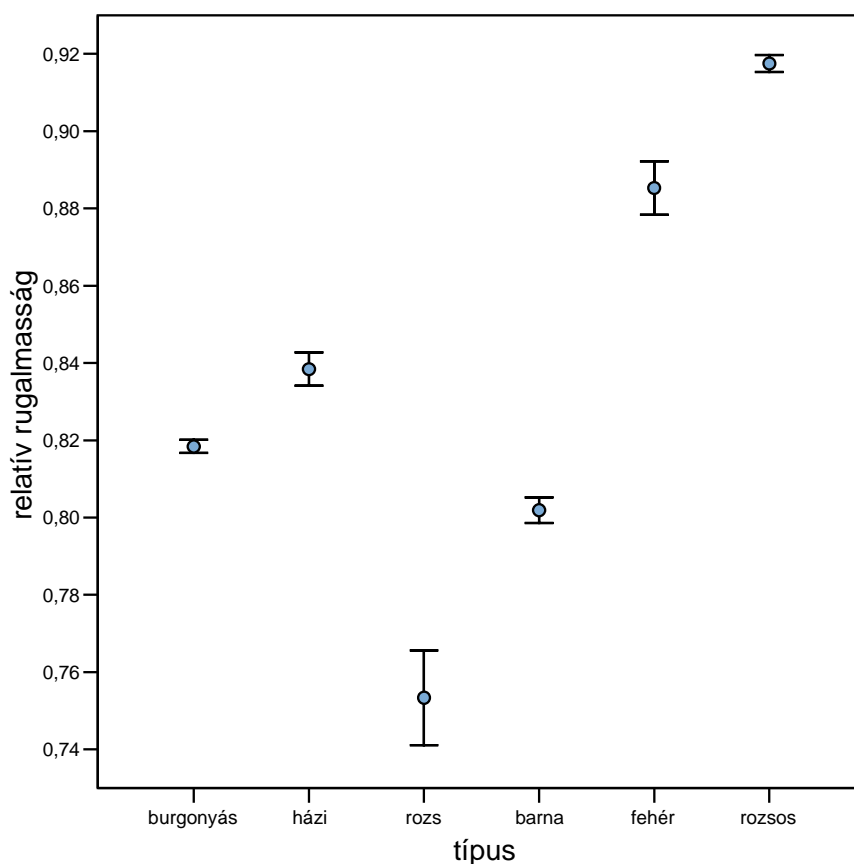
71. ábra: Hat különböző kenyértípus relatív rugalmassága 60 s terhelési időnél

A varianciaanalízis eredménye megerősíti, hogy legalább két kenyértípus szignifikánsan eltér egymástól (20. táblázat). Az error bar ábrázolás esetén igazi átfedések nem fedezhetők fel (72. ábra).

20. táblázat: Variancia-analízis eredménye a relatív rugalmasság értékeire hat különböző kenyértípusnál

ANOVA

relatív rugalmasság					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	,405	5	,081	302,976	,000
Within Groups	,037	137	,000		
Total	,441	142			



72. ábra: Error bar a hat különböző kenyértípus relatív rugalmasságának értékeléséhez

Az alkalmazott Tukey-próba eredményei (27. táblázat, melléklet) szignifikánsak minden csoportra, ami azt igazolja, hogy a relatív rugalmasság alapján a kenyértípusok jól elkülöníthetők egymástól, tehát a kidolgozott módszer alkalmas lehet a különböző bélszerkezettel rendelkező termékek azonosítására.

Ahhoz, hogy a relatív rugalmasságot megkapjuk, mind a teljes, a plasztikus és a rugalmas deformáció értékei rendelkezésre állnak. Ha a diszkriminancia analízisnél az összes jellemzőt figyelembe vesszük, akkor az esetek 95,4 százalékában eldönthető, hogy a vizsgált minta milyen kenyértípusba tartozik (21. táblázat). Megjegyzendő, hogy az osztályozásnál a rugalmas deformáció értékei nem magyarázzák a csoportok közötti különbséget, ezért ezt a módszert a csoportba sorolás során nem vette figyelembe.

21. táblázat: Diszkriminancia analízis eredménye az összes mért jellemző figyelembevételével hat különböző kenyértípus esetén

		Predicted Group Membership						Total	
típus		burgonyás	házi	rozs	barna	fehér	rozsos		
Original	Count	burgonyás	22	0	0	0	0	0	22
		házi	0	30	0	0	0	0	30
		rozs	0	0	24	3	0	0	27
		barna	0	0	0	20	0	0	20
		fehér	0	3	0	0	21	0	24
		rozsos	0	0	0	0	0	20	20
	%	burgonyás	100,0	,0	,0	,0	,0	,0	100,0
		házi	,0	100,0	,0	,0	,0	,0	100,0
		rozs	,0	,0	88,9	11,1	,0	,0	100,0
		barna	,0	,0	,0	100,0	,0	,0	100,0
		fehér	,0	12,5	,0	,0	87,5	,0	100,0
		rozsos	,0	,0	,0	,0	,0	100,0	100,0
Cross-validated ^a	Count	burgonyás	22	0	0	0	0	0	22
		házi	0	30	0	0	0	0	30
		rozs	0	0	24	3	0	0	27
		barna	0	0	0	20	0	0	20
		fehér	0	4	0	0	20	0	24
		rozsos	0	0	0	0	0	20	20
	%	burgonyás	100,0	,0	,0	,0	,0	,0	100,0
		házi	,0	100,0	,0	,0	,0	,0	100,0
		rozs	,0	,0	88,9	11,1	,0	,0	100,0
		barna	,0	,0	,0	100,0	,0	,0	100,0
		fehér	,0	16,7	,0	,0	83,3	,0	100,0
		rozsos	,0	,0	,0	,0	,0	100,0	100,0

a. Cross validation is done only for those cases in the analysis. In cross validation, each case is classified by the functions derived from all cases other than that case.

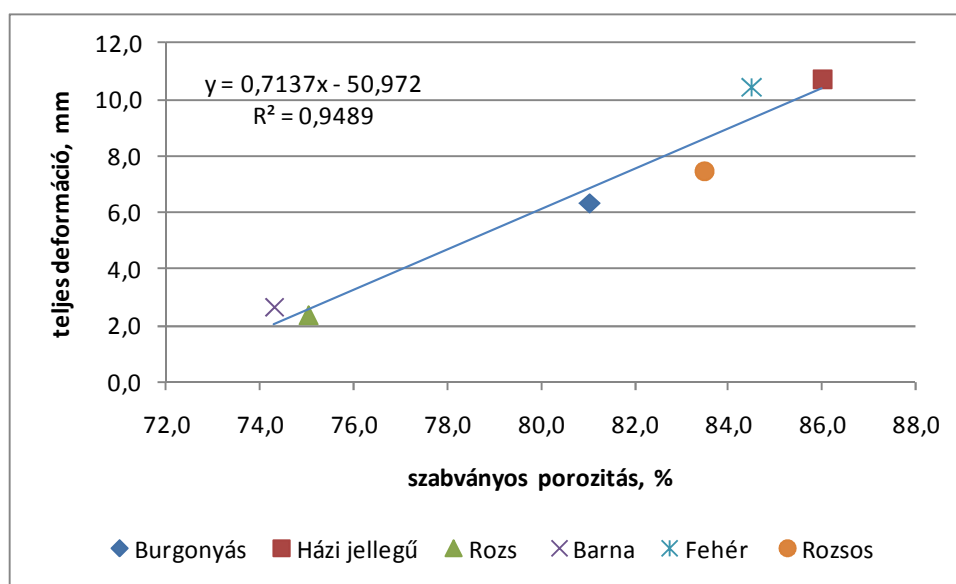
b. 95,8% of original grouped cases correctly classified.

c. 95,1% of cross-validated grouped cases correctly classified.

Látható, hogy tévesztés a nagyon hasonló bélszerkezettel rendelkező rozs és barna valamint a házi és fehér kenyerek esetén történt. Bár az összes meghatározott jellemző alapján az osztályozás kicsit bizonytalanabb, mintha csak a relatív rugalmasságot nézzük, az állomány leírása mind a négy mért paraméter figyelembe vételével sokkal átfogóbb.

A vizsgálatok eredményei alapján a hatféle kenyér megkülönböztethető egymástól, kapott értékek alátámasztják az előzetes vizsgálatok eredményeit. A módszer tehát jól alkalmazható eltérő típusú kenyerek relatív rugalmasságának mérésére, amely alapján az egyes kenyértípusok elkülöníthetőek

Felvetődik a kérdés, hogy a kenyér belső szerkezete, illetve az azt jellemző porozitás és az elasztigráf-elvű méréssel meghatározott reológiai tulajdonságok között van-e valamilyen összefüggés. A méréseket friss kenyereken, a sütés napján végeztem. A 73. ábra a teljes deformáció átlagértékeit mutatja a porozitás függvényében.



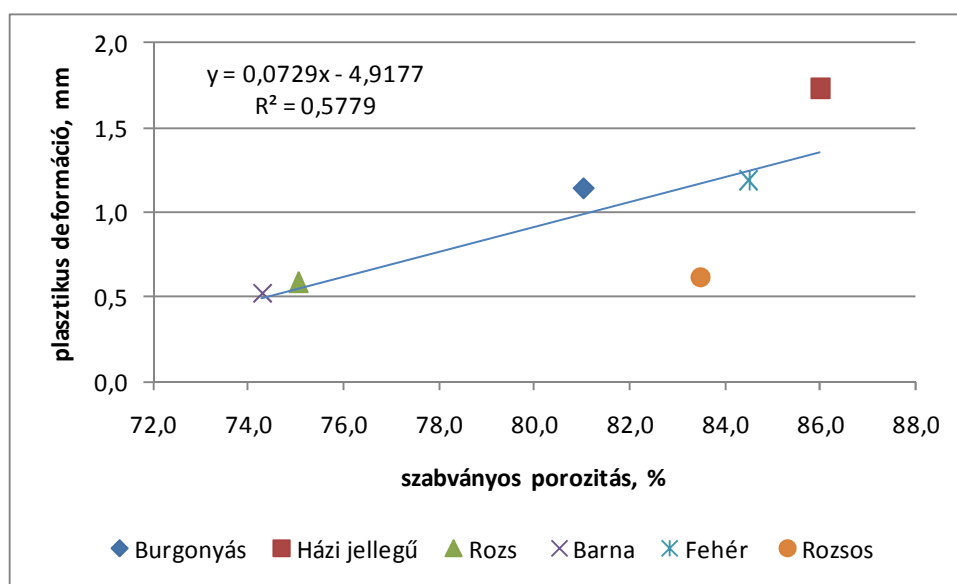
73. ábra: Hat különböző kenyértípus teljes deformációjának átlaga a szabványos porozitás függvényében

A teljes deformáció és a szabványos porozitás alapján az átlagértékeket tekintve a hatféle kenyér látszólag három csoportra különül el. Az első csoportba a rozsliszt alapú barna és rozs kenyerek kerültek. Ezekre a termékekre jellemző, hogy kevés sikért tartalmaznak. A sikérváz hiányában a tészta gáztartó képessége alacsony, a késztermék bélzete tömött, kissé keményebb és kevésbé rugalmas. Porozitásuk 75 % körüli érték, a vizsgált kenyértípusok közül a legkisebb.

A második csoportba a búzaliszt alapú, fehér és házi jellegű termékek sorolhatók. Magas sikértartalmuknak köszönhetően a kelesztés és sütés során keletkező gázok nagy részét megtartják, bélzetük laza, lágy, a pórusok nagyobbak, mint a magas rozsliszt-tartalmú termékeknél. Porozitásuk 85 % körüli, a teljes deformáció értéke itt a legnagyobb.

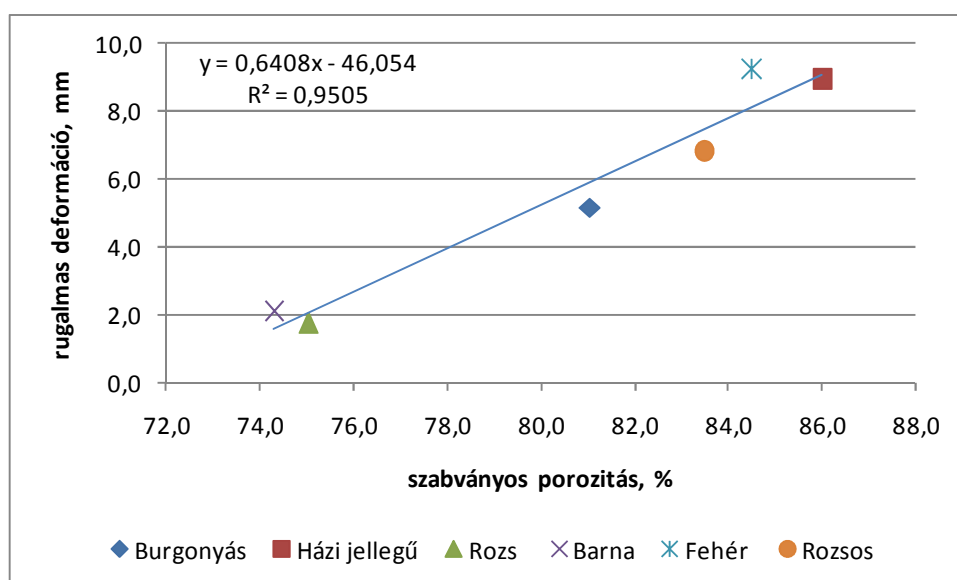
Hasonló tulajdonságokat mutat a burgonyás és rozsos kenyér, ezek kissé keményebbek, mint a második csoport tagjai, porozitásuk alacsonyabb. A burgonyás kenyérnél az adalékként alkalmazott burgonyakészítmény a tésztát kissé elnehezíti, így kelesztés során a pórusok kevésbé tudnak tágulni. A rozsos kenyér porozitás azonban a házi és fehér kenyér értékeihez viszonylag közel áll, az adagolt rozsliszt a pórusok tágulását nem befolyásolja jelentősen, a pórusfalak stabilitását viszont növeli.

A teljes deformáció és a szabványos porozitás között lineárisan jól közelíthető kapcsolat áll fenn, amelyhez az $R^2 = 0,9489$ érték tartozik.



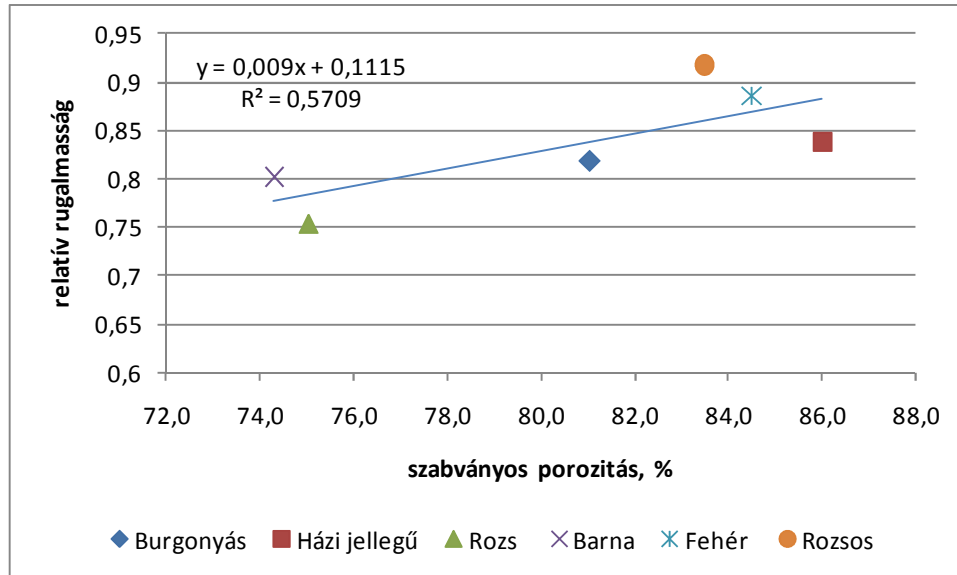
74. ábra: Hat különböző kenyértípus plasztikus deformációjának átlaga a szabványos porozitás függvényében

Gyenge a kapcsolat ($R^2=0,5779$) a plasztikus deformáció és porozitás értékei között (74. ábra). A barna- és a rozskenyér esetén az alacsony plasztikus deformációhoz alacsonyabb porozitás tartozik, a két termék hasonló tulajdonságokat mutat. A burgonyás kenyér plasztikus deformációja a fehér kenyéréhez áll közel, bár porozitása lényegesen kisebb. Az burgonyás kenyér pórusfalai kevésbé rugalmasak, a mechanikai terhelésnek – a fehér és a házi kenyéréhez hasonlóan – kevésbé képes ellenállni. A rozsos kenyér plasztikus deformációja kisebb, mint a hozzá porozításban hasonló fehér és házi kenyéré, pórusfalai ezekénél rugalmasabbak, ellenállóbbak.



75. ábra: Hat különböző kenyértípus rugalmas deformációjának átlaga a szabványos porozitás függvényében

A 75. ábra a rugalmas deformáció és a porozitás értékek közti kapcsolatot szemlélteti. A két jellemző között szoros lineáris kapcsolat van ($R^2=0,9505$). A teljes deformációnál megfigyelt három csoport itt is elkülöníthető. Hasonló tulajdonságokat mutat a barna és rozs valamint a fehér és házi kenyér. Ezek között helyezkednek el a burgonyás és a rozsos kenyér értékei.



76. ábra: Hat különböző kenyértípus relatív rugalmasságának átlaga a szabványos porozitás függvényében

A relatív rugalmasság (76. ábra) esetén a rozsliszt alapú kenyerek szintén jól elkülönülnek a többi kenyértípustól, mind porozitásuk, mind relatív rugalmasságuk alacsonyabb. A fehér és a rozsos kenyér értékei is közel állnak egymáshoz, mind a relatív rugalmasságuk, mind a porozitásuk nagy a nagyobb sikértartalom következtében.

A burgonyás kenyér relatív rugalmassága a rozslisztből készült kenyerekhez áll közelebb. Bár porozitása ezekénél nagyobb, a fehér és rozsos kenyerek porozitásától elmarad. A búzaliszthez adagolt burgonyakészítmény a tészta gáztartó képességét és a kialakuló pórusfalak rugalmasságát csökkentette. A házi jellegű kenyér porozitása a legnagyobb, a nagy pórusok és az ebből eredő vékony pórusfalak azonban kis rugalmasságot eredményeznek. A burgonyás és a házi jellegű kenyér nagy porozitásához tartozó viszonylag kis relatív rugalmasság érték miatt a kapcsolat ezen két jellemző között gyenge ($R^2 = 0,5709$). Ez a két kenyértípus azonban nem tartozik a klasszikus kenyerek közé. A burgonyás kenyér a búzaliszten kívül burgonyakészítményt, a házi jellegű kenyér térfogatnövelő adalékanyagot tartalmaz, ezért tulajdonságaik a tisztán alaplisztet tartalmazó termékekétől eltérnek.

Összességében elmondható, hogy a porozitás és a vizsgált reológiai paraméterek között nem állapítható meg egyértelmű összefüggés. Bár a teljes deformáció valamint az ebből meghatározott rugalmas deformáció és a porozitás között szoros kapcsolat adódott, ugyanez nem mondható el sem a plasztikus deformációról sem a relatív rugalmasságról.

A kidolgozott új módszerrel a kenyérbélzet tulajdonságai széles tartományban határozhatók meg. Alkalmazásával lehetőség nyílik olyan kenyerek szerkezetének vizsgálatára is, melyek az Elasztigráffal nem, vagy csak nehézkesen mérhetők.

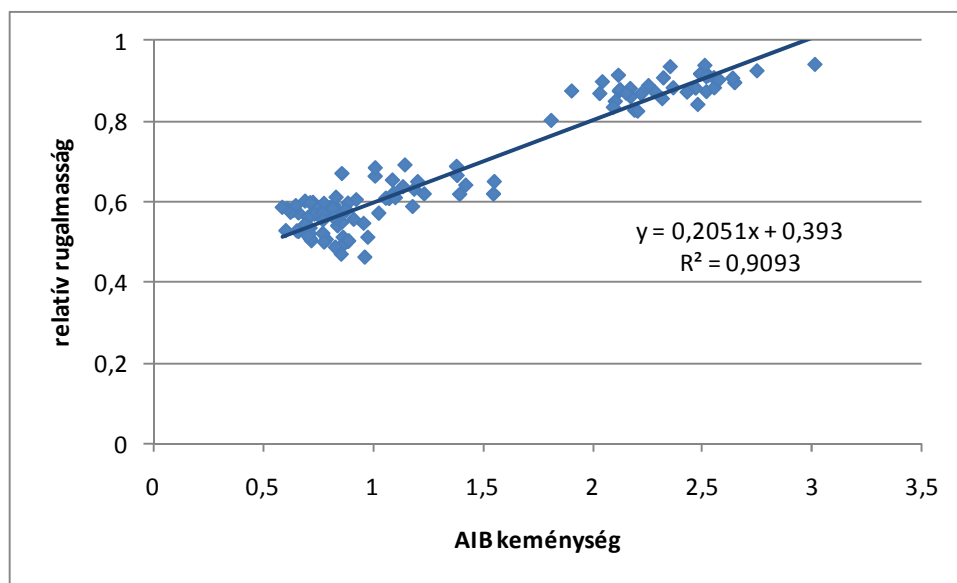
5.4. Az új módszer kapcsolata más módszerekkel

Sikerült olyan új mérési módszert kidolgozni, amely az elasztigráfos mérési módszer alapvének megtartása mellett alkalmazható a mai kenyerek vizsgálatára. Az irodalmi források szerint a kenyér vizsgálatára az AIB és AACC szabványt, valamint a TPA módszert alkalmazzák a leggyakrabban. Mérési módszerem akkor tekinthető a jónak, ha eredménye összehasonlítható a nemzetközi viszonylatban használt és általánosan elfogadott vizsgálatok eredményeivel.

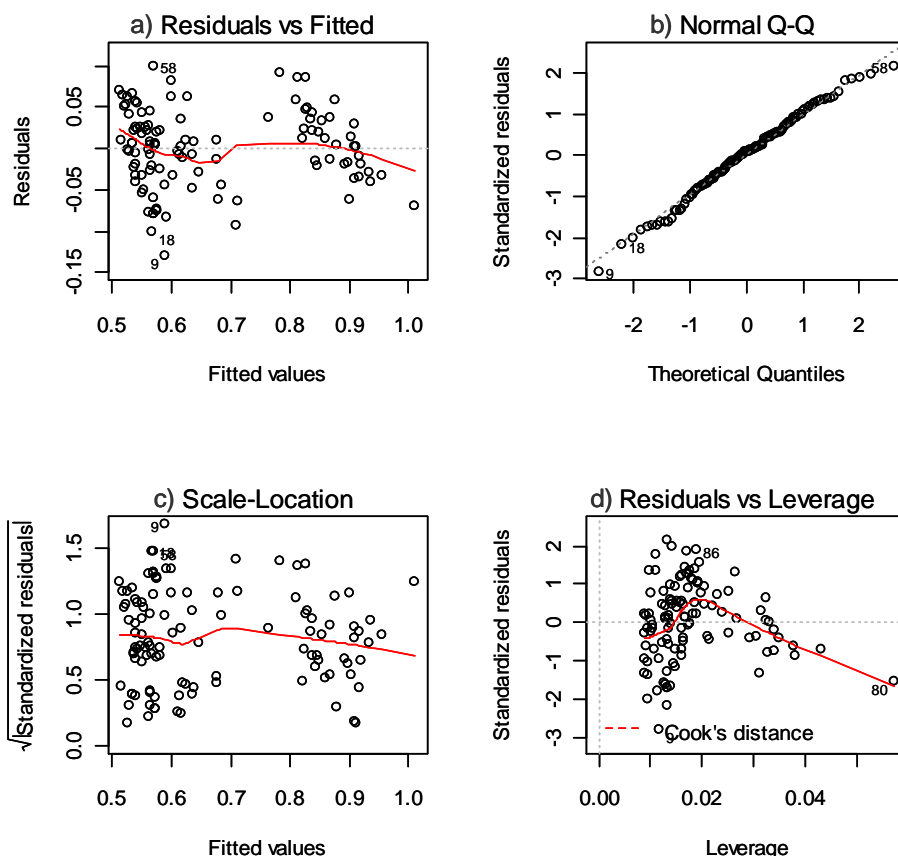
Munkám ezen részében az általam kidolgozott új mérési módszert az AIB szabvánnyal és a TPA vizsgálattal hasonlítottam össze. Az eredményeket részletesen a relatív rugalmasság értékekkel mutatom be, mivel az elasztigráfos mérés során is ezt a tulajdonságot használták a termékek jellemzésére, valamint ezen jellemző alapján sikerült a különböző terméktípusokat legjobban elkülöníteni.

5.4.1. Az új módszer kapcsolata az AIB szabvánnyal

Az AIB kenyérrre vonatkozó szabványa a 25 %-os deformáció eléréséhez szükséges erőértékkel jellemzi a termék keménységét. A 77. ábra a relatív rugalmassággal való összefüggést mutatja. A két érték között szoros lineáris kapcsolat áll fenn.



77. ábra: A relatív rugalmasság és az AIB szabvány szerinti keménység értékének összefüggése



78. ábra: Három kenyértípusnál az AIB szabvány szerinti keménység és a kidolgozott módszerrel számított relatív rugalmasság értékekre illesztett modell diagnosztikus ábrái: a) reziduum-becsült érték ábra, b) QQ-ábra, c) szórás-becsült érték ábra és d) standardizált reziduum-hatóerő ábra

A diagnosztikus ábrák (78. ábra) az illesztés helyességét megerősítik. A hiba egészen szűk határok között változik, a pontokra illesztett simított görbe közel vízszintes. A szórás-becsült érték ábrán tendencia nem látható, tehát a reziduumok szórása állandónak tekinthető. Kiugró értékek nem voltak és torzító pontot sem detektáltam, a standardizált reziduum-hatóerő ábrán a Cook-féle D értéknek megfelelő határok meg sem jelennek.

A kidolgozott vizsgálat során azonban nem csak a relatív rugalmasság áll rendelkezésünkre, hanem a teljes, a plasztikus és a rugalmas deformáció mértéke is. Az AIB szabvány szerinti keménység értékével mutatott kapcsolatukat a 22. táblázatban foglaltuk össze.

22. táblázat: Az elasztigráf elvű mérés és az AIB szabvány szerinti eredmények közti kapcsolat jellemzői

jellemző	kapcsolat	R ²
D	negatív lineáris	0,8111
P	negatív exponenciális	0,9274
R	nincs kapcsolat	0,021
R/D	pozitív lineáris	0,9093

A teljes (D) és a plasztikus (P) deformáció a relatív rugalmassághoz (R/D) hasonlóan szintén szoros kapcsolatot mutat az AIB szabvány keménység értékével. A rugalmas deformációval (R) viszont nem mutatható ki összefüggés.

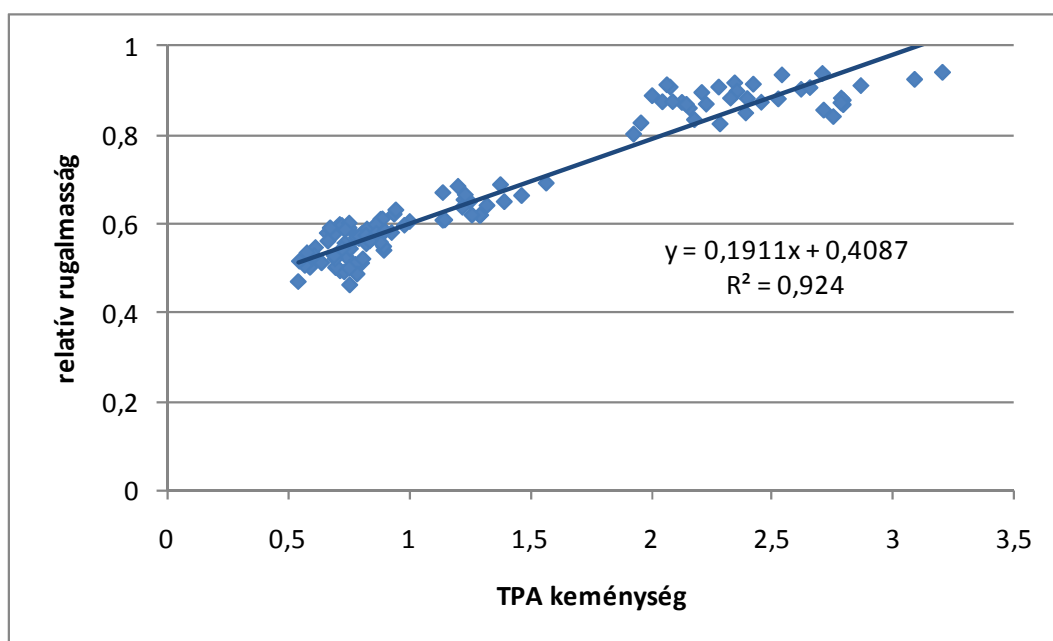
A kidolgozott módszer tehát jó alternatívája lehet az AIB szabványnak. Bár a mérési idő hosszabb, a plasztikus deformáció és a relatív rugalmasság több információt hordoz, mint az egyszerűen meghatározott keménység, így a termékek állománya pontosabban jellemezhető.

5.4.2. Az új módszer kapcsolata a TPA módszerrel

Második viszonyítási módszernek a Texture Profile Analysis (TPA) választottam. Ezt a módszert két harapás tesztnak is nevezik, mivel a mintát egymás után kétszer terheli. Feltételeztük, hogy eredményei vélhetően összefüggést mutatnak a kidolgozott, tartós terhelésen alapuló módszer eredményeivel.

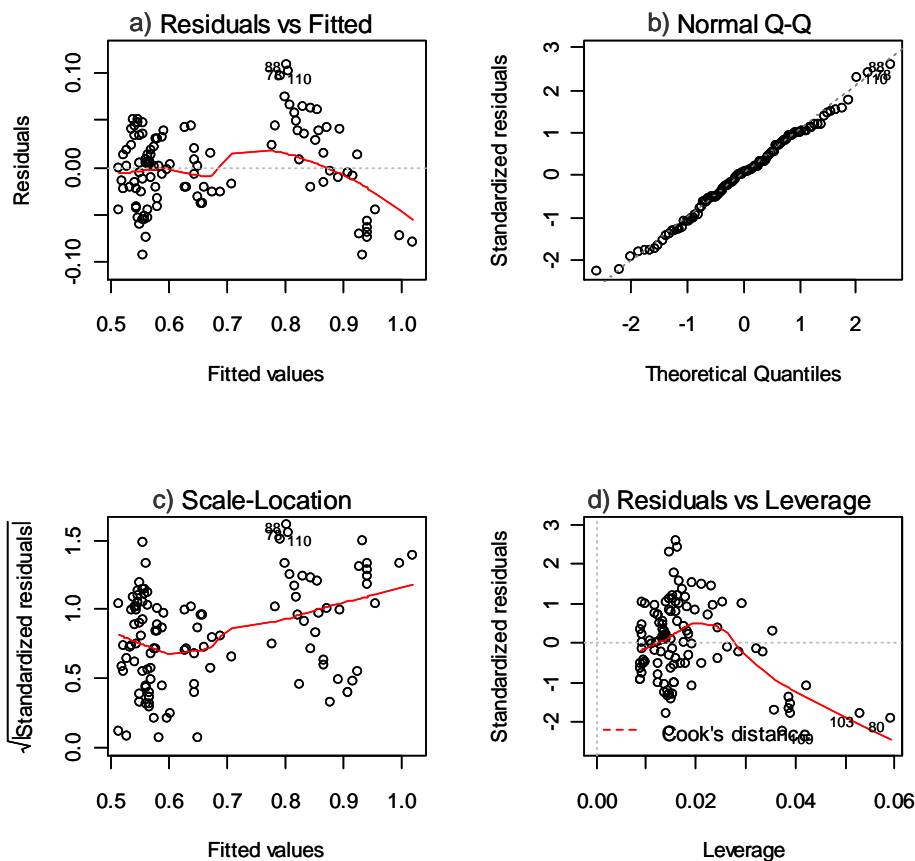
A TPA az AIB szabványtól eltérően nem csak egy, hanem több jellemzővel írja le a vizsgált termék tulajdonságait. A keménység az adott, előre meghatározott deformációhoz szükséges erő a diagramról közvetlenül leolvasható. A többi jellemző meghatározása nem ilyen egyszerű, a rugalmasságot időintervallumokból, a kohéziót görbe alatti területek arányából határozhatjuk meg. A rágási ellenállás értékét a keménység és a kohézió szorzataként, a rágáshoz szükséges energiát pedig a rágási ellenállás és a rugalmasság szorzataként kapjuk.

Az előzőekhez hasonlóan az eredményeket itt is a relatív rugalmasságon mutatom be részletesen.



79. ábra: A relatív rugalmasság és a TPA módszer keménység értékének összefüggése

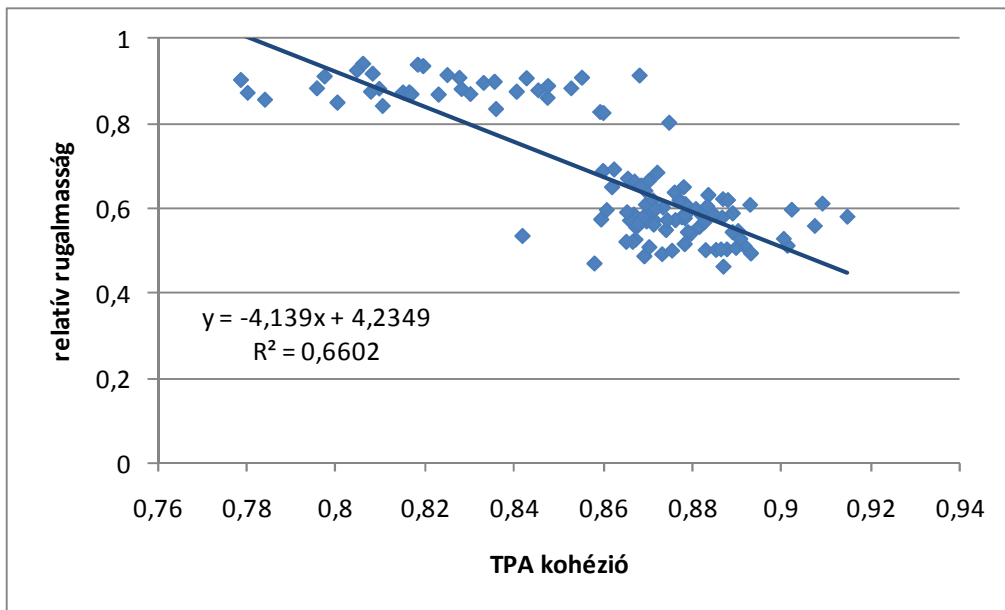
A keménység és a relatív rugalmasság között szoros lineáris kapcsolat áll fenn (79. ábra), a determinációs együttható értéke 0,924.



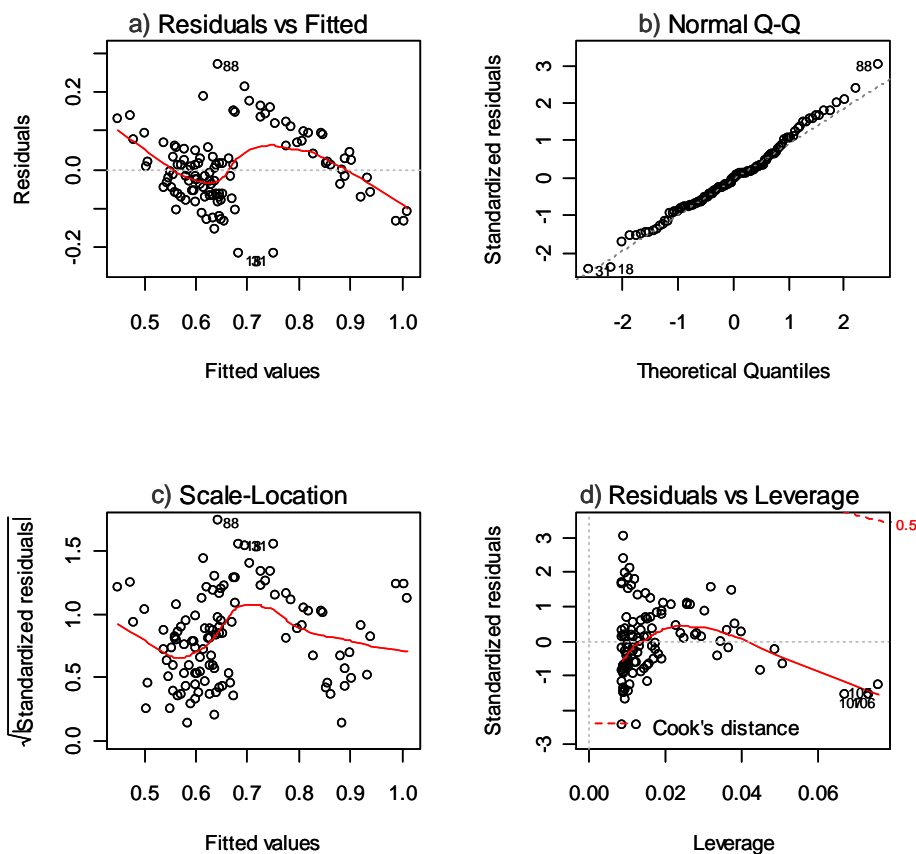
80. ábra: Három kenyértípusnál a TPA keménység és a kidolgozott módszerrel számított relatív rugalmasság értékekre illesztett modell diagnosztikus ábrái: a) reziduum-becsült érték ábra, b) QQ-ábra, c) szórás-becsült érték ábra és d) standardizált reziduum-hatóerő ábra

A diagnosztikus ábrák alapján (80. ábra) az illesztés megfelelő, a reziduumok szűk tartományban helyezkednek el. A Q-Q ábrán az $y=x$ egyenestől jelentősen eltérő pont nincs, a pontok elhelyezkedésében tendencia nem látható. A standardizált reziduum-hatóerő ábrán torzító pont nincs.

Összefüggés van a kohézió és a relatív rugalmasság között is (81. ábra), bár ez a kapcsolat az előzőekhez viszonyítva lényegesen gyengébb ($R^2=0,6602$).



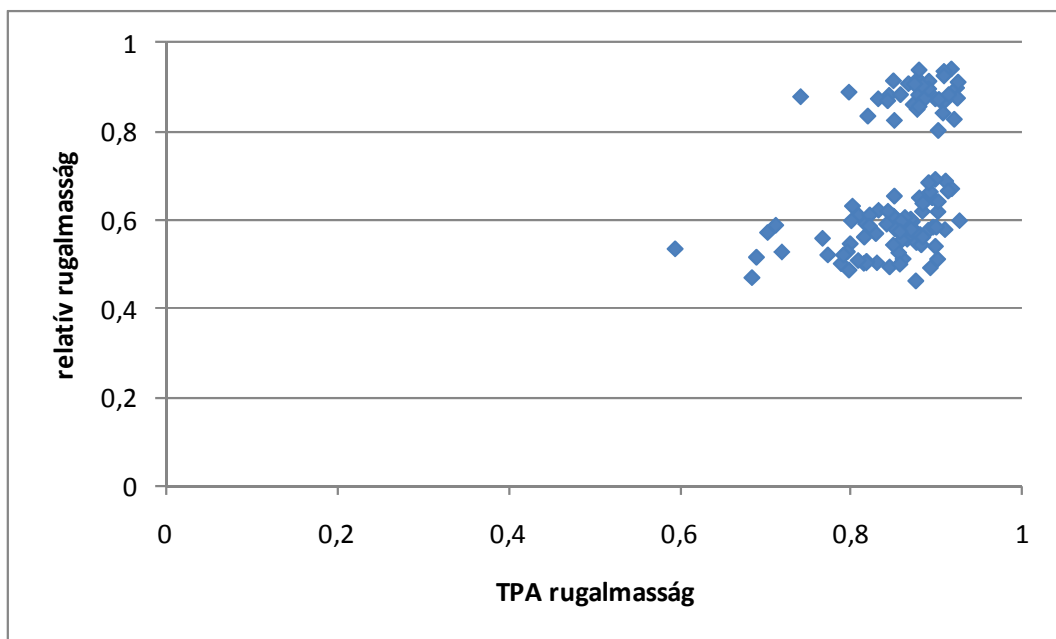
81. ábra: A relatív rugalmasság és a kohézió értékek összefüggése



82. ábra: Három kenyértípusnál a kohézió és a kidolgozott módszerrel számított relatív rugalmasság értékekre illesztett modell diagnosztikus ábrái: a) reziduum-becsült érték ábra, b) QQ-ábra, c) szórás-becsült érték ábra és d) standardizált reziduum-hatóerő ábra

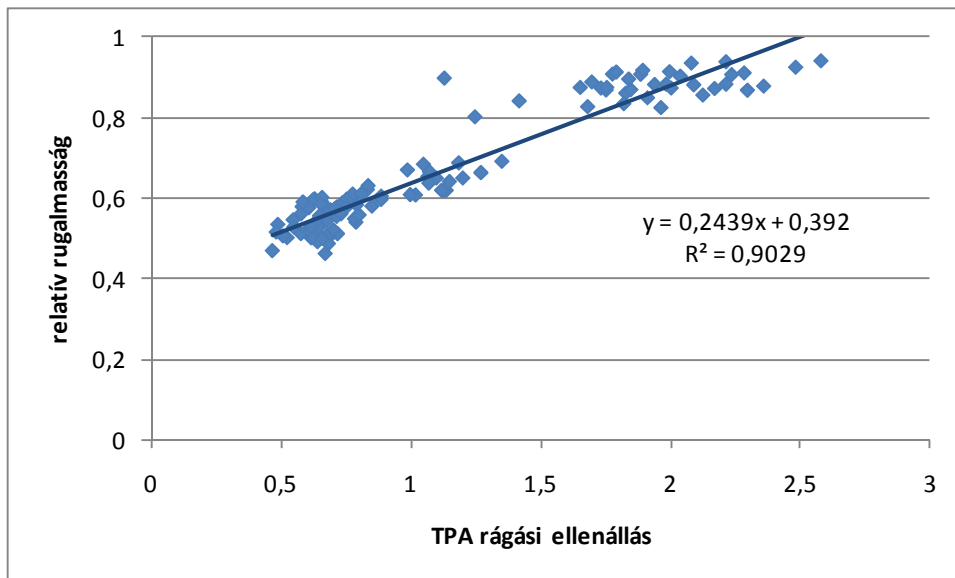
A diagnosztikus ábrák alapján (82. ábra) az illesztés megfelelő, a reziduumok szűk tartományban helyezkednek el. A Q-Q ábrán az $y=x$ egyenestől jelentősen eltérő pont nincs, a pontok elhelyezkedésében tendencia nem látható. A standardizált reziduum-határerő ábrán torzító pont nincs.

A relatív rugalmasság és a TPA módszerrel kapott rugalmasság értékek között nem találtunk összefüggést (83. ábra). A Texture Profile Analysis esetén a rugalmasság a terhelés kezdetétől az első csúcsteléréséig eltelt idő és a második terhelés kezdetétől a második csúcsteléréséhez tartozó idő arányából adódik, ezzel szemben a relatív rugalmasság a rugalmas és a teljes deformáció hányadosa. A TPA rugalmassága ugyan az érzékszervi minősítés során rugalmasságnak nevezett paraméterrel szoros összefüggést mutat, a fizikában használatos rugalmassággal nem azonos.



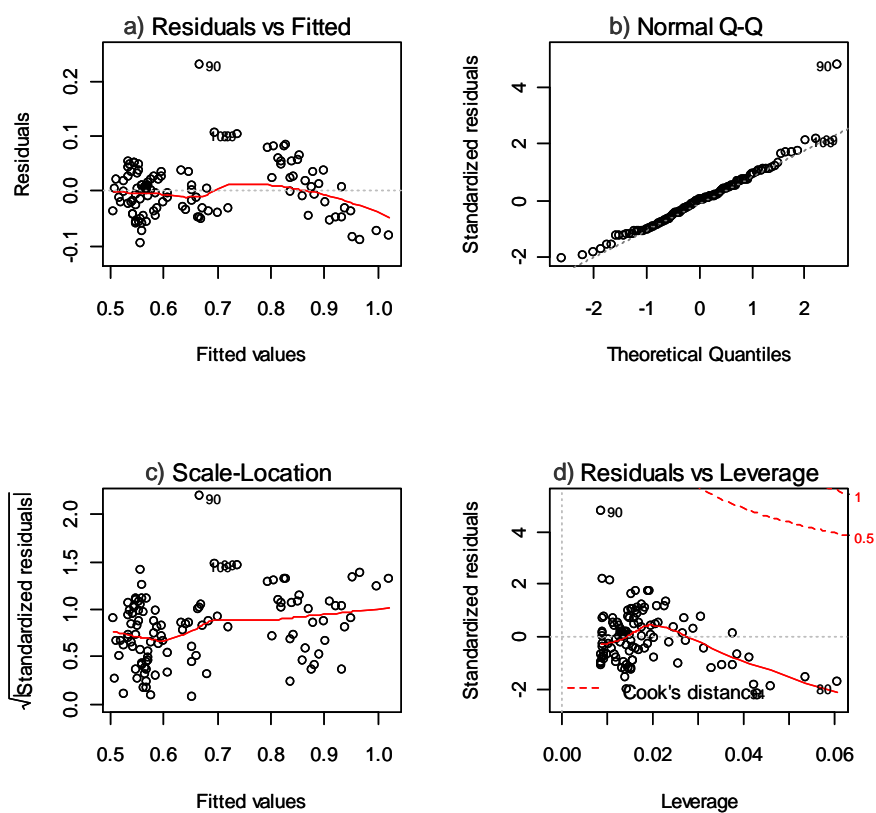
83. ábra: A relatív rugalmasság és a TPA rugalmasság összefüggése

A 84. ábrán a rágási ellenállás és a relatív rugalmasság összefüggését láthatjuk. Az illesztett lineáris modellhez tartozó determinációs együttható értéke 0,9029, ami szoros kapcsolatra utal.



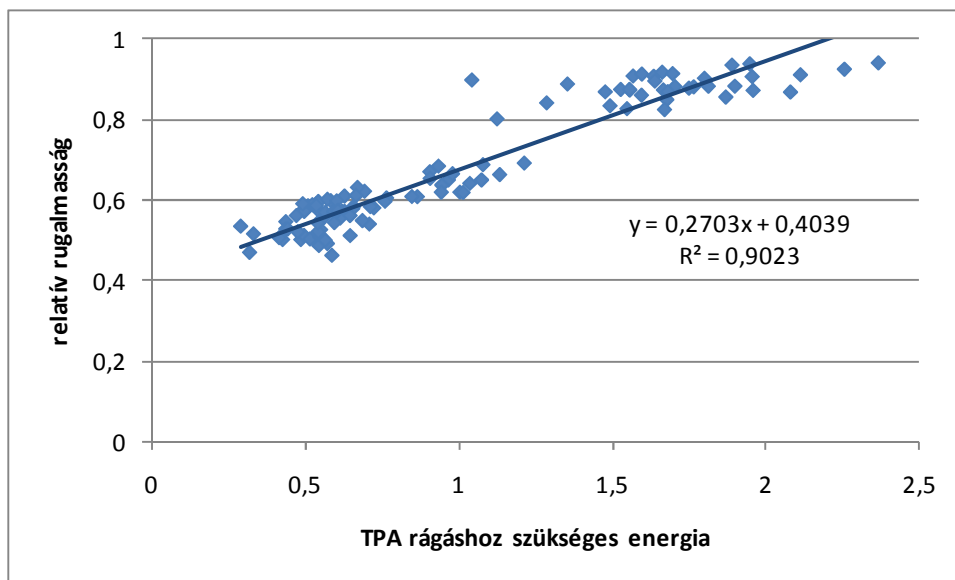
84. ábra: A relatív rugalmasság és rágási ellenállás értékek összefüggése

A diagnosztikus ábrák alapján is elfogadható az illesztett modell (85. ábra). Annak ellenére, hogy a 90. mérési pont minden esetben távol esik a többitől, a standardizált reziduum-hatóerő ábrán nem jelenik meg torzító pontként. A viszonylag nagy ismétlésszám miatt a modell kellően robusztus, egyetlen pont nem gyakorol lényeges hatást a végeredményre.

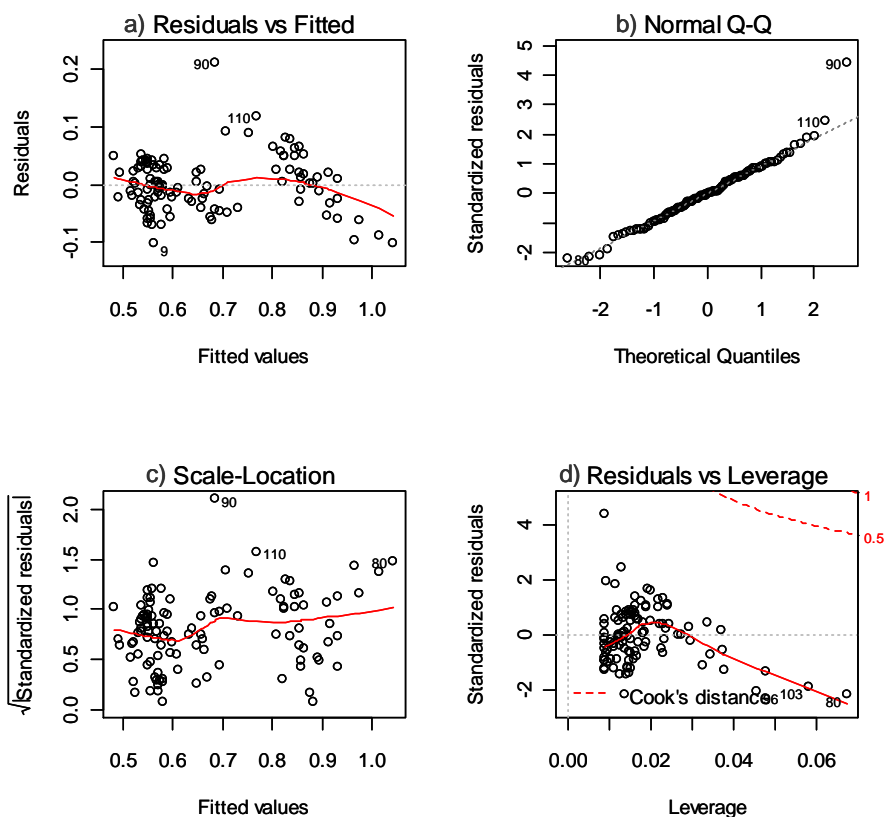


85. ábra: Három kenyértípusnál a rágási ellenállás és a kidolgozott módszerrel számított relatív rugalmasság értékekre illesztett modell diagnosztikus ábrái: a) reziduum-becsült érték ábra, b) QQ-ábra, c) szórás-becsült érték ábra és d) standardizált reziduum-hatóerő ábra

A rágási ellenálláshoz hasonlóan a relatív rugalmasság a rágáshoz szükséges energiával is szoros kapcsolatban áll (86. ábra). Bár néhány pont az illesztett egyenestől távol esik, a determinációs együttható értéke így is 0,9023.



86. ábra: A relatív rugalmasság és a rágáshoz szükséges energia értékének összefüggése



87. ábra: Három kenyértípusnál a rágáshoz szükséges energia és a kidolgozott módszerrel számított relatív rugalmasság értékekre illesztett modell diagnosztikus ábrái: a) reziduumbecsült érték ábra, b) QQ-ábra, c) szórás-becsült érték ábra és d) standardizált reziduumbecült érték ábra

A diagnosztikus ábrák alapján (87. ábra) a 90. mérési pont itt is kiugró értéknek tűnik, a standardizált reziduum-hatóerő ábrán azonban nem jelenik meg torzító pontként. A többi ábra is megerősíti, hogy a néhány kiugró érték ellenére az illesztés jól leírja a paraméterek között fennálló kapcsolatot.

A 23. táblázatban a kidolgozott módszer további jellemzői és a TPA-val kapott jellemzők közötti kapcsolatot foglaltam össze.

A rugalmas deformáció a TPA módszer egyetlen értékével sem mutat összefüggést. Ugyanez igaz a TPA rugalmasság és a kidolgozott módszer értékeinek viszonyára is.

A teljes deformáció szoros kapcsolatban áll a keménységgel. Ez nem meglepő, hiszen a két mennyiség nagyjából ugyanazt a tulajdonságot írja le. Gyenge az összefüggés a kohézióval, a rágási ellenállás és a rágáshoz szükséges energia esetén azonban már elfogadhatóan erős kapcsolat mutatkozik.

A plasztikus deformáció és a keménység, a rágási ellenállás és a rágáshoz szükséges energia közti kapcsolat szoros, a kohézió azonban kevésbé függ össze a plasztikus deformációval.

23. táblázat: Az elasztigráf elvű mérés és a TPA módszer eredményei közti kapcsolat jellemzői (D: teljes deformáció, P: plasztikus deformáció, R: rugalmas deformáció, R/D: relatív rugalmasság)

jellemző	keménység		kohézió		rugalmasság	
	kapcsolat	R ²	kapcsolat	R ²	kapcsolat	R ²
D	negatív exponenciális	0,8452	pozitív exponenciális	0,6787	nincs kapcsolat	0,0679
P	negatív exponenciális	0,9304	pozitív exponenciális	0,7012	nincs kapcsolat	0,12
R	nincs kapcsolat	0,0237	nincs kapcsolat	0,0011	nincs kapcsolat	0,0967
R/D	pozitív lineáris	0,924	negatív lineáris	0,6602	nincs kapcsolat	0,1708
jellemző	rágási ellenállás		rágáshoz szükséges energia			
	kapcsolat	R ²	kapcsolat	R ²		
D	negatív exponenciális	0,7906	negatív exponenciális	0,7794		
P	negatív exponenciális	0,9013	negatív exponenciális	0,8979		
R	nincs kapcsolat	0,0354	nincs kapcsolat	0,0403		
R/D	pozitív lineáris	0,9029	pozitív lineáris	0,9023		

Mint láttuk, a tartós terhelésen alapuló módszer eredményei és a két egymást követő terheléssel dolgozó módszer eredményei között is van kapcsolat. Az új eljárás értékelése egyszerűbb, könnyebben értelmezhető, tehát a TPA-nak jó alternatívája lehet, bár a méréshez szükséges idő valamivel hosszabb.

6. JAVASLATOK TOVÁBBI TUDOMÁNYOS MUNKÁRA ÉS A GYAKORLAT SZÁMÁRA

A téma folytatására az alábbi területeken látok lehetőséget:

- A különböző bélszerkezetű kenyerek nagy ismétlésszámú vizsgálatával az egyes kenyértípusok paramétereire a jellemző értéktartomány meghatározása. Ezzel az Elasztigráfnál kidolgozotthoz hasonló táblázat hozható létre, amely a késztermék minősítéséhez nyújtana segítséget.
- Az új módszerrel végzett nagy számú kísérlet alapján táblázat vagy útmutatás kidolgozása a technológiai hibák feltárására az ezeket jellemző értéktartományok meghatározásával.
- Érzékszervi minősítés eredményeinek összehasonlítása a kidolgozott mérési módszer deformáció-értékeivel és a relatív rugalmassággal, kapcsolatkeresés a szubjektív és az objektív jellemzők között.
- A meghatározott jellemzők értékét erősen befolyásolja a bélzet szerkezete, ezért célszerű lenne ezek porozitással való összefüggésének alaposabb vizsgálata. A porozitás számítógépes látórendszerrel történő meghatározása sok lehetőséget rejt magában.
- A módszer látórendszerrel történő együttes alkalmazása a kenyérbélzet állományának komplex leírását tenné lehetővé, így kidolgozható lenne egy olyan minősítési eljárás, melynek alkalmazása nemcsak a minőségbiztosításban hanem a termékfejlesztésben is érdeklődésre tarthat számot.

7. ÖSSZEFOGLALÁS

A kenyér a régi időktől fogva alapvető élelmiszernek számít, napjainkban sincs ez másként. A fogyasztóknak egyéni véleményük van arról, milyen is a jó kenyér. Egyre többen helyeznek nagy hangsúlyt az egészséges táplálkozásra, sokan pedig speciális étrend betartására kényszerülnek. A sütőipar a változó igényeket széles termékkálával igyekszik kielégíteni, a megfelelő minőség biztosítása azonban lényeges szempont. A kenyér minőségét a bélzettulajdonságok befolyásolják a legnagyobb mértékben, a kenyér állományának vizsgálata ezért rendkívül fontos feladat. A Magyar Élelmiszerkönyv a bélzet reológiai tulajdonságát jellemző relatív rugalmasság minimális értékét legalább 0,8-nek határozza meg. A bélzet rugalmasságának meghatározására a szabvány az Elasztigráf alkalmazását írja elő. Ez a berendezés azonban már nem alkalmas a mai laza bélszerkezetű kenyerek mérésére, mert relatív rugalmasságuk értéke kívül esik annak méréstartományán.

Munkám célja egyszerű és megbízható mérési módszer kidolgozása kenyérbélzet minőségi jellemzőinek meghatározására. Ehhez az Elasztigráf mérési elvét vettem alapul, a méréseket nagy pontosságú, sorozatgyártású állománymérővel valósítottam meg. Feladatomból volt a megfelelő mérőfej, terhelőerő és terhelési idő meghatározása. Vizsgáltam a kompressziós sebesség valamint a bélzetkorongon és kenyérszeleten végzett vizsgálat eredményekre gyakorolt hatását is.

A kidolgozott új mérési módszer során 0,2 mm/s eltolási sebességgel 35 mm átmérőjű nyomófej alkalmazásával a mintát 60 másodpercig 5 N erővel terheljük, majd 60 másodpercig figyeljük a visszaalakulását. A felvett idő-deformáció diagramról leolvasható a teljes és a plasztikus deformáció valamint meghatározható a rugalmas deformáció és a relatív rugalmasság értéke.

A 0,2 és 1, 7 mm/s penetrációs sebességgel végzett vizsgálatok eredményei alapján megállapítható, hogy ennél a két sebességértéknél a mérőfej mozgási sebességének nincs szignifikáns hatása a mért jellemzők értékeire. A kvázistatikus mérésnél azonban az eredmények variációs koefficiense kisebb, így további méréseinknél ezt a sebességet alkalmaztam

Az új módszerrel a 35 mm átmérőjű, 15 mm magas korongon és a 15 mm vastag teljes kenyérszeleten végzett mérések között szignifikáns különbség van, ami a minta és a mérőfej eltérő viszonyából, a mérés során fellépő eltérő erőhatásokból ered. A mérés során felvett idő-deformáció diagramról közvetlenül leolvasható teljes és plasztikus deformáció értékei között szoros kapcsolat van. Ugyanez igaz a relatív rugalmasság értékeire is, tehát a kétféle mintaelőkészítési és mérési módszerrel meghatározott paraméterek megfeleltethetők egymásnak. A rugalmas alakváltozás értékei közötti hiányzó vagy gyenge kapcsolat a kapott eredményeket érdemben nem befolyásolja. Ezek alapján a vizsgálatok egész kenyérszeleten is elvégezhetőek, kísérleteimben a továbbiakban ennek megfelelően jártam el.

A kidolgozott módszer alkalmazhatóságát hatféle kenyéren vizsgáltam. Az eredmények alapján a módszer alkalmas az eltérő típusú kenyerek relatív rugalmasságának mérésére, amely alapján az egyes kenyértípusok elkülöníthetőek.

Sikerült olyan új mérési módszert kidolgozni, amely az elasztográfus mérési módszer alapelveinek megtartása mellett alkalmazható a mai kenyerek vizsgálatára. Mérési módszerünk azonban akkor tekinthető a jónak, ha eredménye összehasonlítható a nemzetközi viszonylatban használt és általánosan elfogadott vizsgálatok eredményeivel. Az általam kidolgozott eljárást az AIB szabvánnyal és a TPA vizsgálattal hasonlítottam össze. Az eredmények alapján szoros összefüggést találtam az új mérési módszerrel nyert eredmények és a nemzetközi gyakorlatban elfogadott és alkalmazott American Institute of Baking szabvány alkalmazásával valamint Texture Profile Analysis-szel kapott eredmények között, ami alátámasztja az új módszer megbízhatóságát és alkalmazhatóságát.

8. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. Új mérési és értékelési módszert dolgoztam ki különböző porozitású kenyértípusok állománymérésére, melynek során 0,2 mm/s előtolási sebességgel 35 mm átmérőjű nyomófej alkalmazásával a mintát 60 másodpercig 5 N erővel terheljük majd 60 másodpercig mérjük a visszaalakulását. A felvett deformáció-idő diagramról leolvasható a teljes és a plasztikus deformáció, valamint meghatározható a rugalmas deformáció és a relatív rugalmasság értéke.
2. Az új módszerrel 0,2 és 1, 7 mm/s penetrációs sebességgel végzett vizsgálatok eredményeiből megállapítottam, hogy ennél a két sebességértéknél a mérőfej mozgási sebességének nincs szignifikáns hatása a teljes, a plasztikus és a rugalmas deformáció, valamint a relatív rugalmasság értékére. A 0,2 mm/s sebességgel végzett kvázistatikus mérésnél azonban az eredmények variációs koefficiense paramétertől függően 2-20% közötti, tehát kisebb mint 1,7 mm/s-nál, ahol 5-60% közötti. Így az előbbi sebességet alkalmasabbnak találtam az inhomogén kenyérbélzet további vizsgálatára.
3. Az új módszerrel a 35 mm átmérőjű, 15 mm magas korongon és a 15 mm vastag teljes kenyérszeleten végzett mérések esetén a teljes, a plasztikus és a rugalmas deformáció, valamint a relatív rugalmasság értékei között szignifikáns különbség van. Ez a minta és a mérőfej eltérő méretviszonyából, valamint a mérés során fellépő eltérő erőhatásokból ered. Bizonyítottam, hogy a korongon és szeleten mért fent említett jellemzők között szoros összefüggés van (az R^2 értéke 0,8-0,96 közötti), így a kenyérszeleten végzett mérések megfelelő eredményt adnak.
4. Az új módszer alkalmazásával az Elasztigráf 1000 elasztigráf egységes méréshatára kiterjeszhető, az eredmények dimenziója elasztigráf egység helyett milliméter, ami a megszokott kenyértípusokhoz megfelelőbb, ezáltal a deformáció értékei könnyebben értelmezhetők.
5. Szoros összefüggést ($R^2=0,8-0,92$) találtam az új mérési módszerrel nyert teljes és plasztikus deformáció valamint a relatív rugalmasság és a nemzetközi gyakorlatban elfogadott és alkalmazott American Institute of Baking szabvány alkalmazásával kapott keménység értékek között.
6. Szoros összefüggést (R^2 értéke 0,66 és 0,92 közötti) találtam az új mérési módszerrel nyert teljes és plasztikus deformáció, valamint a relatív rugalmasság és a nemzetközi gyakorlatban elfogadott és alkalmazott Texture Profile Analysis-szel kapott keménység, kohézió, rágási ellenállás és rágáshoz szükséges energia értékei között, ami alátámasztja az új módszer megbízhatóságát és alkalmazhatóságát.

9. IRODALOMJEGYZÉK

1. AIB (2001). AIB Standard Procedure White Pan Bread Firmness Measurement, AIB Standard Procedures for Texture Measurement of Baked Products, website elérhető: <https://www.aibonline.org/researchandtechnical/services/prodqualityeval/AIBTextureAnalysis%20Procedures.pdf>
2. Baik, M.-Y., & Chinachoti, P. (2000). Moisture redistribution and phase transitions during bread staling. *Cereal Chemistry*, 77, 484–488.
3. Bhattacharya, M., Sofia, V, E-C., Douglas, C. D., McMullen, M. C., (2002). Staling of bread as affected by waxy wheat flour blends. *Cereal Chemistry* 79, 178-192.
4. Bloksma, A. H. (1981). Effect of surface tension in the gas-dough interface on the rheological behavior of dough. *Cereal Chemistry*, 58, 481–486.
5. Bourne, M.C. (1990). Basic Principles of Food Texture Measurement. In *Dough Rheology and Baked Product Texture*. Eds Faridi, H. and Faubion, J.M.. pp.331-341, Van Nostrand Reinhold, Graz, 1990
6. Bourne, M.C. (2002). *Food Texture and Viscosity: Concept and Measurement*, Academic Press, San Diego 2002
7. Brady, P. L., Mayer, S. M. (1985). Correlations of Sensory and Instrumental Measures of Bread Texture *Cereal Chemistry*, 62, 70-72.
8. Campbell, G. M., & Mougeot, E. (1999). Creation and characterisation of aerated food products. *Trends in Food Science & Technology*, 10, 283–296.
9. Chen, P., Whitney, L. F., & Peleg, M. (1994). Some tensile characteristics of bread crumb. *Journal of Texture Studies*, 25, 299–310.
10. Csepregi, Gy. (2003). A haza ízei: a kenyérről. *Nemzetőr*, II. évfolyam. 34. szám.
11. Demirkesen, I., Mert, B., Sumnu, G., Sahina, S. (2010). Rheological properties of gluten-free bread formulations *Journal of Food Engineering*, Volume 96, Issue 2, January 2010, Pages 295-303
12. Dreese, P. C., Faubion, J. M. and Hosney, R. C. (1988) Dynamic Rheological Properties of Flour, Gluten, and Gluten-Starch Doughs. I. Temperature- Dependent Changes During Heating. *Cereal Chemistry* 65, 348-353
13. Gámbaro, A., Fiszman, S., Giménez, A., Varela, P., Salvador, A. (2004) Consumer Acceptability Compared with Sensory and Instrumental Measures of White Pan Bread: Sensory Shelf-life Estimation by Survival Analysis. *Journal of Food Science*, 69 (9), 401–405
14. Gandikota, S. and MacRitchie, F. (2005) Expansion capacity of doughs: methodology and applications, *Journal of Cereal Science* 42, pp. 157–163.

15. Garimella Purna, S.K., Miller, R.A., Seib, P.A., Graybosch, R.A., Shi, Y.-C. (2011) Volume, texture, and molecular mechanism behind the collapse of bread made with different levels of hard waxy wheat flours. *Journal of Cereal Science* (2011), doi: 10.1016/j.jcs.2011.02.008
16. Gasztonyi K., Bogdáné. 1985. *Élelmiszerek kolloidikája és reológiája*. Kertészeti Egyetem Tartósítói Kar, Budapest.
17. Goh, S. M., Charalambides, M. N., & Williams, J. G. (2000). Fracture mechanics of food products. In P. Fischer, I. Marti, & E. J. Windhab (Eds.), *Proceedings of the 2nd international symposium on food rheology and structure* (pp. 259–263). Zürich: Laboratory of Food Process Engineering, ETH.
18. Graybosch, R. A. (1998). Waxy wheats: Origin, properties, and prospects. *Trends in Food Science & Technology*, Volume 9, Issue 4, April 1998, Pages 135-142
19. Hallberg, L. M., & Chinachoti, P. (1992). Dynamic mechanical analysis for glass transitions in long shelf-life bread. *Journal of Food Science*, 57, 1201–1229.
20. Harinder, K. and Bains, G. S. (1990) High Alpha-Amylase Flours: Effect of pH, Acid, and Salt on the Rheological Properties of Dough. *Cereal Chemistry* 67, 588-594
21. Hibberd, G. E., & Parker, N. S. (1985). Measurements of the compression properties of bread crumb. *Journal of Texture Studies*, 16, 97–110.
22. Hoseney, R. C., Hsu, K. S and Junge, R. C. (1979) A Simple Spread Test to Measure the Rheological Properties of Fermenting Dough. *Cereal Chemistry* 56, 141 - 143
23. Hug-Iten, S., Handschin, S., Conde-Petit, B., & Escher, F. (1999). Changes in starch microstructure on baking and staling of wheat bread. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, 32, 255–260.
24. Hung, P. V., Maeda, T., Morita, N., (2007a). Dough and bread qualities of flours with whole waxy wheat flour substitution. *Food Research International* 40, 273-279.
25. Hüttner, E.K., Dal Bello F., Arendt, E.K. (2010). Rheological properties and bread making performance of commercial wholegrain oat flours, *Journal of Cereal Science* Volume 52, Issue 1, July 2010, Pages 65-71
26. Junge, R. C. and Hoseney, R. C. (1981) A Mechanism by Which Shortening and Certain Surfactants Improve Loaf Volume in Bread. *Cereal Chemistry* 58, 408 - 412.
27. Keetels, C. J. A. M., van Vliet, T., & Walstra, P. (1996a). Relationship between the sponge structure of starch bread and its mechanical properties. *Journal of Cereal Science*, 24, 27–31
28. Keetels, C. J. A. M., Visser, K. A., van Vliet, T., Jurgens, A., & Walstra, P. (1996b). Structure and mechanics of starch bread. *Journal of Cereal Science*, 24, 15–26
29. Kokelaar, J. J., & Prins, A. (1995). Surface rheological properties of bread dough components in relation to gas bubble stability. *Journal of Cereal Science*, 22, 53–61.

30. László P., Zana J. (1990). *Élelmiszerfizika I. Kertészeti és Élelmiszeripari Egyetem Élelmiszeripari Kar, Budapest.*
31. Lásztity, R. (1980). Rheological studies on bread at the Technical University of Budapest. *Journal of Texture Studies*, 11, 81–115
32. Lee, M.-L., Swanson, B. G., Baik, B.-K., (2001). Influence of amylose content on properties of wheat starch and breadmaking quality of starch and gluten blends. *Cereal Chemistry* 78, 701-706.
33. Liu, Z., Chuah, C. S. L. and Scanlon, M. G. (2003). Compressive elastic modulus and its relationship to the structure of a hydrated starch foam, *Acta Materialia*, 51: 365–371. p
34. Liu, Z., Scanlon, M.G (2003) Predicting Mechanical Properties of Bread Crumb a, *Food and Bioproducts Processing*, Volume 81, Issue 3, September 2003, Pages 224-238
35. Macsihin, J. U. A., Macsihin, Sz. A. 1987. *Élelmiszeripari termékek reológiája. Mezőgazdasági Kiadó, Budapest.*
36. Magyar Szabvány 20501/3-82 A kenyér bélzetporozitásának meghatározása
37. Mondal, A., Datta, A.K. (2008). Bread baking - A review. *Journal of Food Engineering* 86, 465-474
38. Moore, W. R. and Hosney, R. C. (1986) The Effects of Flour Lipids on the Expansion Rate and Volume of Bread Baked in a Resistance Oven. *Cereal Chemistry* 63,172-174
39. Morita, N., Maeda, T., Miyazaki, M., Yamamori, M., Mura, H., Ohtsuka, I., (2002). Dough and baking properties of high-amylose and waxy wheat flours. *Cereal Chemistry* 79, 491-495
40. Nussinovitch, A., Roy, I., & Peleg, M. (1990). Testing bread slices in tension mode. *Cereal Chemistry* , 67, 101–103.
41. Nussinovitch, A., Steffens, M. S., & Chinachoti, P. (1992). Elastic properties of bread crumb. *Cereal Chemistry* , 69, 678–681.
42. Park, C. S., Baik, B. K., (2007). Characteristics of fresh bread baked from wheat flours of reduced starch amylose content. *Cereal Chemistry* 84, 437-442
43. Persaud, J. N., Faubion, J. M., & Ponte, J. G. Jr. (1990). Dynamic rheological properties of bread crumb. I. Effects of storage time, temperature, and position in the loaf. *Cereal Chemistry* , 67, 92–96.
44. Piazza, L., & Masi, P. (1995). Moisture redistribution throughout the bread loaf during staling and its effect on mechanical properties. *Cereal Chemistry* , 72, 320–325.
45. Rizzello, C.G., Nionelli, L., Coda, R., Di Cagno, R., Gobbetti, M. (2010). Use of sourdough fermented wheat germ for enhancing the nutritional, texture and sensory characteristics of the white bread. *European Food Research and Technology* 230, 645–654

46. Rosenthal, A.J. (1999) Relation between Instrumental and Sensory Measures of Food Texture in Food Texture : Measurement and Perception, Ed. Andrew J. Rosenthal, pp1-18, Aspen Publishers Inc, Gaithersburg, Maryland, 1999
47. Scanlon, M. G., Fahloul, D., & Sapirstein, H. D. (1997). A measure of fracture toughness of bread crumb. *Cereal Chemistry* , 74, 612–613.
48. Scanlon, M. G., Sapirstein, H. D., & Fahloul, D. (2000). Mechanical properties of bread crumb prepared from flours of different dough strength. *Journal of Cereal Science* , 32, 235–243
49. Shah, P., Campbell, G. M., McKee, S. L., & Rielly, C. D. (1998). Proving of bread dough: modelling the growth of individual bubbles. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers, Part C*,76, 73–79
50. Sitkei Gy. (1981). A mezőgazdasági anyagok mechanikája. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1981
51. Stokes, D.J., Donald, A.M., 2000. In situ mechanical testing of dry and hydrated bread crumb in the environmental scanning electron microscope (ESEM). *Journal of Material Science* 35, 599–607.
52. Szalai, L. (2001). A sütőipar technológiája. Elektronikus jegyzet (CD), Szent István Egyetem, Élelmiszertudományi Kar, Gabona és Iparinövénytechnológiai Tanszék
53. Szalai, L. (2003) Búcsú az Elasztigráftól. *Sütőiparosok, Pékek*, L. évfolyam 3. szám, 19-22.
54. Tanaka, K., Furukawa, K. and Matsumoto, H. (1967) The Effect of Acid and Salt on the Farinogram and Extensigram of Dough. *Cereal Chemistry*, 44, 675-680
55. Torbica, A., Hadnađev, M., Dapčevića, T. (2010). Rheological, textural and sensory properties of gluten-free bread formulations based on rice and buckwheat flour. *Food Hydrocolloids*, Volume 24, Issues 6-7, August-October 2010, Pages 626-632
56. Torquato, S. (2000). Modeling of physical properties of composite materials. *International Journal of Solids and Structures*, 37, 411–422.
57. Vitális Dezsőné, 1993. Sütőipari műveletek és technológia I. Agrárszakoktatási Intézet, Budapest.
58. Weegels, P. L., Hamer, R. J., & Schofield, J. D. (1996). Critical review. Functional properties of wheat glutenin. *Journal of Cereal Science* , 23, 1–18.
59. Xie, F., Dowell, F.E. and Sun, X. S. (2003). Comparison of Near-Infrared Reflectance Spectroscopy and Texture Analyzer for Measuring Wheat Bread Changes in Storage, *Cereal Chemistry*, 80 (1), 25-29
60. Yi, L., Kerr, W. L., Johnson, J. W., (2009). Effects of waxy wheat flour and water on frozen dough and bread properties. *Journal of Food Science* 74, 278-284.

61. Zeleznak, K. J. and Hosney, R. C. (1986). The Role of Water in the Retrogradation of Wheat Starch Gels and Bread Crumb. *Cereal Chemistry*. 63(5):407-411 '
62. Zghal, M. C., Scanlon, M. G., & Sapirstein, H. D. (1999). Prediction of bread crumb density by digital image analysis. *Cereal Chemistry*, 76, 734–742.
63. Zghal, M. C., Scanlon, M. G., & Sapirstein, H. D. (2001). Effects of flour strength, baking absorption, and processing conditions on the structure and mechanical properties of bread crumb. *Cereal Chemistry*, 78, 1–7
64. Zhang, L. Lucas, T., Doursat, C., Flick, D., Wagner, M., (2007). Effects of crust constraints on bread expansion and CO₂ release. *Journal of Food Engineering* 80 (4), 1302-1311

10. MELLÉKLET

24. táblázat: A Tukey-próba eredménye hat különböző kenyértípus teljes deformációjára.

Multiple Comparisons

Dependent Variable: teljes deformáció

Tukey HSD

(I) típus	(J) típus	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
burgonyás	házi	-4,38889*	,17543	,000	-4,8960	-3,8818
	rozs	3,95035*	,17951	,000	3,4315	4,4692
	barna	3,67391*	,19310	,000	3,1158	4,2321
	fehér	-4,14688*	,18448	,000	-4,6801	-3,6137
	rozsos	-1,14129*	,19310	,000	-1,6994	-,5831
házi	burgonyás	4,38889*	,17543	,000	3,8818	4,8960
	rozs	8,33924*	,16580	,000	7,8600	8,8185
	barna	8,06280*	,18042	,000	7,5413	8,5843
	fehér	,24201	,17117	,719	-,2527	,7368
	rozsos	3,24760*	,18042	,000	2,7261	3,7691
rozs	burgonyás	-3,95035*	,17951	,000	-4,4692	-3,4315
	házi	-8,33924*	,16580	,000	-8,8185	-7,8600
	barna	-,27644	,18439	,665	-,8094	,2565
	fehér	-8,09724*	,17534	,000	-8,6041	-7,5904
	rozsos	-5,09164*	,18439	,000	-5,6246	-4,5587
barna	burgonyás	-3,67391*	,19310	,000	-4,2321	-3,1158
	házi	-8,06280*	,18042	,000	-8,5843	-7,5413
	rozs	,27644	,18439	,665	-,2565	,8094
	fehér	-7,82079*	,18923	,000	-8,3678	-7,2738
	rozsos	-4,81520*	,19764	,000	-5,3865	-4,2439
fehér	burgonyás	4,14688*	,18448	,000	3,6137	4,6801
	házi	-,24201	,17117	,719	-,7368	,2527
	rozs	8,09724*	,17534	,000	7,5904	8,6041
	barna	7,82079*	,18923	,000	7,2738	8,3678
	rozsos	3,00559*	,18923	,000	2,4586	3,5526
rozsos	burgonyás	1,14129*	,19310	,000	,5831	1,6994
	házi	-3,24760*	,18042	,000	-3,7691	-2,7261
	rozs	5,09164*	,18439	,000	4,5587	5,6246
	barna	4,81520*	,19764	,000	4,2439	5,3865
	fehér	-3,00559*	,18923	,000	-3,5526	-2,4586

*. The mean difference is significant at the .05 level.

25. táblázat: A Tukey-próba eredménye hat különböző kenyértípus plasztikus deformációjára

Multiple Comparisons

Dependent Variable: plasztikus deformáció

Tukey HSD

(I) típus	(J) típus	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
burgonyás	házi	-,58694*	,04104	,000	-,7056	-,4683
	rozs	,55572*	,04199	,000	,4343	,6771
	barna	,62424*	,04517	,000	,4937	,7548
	fehér	-,04641	,04315	,890	-,1711	,0783
	rozsos	,52934*	,04517	,000	,3988	,6599
házi	burgonyás	,58694*	,04104	,000	,4683	,7056
	rozs	1,14266*	,03878	,000	1,0306	1,2548
	barna	1,21118*	,04220	,000	1,0892	1,3332
	fehér	,54053*	,04004	,000	,4248	,6563
	rozsos	1,11628*	,04220	,000	,9943	1,2383
rozs	burgonyás	-,55572*	,04199	,000	-,6771	-,4343
	házi	-1,14266*	,03878	,000	-1,2548	-1,0306
	barna	,06852	,04313	,607	-,0562	,1932
	fehér	-,60213*	,04102	,000	-,7207	-,4836
	rozsos	-,02638	,04313	,990	-,1511	,0983
barna	burgonyás	-,62424*	,04517	,000	-,7548	-,4937
	házi	-1,21118*	,04220	,000	-1,3332	-1,0892
	rozs	-,06852	,04313	,607	-,1932	,0562
	fehér	-,67065*	,04426	,000	-,7986	-,5427
	rozsos	-,09490	,04623	,319	-,2285	,0387
fehér	burgonyás	,04641	,04315	,890	-,0783	,1711
	házi	-,54053*	,04004	,000	-,6563	-,4248
	rozs	,60213*	,04102	,000	,4836	,7207
	barna	,67065*	,04426	,000	,5427	,7986
	rozsos	,57575*	,04426	,000	,4478	,7037
rozsos	burgonyás	-,52934*	,04517	,000	-,6599	-,3988
	házi	-1,11628*	,04220	,000	-1,2383	-,9943
	rozs	,02638	,04313	,990	-,0983	,1511
	barna	,09490	,04623	,319	-,0387	,2285
	fehér	-,57575*	,04426	,000	-,7037	-,4478

*. The mean difference is significant at the .05 level.

26. táblázat: A Tukey-próba eredménye hat különböző kenyértípus rugalmas deformációjára

Multiple Comparisons

Dependent Variable: rugalmas deformáció

Tukey HSD

(I) típus	(J) típus	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
burgonyás	házi	-3,80195*	,15135	,000	-4,2394	-3,3645
	rozs	3,39463*	,15486	,000	2,9470	3,8423
	barna	3,04967*	,16659	,000	2,5682	3,5312
	fehér	-4,10047*	,15915	,000	-4,5605	-3,6405
	rozsos	-1,67063*	,16659	,000	-2,1521	-1,1891
házi	burgonyás	3,80195*	,15135	,000	3,3645	4,2394
	rozs	7,19658*	,14303	,000	6,7831	7,6100
	barna	6,85162*	,15565	,000	6,4017	7,3015
	fehér	-,29852	,14766	,336	-,7253	,1283
	rozsos	2,13132*	,15565	,000	1,6814	2,5812
rozs	burgonyás	-3,39463*	,15486	,000	-3,8423	-2,9470
	házi	-7,19658*	,14303	,000	-7,6100	-6,7831
	barna	-,34496	,15907	,259	-,8048	,1148
	fehér	-7,49511*	,15127	,000	-7,9323	-7,0579
	rozsos	-5,06526*	,15907	,000	-5,5251	-4,6055
barna	burgonyás	-3,04967*	,16659	,000	-3,5312	-2,5682
	házi	-6,85162*	,15565	,000	-7,3015	-6,4017
	rozs	,34496	,15907	,259	-,1148	,8048
	fehér	-7,15014*	,16325	,000	-7,6220	-6,6783
	rozsos	-4,72030*	,17051	,000	-5,2131	-4,2275
fehér	burgonyás	4,10047*	,15915	,000	3,6405	4,5605
	házi	,29852	,14766	,336	-,1283	,7253
	rozs	7,49511*	,15127	,000	7,0579	7,9323
	barna	7,15014*	,16325	,000	6,6783	7,6220
	rozsos	2,42984*	,16325	,000	1,9580	2,9017
rozsos	burgonyás	1,67063*	,16659	,000	1,1891	2,1521
	házi	-2,13132*	,15565	,000	-2,5812	-1,6814
	rozs	5,06526*	,15907	,000	4,6055	5,5251
	barna	4,72030*	,17051	,000	4,2275	5,2131
	fehér	-2,42984*	,16325	,000	-2,9017	-1,9580

*. The mean difference is significant at the .05 level.

27. táblázat: A Tukey-próba eredménye hat különböző kenyértípus relatív rugalmasságára

Multiple Comparisons

Dependent Variable: relatív rugalmasság

Tukey HSD

(I) típus	(J) típus	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
burgonyás	házi	-,02001*	,00459	,000	-,0333	-,0068
	rozs	,06503*	,00469	,000	,0515	,0786
	barna	,01650*	,00505	,017	,0019	,0311
	fehér	-,06690*	,00482	,000	-,0808	-,0530
	rozsos	-,09911*	,00505	,000	-,1137	-,0845
házi	burgonyás	,02001*	,00459	,000	,0068	,0333
	rozs	,08504*	,00434	,000	,0725	,0976
	barna	,03651*	,00472	,000	,0229	,0501
	fehér	-,04689*	,00448	,000	-,0598	-,0340
	rozsos	-,07910*	,00472	,000	-,0927	-,0655
rozs	burgonyás	-,06503*	,00469	,000	-,0786	-,0515
	házi	-,08504*	,00434	,000	-,0976	-,0725
	barna	-,04854*	,00482	,000	-,0625	-,0346
	fehér	-,13193*	,00458	,000	-,1452	-,1187
	rozsos	-,16415*	,00482	,000	-,1781	-,1502
barna	burgonyás	-,01650*	,00505	,017	-,0311	-,0019
	házi	-,03651*	,00472	,000	-,0501	-,0229
	rozs	,04854*	,00482	,000	,0346	,0625
	fehér	-,08340*	,00495	,000	-,0977	-,0691
	rozsos	-,11561*	,00517	,000	-,1305	-,1007
fehér	burgonyás	,06690*	,00482	,000	,0530	,0808
	házi	,04689*	,00448	,000	,0340	,0598
	rozs	,13193*	,00458	,000	,1187	,1452
	barna	,08340*	,00495	,000	,0691	,0977
	rozsos	-,03222*	,00495	,000	-,0465	-,0179
rozsos	burgonyás	,09911*	,00505	,000	,0845	,1137
	házi	,07910*	,00472	,000	,0655	,0927
	rozs	,16415*	,00482	,000	,1502	,1781
	barna	,11561*	,00517	,000	,1007	,1305
	fehér	,03222*	,00495	,000	,0179	,0465

*. The mean difference is significant at the .05 level.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönettel tartozom témavezetőimnek Dr. Fekete Andrásnak és Dr. Baranyai Lászlónak, valamint Dr. Felföldi Józsefnek a szakmai segítségért, rendkívül értékes tanácsaiért és türelméért.

Külön köszönöm dr. Szalai Lajosnak gyakorlati segítségét, javaslatait, valamint dr. Zsorné dr. Muha Viktóriának, Kovács Zoltánnak, Csim Györgynek és Szöllősi Dánielnek a támogató, baráti háttérért.

Ezúton is szeretném megköszönni segítőkész kollégáim és tanáraink állandó biztatását, építő jellegű kritikáit, melyek nélkül valószínűleg nem készült volna el dolgozatom.

Végül köszönet illeti családomat a kitartó bátorításért és támogatásért.