



BIOLÓGIAI ANYAGOK SÉRÜLÉSVIZSGÁLATA

DOI: 10.54598/000270

Doktori (PhD) értekezés

Farkas Csaba

Gödöllő
2020

**A doktori iskola
megnevezése:**

Műszaki Tudományi Doktori Iskola

tudományága:

Agrárműszaki Tudományok

vezetője:

Prof. Dr. Farkas István
egyetemi tanár, DSc
Szent István Egyetem, Gépészmérnöki Kar

témavezető:

Prof. Dr. Fenyvesi László
egyetemi tanár, PhD
Szent István Egyetem, Gépészmérnöki Kar
Mechanikai és Géptani Intézet

társ-témavezető:

Dr. Petróczki Károly
egyetemi docens, PhD
Szent István Egyetem, Gépészmérnöki Kar
Folyamatmérnöki Intézet

.....
Az iskolavezető jóváhagyása

.....
A témavezető jóváhagyása

TARTALOMJEGYZÉK

JELÖLÉSJEGYZÉK.....	5
1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK.....	6
1.1. A téma időszerűsége, jelentősége.....	6
1.2. Célkítűzések.....	7
2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS.....	8
2.1. A kertészeti termények mechanikai sérülései.....	8
2.1.1. A terményeket érő sérülések eredete és megjelenési formái.....	8
2.1.2. A sérülések hatásai.....	8
2.1.3. A sérülések és a tönkremenetel jellemzése.....	9
2.1.4. Egyes tényezők hatása a sérülékenységre.....	11
2.2. Termények anyagtulajdonságai.....	14
2.2.1. Anyagmodellek.....	14
2.2.2. Kúszás és relaxáció.....	16
2.2.3. A termények feszültség-deformáció diagramjának egyes paraméterei.....	17
2.2.4. Modellezés a véges- és diszkrét elemes vizsgálatok során.....	18
2.3. Az ismétlődő terhelés.....	19
2.4. A terhelési folyamat energiamutatói.....	20
2.4.1. A mechanikai hiszterézis görbe.....	20
2.4.2. Disszipált energia számítása.....	21
2.5. Termények anyagvizsgálatánál alkalmazott berendezések és módszerek.....	22
2.5.1. Kompressziós vizsgálati módszerek.....	22
2.5.2. Ütközési és ejtési vizsgálatok.....	23
2.5.3. Rázópados vizsgálatok.....	25
2.5.4. A módszerek alkalmazhatósága.....	25
2.6. A szakirodalomi áttekintés összefoglaló értékelése.....	26
3. ANYAG ÉS MÓDSZER.....	28
3.1. A mérésekhez használt eszközök.....	28
3.1.1. A DyMaTest és a mérőrendszer.....	28
3.1.2. A terhelőerő beállítása.....	31
3.2. A termények alakváltozási görbéi.....	33
3.3. Tönkremeneteli idő a töréspont meghatározásával.....	35
3.4. Anyagtulajdonságok meghatározása.....	38
3.4.1. A viszkoelasztikus modell.....	38
3.4.2. Simulink szabályozóköre.....	39
3.5. A terményekben kialakuló energiatranszport.....	42
3.5.1. A termények mechanikai hiszterézis görbéi.....	42
3.5.2. Belső töréspont meghatározása.....	43
3.6. A tönkremeneteli modell paraméterei.....	45
3.6.1. A mérésekkel meghatározott paraméterek összefoglalása.....	45
3.6.2. A tönkremeneteli időtartamok meghatározása.....	45
4. EREDMÉNYEK.....	47
4.1. A külső és belső tönkremeneteli időpontok kiértékelése.....	47
4.1.1. A külső töréspontig eltelt időtartamok.....	47
4.1.2. A belső töréspontig eltelt időtartamok.....	48
4.1.3. Tönkremeneteli időtartamok összehasonlítása.....	51

4.2. A viszkoelasztikus modellparaméterek kiértékelése	55
4.3. Lineáris regressziós tönkremeneteli modellek kidolgozása	58
4.4. Új tudományos eredmények	61
5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK	63
6. ÖSSZEFOGLALÁS	64
7. SUMMARY	65
8. MELLÉKLETEK	66
M1. Irodalomjegyzék	66
M2. Az értekezés témaköréhez kapcsolódó publikációk	73
M3. Mérési adatok	75
<i>M3.1. A termények tönkremeneteli paraméterei</i>	75
<i>M3.2. A termények viszkoelasztikus modellparaméterei</i>	83
<i>M3.3. Mért és számított tönkremeneteli időtartamok kapcsolata</i>	91

JELÖLÉSJEGYZÉK

Alkalmazott jelölések

E	rugalmassági (Young) modulus	$[N\ m^{-2}]$
E_1, E_2	anyagmodell rugalmas elemei	$[N\ m^{-2}]$
E_{sz1}, E_{sz2}	számítógépes modell rugalmas elemei	$[N\ mm^{-1}]$
E_D	disszipált energia	$[N\ mm]$
E_{DR}	disszipált energia arány	$[-]$
E_{DRmax}	disszipált energia arány maximális értéke	$[-]$
E_R	rugalmas alakváltozási energia	$[mJ]$
$E_{\dot{O}}$	teljes alakváltozási munka	$[mJ]$
f_{sD}	a DyMaTest mintavételi frekvenciája	$[Hz]$
f_{sK}	a videós képrögzítés mintavételi frekvenciája	$[Hz]$
F	nyomóterhelés	$[N]$
F_m	periodikus nyomóterhelési függvény	$[N]$
F_{max}	periodikus nyomóterhelés maximális értéke	$[N]$
n_{DRmax}	disszipált energia arány csúcsértékének ciklusszáma	$[-]$
R_{TTF}	külső és belső tönkremeneteli időtartamok aránya	$[-]$
$STTF$	tönkremeneteli idő szórása	$[s]$
SR_{TTF}	tönkremeneteli időtartamok arányára vonatkozó szórás	$[-]$
t	idő	$[s]$
t_{wM}	a terhelés kezdete és a tehermentesítés vége között eltelt idő	$[s]$
T_{RD}	DyMaTest mérés felbontása	$[s]$
T_{RK}	videós képrögzítés felbontása	$[s]$
w	alakváltozás	$[mm]$
w_m	alakváltozási függvény	$[mm]$
w_M	rugalmas alakváltozás	$[mm]$
w_{max}	alakváltozás maximális értéke	$[mm]$
w_R	rugalmas alakváltozás	$[mm]$
w_{sz}	számított alakváltozási függvény	$[mm]$

Görög betűk

δ	fáziseltolás	$[-]$
ε	fajlagos nyúlás	$[-]$
η	viszkózitási tényező	$[Ns\ m^{-2}]$
η_1	anyagmodell viszkózus eleme	$[Ns\ m^{-2}]$
η_{sz1}	számítógépes modell viszkózus eleme	$[Ns\ mm^{-1}]$
ω	szögsebesség	$[s^{-1}]$

Rövidítések

TTF	tönkremeneteli idő	$[s]$
TTF_B	termény belső töréspontjáig eltelt időtartam	$[s]$
TTF_G	Golden almák tönkremeneteli frekvenciafüggését leíró egyenlet	$[s]$
TTF_K	termény külső töréspontjáig eltelt időtartam	$[s]$
TTF_P	Packham körték tönkremeneteli frekvenciafüggését leíró egyenlet	$[s]$
$TTFB_G$	Golden almák belső tönkremeneteli frekvenciafüggése	$[s]$
$TTFK_G$	Golden almák külső tönkremeneteli frekvenciafüggése	$[s]$
$TTFB_P$	Packham körték belső tönkremeneteli frekvenciafüggése	$[s]$

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK

1.1. A téma időszerűsége, jelentősége

A betakarítás, a feldolgozás, a szállítás, valamint a csomagolás közben kialakuló mechanikai hatások még napjainkban is jelentős kockázatot hordoznak a mezőgazdasági és kertészeti termékek épségére nézve. Az egyes termények különböző sérülési határértékekkel rendelkeznek, melyeket átlépve a külső erők által okozott kár többféleképpen is megnyilvánulhat: a károsodott térfogat néha kívülről is észlelhető, de az esetek jelentős részében olyan belső elváltozás keletkezik, amit a szemrevételezéssel történő válogatás nem mindig tud kiszűrni. Ilyenkor akár az egész terményhalmaz veszélybe kerülhet, hiszen a romláshoz vezető biológiai folyamatok nem korlátozódnak a sérült terményegyre.

Bár az alaki és minőségi tulajdonságok megkülönböztetésére és válogatására fókuszáló gépi módszerek hatékonysága folyamatosan növekszik (Gergely, 2016; Hameed et al., 2018; Steinbrener et al., 2019; Cakmak, 2019), a kezelési folyamatok végén tapasztalható veszteség hatalmas méreteket ölt: a nemzetközi felmérések szerint a feldolgozás különböző fázisaiban keletkező veszteségek miatt a termények 30-40%-a sohasem jut el a termelőtől a fogyasztóig (Bourne, 2014; FAO, 2011; NRDC, 2012; Cakmak, 2019; Yahia et al., 2019). Mivel a látható sérülések nagymértékben rontják a zöldségek és gyümölcsök piacképességét, a különféle terményválogató megoldások is arra törekednek, hogy a piacon csakis a hibátlan megjelenésű áruk jelenjenek meg, ezért az ilyen rendszerek fejlesztésekor a képfeldolgozáson alapuló megoldások kapják a legnagyobb hangsúlyt: a hiperspektrális vagy hőkamerás eljárásokkal vizsgált gyümölcsök így az előírt minőségi kritériumok és fogyasztói igények szerint szortírozhatók.

A kívülről észlelhető elváltozások, valamint a belső szövetben kimutatható károsodások felismerése mellett azoknak a kutatásoknak sem csökkent a jelentősége, melyek a mechanikai tulajdonságok meghatározására irányulnak - folyamatosan szem előtt tartva a veszteségek minimalizálásának fontosságát. A termények bizonyos szilárdsági paraméterei roncsolásmentes úton is meghatározhatók, például akusztikus vizsgálatok (Zhang et al., 2019) vagy rezgésanalízis útján (Goliáš et al., 2011). A visszafordíthatatlan károsodáshoz vezető folyamatok megértéséhez, valamint a terhelési határértékek felállításához azonban a roncsolásos vizsgálatok elvégzésére is szükség van, hiszen a termény anyagára jellemző sérülési mechanizmus és ellenállóképesség csak ezen az úton ismerhető meg.

A teljes élelmiszerfeldolgozási láncból számos kutatás összponstosít a szállítás közben keletkező sérülések felmérésére, a zöldségeket és gyümölcsöket terhelő legveszélyesebb erőhatásokat ilyenkor rezgési szimulációk segítségével térképezik fel (Vursavuş and Özgüven, 2004; Van Zeebroeck et al., 2007; Soleimani és Ahmadi, 2015): ezek a módszerek a legnagyobb veszteséget okozó frekvenciákat, valamint a szállítási folyamat közben alkalmazható optimális tárolási és logisztikai körülmények egy részét már sikeresen feltárták. Az egyes fajtákra vonatkozó sérülési határértékeket azonban nem csak a halmazos vizsgálatok, hanem a terményegyedek és az azokból származó minták szintjén is érdemes tanulmányozni (McLaughlin and Pitt, 1984), a szimulációk során kapott tapasztalatokra támaszkodva ugyanis az egyes termények energiamutatóinak és modell-paramétereinek változása a terhelési körülmények függvényében meghatározható, elősegítve a sérülési karakterisztika leírását.

A különböző megközelítéssel végzett kísérletek azonban kiegészítik egymást, hiszen az univerzális vagy egyedi terhelőberendezésekkel végrehajtott laboratóriumi sérülésvizsgálatok is azokra az adatokra támaszkodnak, amik a feldolgozás helyszínén lettek regisztrálva. Az ilyen vizsgálatok során az adott termény terhelés-alakváltozás görbéinek a kiértékelése zajlik, amik a mezőgazdasági anyagok leírására alkalmas matematikai modellekkel közelíthetők.

Az így kapott anyagmodellek további számítógépes szimulációkhoz használhatók, melyek a feldolgozási folyamatokban használt gépek és eszközök optimális kialakítására irányulnak.

1.2. Célkitűzések

Munkámban almástermésű gyümölcsök tönkremeneteli mechanizmusára alkotok modellt, a vizsgálatok során pedig egy jellegzetes alma- és körtefaj tulajdonságait hasonlítom össze. Az Európai Unió almatermelésében a Golden Delicious képviselteti magát a legnagyobb arányban, ami a hazai termelési összeggében is évről évre stabilan jelen van (WAPA, 2018). A körték közül a Vilmoshoz hasonló Packham fajtára esett a választás, ami hosszú tárolhatósága és beszerezhetősége miatt nyújt kedvező alapfeltételeket a kísérlethez.

A mérések során a Mezőgazdasági Gépesítési Intézet által rendelkezésemre bocsátott DyMaTest anyagvizsgálót használok, ami általánosan alkalmazható mezőgazdasági és kertészeti termények nyomóterheléséhez. A vizsgálatoknál a ciklikus terhelés hatására bekövetkező kifáradási jelenségre koncentrálok: a szállítás során a rezgésekből adódó ismételt terhelés az egyik legveszélyesebb külső behatás, ami a terményeket érheti, hiszen ilyenkor a visszafordíthatatlan károsodás bekövetkezéséhez egy kisebb erő is elegendő, mint ami a statikus terhelés esetén fennálló tönkremeneteli határérték (Fenyvesi, 2004).

A sérülési mechanizmus leírásához az eddig alkalmazott módszerek és megközelítések áttekintése után a tönkremeneteli folyamatot jellemző legfontosabb paraméterek összegzése, és ezek megfelelő pontosságú meghatározása szükséges. Az új eredmények alappilléret három különböző módszer képezi:

- a gyümölcsök anyagának leírása a legegyszerűbb viszkoelasztikus modell segítségével, amivel a terhelések során jelentkező kúszási jelenség közelíthető,
- a tönkremeneteli folyamattal leginkább összefüggésbe hozható disszipált-energia mutatók meghatározása,
- valamint a tönkremeneteli idő definiálása és megfelelő mérési módszer kidolgozása a meghatározásához.

A tönkremeneteli modell tehát az eddig külön kezelt eljárások együttes alkalmazására épít, az eredmények pedig kizárólag a mechanikai terhelésből származó adatokra támaszkodnak. A kapott paraméterekkel a tönkremeneteli idő leírására fókuszálok, a termények sérülési mechanizmusainak jellemzésére lineáris összefüggések felállítására törekszem.

Az energiamutatók alapján a vizsgált termények belső károsodási folyamata is feltérképezhető, erre más viszkoelasztikus anyagokkal foglalkozó szakterületeken már olyan módszereket dolgoztak ki, amik a gyümölcsök esetén is átvehetők.

Fő célkitűzéseim a fentiek alapján az alábbi pontokban foglalhatók össze:

- a Golden Delicious almák és Packham körték belső és külső tönkremeneteli határértékeinek megállapítása, a károsodási mutatók frekvenciafüggésének összehasonlítása,
- emellett a tönkremenetelt befolyásoló legfontosabb paraméterek mérésekkel történő meghatározása, valamint az egyes tényezőkből felállítható lineáris regressziós modell kidolgozása, ami a két terménfajta mechanikai ellenállóképességét írja le.

Az anyagtulajdonságot jellemző egyenletet egy olyan blokkorientált módszerrel oldom meg, amely a mérések során beállított terhelési adatokkal identifikálható, és a termények rugalmas és viszkózus modellegyütthetőinek megfelelő pontosságú meghatározását teszi lehetővé.

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

A szakirodalmi áttekintésben a kertészeti és mezőgazdasági termények mechanikai sérüléseivel foglalkozó nemzetközi és hazai kutatásokat ismertetem, sorra véve a sérült termények felismerésére, jellemzésére, elkülönítésére, valamint a károsodás esetleges megelőzésére irányuló módszereket és eljárásokat. Mivel a munkám eredményei a ciklikus terhelés hatására létrejövő alakváltozás megfigyelésén alapulnak, az erről szóló források tanulmányozása szintén elengedhetetlen.

2.1. A kertészeti termények mechanikai sérülései

A gyümölcsök sérülése az egyik legfontosabb tényező, amely a betakarítási és feldolgozási folyamatok gépesítését, valamint teljes automatizálhatóságát befolyásolja, egyes esetekben pedig korlátozza (Blahovec et al., 2004). A károsodott termények felismerésére és a sérülések megelőzésére irányuló módszerek kidolgozása ezért kulcsfontosságú, ehhez pedig meg kell ismerni a termények sérülési mechanizmusát.

2.1.1. A terményeket érő sérülések eredete és megjelenési formái

A termény sérülése a környezettel történő kölcsönhatások során jön létre, minden esetben a környezet által kifejtett különböző hatások révén. A károsodás lehet termikus, kémiai, biológiai vagy mechanikai sérülés (Sitkei, 2005). Munkámban ezek közül a mechanikai sérülések tárgyalásával foglalkozom.

A mechanikai sérülések eredhetnek a termény más terményekkel, növényzettel, betakarító- és kezelő gépekkel, tárolókkal és egyéb idegen testekkel (pl. talaj, homokszemek, jég) történő kölcsönhatása során (Ruiz Altisent, 1991). A sérülést előidéző leggyakoribb mechanikai kölcsönhatás az ütközés. A termények érintkezési felületén az ütközés során Hertz-feszültség keletkezik (Sitkei, 1981).

A mechanikai sérülést okozó terhelések három csoportba sorolhatók. A statikus terheléshez nem csak az állandó erővel történő terhelést soroljuk, hanem az igen lassú sebességgel magvalósuló esetek is ide tartoznak. A dinamikus terhelés során a terhelést pillanatnyi lefutásúnak tekintjük, formájától eltekintünk. Ezek mellett a mechanikai sérülés gyakran időben változó, ismétlődő terhelési ciklus eredményeként is kialakulhat (Sitkei, 2005).

A mechanikai behatások számos különféle sérülést okozhatnak a terményeken, Mohsenin (1970) ezekről részletes csoportosítást és jellemzést alkotott, Sitkei (1981) pedig ennek a magyar nyelvű szakszókincset is létrehozta. Saját vizsgálataimban a terményeket egyben, tesztminták kivágása nélkül, nyomócsapos terheléseknek vettem alá (3.1. fejezet), ezt figyelembe véve a sérülések közül három fontosabb kategória emelhető ki:

- Ha a növényi szövetek külső erő hatására sérülnek meg, zúzódás jön létre. Bár a termény héja ilyenkor nem szakad fel, ez sok esetben fizikai-, szín- és ízváltozást vált ki a szövetben.
- A horzsolás során a termény héja sérül, ilyenkor részben el is válhat az alatta található szövetektől. Az ilyen sérülés közvetlenül betakarítás után nehezen érzékelhető, sokszor csak bizonyos tárolási idő elteltével vehető észre.
- Ütés vagy nyomás hatására létrejövő repedés esetén a héj és a szövet a termény több darabra történő szétesése nélkül reped fel.

2.1.2. A sérülések hatásai

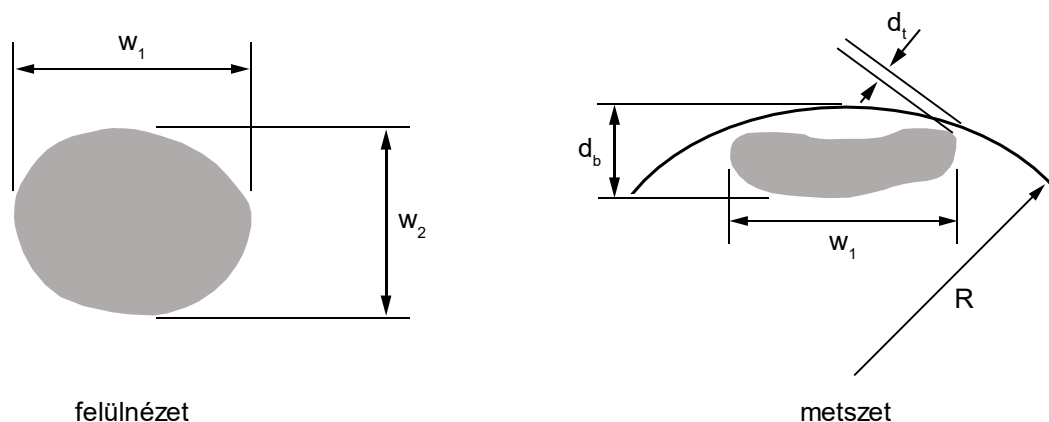
Umezuruike és Pankaj (2014) számos kutatást gyűjtöttek össze, melyek a sérülések hatásaival foglalkoznak, az áttekintésben viszont nem csak a minőségromlás számokban kifejezhető mértéke,

hanem a fogyasztói igények is kiemelt figyelmet kapnak. A látható sérülések drasztikusan rontják a termény piacképességét, a vásárlók túlnyomó százaléka egyértelműen a vizuális megítélés alapján dönt (Kader, 2002). Harker (2009) szerint az esetek többségében a megnyerő külső akár az árral szemben is elsőbbséget élvez. Mivel a fogyasztók a piacon elsősorban a gyümölcs héjának állapota, és annak színe alapján tudnak mérlegelni, Jahangir és tsai. (2019) a legkelendőbb megjelenés genetikai és kémiai feltételeit keresik, a konklúzió azonban nem ad egyértelmű eredményeket.

Sokszor azonban a mechanikai hatásoknak nincs kívülről is észlelhető jele, almák és körték esetében az enzim barnulás a sejtek közötti levegőtartalom miatt a termények belsejében is kialakulhat (Mohsenin, 1970). Megállapítható, hogy a mechanikai sérülések felgyorsítanak bizonyos fiziológiai folyamatokat (pl. nedvességtartalom változás, vitamin tartalom csökkenése stb.), melyek romlást, valamint rosszabb tápértéket eredményeznek. A mechanikai sérülések miatt kialakuló erjedés és egyéb biológiai folyamatok pedig a többi, sértetlen terményre is fertőző hatással lehetnek a tárolás során (Prusky, 2011; Umezurike és Pankaj, 2014).

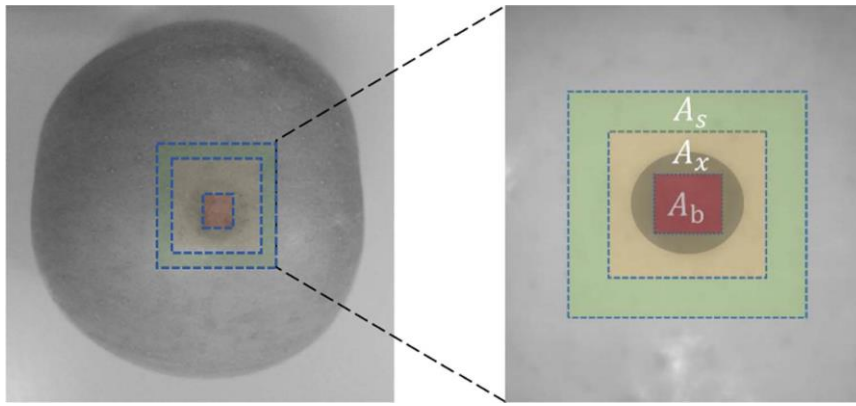
2.1.3. A sérülések és a tönkremenetel jellemzése

A sérülések jellemzése a megjelenési formától függően többféle módon történhet. Horzsolások esetén alkalmazható a felületi károsodás méreteinek meghatározása, zúzódáskor azonban a sérülés mélységét is figyelembe kell venni, ilyenkor a károsodott térfogat kerül a vizsgálat tárgyává (Sitkei, 2005). Bollen és tsai. (1999) a térfogat kiszámításához szükséges paramétereket ismertetik (2.1. ábra), napjaink ipari környezetében azonban hatékonyabban alkalmazhatók a különböző képalkotó eljárások.



2.1. ábra Méretek a sérülés kiterjedésének meghatározására: w_1 és w_2 - szélesség és hosszúság, d_b - a sérülés mélysége a felszíntől mérve, d_t - a sérülés és a gyümölcsfelszín közötti távolság, R - a termény sugara a sérülésnél (Bollen et al., 1999)

A képalkotáson alapuló módszerek manapság igen elterjedtek a gyümölcssérülések feltárásában, a vizuális (VIS) és közeli infravörös (NIR) spektroszkópiás eljárással vizsgált almák sérült területei például jól megkülönböztethetők az egészségestől, a feldolgozás segítségével pedig olyan károsodások is összehasonlíthatók, amiket különböző típusú erőhatások okoztak (Xing et al., 2003). A képalkotó berendezésekkel párhuzamosan a szoftveres háttér is folyamatosan fejlődik, számos lehetőséggel bővítve a kutatási irányokat: Che és tsai. (2018) például pixel-alapú elemzéssel vizsgálják az almákban keletkező károsodások kiterjedését (2.2. ábra). Mivel a hiperspektrális felvételek készítését a mechanikai behatás után többször megismétlik, így a sérülés terjedése is nyomon követhető.



2.2. ábra Sérült terményrészek feltérképezése spektrális képfeldolgozással (Che et al., 2018)

A módszer nem csupán az előrehaladott károsodások feltérképezését, de a friss mechanikai behatások észlelését is lehetővé teszi: ElMasry és tsai. (2008) bemutatták, hogy azok a sérülések is hatékonyan megjeleníthetők, amik nem sokkal a mechanikai kölcsönhatás után keletkeznek. Baranowski és tsai. (2012) a hiperpektrális megközelítés mellett hőkamerás elemzéssel is elvégezték a Golden Delicious almák korai sérüléseinek feltárását. Egyes termények, például a kiwik esetében a speciális héjszerkezet miatt a károsodás később sem vehető észre, a spektrális és képi vizsgálati eljárások azonban ilyenkor is alkalmazhatók (Lü and Tang, 2012).

A sérülések azonosítása mellett a képfeldolgozáson alapuló módszerek más osztályozási szempontok előtt is utat nyitnak: Gergely (2016) olyan paprikaválogató eljárást dolgozott ki, amely a piaci elvárásoknak megfelelően alak szerint végzi el a kívánt szortírozást, Malik és tsai. (2018) pedig olyan algoritmust fejlesztettek ki, melynek segítségével a kamerával felszerelt paradicsomszedő robotok figyelembe tudják venni a termények aktuális érési állapotát. A rendszer az átfedésbe kerülő termények megkülönböztetésével, és az eltérő fényviszonyokkal is megbirkózik, a megfelelően érett egyedek 81%-át felismeri.

Zarifneshat és tsai. (2012) szerint bizonyos vizsgálati paraméterek birtokában egy mesterséges neurális hálózat hozható létre, amely előre jelzi az almákban keletkező sérülések kiterjedését: a rendszer a termény sugara, a hőmérséklet, az akusztikus keménységtényező és a terhelőerő függvényében számítja ki a várható térfogatot. A mérések és a hálózat által becsült eredmények között 95%-os egyezés érhető el.

Ha a sérülések felismerése helyett a megelőzést helyezzük előtérbe, ismernünk kell azt a határállapotot, ami a termény tönkremenetelét jelzi. Mohsenin (1970) a szerkezeti anyagokhoz hasonlóan két paramétert is kijelölt erre a célra: a *biológiai folyáshatárt*, valamint a termény *töréspontját* (2.3. ábra).

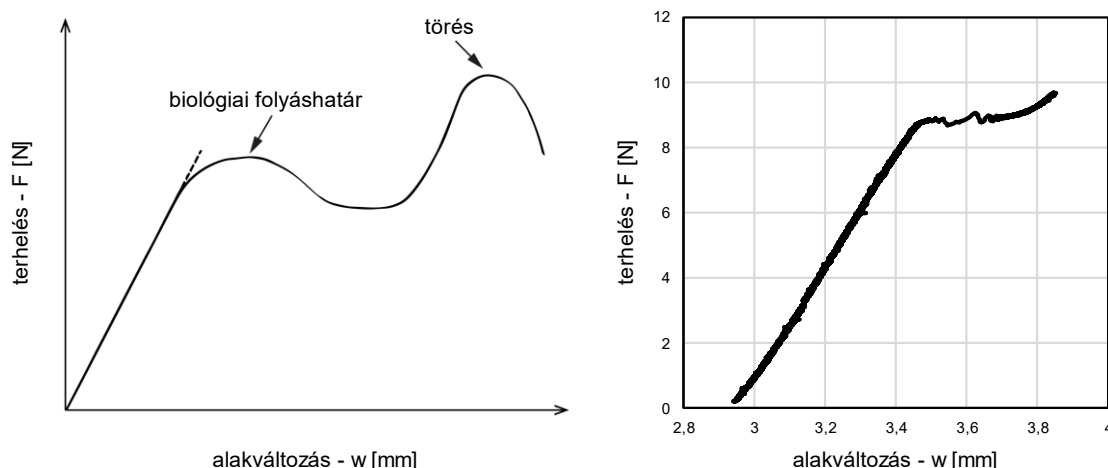
Sitkei (1981) a biológiai folyáshatárt a következőképpen jellemzi: „Biológiai anyagoknál a sejttrendszerben keletkező szakadás kezdetét a *biológiai folyáshatár* jelzi. Ezért első közelítésben mondhatjuk, hogy sérülés akkor következik be, ha az igénybevétel meghaladja a biológiai folyáshatárt”

A biológiai folyáshatár tehát olyan mikroszkopikus repedést jelent a termény szövetszerkezetében, ami végleges károsodáshoz vezethet, ugyanakkor a regenerálódás, valamint a sérülés terjedésének megszűnése sem zárható ki, amennyiben a terhelés már nem folytatódik tovább. Ebből adódóan a gyümölcs nagy része akár egészséges is maradhat. A töréspontnál már szemmel is látható a szövet roncsolódása, ekkor a termény nagy valószínűséggel teljesen tönkremegy.

Steffe (1996) rámutat, hogy az anyag típusától és minőségétől függően a két pont közelebb vagy távolabb is elhelyezkedhet egymáshoz képest. Ezt természetesen a terhelés lefutása is befolyásolja,

egyes esetekben még az is előfordulhat, hogy a biológiai folyáshatárt és a törést meg sem lehet különböztetni (Bourne, 1965).

Mivel a biológiai folyáshatár és a töréspont a mérések során sok esetben könnyen kimutatható (2.3. ábra), a legtöbbször ezek jellemzik egy termény tönkremenetelét (Fenyvesi, 2004), a kitüntetett értékek pedig több külső paraméter függvényében is vizsgálhatók.



2.3. ábra Biológia folyáshatár és töréspont a termények általános alakváltozási diagramján (Steffe, 1996), valamint Golden alma alakváltozási görbéje lineárisan növekvő terhelésnél (saját mérés)

Yurtlu and Erdoğan (2005) az egyre hosszabb tárolási idők függvényében elemezték az almák és körték sérülési határértékének csökkenését, Mehinagic és tsai. (2006) pedig több paraméter mellett a Golden almák töréspontja és a fogyasztás során érzékelhető minőségi paraméterek közötti korrelációt kutatták. A szövet roncsolódását kiváltó erő, és az eközben keletkező energia szoros összefüggésben áll a termény lédús és ropogós tulajdonságaival is.

2.1.4. Egyes tényezők hatása a sérülékenységre

A sérülékenységet befolyásoló tényezők alapvetően két nagy csoportra oszthatók: a *belső tényezők* a termény anyagtulajdonságaiból és biológiai állapotából adódnak, míg a *külső tényezők* a környezetből származtathatók, mechanikai sérülés során jellemzően a terhelés paramétereit sorolhatjuk ide.

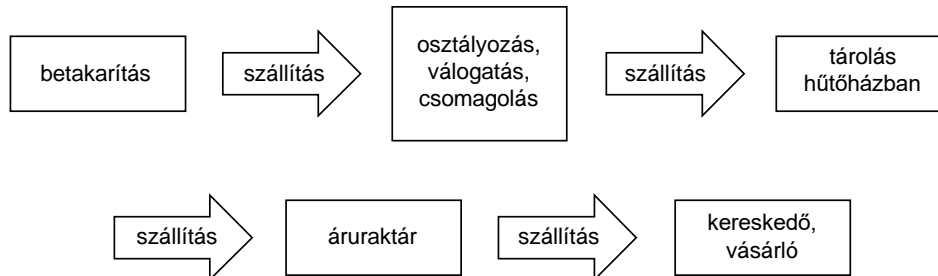
A belső tényezők között a sérülékenységet jelentős mértékben befolyásolja a termény *érési állapota*, mely a *nedvességtartalommal* szoros összefüggésben áll. Az érési állapot egyes gyümölcsök (pl. őszibarack, sárgabarack, körte) esetén kiemelten fontos, mert a mechanikai jellemzők változása drasztikus mértékű a teljes érést megelőző időszakban, túl érett állapotban pedig sok esetben kezelhetetlenné válhatnak a termények a nagymértékű szilárdságcsökkenés miatt (Sitkei, 1981). Emellett az is megállapítható, hogy optimális érési állapotban a hűtőtárolás és a különböző utókezelések hatása is kedvezőbb (Ganai et al., 2016).

Az egyik legfontosabb külső tényező, ami a betakarítás előtt is kifejti a hatását, az a *hőmérséklet*, melynek változásával a biológiai anyag rugalmassága is módosul. Burgonyákon elvégzett ütővizsgálatok alapján elmondható, hogy a csökkenő hőmérséklet eredményeként a rugalmasság is csökken, a sérülési hajlam pedig növekszik (Sitkei, 1981).

Mérésekkel az is igazolható, hogy a napi hőmérsékletváltozás miatt a szedés ideje is meghatározó a termények sérülékenysége szempontjából. A nap későbbi szakaszában leszedett Golden

Delicious almák kevésbé sérülékenyek, mint a kora reggeli órákban begyűjtött gyümölcsök, a Granny Smith almák vizsgálata során pedig megállapították, hogy a terhelések általában nagyobb károsodott terményrészt eredményeznek 0 C°-on, mint 20 C°-on (Movatt, 1997).

A terményt érő külső hatások a feldolgozottság állapotától (2.4. ábra) függően több forrásból eredhetnek, a gyümölcsöket már a szedés során is sérülések érhetik.



2.4. ábra A gyümölcs feldolgozásának állomásai (Ruiz Altisent, 1991; Mowatt, 1997)

A betakarítás történhet kézi úton, valamint gépi módszerekkel is, ilyenkor leggyakrabban valamilyen farázó berendezést alkalmaznak. A gyümölcsszedéskor legtöbbször a *megengedhető esési magasságot* kell figyelembe venni.

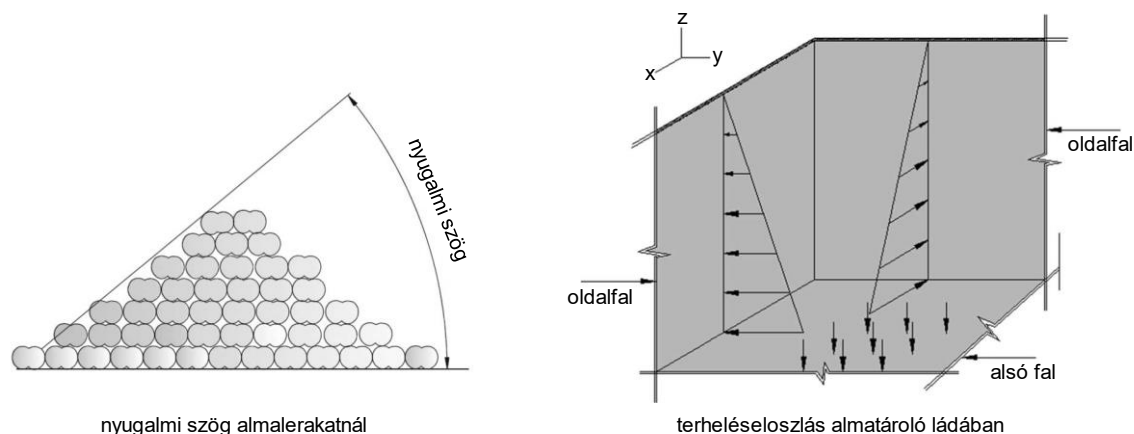
A megengedhető esési magasság a termény súlyától is függ - valamint attól is, hogy milyen felületre érkezik az adott gyümölcs - kisebb terményeknél általában nagyobb esési magasság engedhető meg (Csizmazia, 2011). Az adott gyümölcsre absorbeálható energia meghatározása után a súly figyelembevételével a megengedhető esési magasság is kiszámítható. Ejtési vizsgálatok útján megállapították, hogy az ütközési energia és a zúzódást szenvedett térfogat között lineáris kapcsolat áll fenn (Sitkei, 1981). Az almák betakarítást megelőző lehullása a fáról egyébként még napjainkban is jelentős veszteségeket okoz a termelésben, Arseneault and Cline (2016) szerint ez egyes fajták esetében a teljes hozam 30%-át is elérheti.

A feldolgozási és szállítási folyamatokban keletkező terménysérülések okai, valamint a terhelésátadást befolyásoló körülmények többféle szempontból vizsgálhatók: Hilton (1994) rendszerezéséből kiindulva Van Zeebroeck és tsai. (2007) az erre irányuló kutatásokat az alábbi kategóriák szerint csoportosították:

- A. A mechanikai hatások és rezgések forrását, nagyságát és természetét vizsgáló munkák: ide sorolhatók gyümölcsök közötti kölcsönhatások, a terményszállító eséséből származó mechanikai hatások, a terménytárolóra ható rezgések a szállításkor, valamint a szállítójármű rezgései az útfelület minőségéből adódóan.
- B. A csomagolóanyag és a terménytároló hatásainak elemzése: a vizsgálatok tárgyát a csomagolóanyag csillapító hatásai, a tárolók viselkedése dinamikus hatások esetén, valamint a tároló és a gyümölcs között keletkező súrlódás képezi.
- C. A gyümölcsök egymásra gyakorolt hatásai a mechanikai erők és rezgések továbbítása, valamint módosítása során: ebbe a csoportba tartoznak a szomszédos gyümölcs terheléscsillapító hatásával, valamint a csomagolóanyag és a gyümölcs kölcsönhatásával foglalkozó munkák.
- D. A gyümölcs sérülési hajlamának vizsgálata az érési állapot, a tárolási körülmények, a hőmérséklet, a méretek, valamint a fajta és a származás alapján.

A gyümölcsök általában darabos halmazt alkotnak, így a ládában történő szállítás és tárolás során az egyes terményeken adódik át a terhelés. Tárolásnál a vizsgált gyümölcsre ható *statikus erő* a felette elhelyezkedő gyümölcsoszlop súlyából határozható meg (Sitkei, 1981).

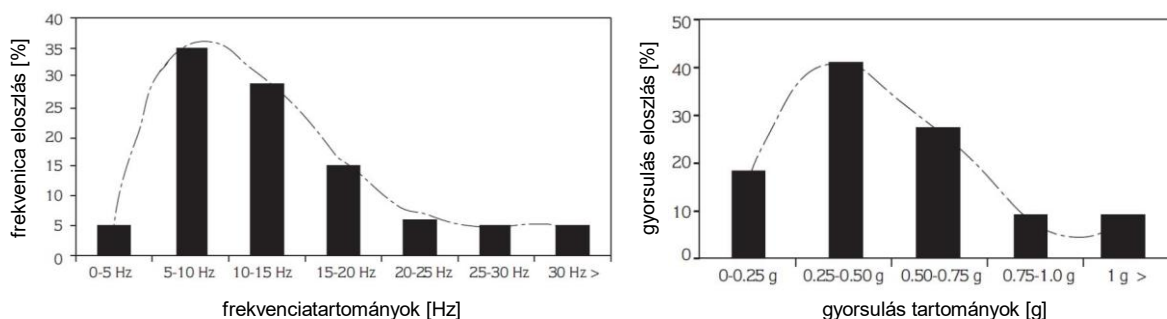
A ládában elhelyezkedő halmaz miatt nem csak az egyes gyümölcsökre, hanem magára a tárolóra is hat terhelés, Alam és tsai. (2012) ezért az oldalfalak deformációját vizsgálták: a véges elemes módszerrel végrehajtott elemzés segítségével kimutatták, hogy az almalerakat nyugalmi szöge (2.5 ábra) alapvetően határozza meg a ládában létrejövő terheléseloszlást.



2.5. ábra Almatároló oldalfalának terhelésvizsgálata (Alam et al., 2012)

A mechanikai sérülések, és az ebből következő jelentősebb veszteségek azonban nem a tárolás, hanem a szállítás és a különböző kezelési műveletek során keletkeznek (Van Zeebroeck et al., 2007). A szállítás során a ládában rezgések alakulnak ki, így a terményeket *dinamikus- és ismétlődő terhelések* érik. A kutatások általában a szállítás közben keletkező sérült terményhányadot mérik fel, miközben a terhelések frekvenciája, valamint a tárolók kialakítása a legfontosabb vizsgálati paraméterek.

A szállítási folyamat közben a rezgések gyorsulásérzékelőkkel mérhetők, de a tesztek leggyakrabban nem az utakon, hanem inkább laboratóriumban, egy rázópad segítségével hajtják végre. A kutatások egybehangzóan arra a következtetésre jutnak, hogy a szállítási rezgések terén az 5 és 10 Hz közötti frekvenciatartomány dominál, a legtöbb sérüléshez vezető frekvenciaérték általában ebben a sávban keresendő (2.6. ábra).



2.6. ábra Frekvencia- és gyorsulástartományok jellemző eloszlása a gyümölcsök szállításában (Vursavuş and Özgüven, 2004)

A veszteségek csökkentésére többféle megközelítés alkalmazható. Fischer és tsai. (1992) szőlő és eperhalmazokkal kísérleteztek, ők a megfelelő csillapítást és a veszélyes frekvenciák elhangolását javasolták. Vursavuş and Özgüven (2004) almákat vizsgáltak, és inkább a tárolási módokat hasonlították össze: a legkevesebb sérülés a mintázatban pakolt terménylerakokban keletkezett, ezt követte a papírelválasztók közé helyezett, majd a teljesen ömlesztett halmaz. A legtöbb veszteséget okozó frekvenciákat a szőlő és eperhalmazok esetén az 5 és 10 Hz közötti tartományban, az almák esetén pedig 8,2 Hz-nél határozták meg a szerzők.

Hinsch és tsai. (1993) arra is rámutattak, hogy a jármű különböző felfüggesztései mellett a teherautón belüli elhelyezés is kulcsszerepet játszhat: a rakodótér közepén kisebb gyorsulások tapasztalhatók, mint a szélein, viszont Berardinelli és tsai. (2005) nem tudtak szignifikáns összefüggést találni a körték sérülései és a vertikális, vagy horizontális elhelyezés között.

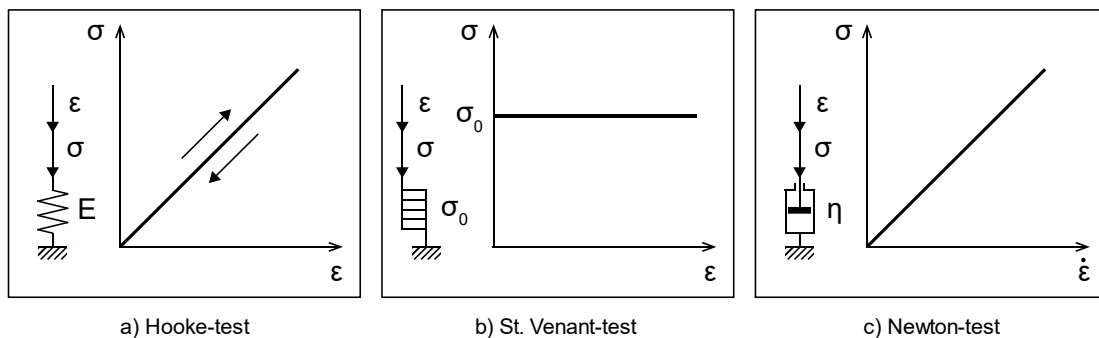
Springael és tsai. (2018) szerint a rezgésekből adódó szállítási veszteségek nem csak a tárolók fejlesztésével és megfelelő elhelyezésével, hanem az útvonalak optimalizálásával is jelentősen csökkenthetők: szimulációjukban a rosszul karbantartott utak elkerülésével 250-1500 eurós összeg takarítható meg, az útprofilok teljes felméréséhez gyorsulásérzékelőkkel gyűjtött adatokra van szükség.

2.2. Termények anyagtulajdonságai

2.2.1. Anyagmodellek

Az alakváltozási- és feszültségi állapot közötti függvénykapcsolatot az *anyagmodellek* adják meg (Csizmadia és Nándori, 2003). Amikor a deformáció az erőhatás mellett az időtől is függ, *reológiai anyagokról* beszélünk. A mezőgazdasági anyagok tipikusan ide sorolhatók.

Az *ideális anyagmodellel* az anyagok egy-egy alaptulajdonsága írható le, úgymint: rugalmasság, képlékenységi és viszkozitás. Az *ideálisan rugalmas test* esetén a feszültség és a deformáció egyenesen arányos, a terhelés megszűnése után pedig nincs maradék alakváltozás (2.7/a ábra), ezért a jelenség modellezésére egy rugó a legalkalmasabb (Csizmadia és Nándori, 2003; Pék, 2000, 2010).



2.7. ábra Ideális anyagmodellek erő-deformáció diagramjai (Csizmadia és Nándori, 2003)

Homogén és izotrop anyagok esetén a rugalmas anyagmodell *Hooke-testnek* nevezik (Hooke, 1678), melynek állapotegyenlete húzás vagy nyomás esetén:

$$\sigma = E \varepsilon. \quad (2.1)$$

A σ feszültség [N m^{-2}], valamint az ε fajlagos nyúlás [-] között az E rugalmassági (Young) modulus [N m^{-2}] az arányossági tényező (Csizmadia és Nándori, 2003; Firtha, 2009). A mezőgazdasági anyagoknál Hooke-tesztel ellentétben sokszor van maradék alakváltozás (Sitkei, 1981).

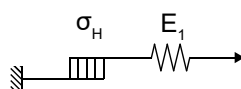
Ideálisan képlékeny (plasztikus) anyagok esetén a deformáció bekövetkezéséhez egy meghatározott feszültség elérése szükséges. Ilyen testeknél az alakváltozás nagysága a feszültség megszűnése után is változatlan marad (2.7/b ábra). Az ideálisan képlékeny anyagmodell *St. Venant-testnek* nevezik (Saint-Venant, 1853; Love, 1892; Mises, 1945), a jelenség lényege pedig a tapadási súrlódás segítségével szemléltethető. A termények esetén gyakran megfigyelhető a plasztikus viselkedés, ugyanis a növényi szövetek károsodása jellemzően egy adott határfeszültség elérésekor történik (Csizmadia és Nándori, 2003; Firtha, 2009).

A *viszkózus* anyagok jellemzésénél általában a feszültség és az alakváltozás sebessége közötti összefüggést vizsgáljuk (2.7/c ábra), a feszültség és deformáció kapcsolata az időtől is függ. Megkülönböztethető lineárisan- és nemlineárisan viszkózus modell, a lineáris anyagmodellt *Newton-testnek* nevezik (Newton, 1687; Franco and Partal, 2010). A Newton-test állapotegyenlete egytengelyű feszültségállapot esetén:

$$\sigma = \eta \dot{\epsilon}, \quad (2.2)$$

ahol: η - viszkozitási tényező [Ns m^{-2}], $\dot{\epsilon}$ pedig az alakváltozási sebesség [s^{-1}]. A Newton-test a sebességgel arányos csillapítású dugattyúval modellezhető (Csatár, 2009).

A valóságos anyagok viselkedését - az ideális anyagtulajdonságokat felhasználva - többtagú modellekkel közelítjük, a *reológiai modellek* tehát több alaptulajdonságot is magukon viselnek. Az ilyen modellek általában az alaptagok soros- vagy párhuzamos kapcsolásával állíthatók elő (Csizmadia és Nándori, 2003). Egy száraz növényi szár viselkedése például a *Prandtl-test* segítségével jellemezhető, amely egy sorba kapcsolt St. Venant és Hooke-testből áll (2.8. ábra). A modell a határfeszültség eléréséig rugalmas, majd a plasztikus elem elszakad (Firtha, 2009).



2.8. ábra Prandtl-test (Firtha, 2009)

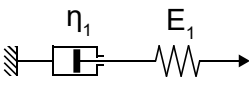
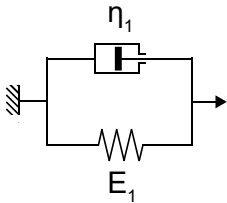
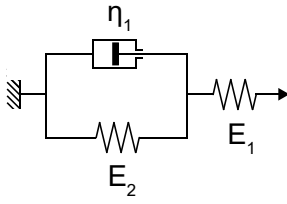
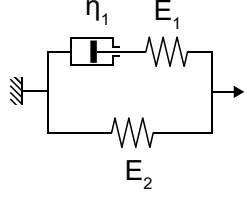
A részben szilárd testek, részben folyadékok tulajdonságaival rendelkező anyagokat *viszkoelasztikus modellekkel* írhatjuk le, amelyek Hooke- és Newton-testekből épülnek fel (Sitkei, 1981; Csizmadia és Nándori, 2003). A *Maxwell-test* esetén az említett két tag sorosan kapcsolódik egymással, a Voigt-Kelvin modellnél pedig párhuzamosan (2.1. táblázat).

Fekete (1997) a Maxwell modellek együtthatóit hasonlította össze Red Delicious almák roncsolásos és roncsolásmentes nyomótesztje során: a termények tönkremeneteli folyamatában a newtoni viselkedés - tehát a modellek viszkózus tagjai - a legtöbb esetben egyértelmű matematikai összefüggésbe állíthatók a terhelési paraméterekkel (például a terhelési sebességgel, vagy ismétlődő mechanikai hatás esetén a frekvenciával). A viszkózus együtthatók általában nagyobb értékeket vesznek fel, amikor a termény roncsolásos vizsgálata zajlik. A kisebb alakváltozásoknál a termények viszont teljesen rugalmasan viselkednek (Abbott and Massie, 1998).

Természetesen a viszkoelasztikus modellekben egy alaptagból több is szerepelhet, így összetettebb modellek is előállíthatók (pl. Poynting-Thomson vagy Jeffrey-test). *Lineárisan viszkoelasztikus* anyagoknál a feszültség és alakváltozás kapcsolata a feszültség nagyságától független, a mezőgazdasági anyagok többsége azonban *nem lineárisan viszkoelasztikus*, tehát a feszültség-deformáció viszony nem csak az időtől, hanem a feszültség értékétől is függ (Sitkei, 1981).

A gyümölcsök és terményhalmazok anyagtulajdonságainak feltérképezésén túl a különböző növényi eredetű olajok, valamint biokompatibilis organogélek is viszkoelasztikus modellekkel tanulmányozhatók, az ilyen kutatások eredményei általában a gyógyszerészeti területen hasznosulnak (de Francisco et al., 2019). A 2.1. táblázat néhány viszkoelasztikus modell kapcsolását és leírását tartalmazza.

2.1. táblázat Néhány viszkoelasztikus modell (Roylance 2001; Csatár, 2008; Van der Varst et al., 2016)

Maxwell	Voigt-Kelvin	Poynting-Thomson	
		Kelvin konfiguráció (a)	Maxwell konfiguráció (b)
			
$\sigma = \sigma_N = \sigma_H$ $\varepsilon = \varepsilon_N + \varepsilon_H$ $\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_N + \dot{\varepsilon}_H = \frac{\dot{\sigma}}{\eta_1} + \frac{\dot{\sigma}}{E_1}$	$\sigma = \sigma_N + \sigma_H$ $\varepsilon = \varepsilon_N = \varepsilon_H$ $\sigma = \eta_1 \dot{\varepsilon}_1 + E_1 \varepsilon_1$	<p>Kúszási modell (a):</p> $\sigma + \frac{\eta_1}{E_1 + E_2} \dot{\sigma} = \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2} \varepsilon + \frac{E_1 \eta_1}{E_1 + E_2} \dot{\varepsilon}$ <p>Relaxációs modell (b):</p> $\sigma + \frac{\eta_1}{E_1} \dot{\sigma} = E_2 \varepsilon + \eta_1 \left(1 + \frac{E_2}{E_1} \right) \dot{\varepsilon}$	

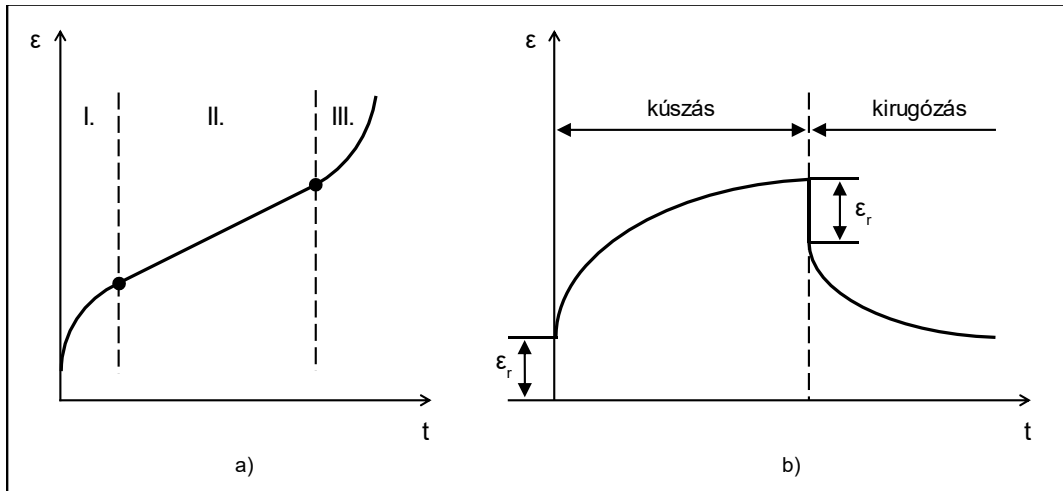
2.2.2. Kúszás és relaxáció

A mezőgazdasági gyakorlatban a termények és a talaj mechanikai tulajdonságait, így a különféle gyümölcsök anyagi viselkedését is viszkoelasztikus modellek segítségével jellemzik. Egy mechanikai kölcsönhatás során a deformációt ilyenkor nem csupán az igénybevétel nagysága, de a terhelés sebessége is jelentősen befolyásolja, a kúszás és a relaxáció jelensége pedig kitüntetett szerephez jut (Szendrő, 2000).

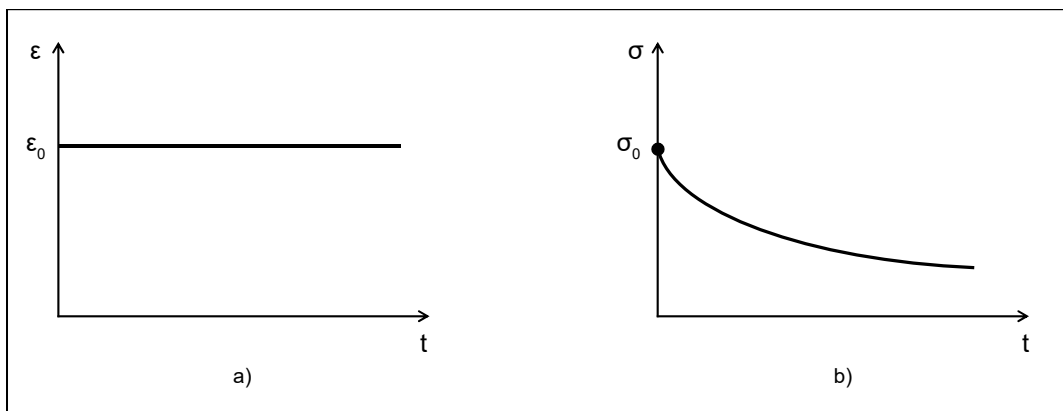
A kúszás során állandó feszültség hatására az anyag deformációja folyamatosan növekszik, a jelenség a deformáció sebességével ($\dot{\varepsilon}$ – 2.2 egyenlet) jellemezhető.

A kúszási folyamat első szakaszában a deformáció sebessége csökken, ezt elsődleges kúszásnak nevezik. A második szakaszon a deformáció közel állandó, a harmadik fázisban pedig növekszik, egészen az anyag roncsolódásáig (2.9/a ábra).

A terhelés megszüntetése után maradó alakváltozás jön létre, ez azonban az idő függvényében csökken. Ezt a jelenséget *kirugózásnak* nevezik (2.9/b ábra), lefolyása pedig a terhelés nagysága mellett a terhelési időtől is függ. A deformáció csökkenése a végleges maradó alakváltozásig tart. Mezőgazdasági anyagoknál a kirugózást a terhelés növelése és a hőmérséklet növekedése is csökkenti (Sitkei, 1981; Szendrő, 2007).



2.9. ábra A kúszás fázisai, kúszás és kirugózás (Sitkei, 1981)

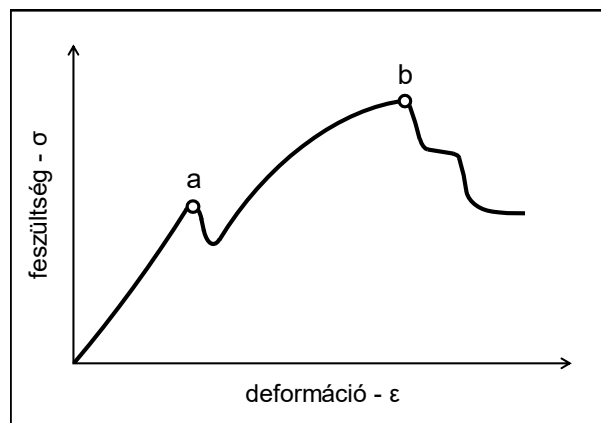


2.10. ábra A relaxációs folyamat (Sitkei, 1981)

A viszkoelasztikus anyagok jellemző tulajdonsága a relaxáció is, amely során az állandó deformáció mellett a feszültség folyamatosan csökken (2.10. ábra). A jelenség a relaxációs idővel jellemezhető. Ez azt az időtartamot jelenti, amely alatt a létrehozott feszültség $1/e$ -ad (kb. 37 %) részére csökken (Sitkei, 1981; Malkin and Isayev, 2017).

2.2.3. A termények feszültség-deformáció diagramjának egyes paraméterei

A terhelések során rögzített feszültség-deformáció görbe (2.11. ábra) alapján a termények számos mechanikai tulajdonsága meghatározható.

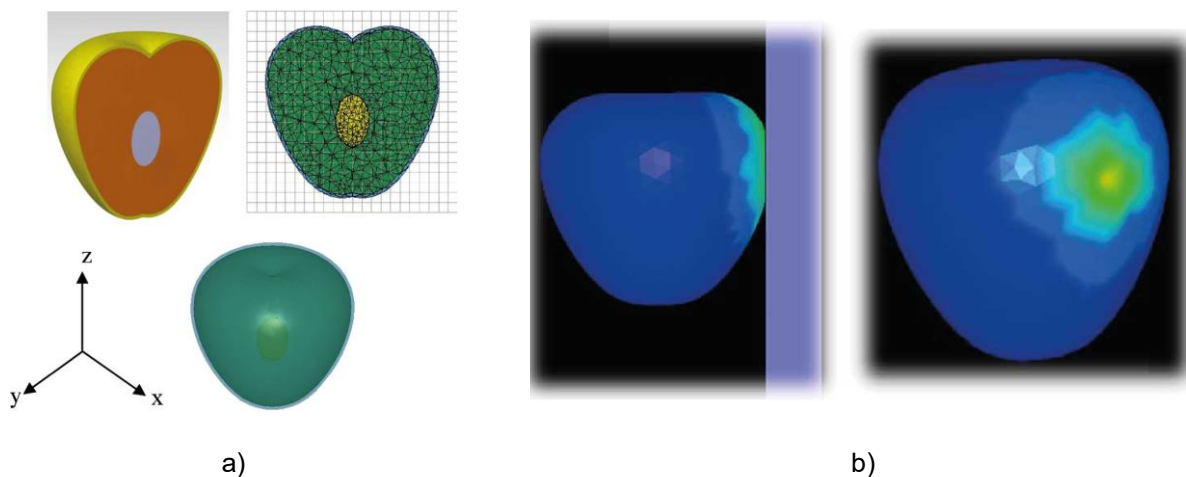


2.11. ábra Biológiai anyag feszültség-deformáció görbéje (Sitkei, 1981)

- *Biológiai folyáshatár*: a 2.1.3. fejezetben definiálva.
- Ha az anyag nagyobb térfogatában jön létre károsodás, a diagramon *töréspont* látható (2.11. ábra b pont). Ilyenkor a feszültség meredeken és jelentősen csökkenni kezd. A törés általában plasztikus deformáció után következik be.
- A közelítően egyenes kezdeti szakasz iránytangensével a biológiai anyag *merevsége* jellemezhető.
- A rugalmas deformáció viszonyát a teljes deformációhoz a *rugalmassági fok* mutatja meg. Akkor vizsgálható, ha egy bizonyos értékig történő terhelés után tehermentesítés következik be.
- A töréspont bekövetkeztéig befektetett munka nagysága a termény *szívóssága*, melynek értékét a görbe alatti terület adja meg.
- Egy adott nyomótest behatolásával szemben tanúsított ellenállás az anyag *keményisége*.
- A rugalmassági tartományban tárolt energia a *deformációs munka*.
- A terhelés-tehermentesítés ciklusban abszorbeált energia a *mechanikai hiszterézis*, mellyel az anyag csillapítási képessége is jellemezhető.
- Az *energia visszanyerés* a tehermentesítéskor visszanyert energia viszonya a terheléskor befektetett energiához.

2.2.4. Modellezés a véges- és diszkrétéleemes vizsgálatok során

Napjainkban a termények viszkoelasztikus modellezését a végeselemes módszeren (rövidítve a VEM-en) alapuló kutatások során alkalmazzák a legelterjedtebben. A gyümölcsök egyes rétegeit, almástermésűek esetén például a héjat, a húst és a magházat ilyenkor külön modellekkel jellemzik (2.12/a ábra), ahol a külső mechanikai hatás által okozott feszültségterjedés (2.12/b ábra) megjeleníthető (Fenyvesi et al., 2013; Ahmadi et al., 2016; Ji et al., 2019). A test, amellyel a vizsgált termény kölcsönhatásba lép, szintén egyedi tulajdonságokkal rendelkezhet.

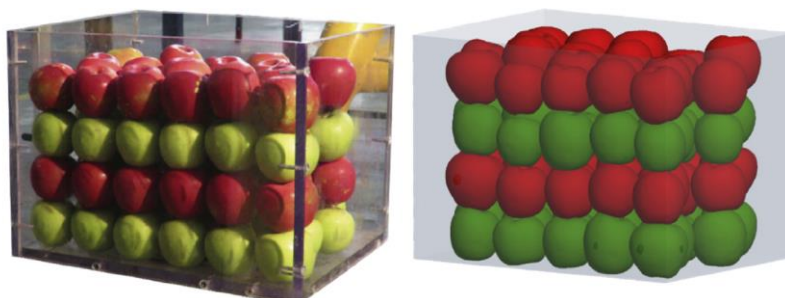


2.12. ábra Ütközés hatására bekövetkező feszültségterjedés vizsgálata az almák különböző rétegeiben (Ahmadi et al., 2016)

A módszer segítségével Yousefi és tsai. (2016) körték, Du és tsai. (2019) pedig a kiwik ejtési vizsgálata során létrejövő károsodást tanulmányozták: a modellek a körték esetén 60,53%-os, a kiwik esetén pedig 17,1%-os maximális hibával mutatják meg a keletkező sérülések kiterjedését.

Több gyümölcs, vagy egy egész terményhalmaz esetén a felületek közötti érintkezés hatásai a diszkrételes (DEM) megközelítéssel tanulmányozhatók. A módszerrel a legkülönbözőbb szemcsés anyagok viselkedése írható le, a mezőgazdasági gyakorlatban pedig az eljárás hazai jelentősége is folyamatosan növekszik: Safranyik (2016) például a gravitációs silóürítésre, Varga (2018) pedig a keverőcsigák környezetében létrejövő szemcsemozgások elemzésére alkotott diszkrételes modellt. Bár a nagy szemcsemennyiségek kezelése hatalmas számítási kapacitást és sok időt vesz igénybe, a módszer és a technológiai háttér folyamatosan fejlődnek.

A Scheffler és tsai. (2018) által kidolgozott DEM rendszer a halmazban kezelt almák sérüléseinek kiterjedésére ad becslést (2.13. ábra): a modell jelenleg az almák között kialakuló erőhatásokra 11%-os, a terményegyedek sérüléseire 47%-os, a halmazban keletkező összes károsodott felületre 35%-os, a sérülések mélységére pedig 30%-os pontossággal készít előrejelzést. Van Zeebroeck és tsai. (2006) az almahalmazokat a szállítási folyamat során tapasztalható ismétlődő terhelésnek tették ki: az eredményeik kimutatták, hogy a frekvencia növelésével csökkenthető a sérülések kiterjedése.



2.13. ábra Almahalmaz vizsgálata diszkrét elemes módszerrel (Scheffler et al. 2018)

2.3. Az ismétlődő terhelés

Ismétlődő terhelések esetén akkor is létrejöhét biológiai folyás vagy törés, hogyha a terhelés okozta igénybevétel kisebb, mint ami a tönkremenetel bekövetkeztéhez elég lenne. A ciklusszám növekedésével az anyag szilárdsága csökken, a termény szerkezete pedig kifárad.

Hogyha a terményt periodikusan váltakozó terhelés éri, akkor a keletkező deformáció szintén periodikus lesz. Tehát egy σ_0 amplitúdójú és ω szögsebességű

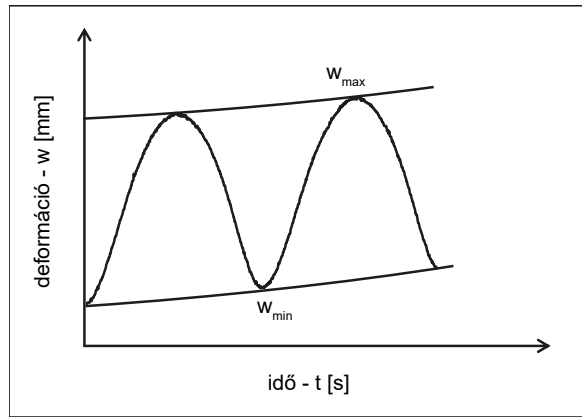
$$\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t) \quad (2.3)$$

feszültség esetén a válaszfüggvény:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin(\omega t - \delta). \quad (2.4)$$

Ahol δ a feszültség és a deformáció közötti fázisszög eltérés.

Az állandó amplitúdójú ciklikus terhelés hatására az alakváltozás folyamatosan változik, akárcsak az állandó terhelés hatására létrejövő kúszás során. Ilyenkor a kapott periodikus deformáció burkológörbéi hasonlítanak a statikus terhelés során keletkező kúszási görbékhez, ezért ezt a jelenséget *dinamikus kúszásnak* nevezik (2.14. ábra).



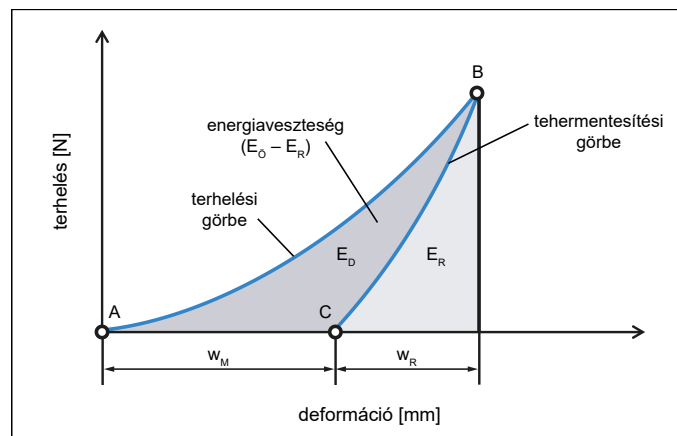
2.14. ábra A ciklikus terhelés hatására bekövetkező dinamikus kúszás (Fenyvesi, 2004)

Ezzel együtt az is megállapítható, hogy az állandó amplitúdójú ciklikus alakváltozás mellett *dinamikus feszültség relaxáció* jön létre (Fenyvesi, 2004).

2.4. A terhelési folyamat energiamutatói

2.4.1. A mechanikai hiszterézis görbe

A 2.15. ábra a hiszterézis görbe kitüntetett paramétereit mutatja be. A terhelés folyamata az A és B pont között zajlik, a tehermentesítés pedig a B és C pont között látható. A különböző energiamutatók az egyes görbék által határolt területek meghatározásával számíthatók (Diels et al., 2016; Lee et al., 2016).



2.15. ábra A mechanikai hiszterézis folyamata (Lee et al., 2016)

A görbén látható jelölések magyarázata (Kim, 2006; Lee et al., 2016):

- w_M - Maradó (vagy rugalmatlan) alakváltozás: a tehermentesítés végén regisztrált alakváltozás.
- w_R - Rugalmas alakváltozás: ha a görbe teljesen zárt (azaz az A és C pont egybeesik), a terhelés megszüntetésekor az anyag teljesen visszanyeri az eredeti formáját.
- A maximális deformáció a B pontnál látható:

$$w_{\max} = w_M + w_R. \quad (2.5)$$

- E_D - Disszipált energia (maradó alakváltozási munka): visszafordíthatatlan energiavesztés, amely hő vagy az anyag károsodásának formájában jelenik meg.

- E_R - Rugalmas energia: a rugalmas alakváltozáshoz tartozó energiamennyiség.
- Az összes bevezetett energia a terhelés során:

$$E_{\text{ö}} = E_D + E_R. \quad (2.6)$$

Bár az energiaveszteségek számítása több szakterületen hozzátartozik a sérülési mechanizmus leírásához, a hiszterézis görbéből meghatározható disszipált energiának csak egy része kötődik az anyag károsodásához és a tönkremeneteli folyamathoz (Ghuzlan and Carpenter, 2000).

2.4.2. Disszipált energia számítása

A mechanikai hiszterézis alapján számított disszipált energiát minden esetben a terhelési és tehermentesítési görbe közötti terület meghatározásával adják meg:

$$E_D = \int_0^T \sigma \frac{d\varepsilon}{dt} dt, \quad (2.7)$$

ahol T a terhelés időtartama. Ciklikus terhelés esetén egy ismétlődő hiszterézis görbét kapunk, ahol a maradó alakváltozás folyamatos növekedése utal a dinamikus kúszás jelenségére. A 2.5 képletből kiindulva az alakváltozás idő szerinti deriváltja:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \omega \varepsilon_0 \cos(\omega t - \delta). \quad (2.8)$$

A feszültség (2.4) és a derivált alakváltozási (2.7) függvényt a 2.6 egyenletbe behelyettesítve a ciklus disszipált energiája:

$$E_D = \int_0^T \varepsilon_0 \sigma_0 \omega \sin \omega t \cos(\omega t - \delta) dt. \quad (2.9)$$

Az integrálást elvégezve:

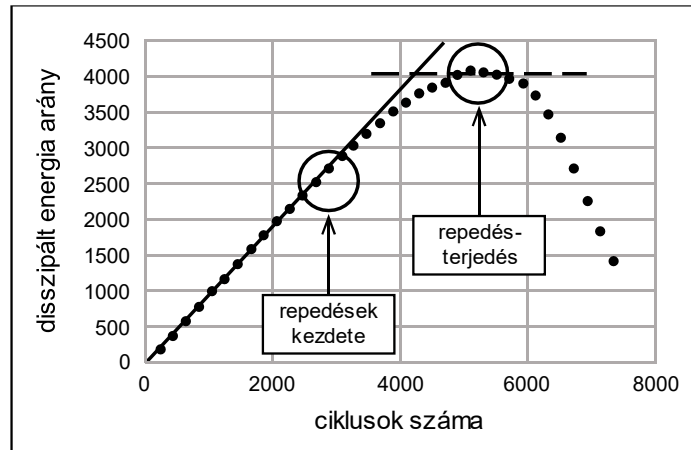
$$E_D = \pi \varepsilon_0 \sigma_0 \sin \delta. \quad (2.10)$$

A deformáció időfüggvényét általában a mérések során rögzített adatsorok közelítésével határozzák meg (Kim, 2006). A kúszás második fázisa (2.9/a ábra) az esetek többségében a tönkremenetel kezdetéig egy lineáris folyamatként jól leírható, a terhelés elején tapasztalható felfutás ilyenkor azonban pontatlanságot eredményez. A folyáshatár, vagy a repedésterjedés kezdőpontjának meghatározása szintén bizonytalanságot hordoz, erre vonatkozó egységes módszert a terményekkel foglalkozó szakirodalom nem ismert.

Az útburkolatok esetében, a különböző aszfaltrétegek reológiai vizsgálata során a ciklusonként meghatározott disszipált energia halmozódásával következtetnek a repedések kialakulására, és ezzel együtt a tönkremeneteli folyamat kezdetére. Az

$$E_{DR} = \frac{\sum_{i=0}^n E_{Di}}{E_{Dn}} \quad (2.11)$$

összefüggést felhasználva a disszipáltenergia-arány (E_{DR}) a ciklusszám függvényében ábrázolva (2.16 ábra) két kitüntetett ponton is utalhat a belső károsodásra: amikor a függvény kezdeti felfutási meredeksége 10%-ot zuhan, az aszfalt belsejében a repedésképződés elindul, a görbe töréspontja pedig a kifáradásos tönkremetelt jelzi (Delgadillo and Bahia, 2005).



2.16. ábra Belső repedésterjedési folyamat jellemzői a disszipált energia alapján (Delgadillo and Bahia, 2005)

2.5. Termények anyagvizsgálatánál alkalmazott berendezések és módszerek

A különböző termények alapvetően két fajta módon vizsgálhatók: *roncsolásos* vagy *roncsolásmentes* úton. Egyes anyagjellemzőket roncsolásmentes módszerekkel is meg lehet határozni, a tönkremeneteli folyamat tanulmányozása azonban csak a vizsgált termék maradandó károsulásával valósítható meg, hiszen a biológia folyáshoz (vagy a szövetszerkezet jelentős töréséhez) megfelelő nagyságú terhelőerőnek kell kitenni a gyümölcsöt.

2.5.1. Kompressziós vizsgálati módszerek

A kompressziós eljárások során valamilyen mérőtestet nyomnak a termék felületébe, miközben regisztrálják az erőt és a deformációt. Az ilyen eljárások többségénél a behatolási sebesség kicsi és állandó, tehát a vizsgálat *kvázisztatikusnak* nevezhető. Számítógépes vezérlésű precíziós penetrométert (állományvizsgálót) laboratóriumokban alkalmaznak (2.17/a ábra), kézi penetrométerekkel pedig gyors, szabad földi mérések végezhetők. A széles körben használt Magness-Taylor módszerrel (Magness and Taylor, 1925) roncsolásos keménységmérés végezhető (2.17/b ábra), a kézi penetrométerrel a nyomóerő maximális értéke olvasható le a mérés során (Sitkei, 2005).



a) precíziós penetrométer



b) Magness-Taylor keménységmérő

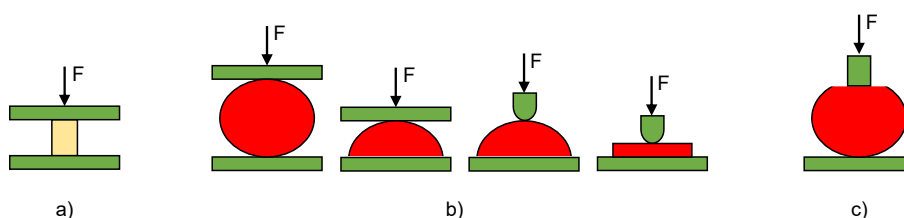


c) MGA-1091 keménységmérő

2.17. ábra Laboratóriumi és kézi penetrométerek (Sitkei, 2005)

A terepen végezhető mérések bővítése érdekében Borsa és tsai. (2002) hordozható elektronikus keménységmérő műszert (MGA-1091) fejlesztett ki (2.17/c ábra). A berendezés segítségével különböző zöldségek és gyümölcsök utóérési folyamatát, valamint tárolás közbeni minőségváltozását vizsgálták.

A laboratóriumi kompressziós vizsgálatok során többfajta mérőtest és érintkezési modell alkalmazható. Shirvani és tsai. (2014) az almák rugalmassági modulusának meghatározása során három különböző megközelítést hasonlítottak össze: Hooke elméletének alkalmazásakor a terményből egy homogén, henger alakú próbatestet alakítottak ki, melyet egytengelyű nyomásnak tettek ki két síklap között (2.18/a ábra); a Hertz elméleten alapuló méréseknél alma és fél alma próbatesteken lapos felületekkel, illetve félgömb alakú mérőcsappal végezték a terhelést (2.18/b ábra); a vizsgálatok harmadik csoportjánál pedig sík felületű mérőcsapot alkalmaztak a termény laposan előkészített oldalán (2.18/c ábra). A szerzők szerint Hooke elméletből kiindulva az almák biológiai folyáshatára könnyen meghatározható, a Hertz elmélet viszont közelebb áll a valósághoz, hiszen ilyenkor a teljes terményt terhelik. A harmadik mérősorozat eredményei a másik két módszertől jelentősen eltértek. Diels és tsai. (2016) szintén lapos felületekkel terhelt, félgömb alakú almákat vizsgáltak kvázisztatikus nyomóerővel, az eredményeket pedig ingás ütköztetések adataival kiegészítve egy olyan kontakt erőmodellt alkottak, mely $R^2 = 0,9$ pontossággal illeszkedik a mérésekkel kapott erőgörbékhez.



2.18. ábra Különböző érintkezési körülmények tesztelése kompressziós vizsgálatok során (Shirvani és tsai, 2014)

A Hertz elmélet alkalmazásakor a mérőtest akár egy másik terménnyel is helyettesíthető: Van Zeebroeck és tsai. (2004) a két alma között kialakuló súrlódási viszonyokat vizsgálták, a termények között pedig egy vékony membránt helyeztek el az érintkezési felület meghatározásához. Az így kidolgozott érintkezési modellek felhasználása tipikusan a diszkrétéleemes vizsgálatok során kamatoztatható.

2.5.2. Ütközési és ejtési vizsgálatok

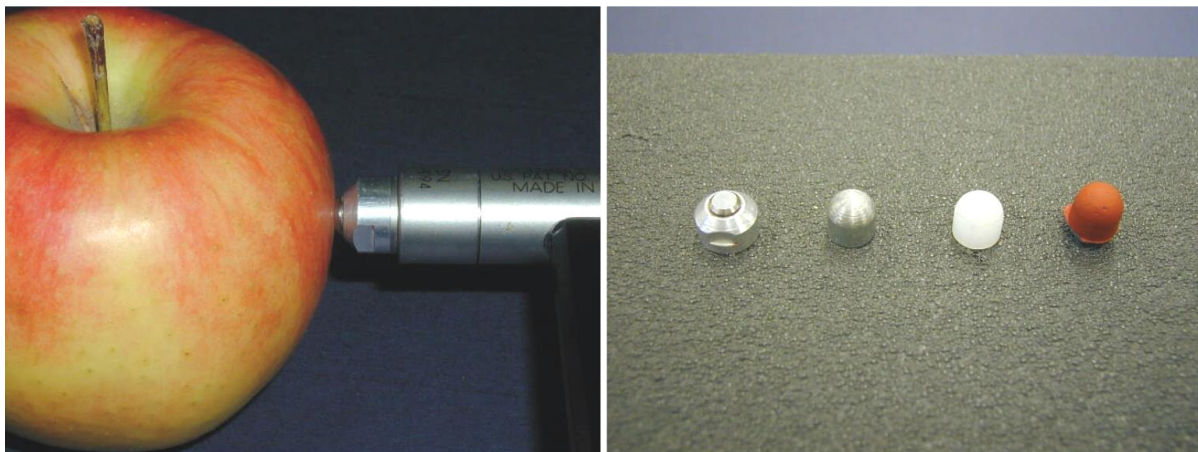
Az *ütközés* az egyik leggyakrabban előforduló mechanikai hatás a különböző kezelési eljárások során. Mivel a termények legtöbb esetben domborúak, az ütközések során a kölcsönhatás kis felületeken megy végbe, így a folyamat szintén a Hertz-feszültség létrejöttével jár (Sitkei, 1981). Az ütközés bekövetkezhet, amikor a termény a talajra esik, vagy amikor a többi terménnyel érintkezik, de a feldolgozási folyamat során a gyümölcsök egyéb szilárd testekkel is kölcsönhatásba kerülhetnek (például a tároló oldalfalával vagy a gépi kezelés bizonyos eszközeivel). A jelenséget laboratóriumi környezetben ingás berendezésekkel, vagy ejtési vizsgálatok útján lehet reprodukálni.

Az ingás ütköztetések egy szilárd gömbalakú test segítségével (Ferreira et al., 2008), vagy két gyümölcs között is elvégezhetők (Wang et al., 2018). Fu és tsai. (2016) Granny Smith almák ütköztetése során azokat a terhelési határértékeket keresték, amiknek hatására a vizsgált gyümölcs még éppen eleget tesz a piac által állított vizuális követelményeknek: az ütőfejbe épített erőmérő szenzorral mérve a 28 N körüli értékeknél a termény szinte tökéletes marad, 53 N fölött azonban az eladhatóság már komoly veszélybe kerül.

Az ingás berendezések helyett Vursavus és tsai. (2017) egy vákuumos megfogót alkalmaztak a paradicsomok függőleges ejtéséhez, ahol a terményekre ható erő időfüggvényét egy mérőlapra zuhanva vették fel. A becsapódáskor mérhető impulzust, valamint az erőhatás időtartamát és csúcserőértékét felhasználva a paradicsomok keménységét lineáris regressziós modellel közelítették. Az időfüggvény paramétereiből felírható többváltozós egyenletek 17,07%-os, az egyváltozós egyenletek pedig 19,52%-os hibával becsülték meg az erő-deformáció görbéből számított keménységi tényezőt.

Az ütközési tesztek során azonban olyan oszcilláció keletkezhet, amely a mérőérzékelőkre is hatással van, az így szerzett adatok pedig pontatlanok lehetnek: a dinamikus folyamatot általában erőmérő cellákkal és gyorsulásérzékelőkkel vizsgálják, az alakváltozást pedig a gyorsulásfüggvény integrálásával határozzák meg. Stropek és Gołacki (2015) ennek megkerülésére érdekében a becsapódó gyümölcsök deformációját egy nagy képkockasebességű kamerával rögzítették.

Felföldi (2004) a kertészeti terményeknél alkalmazható – még roncsolásmentes – mechanikai impulzus nagyságának meghatározására dolgozott ki módszert. A vizsgálat során az azonos körülmények között végrehajtott mérések korreláció analízise valósult meg, különböző ütőfejek alkalmazása és összehasonlítása mellett (2.19. ábra). Almák és körték esetén $0,005\text{--}0,01\text{ kg m s}^{-1}$ impulzusnál még láthatatlan, de már szignifikánsan mérhető maradandó hatások keletkeztek.



2.19. ábra Vizsgált ütőfej alakok- és anyagok roncsolást nem okozó mechanikai impulzus nagyságának meghatározásához (Felföldi, 2004)

Li és tsai. (2017) az eddig alkalmazott kompressziós és ütközési módszerekről, valamint az ezekhez kapcsolódó modellezési eljárásokról készítettek részletes áttekintést. Az összefoglalás végén több olyan irányt is meghatároztak, ami a kutatók előtt még járatlan terület. Ezek közé tartozik, hogy a laboratóriumi vizsgálatok során tesztelt gyümölcsök már érett példányok (legtöbbször a piacról, vagy a termelőktől származnak), a valóságban a szedés viszont még éretlen állapotban történik, a feldolgozás jelentős részében ezért más terhelési határértékek jellemzők, mint a kísérleteknél. A modellekbe így az egyes termények érési karakterisztikáját is be kellene építeni. A szerzők emellett azt is megállapítják, hogy az ismételt terhelések hatásaira nagyobb hangsúlyt kell fektetni, a tönkremeneteli folyamat mikroszkopikus feltérképezése pedig elengedhetetlen lesz a véges- és diszkrét elemes kutatásokhoz.

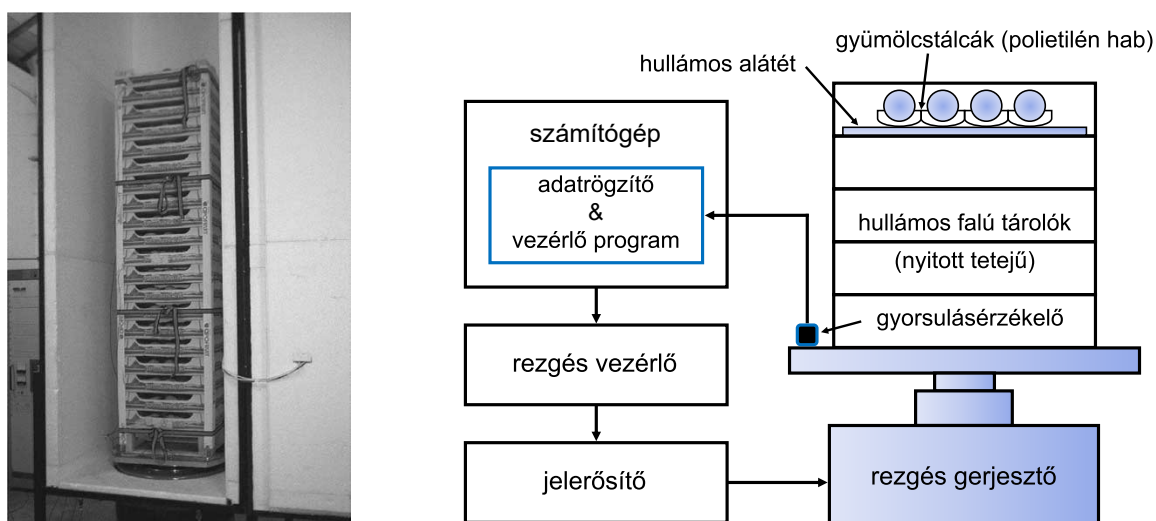
A terhelések beállításánál a laboratóriumi vizsgálatok a gépi feldolgozás közben gyűjtött adatokra is támaszkodhatnak: Praeger és tsai. (2013) a tényleges manipulációs folyamatokban alkalmazható mesterséges terményeket gyűjtötték össze és végeztek összehasonlítást. A méréseket alapvetően háromtengelyű gyorsulásérzékelők végzik, melyek rugalmas falú műanyag tokozásban, vagy bizonyos esetekben akár igazi terményekben is elhelyezhetők.

2.5.3. Rázópados vizsgálatok

A gyümölcsök rezgésekre adott válasza, és az ezzel összefüggésbe hozható mechanikai tulajdonságok terményegyenként, és halmazos formában is vizsgálhatók. Az egyes gyümölcsökhöz készített rázópadokkal általában a keménység meghatározása a cél, a halmazos mérésekkel pedig a szállítási körülményeket szimulálják, ilyenkor a veszélyes frekvenciákat és gyorsulásértékeket, valamint a tárolási és elhelyezési megoldások hatását vizsgálják a sérült terményhányad feltérképezésével.

A keménységi vizsgálatok során a rázópadon és a gyümölcsön gyorsulásérzékelőket helyeznek el, melyek segítségével felveszik a termény frekvenciagörbéjét. A keménységi tényező a frekvenciacsúcsok és a termény súlyának ismeretében kiszámítható (Finney, 1970; Abbott and Massie, 1998; Goliáš et al., 2011). A gyorsulásérzékelők mellett a gyümölcsök rezgéseinek megfigyeléséhez lézeres vibrométer (LDV - Laser Doppler Vibrometer) is használható (Terasaki et al., 2001; Oveisi, 2012), az akusztikus vizsgálatoknál pedig mikrofont, vagy piezoelektromos érzékelőt használnak a frekvenciák tanulmányozásához (Muramatsu et al., 1996; Duprat et al., 1997; Diezema, 2003; García-Ramos et al., 2005).

A szállítás során az útminőség és a jármű csillapítási tulajdonságai mellett a csomagolás és az alkalmazott terménytárolók, valamint a terményhalmazok elhelyezkedése is jelentős hatást gyakorolnak a sérülések kiterjedésére (Berardinelli et al., 2015; Idah et al., 2012; Jung and Park, 2012; Fadiji et al., 2016). Az ilyen vizsgálatokhoz a legtöbbször szintén laboratóriumi rázópadokat és gyorsulásérzékelőket alkalmaznak (2.20. ábra).



2.20. ábra Körték szállítási szimulációja rázópad segítségével (Berardinelli et al., 2005; Jung and Park, 2012)

2.5.4. A módszerek alkalmazhatósága

Van Zeebroeck és tsai. (2007) az almák kezeléséről és szállításáról szóló kutatásokból készítettek széleskörű áttekintést, amely a terület 45 éves gyakorlatát igyekszik összefoglalni. A témával foglalkozó számos kutatás ellenére a sérült és kidobott termények mennyisége továbbra is hatalmas az élelmiszerláncban, ezzel kapcsolatban pedig az alábbi következtetéseket fogalmazták meg:

- A tudományos eredmények szerzői sokszor nincsenek kapcsolatban a termelőkkel, illetve a feldolgozási folyamatokban dolgozó munkatársakkal.

- A valódi feldolgozás és a tesztkörülmények gyakran annyira eltérnek, hogy a kapott eredményeket nem lehet hasznosítani.
- Több esetben előfordul, hogy az ismertetett módszerek és eredmények további fejlesztésre szorulnak.
- Az egyes termények anyagaira jellemző mikroszintű viselkedés még nem teljesen ismert a sérülési folyamatok közben.

2.6. A szakirodalmi áttekintés összefoglaló értékelése

A gyümölcsök gépi betakarítása és manipulálása során keletkezett sérülések sok esetben nem észlelhetők azonnal. Ha a károsodott és romlásnak indult termény nem ismerhető fel és nem távolítható el a feldolgozási folyamatból, akkor az a vele együtt tárolt gyümölcsök minőségére is rossz hatással lehet. Különböző képalkotási (pl. spektrális vagy hőkamerás) eljárásokkal a belső és szemmel nem észrevehető sérülések is feltárhatók, legtöbbször azonban a mechanikai sérülés megelőzése az elsődleges cél, hiszen a veszteséget is minimalizálni kell.

A sérülések a gyümölcsökkel érintkező gépi felületek optimális kialakításával (Csizmazia, 2001), valamint a szállítási és tárolási körülmények megfelelő biztosításával is megelőzhetők. Az erre irányuló vizsgálatok során legtöbbször sérülési határértékeket állapítanak meg:

- rázógépes betakarításnál az adott termény megengedhető esési magasságát,
- tárolásnál a gyümölcsoszlop súlyából adódó statikus terhelést,
- szállításnál pedig a ládában kialakuló rezgés gyorsulásokat kell figyelembe venni.

A termények sérülésvizsgálata során az említett folyamatok közben keletkező terheléseket reprodukálják, eközben pedig regisztrálják a terhelés és az okozott deformáció nagyságát. A tönkremenetelt legtöbbször a biológiai folyáshatárral adják meg, mely a növény sejtszövetében fellépő kezdeti törés. A gyümölcs nem károsul maradandóan, ha a külső hatások a biológiai folyáshatárt kiváltó terhelési értékek alatt maradnak.

Fontos tehát, hogy a hatékony válogató rendszerek alkalmazása mellett a termény anyagi tulajdonságait és sérülési mechanizmusát roncsolásos vizsgálatok útján tanulmányozzuk, hiszen a tönkremeneteli folyamat csak így figyelhető meg. A sérülési határértékek (a biológiai folyáshatár vagy a felszínen is megfigyelhető töréspont) meghatározása azonban akadályokban ütközik, amikor a terhelési sebesség gyors. Mivel az alakváltozás megfigyelésére korábban is alkalmaztak nagy képkockasebességű felvételeket (Stropek és Gołacki, 2015), a módszer a gyümölchéj átszakadásának regisztrálásához is alkalmasnak bizonyulhat.

A nem megfelelő kezelésből adódó ütközések mellett a sérülések zömét a szállítás során kialakuló rezgések okozzák, ezért az ismételt terhelés hatására kialakuló kifáradási jelenség feltérképezése a gyümölcsöknél is elengedhetetlen – a folyamat roncsolásos vizsgálatokkal történő megfigyelése ráadásul kiesik napjaink kutatási irányvonalából. Éppen ezért Li és tsai. (2017) szintén az ismétlődő mechanikai hatásokkal dolgozó kutatások elterjedését szorgalmazzák.

A szállítási szimulációk során a legnagyobb károsodást előidéző frekvenciákat már egybehangzóan kimutatták (Fischer et al., 1992; Hinsch et al., 1993; Vursavuş and Özgüven, 2004), az ismétlődő terhelésekkel végzett roncsolásos vizsgálatok során a tapasztalatok alapján így a 10 Hz alatti frekvenciatartományt kell beállítani.

Megfelelő pontosságú, mérésekkel identifikált matematikai modell felállításával egyes vizsgálati esetek, illetve nehezen kivitelezhető mérési beállítások egyszerűbben és gyorsabban is megvalósíthatók számítógépes szimulációt alkalmazva. A terményeket jellemző viskoelasztikus matematikai modellek a jelenlegi kutatásban egy blokkorientált, könnyen módosítható szabályozó kör formájában kell megvalósuljanak.

A termény viszkoelasztikus tulajdonságai a terhelési és tehermentesítési folyamat során keletkező hiszterézissel szoros összefüggésben állnak (Lee et al., 2016). A görbe alapján meghatározható energiamutatók, és azok kifáradásos tönkremenetelre gyakorolt hatásai bizonyos anyagtudományi területeken már részletesen feltárt előzményekkel rendelkeznek (Delgadillo and Bahia, 2005). Mivel az aszfaltkeverékek anyagtulajdonságait szintén viszkoelasztikus modellekkel közelítik, a bejáratott energiaszámítási módszer a termények esetén is átvehető.

A szakirodalom alapján a saját tönkremeneteli modellek kidolgozásánál az alábbi szempontokra fókuszálók:

- a mezőgazdasági és kertészeti termények ismétlődő terhelése esetén általában a lengőpadon végzett, roncsolásmentes vizsgálatok az elterjedtek (Finney, 1970; Abbott and Massie, 1998; Berardinelli et al., 2015), az egyenletek felírásánál ezért a ritkán alkalmazott, de a kifáradásos tönkremenetel szempontjából elengedhetetlen roncsolásos módszert alkalmazom, hiszen a szövet károsodási folyamata, valamint a tönkremeneteli határértékek csak ezen az úton tanulmányozhatók,
- az energiatranszport vizsgálatok során pedig a kúszási görbére illesztett közelítő eljárások helyett az adatsor közvetlen integrálását végzem el, így a pontatlanságok elkerülhetők.

Az új módszerek segítségével

- az ismétlődő terhelés során bekövetkező tönkremeneteli időpontok definiálása és összehasonlítása,
- valamint a károsodási folyamatot jellemző tényezők mérése és mechanikai ellenállóképességre gyakorolt hatása tárható fel.

A termények egy-egy anyagtulajdonságának leírásához gyakran alkalmaznak többváltozós regressziós modelleket (Oveisi, 2012; Lee et al., 2016; Vursavus et al., 2017). A megközelítés a célkitűzések között megfogalmazott lineáris regressziós egyenletek felállításában tölthet be fontos szerepet, melyben a vizsgált gyümölcsök viszkoelasztikus modellegyütthatói, valamint az energiaszámításból adódó eredmények együttes befolyása kerülhet a középpontba.

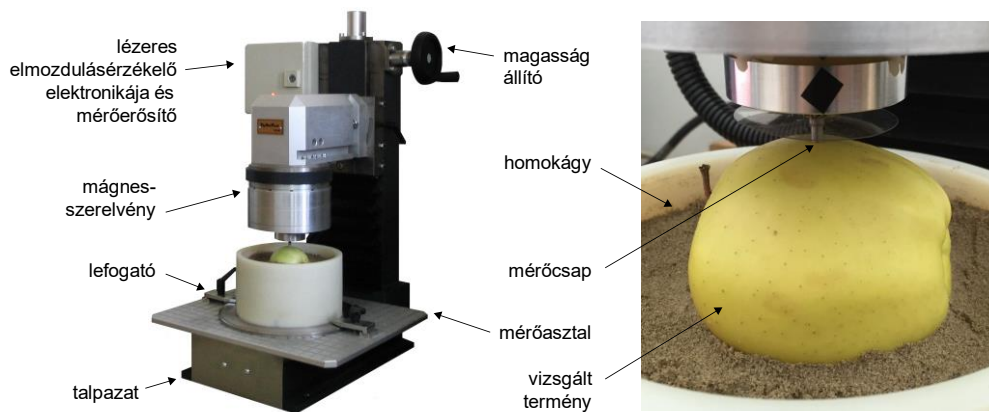
3. ANYAG ÉS MÓDSZER

Ebben a fejezetben a sérülésvizsgálatokhoz alkalmazott berendezés és mérőrendszer működését, valamint az adatok feldolgozása során alkalmazott módszereket, összefüggéseket, és a termények anyagi viselkedését leíró matematikai modellt ismertetem.

3.1. A mérésekhez használt eszközök

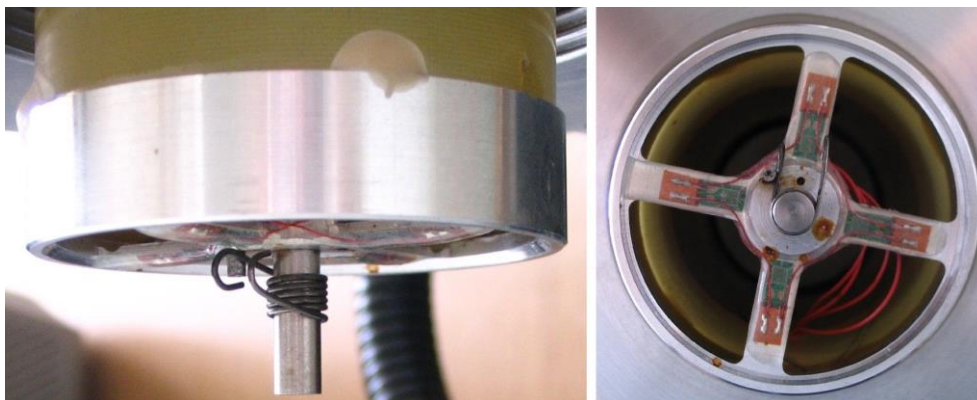
3.1.1. A DyMaTest és a mérőrendszer

Munkámban a hazánkban is növekvő piaci jelentőséggel bíró Golden Delicious almák és Packham körték anyagtulajdonságaira koncentráltam. A kompressziós vizsgálatok során a terményfelületek terhelése egy mérőcsap segítségével valósult meg, a mérések pedig a kifáradás tanulmányozása érdekében egy ismétlődő nyomóerő beállításával a gyümölcsök tönkremeneteli határáig történnek. Ehhez a Mezőgazdasági Gépesítési Intézet által rendelkezésemre bocsátott DyMaTest anyagvizsgáló berendezést használtam (3.1. ábra).



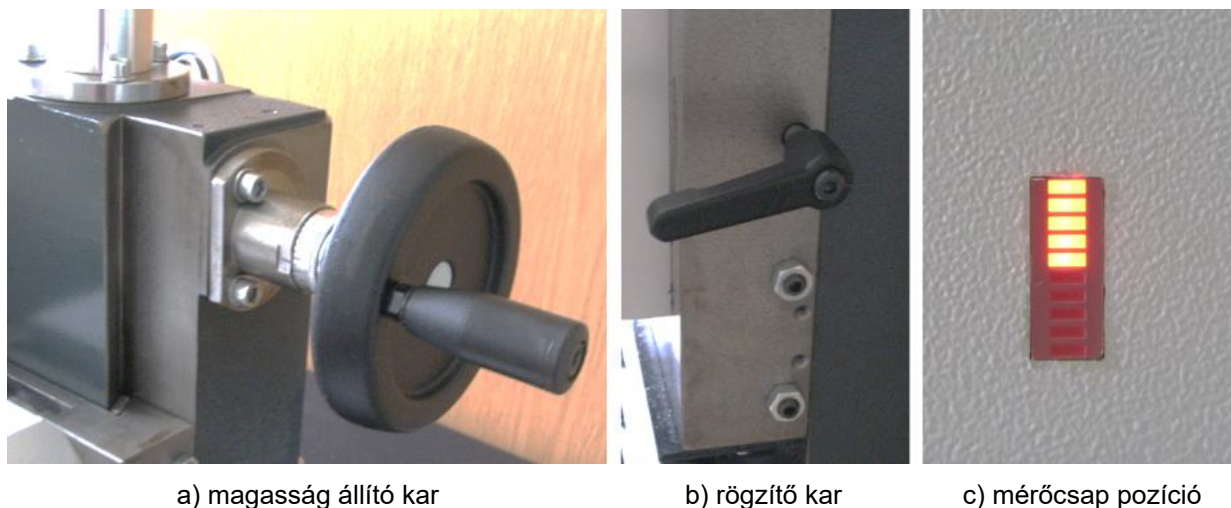
3.1. ábra A DyMaTest anyagvizsgáló berendezés felépítése

A gyümölcsök erő-deformáció görbét a DyMaTest különböző szenzorok segítségével rögzíti. A deformáció-adatok a mérőcsap elmozdulása alapján regisztrálhatók, ami egy OMRON ZX LT010 lézeres szenzor segítségével történik 10 mm-es tartományban, 3 μ m-es felbontással - ez a termények teljesen rugalmas, kis alakváltozási tartományban történő mérésére is alkalmassá teszi az eszközt. Az erőmérést egy egyedi tervezésű mérőcella teszi lehetővé (3.2. ábra), amelyben Kyowa KFG-2-120-C1-23 típusú nyúlásmérő ellenállások működnek (Petróczki és Fenyvesi, 2014). Az erő- és deformációadatok az idő függvényében is megjeleníthetők, a mérések során az adatrögzítéshez 2 kHz-es mintavételezést használtam.



3.2. ábra Mérőcsap és mérőcella

A berendezés mérőcsapja a mérések előtt a 10 mm-es tartományban tetszőlegesen elmozdítható, melynek pozíciója a lézeres érzékelőhöz tartozó kijelzőn valós időben is leolvasható. A kijelző az elektronikát tartalmazó doboz belsejében található, ennek ajtaján viszont egy 10 darab LED-ből álló visszajelzés is helyet kapott (3.3/c ábra), ahol 1 LED felvillanása a mérőcsap 1 mm-es elmozdulását jelenti. A gyümölcs homokágyban történő elhelyezése után a 3.3/a ábrán látható magasság állítóval a mérőcsap megfelelően pozícióba állítható termény felületét érintve, a biztosító karral pedig rögzíthető ez az állapot (3.3/b ábra).



3.3. ábra Mérőcsap pozíciójának beállítása és visszajelzése a DyMaTest anyagvizsgálón

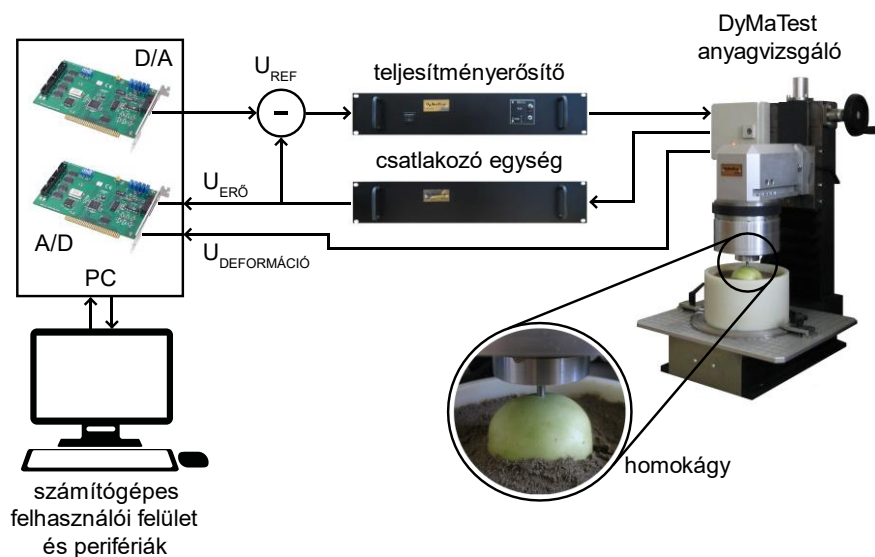
Az egyedi fejlesztésű DyMaTest berendezés statikus, dinamikus és ismétlődő erők kifejtésére is képes: szoftveres úton állandó és változó sebességű lineáris nyomóerők állíthatók be, az ismétlődő hatások vizsgálatához pedig szinuszos jelalakok alkalmazhatók testre szabható frekvencia és amplitúdó beállítással, 0-tól 200 Hz-ig terjedő frekvenciatartományban. A DyMatest fő műszaki paramétereit a 3.1. táblázat foglalja össze.

3.1. táblázat A DyMaTest műszaki paramétere (Petróczi és Fenyvesi, 2014)

Maximális nyomóerő:	15 N
Erő mérése:	Speciális tenzometrikus nyomócella
Deformáció:	10 mm-ig
Deformáció mérése:	Lézeres pozíciómérő (felbontás: 3 μ m)
Frekvenciatartomány:	0...200 Hz
Nyomócsap átmérő:	Ø 4 mm, Ø 5 mm, Ø 6 mm

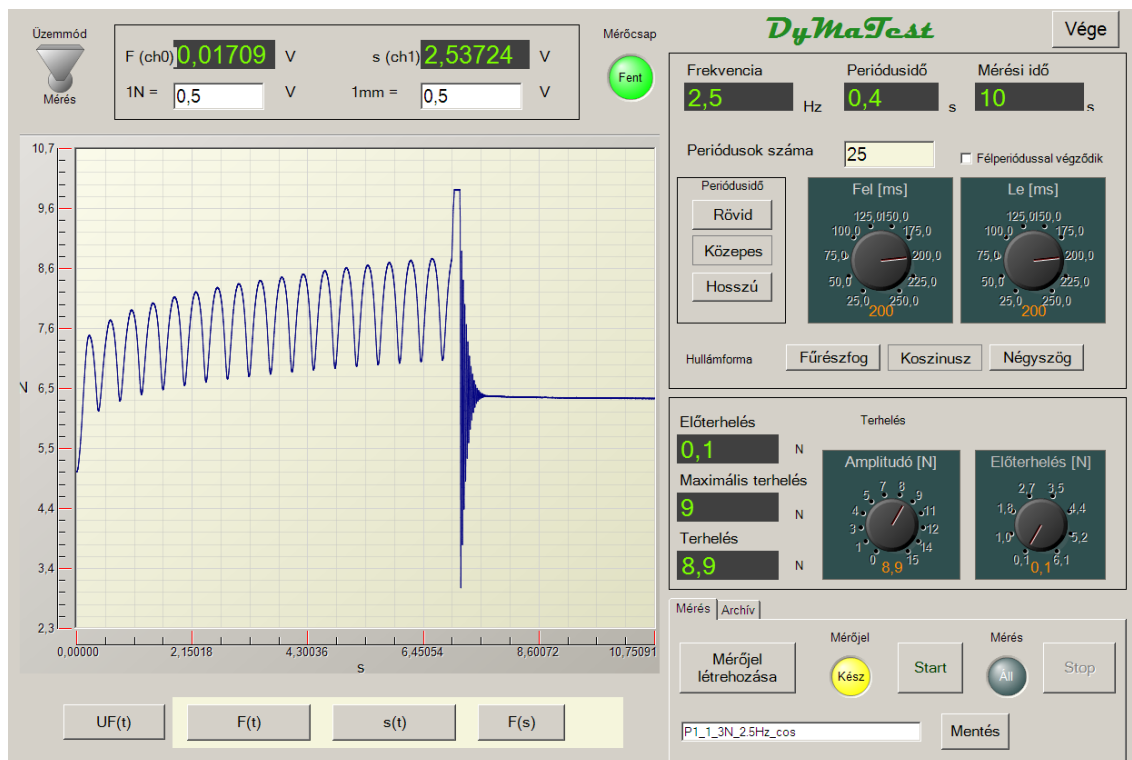
A mérések során a termények egy homokágyban helyezkednek el (3.1. ábra), a beágyazás körülbelül a termények feléig történik. A homok kúszásának meghatározásához a tényleges vizsgálatokat kontroll mérések előzték meg, ahol a terhelés egy teljesen rugalmatlan, 32 mm átmérőjű csapágygolyón keresztül történt. Mivel a fotoelektromos érzékelő mérési tartományában, a gyümölcsvizsgálatok során is alkalmazott terhelések esetén (3.1.2. fejezet) nem volt kimutatható elmozdulás, ezért a homok alakváltozása a gyümölcsök terhelési görbéin egyáltalán nem jelenik meg. A vizsgálatok előtt a homok előkészítése minden esetben nedvesítési, szítási és tömörítési műveletekből állt (Pillinger et al., 2018).

A 3.4 ábra a DyMaTest mérőrendszerét szemlélteti. A mérőrendszer szoftveres vezérlő-környezetében a beállított terhelés a számítógépes mérőkártyán (D/A) keresztül kimeneti jelként jut el az anyagvizsgáló eszközig, amelyben egy elektromechanikus átalakító a villamos jelet erőhatássá transzformálja.

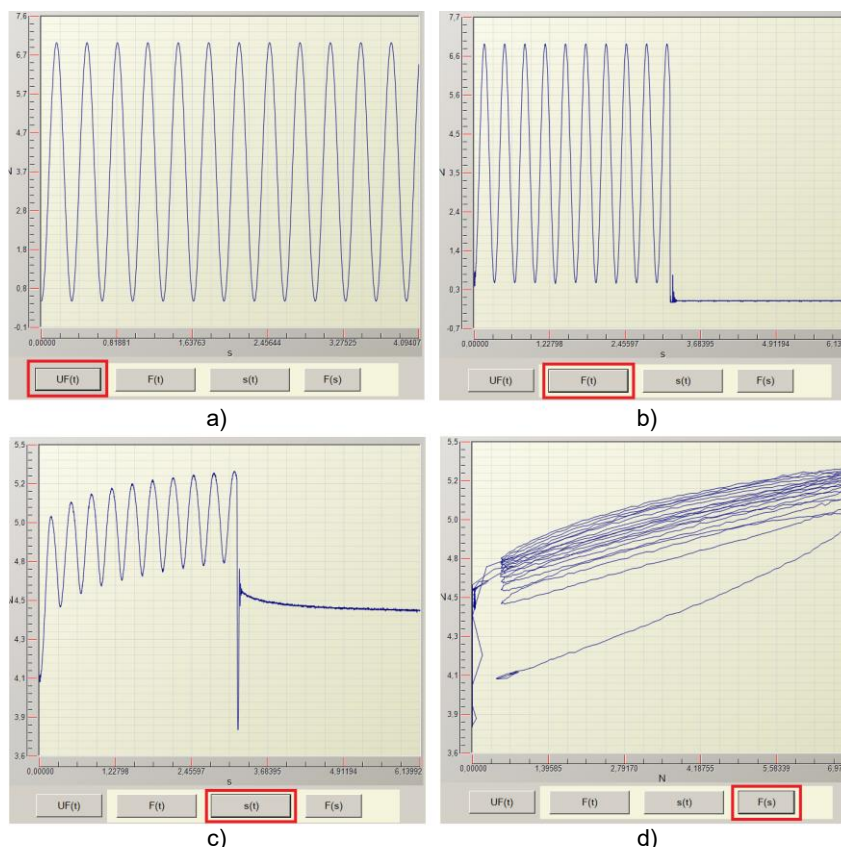


3.4. ábra A DyMaTest anyagvizsgáló és mérőrendszere

A mérések során kapott erő- és deformációadatok szintén egy mérőkártyán (A/D) keresztül jutnak el a számítógépig, ahol azok rögzítésére és azonnali megjelenítésére is lehetőség van: a szoftver az erő-deformáció függvény, vagy az időfüggvényének megtekintését is lehetővé teszi. A teljes kezelőfelület a 3.5. ábrán látható, a 3.6. ábra pedig a megjeleníthető grafikonokat mutatja.



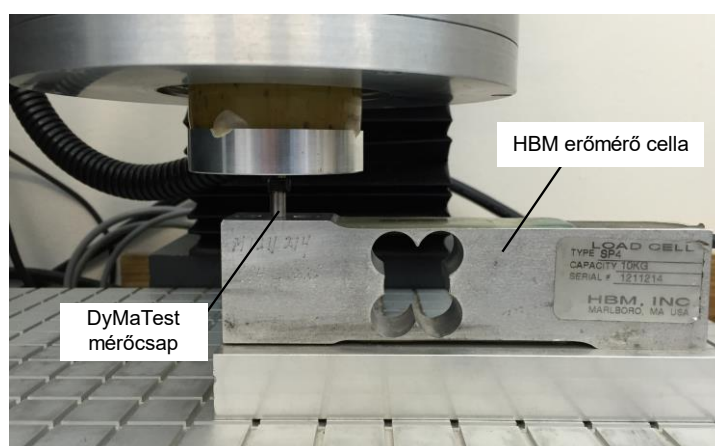
3.5. ábra A DyMaTest kezelőfelülete egy alakváltozási időfüggvényt megjelenítve



3.6. ábra A beállított terhelőerő és a mért terhelőerő időfüggvénye (a, b), valamint a deformáció időfüggvénye és erő-deformáció függvénye (c, d)

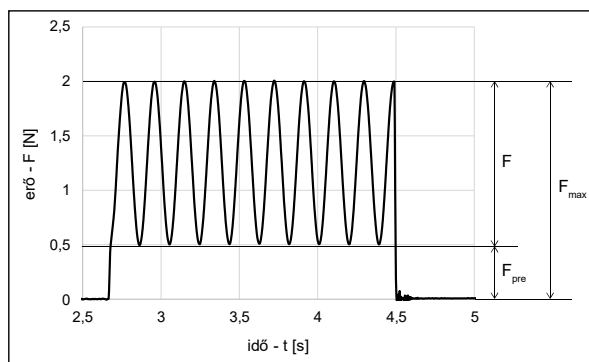
3.1.2. A terhelőerő beállítása

A mentett adatokat a mérések elvégzése után Excel és Matlab szoftverekkel dolgoztam fel. A beállított nyomóterhelés ellenőrzéséhez egy HBM SP4 típusú, 10 kg-os erőmérő cellát alkalmaztam (3.7. ábra). Az egyforma mérési körülmények biztosítása érdekében a mérőrendszerhez tartozó szoftverben egy előterhelési beállítás is elvégezhető.



3.7. ábra A beállított nyomóterhelés kontrollvizsgálata HBM erőmérő cellával

A 3.8. ábra a maximális nyomóerő (F_{\max} - jelen esetben 2 N értékre állítva) és az előterhelés ($F_{\text{pre}} = 0,5 \text{ N}$) viszonyát szemlélteti. Az előterhelés a nyomóerőhöz képest általában elhanyagolhatóan kis értékű, aminek hatása a termény rugalmas alakváltozási tartományában marad.



3.8. ábra A HBM erőmérő cellával rögzített szinuszos nyomóterhelés

Az előterhelés nagyságán kívül a nyomóerő időtartama is beállítható – ami a periodikus terheléseknél a ciklusszám megadásával történik, emellett pedig a frekvencia értéke is tetszőlegesen beállítható. A mérések során alkalmazott terhelések a vizsgált termények kifáradásos tönkremenetelig zajlottak, amikor a mérőcsap a termény héját átszakítja – ilyenkor a mechanikai ellenállás megszűnése miatt a terhelés is automatikusan leáll.

Az ismétlődő terhelésekkel végzett vizsgálatok elvégzéséhez egy origóból kiinduló, jól reprodukálható, egyszerűen leírható periodikus nyomóerő függvényre van szükség, ezen feltételeknek eleget téve az alábbi jelalakot alkalmaztam:

$$F_m = F_{\max}(1 - \cos(\omega t)), \quad (3.1)$$

ahol F_{\max} a periodikus terhelési függvény csúcserőértéke [N], ω a terhelés körfrekvenciája [s^{-1}].

A Golden és Packham termények eltérő terhelési ellenállása miatt különböző nyomóerők beállítására volt szükség: a Packham körték esetén a vizsgált frekvenciatartomány bizonyos értékeinél már az első ciklusok némelyikében megtörtént a tönkremenetel, a Golden almák viszont sokkal ellenállóbbak voltak, ezért a későbbiekben részletezésre kerülő károsodási idők és disszipált energia értékek összehasonlíthatóságát figyelembe véve a körték 4 N, az almák pedig 14 N terhelésnek lettek alávetve. A gyakorlatban ez azt jelenti, hogy a 4 N erőnél nagyobb beállításoknál, a vizsgált frekvenciaértékek többségénél a körték anyagában azonnali roncsolódás jönne létre, 14 N alatt pedig nagyságrendekkel hosszabb terhelési folyamatot kéne futtatni az almák látható károsításához. A 3.2. táblázat a Golden Delicious a Packham körték esetén alkalmazott terhelési beállításokat összegzi.

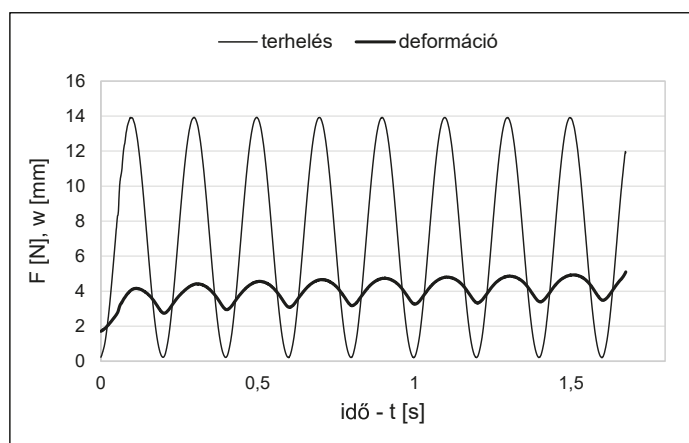
3.2. táblázat A mérések során beállított terhelőerők paraméterei

Golden Delicious			Packham		
Terhelési paraméter	Jelölés	Értéke	Terhelési paraméter	Jelölés	Értéke
Előterhelés	F_{pre}	0,2 N	Előterhelés	F_{pre}	0,2 N
Terhelés	F	13,8 N	Terhelés	F	3,8 N
Maximális Terhelés	F_{\max}	14 N	Maximális terhelés	F_{\max}	4 N
Frekvencia	f	2,5; 3,7; 5; 7,5; 10; 11,6 Hz	Frekvencia	f	2,5; 3,7; 5; 7,5; 10; 11,6 Hz

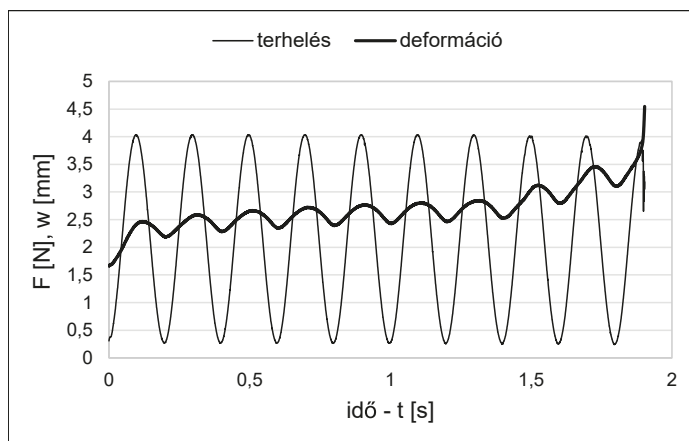
A szállítással foglalkozó kutatásokból megismert legveszélyesebb frekvenciatartományból (Fischer et al., 1992; Hinsch et al., 1993; Vursavuş and Özgüven, 2004), valamint a műszer beállítási lehetőségeiből adódóan a vizsgált frekvenciák a 2,5, 3,7, 5, 7,5, 10 és 11,6 Hz voltak, ezeket a beállításokat mindkét terményfajta esetén 25 ismétléssel valósítottam meg. Egy adott frekvencián a gyümölcsök egyszer lettek terhelve, a kísérletben így 25 db Golden alma és 25 db Packham körte vett részt, a tanulmány összesen 300 mérési adatsor kiértékelését ismerteti.

3.2. A termények alakváltozási görbéi

A 3.9. ábra az előző fejezetben ismertetett terhelés, és az általa létrehozott alakváltozás időfüggvényét mutatja egy Golden Delicious alma esetében, a 3.10. ábra pedig egy Packham körte esetében. Az alkalmazott ismétlődő terhelés hatására a 2.3. fejezetben ismertetett válaszfüggvényt kapjuk (2.5. egyenlet), ahol a dinamikus kúszási jelenség is megfigyelhető a terhelt gyümölcsök anyagszerkezeti viselkedésében: míg a nyomerő középértéke állandó, az alakváltozási görbe középértéke az idő függvényében folyamatosan növekszik. Mivel a terhelés nem a mérőcsap véghelyzetéből, hanem egy köztes állapotból indul, ezért az alakváltozási görbék kezdetei nem az origóban vannak.



3.9. ábra Golden Delicious alma alakváltozási görbéje az ismétlődő terhelés hatására



3.10. ábra Packham körte alakváltozási görbéje az ismétlődő terhelés hatására

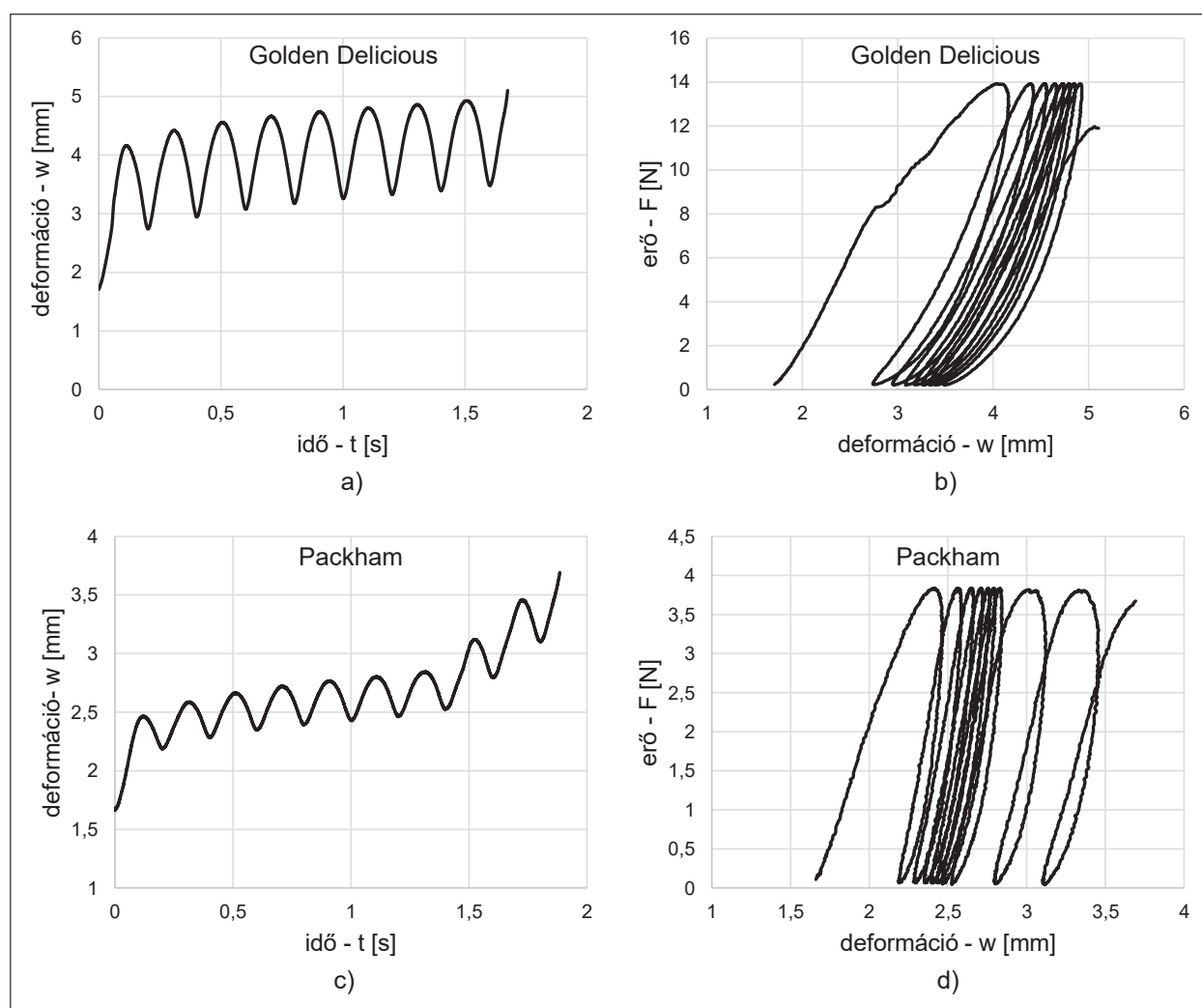
Felhasználva a periodikusan változó alakváltozás általános függvényét (2.5 egyenlet), és figyelembe véve az alkalmazott ismétlődő terhelést (3.1. egyenlet), a kapott alakváltozás a következőképpen írható le:

$$w_m = jt + k + w_{\max}(1 - \cos(\omega t - \delta)), \quad (3.2)$$

ahol w a deformáció [mm], j és k a lineáris kúszási folyamat együtthatói, w_{max} a periodikus alakváltozási függvény csúcserőke [mm], ω a szögsebesség [s^{-1}], δ pedig a terhelés és az alakváltozás időfüggvénye közötti fáziseltolódás.

A 3.2. egyenlet egy olyan elméleti közelítés, melyben a kúszási folyamatot a görbe középpértékének lineáris felfutásaként kezeljük, a jelenség leírását a szintén periodikus terheléssel dolgozó Kim és tsai. (2006) hasonlóan adják meg az aszfaltkeverékek jellemzésénél. Bár a kúszás második fázisához (2.2.2 fejezet, 2.9/a ábra) ez a közelítés megfelelő lehet, a jelenség kezdete és tönkremeneteli szakasza már nem linearizálható, így a módszer a teljes kúszási folyamatot tekintve pontatlanságokat hordoz.

A termények erő-deformáció diagramjain egy ismétlődő hiszterézis görbe figyelhető meg (3.11/b és d ábra), ahol a dinamikus kúszás jelenségére a maradó alakváltozás növekedése utal. A terhelési és tehermentesítési görbék által határolt terület a termény adott ciklusra jellemző energiamutatóival szoros összefüggésben áll.



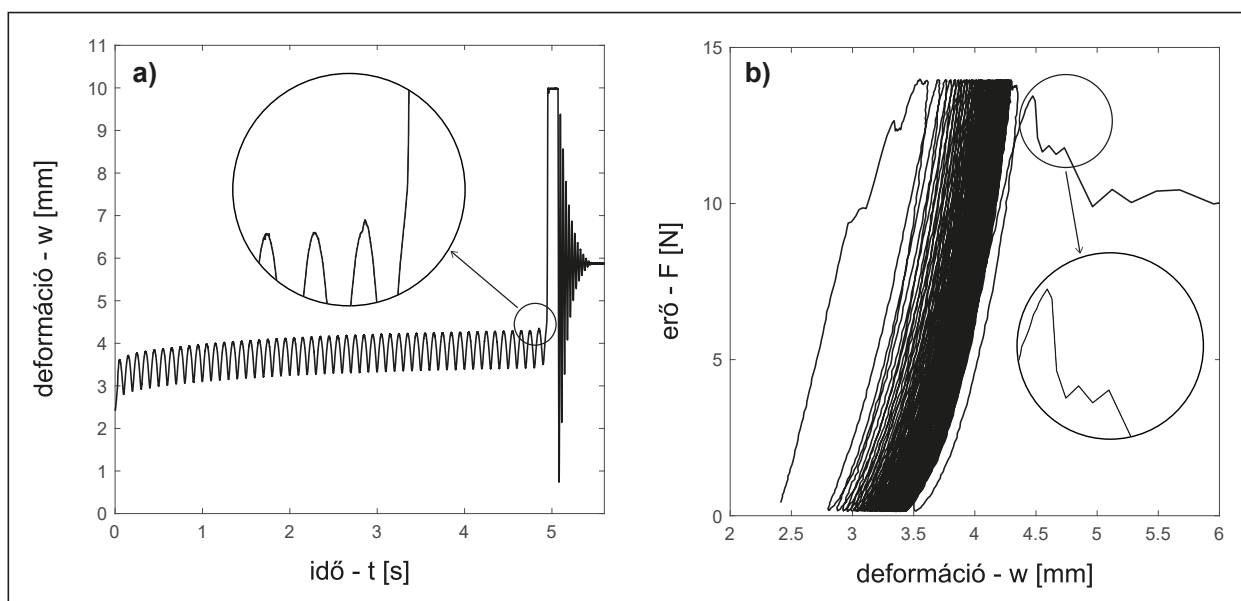
3.11. ábra Golden delicious almák és Packham körték alakváltozási görbéi

A mérések során kapott adatsorokat, és az azokból előállított görbéket a termények töréspontjáig dolgoztam fel és elemeztem, ezt a pontot pedig a következő fejezetben ismertetett képfeldolgozási módszerrel állapítottam meg.

3.3. Tönkremeneteli idő a töréspont meghatározásával

A viszkoelasztikus paraméterek és az energiamutatók meghatározásához a kapott adatsorokat a gyümölcsök töréspontjáig dolgoztam fel, ami akkor következik be, amikor a mérőcsap a héjat átszakítva egy kívülről is jól látható károsodást okoz a termény szöveteiben. Ilyenkor a héj és a gyümölcshús egyaránt károsodik, az anyagi viselkedést így nem egy homogén összetételű struktúra, hanem egy „szerkezet” modellezésével közelítem.

A 3.12. ábra vágtalanul mutatja be a teljes terhelési folyamatot egy Golden Delicious alma esetében: a töréspont után a mérőcsap szinte akadálytalanul halad át a károsodott szöveten, a gyümölcs mechanikai ellenállása teljesen megszűnik - a kapott görbéken a deformáció meredek növekedésbe kezd. A töréspontot a sejtszerkezet belsejében egy kezdeti törés előzi meg - a biológiai folyáshatár - ami a tönkremeneteli folyamat gyors lefolyása miatt ezeken a görbéken kimutathatatlan.



3.12. ábra A töréspont hozzávetőleges helye a deformáció időfüggvényén, valamint az erő-deformáció görbén egy Golden Delicious alma esetében

A deformáció időfüggvényén és az erő-deformáció diagramokon azonban legtöbbször a töréspont meghatározása is nehézségekbe ütközik. A tönkremeneteli határérték a deformáció időfüggvényén (3.12/a ábra) a meredek felfutás előtt keresendő, az utolsó felterhelés és a felfutás határán viszont sokszor nem észlelhető jól kivehető inflexiós pont. Minél nagyobb a frekvencia, a határállapot annál nehezebben észlelhető.

A tönkremenetel után az erőmérő cella igazi mechanikai ellenállást már nem érzékel, így az erő-deformáció görbén egy töréspont után megbízhatatlan adatok keletkeznek. A tönkremeneteli határpont azonban még ez előtt, valahol az utolsó felterhelési ciklusban következik be.

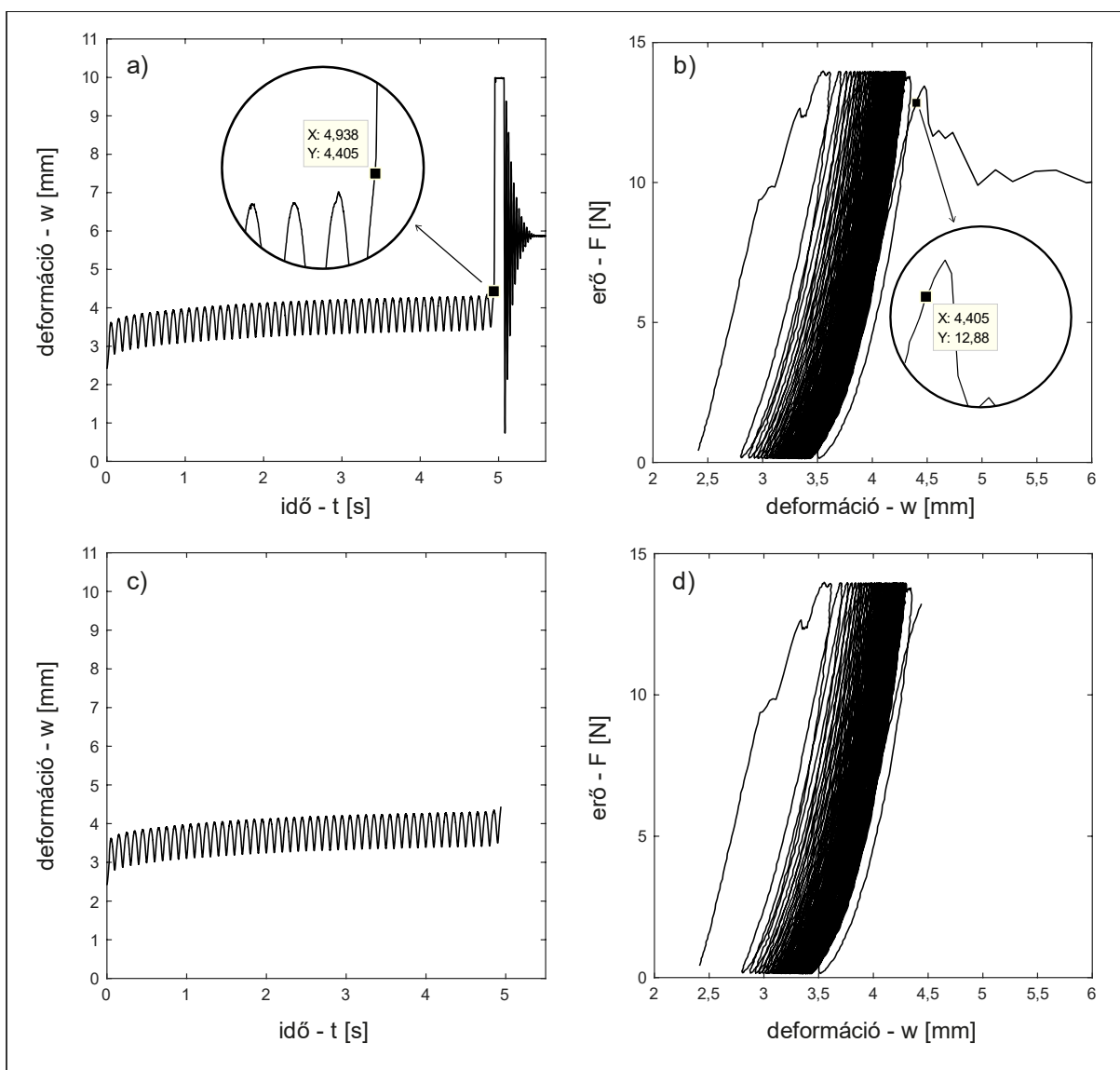
A pontosabb meghatározás érdekében a terhelési folyamatokat egy nagy képkocasebességű videórögzítővel is nyomon követtem. Az alkalmazott kamera 240 képkockát rögzít másodpercenként, a feldolgozáshoz pedig egy olyan videoszerkesztő szoftvert használtam, amivel a felvett anyag képkockáinként léptethető. A töréspont pillanatában a mérőcsap jól láthatóan kilép a kúszási fázis során lassan növekedő deformációs tartományból, és gyorsan hatol át a gyümölcs szerkezetén. A keresett töréspontot a tönkremeneteli szakasz első képkockája jelenti (3.13/b ábra), aminek a terhelési folyamatban az időpontját határozom meg. A 3.14. ábra egy Golden alma alakváltozási görbéin szemlélteti a tönkremeneteli időt.



a)

b)

3.13. ábra Nagy képkockasebességű felvétel elemzése



3.14. ábra A képkocka-elemzés alapján megállapított töréspont helye egy Golden Delicious alma esetén (a, b), a töréspontnál elvágott görbék a további elemzésekhez (c, d)

A töréspontot egy időparaméterként kezelem, ami a továbbiakban az adott terményre jellemző *tönkremeneteli idő*ként, vagy *tönkremenetelig eltelt időtartam*ként szerepel majd a számításaimban. Ennek jelölésére a TTF (time to failure) rövidítést használom (Gnedenko et al., 1999).

A videófelvételen a mérőcsap elmozdulásának első képkockája a DyMaTest által rögzített adatsor kezdeti értékeihez rendelhető, ezáltal a vizsgált képkockák száma a mért eredmények időskálájára átszámítható. A videós elemzés időbeli felbontása a képkockasebességből kiindulva:

$$T_{RK} = \frac{1}{f_{sK}} = \frac{1}{240} = 4,16\dot{6} \cdot 10^{-3} \text{ s} = 4,16\dot{6} \text{ ms}, \quad (3.3)$$

ahol T_{RK} a kamera időbeli felbontása - azaz a legkisebb időegység, amivel az adott képkocka az időskálán mozoghat [s], f_{sK} a kamera másodpercenkénti képkockasebessége [FPS – frames per second].

A 3.14. ábrán bemutatott mérésnél a tönkremeneteli időt az 1185. képkockánál észleltem. Ez azt jelenti, hogy az esemény az időskálán a következő értéket veszi fel:

$$TTF = n_K \cdot T_{RK} = 1185 \cdot \frac{1}{240} = 4,9375 \text{ s}, \quad (3.4)$$

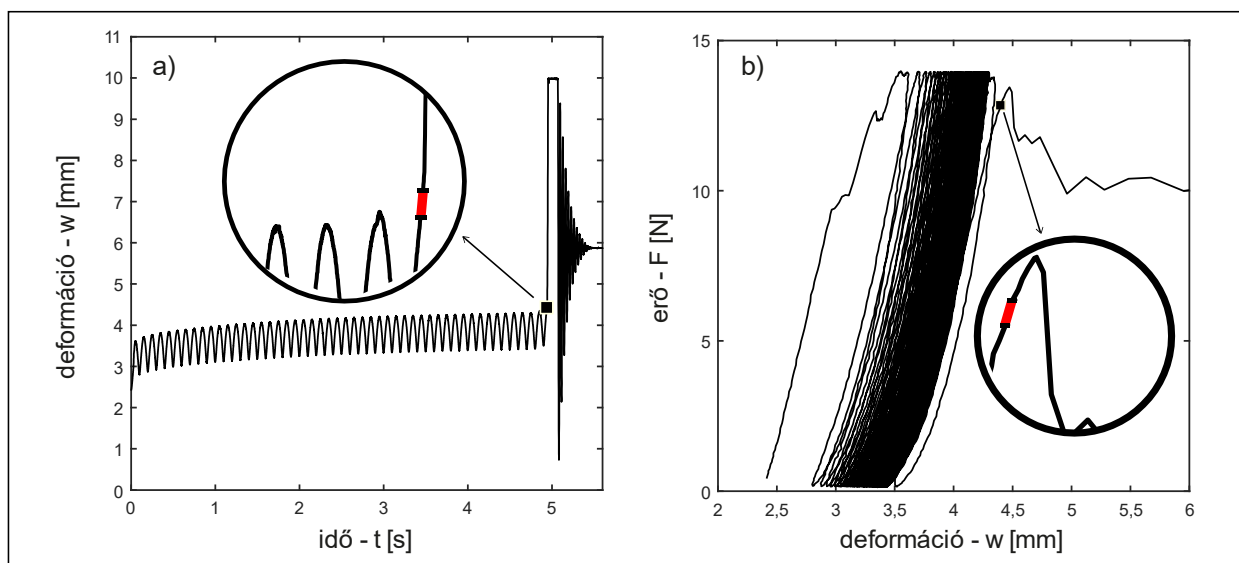
ahol n_K az adott képkocka száma.

A 3.4. egyenletben kapott eredményhez a DyMaTest segítségével rögzített adatsorban a 4,9376 másodperc esik a legközelebb. A 3.14/a ábrán tehát ez az időparaméter jelöli ki a töréspontot, a 3.14/b ábrán pedig az ehhez az értékhez tartozó erő-deformáció koordináta látható.

Mivel a kamera legkisebb felbontási egysége 4,16 milliszekundum, a képkocka-elemzés ekkora abszolút hibával működik. Ha 1 képkockához ezt az értéket rendeljük hozzá, a kiértékelt eredmény a

$$TTF = 4,937^{+0}_{-0,004} \text{ s} \quad (3.5)$$

formában írható fel. A tényleges tönkremeneteli idő a 3.15. ábrán jelölt tartományban helyezkedik el.



3.15. ábra Hibasáv a töréspont helyének behatárolására

A DyMaTest a mérési eredményeket 2 kHz-es mintavételezési frekvenciával rögzíti, ezért az adatsor legkisebb időegysége

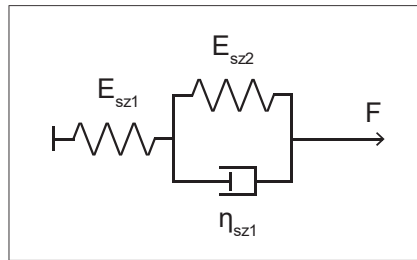
$$T_{RD} = \frac{1}{f_{SD}} = \frac{1}{2000} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ s} = 0,5 \text{ ms}, \quad (3.6)$$

ahol T_{RD} a DyMaTest időbeli felbontása [s], f_{SD} a DyMaTest mintavételezési frekvenciája [Hz]. Mivel ez a felbontás 8,3-szor akkora, mint a kamera felbontása, a 3.15. ábrán kijelölt tartományban a tönkremeneteli idő a DyMaTest által mért adatsorban 8 további értéket vehet fel.

3.4. Anyagtulajdonságok meghatározása

3.4.1. A viszkoelasztikus modell

Morrow and Mohsenin (1966) eredeti javaslata nyomán az almák viszkoelasztikus modellezésénél a Poynting-Thomson test alkalmazása Tscheuschner és Doan (1988), valamint Fenyvesi (2004) kutatásaiban is megjelenik. Matematikai leírásuk viszonylag egyszerű, a valóságos anyagok viselkedésére pedig jó közelítést adnak (Sitkei, 1981). A Poynting-Thomson test egy háromelemes modell, amellyel az almástermésű gyümölcsök kúszási és relaxációs folyamata is jól leírható. A Poynting-Thomson test felépítését a 3.16. ábra szemlélteti.



3.16. ábra A Poynting-Thomson test

Munkámban a Poynting-Thomson egyenlet azon együtthatóit keresem, amelyekkel a mérések során kapott kúszási folyamatokra a legjobb közelítés alkalmazható. Az irodalomkutatás 2.1. táblázatához képest a feszültség helyett erő értékekkel (és azok deriváltjával), a fajlagos nyúlások helyett pedig deformációval dolgoztam – hosszúságegységeknél méter helyett milliméterrel szerepel. A 3.16. ábrán szereplő kapcsolás így az alábbi egyenlettel írható le:

$$F_m + \frac{\eta_{sz1}}{E_{sz1} + E_{sz2}} \dot{F}_m = \frac{E_{sz1} E_{sz2}}{E_{sz1} + E_{sz2}} w_m + \frac{E_{sz1} \eta_{sz1}}{E_{sz1} + E_{sz2}} \dot{w}_m, \quad (3.7)$$

ahol E_{sz1} és E_{sz2} a modell rugalmas komponensei [N mm^{-1}], η_{sz1} a viszkózus elem [Ns mm^{-1}]. F_m a mérések során rögzített nyomóerő [N], w_m pedig a mérések során kapott deformáció [mm]. \dot{F}_m az erő deriváltja [N s^{-1}], \dot{w}_m pedig az alakváltozás deriváltja [mm s^{-1}].

Bevezetve az

$$a_0 = \frac{E_{sz1} E_{sz2}}{E_{sz1} + E_{sz2}}, \quad (3.8)$$

és az

$$a_1 = \frac{E_{sz1} \eta_{sz1}}{E_{sz1} + E_{sz2}}, \quad (3.9)$$

valamint a

$$b_1 = \frac{\eta_{sz1}}{E_{sz1} + E_{sz2}} \quad (3.10)$$

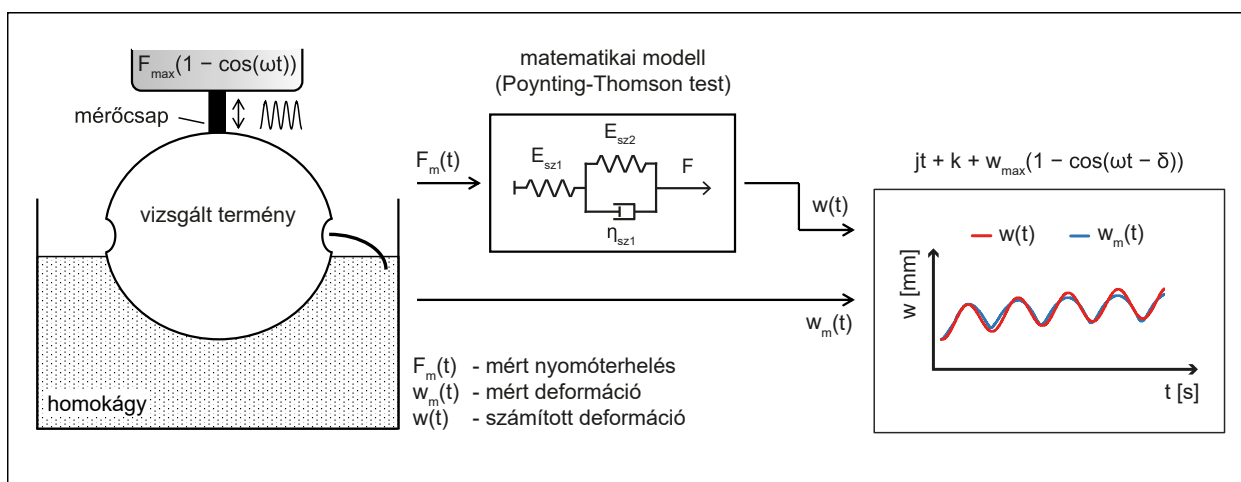
együtthatókat, a 3.7. egyenlet felírása:

$$F_m + b_1 \dot{F}_m = a_0 w_m + a_1 \dot{w}_m. \quad (3.11)$$

Az egyenlet a viszkoelasztikus együtthatók meghatározásához felállított számítógépes matematikai modell alapját képezi.

3.4.2. Simulink szabályozókör

A Matlab Simulink környezetben megvalósított matematikai modell tehát a kúszási vizsgálatok során gyűjtött mérési adatokkal identifikálható, ami a mérőcellával regisztrált nyomóerő, valamint a lézeres pozíciómérővel rögzített deformáció időfüggvényeit jelenti. A rendszer egyszerűsített blokkvázlatát a 3.17. ábra szemlélteti: a cél a $w_m(t)$ adatsor összehasonlítása a matematikai modell segítségével előállított $w(t)$ adatsorral, ezután pedig a közöttük lévő eltérések minimalizálása, és a modellegyütthatók meghatározása.



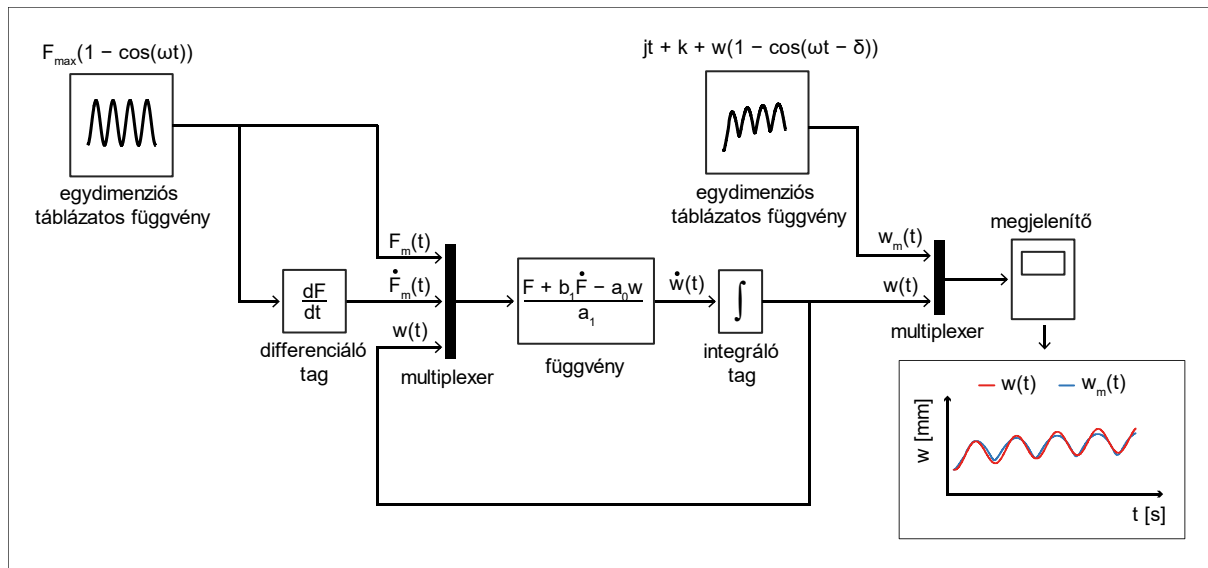
3.17. ábra Számítógépes matematikai modell identifikációja

Ha az alkalmazott matematikai modell egy szabályozókör formájában, ún. jelátviteli alaptagokból felépíthető, akkor lehetőség nyílik a modell blokkorientált megoldására (Farkas, 2001). Ilyenkor a Kelvin-Thomson visszavezetési elv alkalmazható, ennek első lépése a leíró egyenlet legmagasabb rendű tagjának kifejezése. Ez a 3.11 egyenletből kiindulva:

$$\dot{w}_m = \frac{F_m + b_1 \dot{F}_m - a_0 w_m}{a_1}. \quad (3.12)$$

Az egyenlet blokkorientált felírásához így differenciáló, integráló és összegző alaptagokra lesz szükség. Ahhoz, hogy a rendszer identifikálható legyen a mérési adatokból álló időfüggvényekkel (F_m és w_m), a Simulink „1-D lookup table” (egydimenziós táblázatos függvény) blokkját alkalmaztam.

Az átrendezett egyenlet egy „function” (függvény) blokkban adható meg, melynek kimenete a legmagasabb rendű tagot, a deformációsebességet adja. Az integrálás után a matematikai modell alakváltozási válaszfüggvényét kapjuk a mérések során is alkalmazott nyomóerő-függvény hatására. A felépített szabályozókör működését a 3.18. ábra szemlélteti.



3.18. ábra Simulink szabályozóköri működése

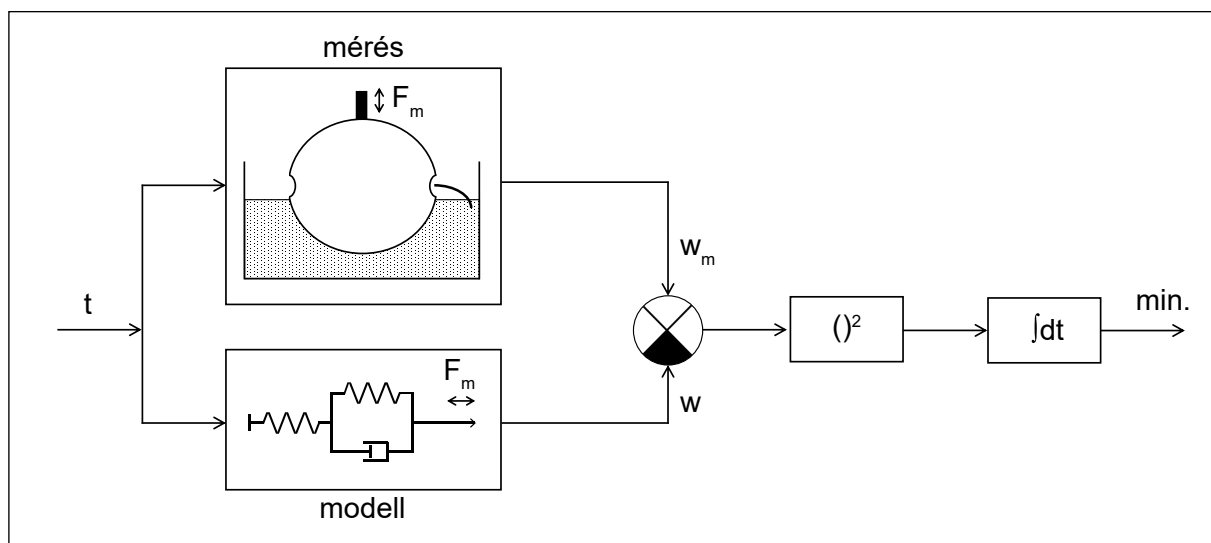
A 'scope' (megjelenítő) blokk a számított és a mérésekből származó eredményeket egyszerre jeleníti meg. A matematikai modell által adható legjobb közelítés érdekében a két adatsor közötti eltérést kell minimalizálni:

$$w_m(t) - w(t) \rightarrow \min. \quad (3.13)$$

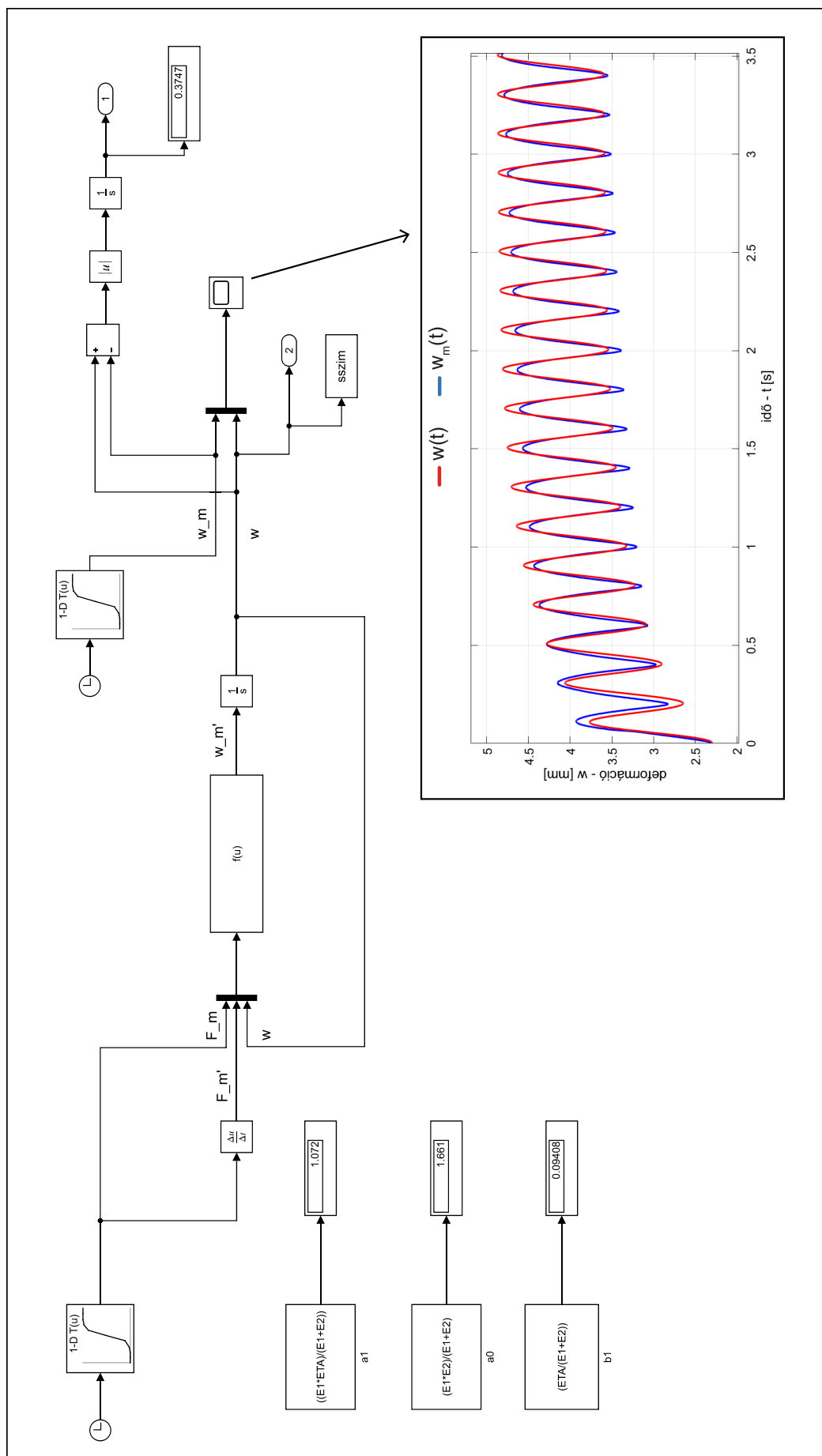
A minimalizálási folyamat elvégzéséhez a legkisebb négyzetek módszerét alkalmaztam, amely egy T időtartamú terhelésre vonatkozóan:

$$\int_0^T (w_m(t) - w(t))^2 dt \rightarrow \min. \quad (3.14)$$

Ezek alapján az identifikáció hatásvázlatát a 3.19. ábra szemlélteti. A 3.20. ábrán a tényleges Simulink blokkábra, valamint a minimumkeresés után megjelenített deformációs időfüggvények láthatók egy Golden Delicious alma esetén.



3.19. ábra A rendszeridentifikáció hatásvázlata



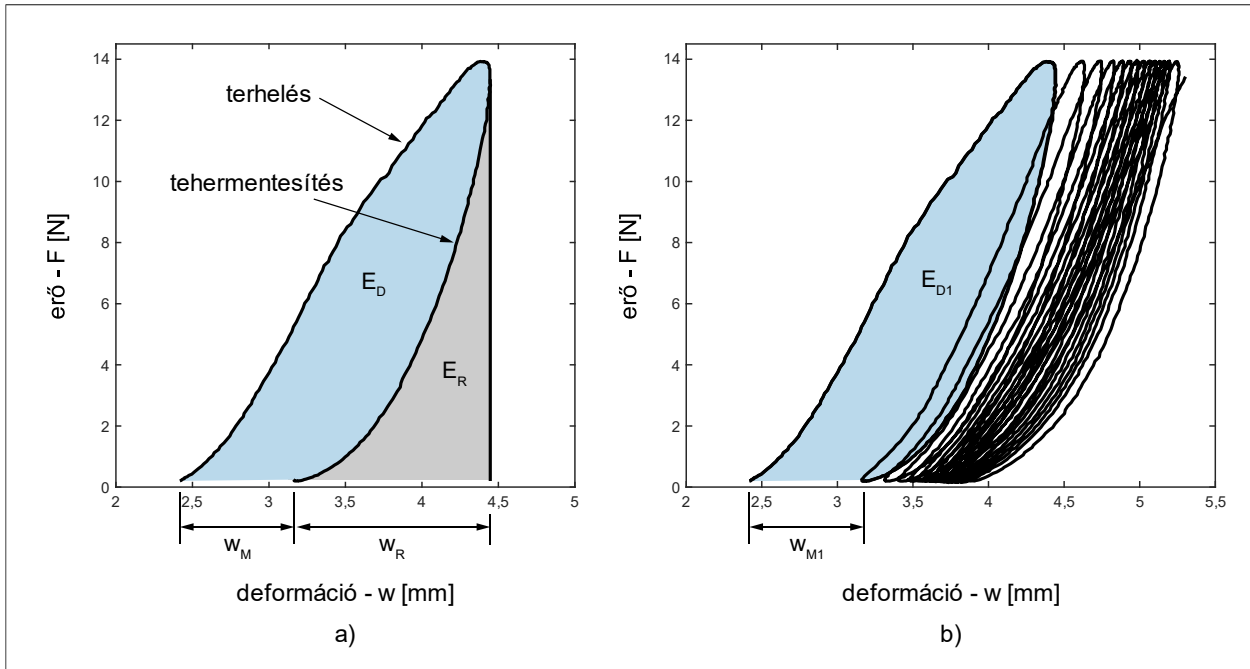
3.20. ábra Simulink szabályozókör a viszkoelasztikus modellparaméterek meghatározásához

A minimumkeresési folyamat futtatása után a 300 méréshez tartozó E_{sz1} , E_{sz2} és η_{sz1} modellegyütthatókat rögzítettem, és vizsgálati paraméterként felhasználtam. A matematikai rendszerrel végzett közelítések $R^2 = 0,967-0,998$ értékek között változtak.

3.5. A terményekben kialakuló energiateranszport

3.5.1. A termények mechanikai hiszterézis görbéi

Egy tetszőleges terhelési ciklusban megjelenített erő-deformáció görbe megmutatja a rugalmas és a visszafordíthatatlan folyamatokból származó alakváltozási és energiaviszonyokat (3.21/a ábra). Mivel a görbe a tehermentesítés után nem záródik, ezért az anyagban a következő ciklusig w_M maradó alakváltozás keletkezik, a terhelési csúcspont és a maradó alakváltozás közötti különbség pedig a w_R rugalmas alakváltozással egyenlő.



3.21. ábra Egy terhelési ciklus erő-deformáció görbéje, valamint a termény erő-deformáció görbéje a tönkremenetelig egy Golden Delicious alma esetén

Ugyanezzel a megközelítéssel, ha a teljes munkából (E) kivonjuk a rugalmas alakváltozáshoz tartozó energiát (E_R), akkor az adott ciklusra vonatkozó disszipált energiát kapjuk:

$$E_D = E - E_R. \quad (3.15)$$

Az energiaveszteség ugyanakkor a terhelési és tehermentesítési görbék közötti terület meghatározásával is kiszámítható:

$$E_D = \int_0^{t_{w_M}} F \frac{dw}{dt} dt, \quad (3.16)$$

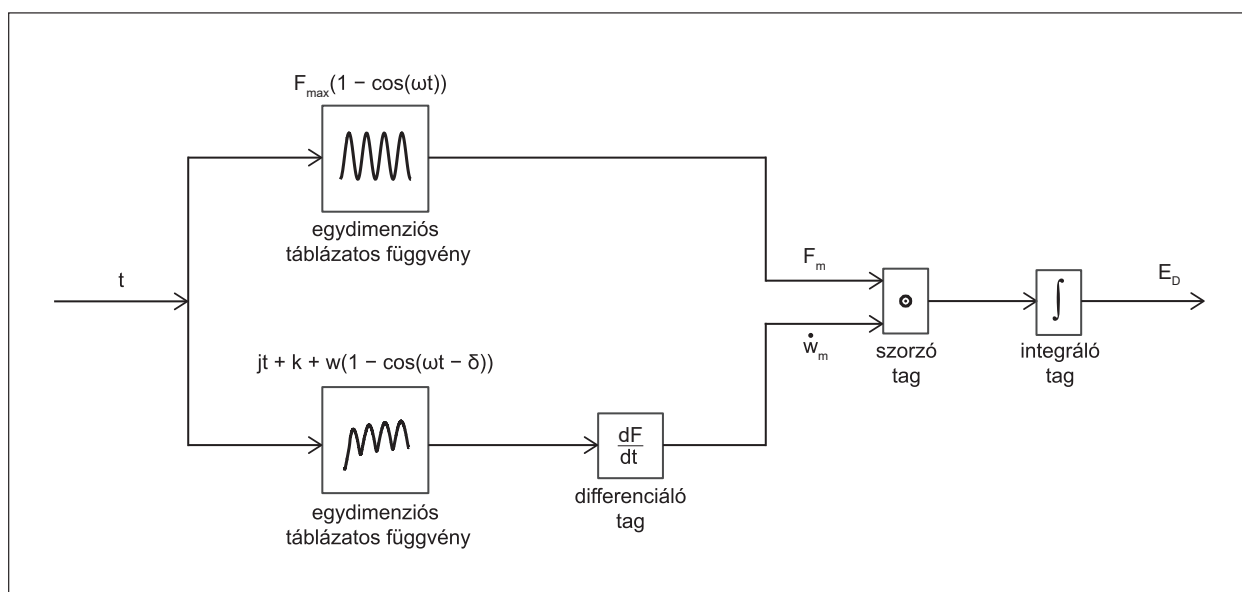
ahol t_{w_M} a terhelési folyamat kezdete és a tehermentesítés vége között eltelt idő [s], F pedig a vizsgálóberendezéssel előállított terhelési függvény [N].

A ciklikus alakváltozásra felírt egyenletet (3.2) behelyettesítve:

$$E_D = \int_0^{t_{wM}} F_{\max}(1 - \cos(\omega t))(j + \omega w_{\max} \sin(\omega t - \delta)) dt. \quad (3.17)$$

Az elméleti összefüggés, valamint a kapott mérési adatok alapján a disszipált energia értéke a paraméteres görbe numerikus integrálásával meghatározható. Az egyes görbék által határolt terület ciklusonként kiszámítható (3.21/b ábra).

Bár a kapott görbéket a 3.2 egyenlet általánosan és kielégítően leírja, de a paraméteres görbe adatsorai rendelkezésre állnak, így a kúszási folyamat elméleti közelítése, valamint a disszipált energiát leíró 3.17 egyenlet a numerikus módszer alkalmazása miatt az energiaszámításhoz nem szükségesek, ezért a korábban felmerülő pontatlanságok elkerülhetők. Ehelyett a 3.16 egyenletet Simulink környezetben valósítottam meg, melynek hatásvázlata a 3.22. ábrán látható.



3.22. ábra Disszipált energia meghatározása Simulink környezetben

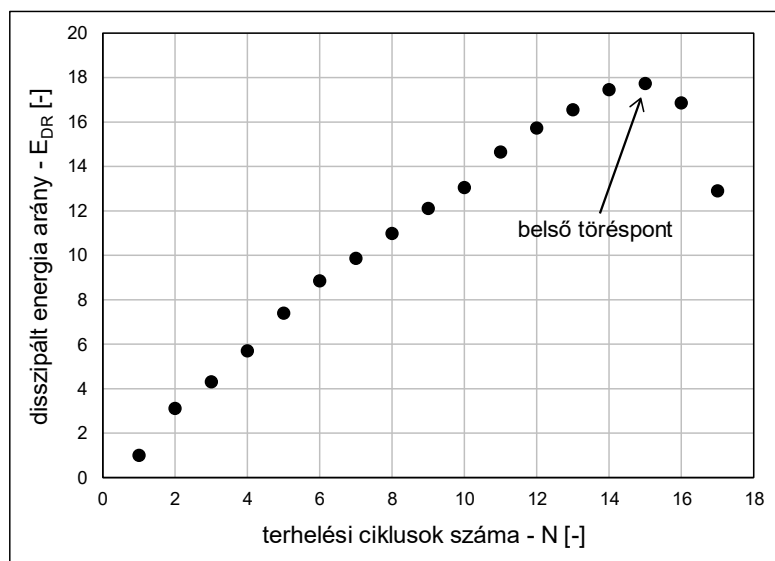
3.5.2. Belső töréspont meghatározása

A 2.4.2. fejezetben ismertetett számítási módszert alkalmazva, a ciklusonként meghatározott energiavesztés értékekkel egy újabb tönkremeneteli paraméter definiálására is lehetőség nyílik. A szakirodalmi áttekintésben is hivatkozott disszipált energia-arány (2.11. egyenlet), melyet a különböző aszfalttrétegek reológiai vizsgálatánál alkalmaznak (Delgadillo and Bahia, 2005):

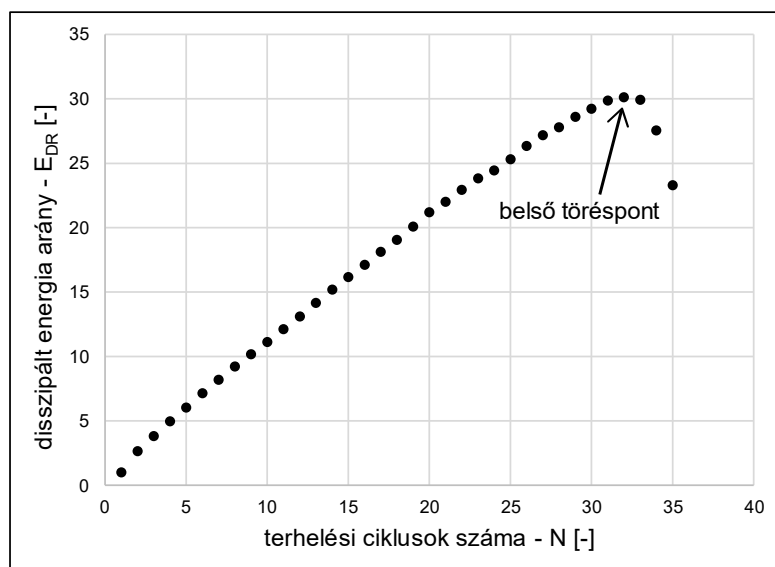
$$E_{DR} = \frac{\sum_{i=0}^n E_{Di}}{E_{Dn}},$$

ahol E_{Di} az adott ciklusig összegzett energiavesztés [mJ], E_{Dn} pedig az adott ciklus energiavesztése [mJ]. A hivatkozott kutatásban a disszipáltenergia-arány (E_{DR}) a ciklusszám függvényében ábrázolva két kitüntetett ponton is utal a belső károsodásra: amikor a függvény kezdeti felfutási meredeksége 10%-ot zuhan, az aszfalt belsejében a repedésképződés elindul, a görbe töréspontja pedig a kifáradásos tönkremetelt jelzi.

A gyümölcsök esetében az energiahalmozódási folyamat a legtöbb esetben nem jellemezhető a kezdeti meredekségtől való eltéréssel - ez talán a mérések viszonylag gyors lefutási idejének tudható be - de a belső töréspont a jelenlegi kísérletek során is jól kivehető (3.23. és 3.24. ábra).



3.23. ábra A kifáradásra utaló belső töréspont a disszipált energiákból képzett hányados alapján egy Golden Delicious termény esetén



3.24. ábra A kifáradásra utaló belső töréspont a disszipált energiákból képzett hányados alapján egy Packham körte esetén

A kifáradással járó tönkremenetel tehát kétféleképpen is jellemezhető: egy belső törésponttal a halmozódó disszipált energiák tipikus görbéjén (3.23. és 3.24. ábra), valamint a héj átszakadásánál regisztrált időponttal (3.3. fejezet). A kísérletek során mindkét esetre figyelmet fordítottam, a két gyümölcsfajta tönkremenetelének frekvenciafüggése mellett a sejtszerkezet belsejében keletkező károsodás és a külső roncsolódás idejét is összehasonlítottam.

Mivel az energiamutatók között a belső töréspontra utaló paraméter kapcsolódik szorosan a károsodási határállapot leírásához, a többváltozós tönkremeneteli modell felírásánál ezekre az eredményekre támaszkodtam. A továbbiakban a töréssel járó tönkremeneteli időt TTF_K , az energiahányados alapján meghatározott károsodás idejét pedig TTK_B jelöléssel adom meg.

3.6. A tönkremeneteli modell paraméterei

3.6.1. A mérésekkel meghatározott paraméterek összefoglalása

Az előző fejezetekben ismertetett mérési eredmények a tönkremeneteli modell alapját képezik. A paraméterek a nyomóterhelések során regisztrált adatsorok elemzéséből, valamint a videós képkockaelemzésből származnak, emellett pedig a terhelési beállítások bizonyos értékei is szerepelnek. A paramétereket a 3.3. táblázat ismerteti.

3.3. táblázat A mérések során kapott paraméterek

Paraméter	Jelölés	Leírás	Mértékegység
Tönkremeneteli idő	TTF _B	termény belső töréspontjáig eltelt időtartam	s
	TTF _K	termény külső töréspontjáig eltelt időtartam	s
Viszkoelasztikus modellegyütthatók	E _{sz1}	rugalmas elem	N mm ⁻¹
	E _{sz2}	rugalmas elem	N mm ⁻¹
	η _{sz1}	viszkózus elem	Ns mm ⁻¹
Disszipált energia	E _{DRmax}	disszipált energia arány csúcsértéke	-
Frekvencia	f	az ismétlődő terhelés frekvenciája	Hz

A vizsgálatok során egy terményen minden vizsgálati frekvenciához (2,5, 3,7, 5, 7,5, 10 és 11,6 Hz) tartozik egy tönkremeneteli idő, három viszkoelasztikus modellparaméter, és egy csúcsérték a disszipált energiahányados ciklusfüggvényéről. A mérések 25 Golden Delicious alma és 25 Packham körte ciklikus terhelésével zajlottak.

3.6.2. A tönkremeneteli időtartamok meghatározása

A termények mechanikai ellenállóképességét elsősorban a képkockaelemzéssel meghatározott tönkremeneteli idővel jellemzem, így a modellalkotásnál ez lesz az egyenlet függő változója. A cél, hogy a tönkremeneteli időt a mért paraméterek felhasználásával a legegyszerűbb közelítéssel írjam le. Az egyenletet megalkotásához az SPSS statistics szoftver linear regression modulját használom.

Hipotézis H1: Az ismétlődő terheléssel végzett vizsgálatoknál a termények belső töréspontjának időtartama a rögzített erő-deformáció adatsorokból és diagramokból közvetlenül nem állapítható meg, csupán az energiahányados segítségével. Ugyanakkor a képkockaelemzéssel meghatározott külső tönkremeneteli időtartam és az energiamutatók alapján meghatározott belső károsodási határérték között olyan összefüggés található, melynek segítségével a külső tönkremeneteli időtartam ismeretében a sejtszerkezet belsejében kialakuló kezdeti törés időpontja anélkül is megállapítható, hogy az energiatranszport elemzés kiértékelési lépéseit el kéne végezni.

Hipotézis H2: A Golden Delicious almák és Packham körték tönkremeneteléhez kapcsolódó, mérések útján meghatározott paraméterek segítségével egy olyan lineáris többváltozós modell állítható fel, amely a

$$\text{TTF} = a + bE_{sz1} + cE_{sz2} + d\eta_{sz1} + hE_{DRmax} \quad (3.18)$$

alakban keresendő, ahol a , b , c , d és h a közelítő egyenlet együtthatói.

4. EREDMÉNYEK

A fejezetben a ciklikus terhelések során rögzített tönkremeneteli időtartamok, a viszkoelasztikus modellparaméterek, valamint az energiaveszteségi-hányados csúcserőértékeinek frekvenciafüggését ismertetem, valamint a többváltozós regressziós modell felállítását, és annak megbízhatóságát mutatom be a vizsgált Golden Delicious almák és a Packham körték esetében.

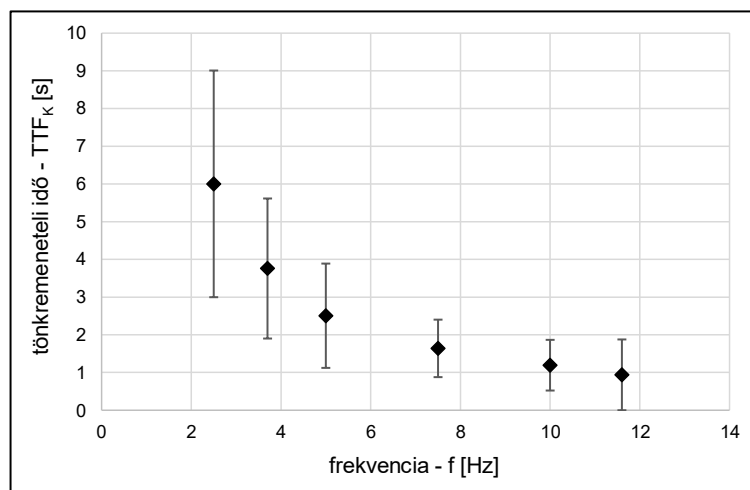
4.1. A külső és belső tönkremeneteli időpontok kiértékelése

4.1.1. A külső töréspontig eltelt időtartamok

A különböző mérési beállításokat átlagolva az almák a nagyobb frekvenciákon kisebb ellenállóképességet tanúsítanak, ezért a károsodás egyre hamarabb következik be, viszont a vizsgált körték többsége nagyobb rugalmasságot mutat az 5 Hz feletti beállításoknál, így a tönkremeneteli idő tekintetében a Packham terményeknél egy növekvő tendencia kezdődik. A 4.1. táblázat a 25 mérés átlagát összegzi a vizsgált frekvenciatartományban, a 4.1. és 4.2. ábrán pedig az adatok alapján készített diagramok láthatók, ahol a feltüntetett hibasávok az egyes mérési beállításoknál végzett ismétlések szórását mutatják. Az egyes terményeknél mért értékeket az M3.1. melléklet 8.1. és 8.2 táblázata tartalmazza.

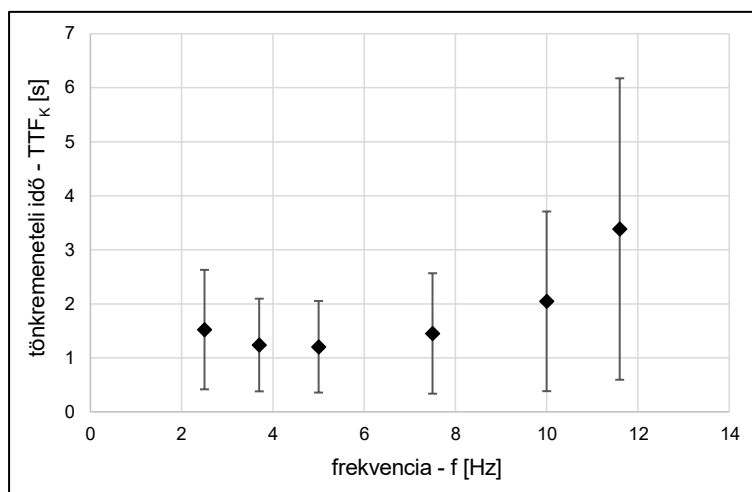
4.1. táblázat A külső töréspontig eltelt időtartam átlagai és az eredmények szórása

frekvencia [Hz]	Golden		Packham	
	TTF _K [s]	szórás - STTF [s]	TTF _K [s]	szórás - STTF [s]
2,5	6,002	3,006	1,522	1,105
3,7	3,758	1,857	1,237	0,858
5	2,505	1,383	1,203	0,847
7,5	1,639	0,762	1,451	1,114
10	1,192	0,672	2,046	1,662
11,6	0,938	0,938	3,384	2,790



4.1. ábra A külső töréspontig eltelt időtartamok frekvenciafüggése Golden Delicious almák esetén

Az almák esetén összegzett eredményeknél a kisebb frekvenciákon nagyobb eltérések tapasztalhatók, míg a nagyobb frekvenciaértékeknél a szórás kisebb, így a hibasávok szélsőértékei közelebb kerülnek az átlaghoz. A 4.2 ábra a Packham körték eredményeit mutatja.



4.2. ábra A külső töréspontig eltelt időtartamok frekvenciafüggése Packham körték esetén

Míg a tönkremereteli időtartamok szórásmezőjének szélsőértékei a Golden almáknál az átlaghoz hasonló trendet mutatnak, addig a körték esetén a szórásmezők minimumértékei már nem reprezentálják az átlagok frekvenciafüggését – a körtéknél tehát sokkal eltérőbb karakterisztikák tapasztalhatók a 25 mérés között.

Mivel a méréssorozat

$$s_{\text{TTF}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\text{TTF}_{K_i} - \overline{\text{TTF}_K})^2}{n-1}} \quad (4.1)$$

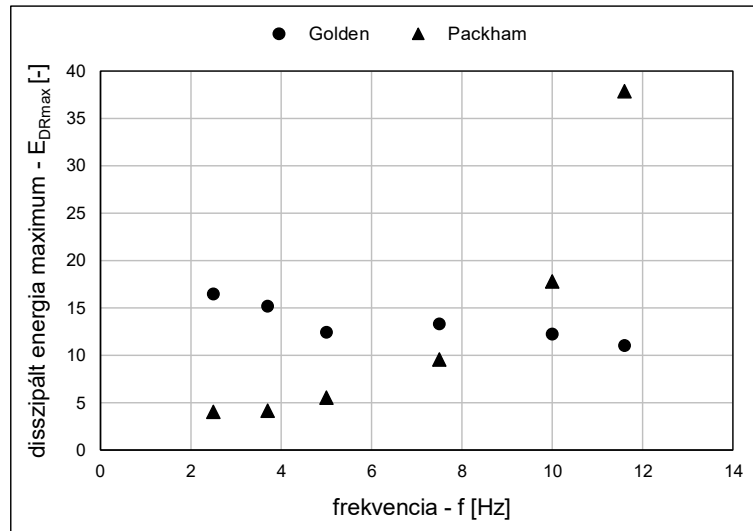
összefüggéssel meghatározott szórása mindkét termény esetén elég jelentős (4.1. táblázat, 4.1. és 4.2. ábra), a tönkremereteli idő leírásakor a további paraméterek (a modellegyütthatók és az energiamutatók) szerepe ezért kiemelten fontos vizsgálati szempontok, amikor a károsodási folyamatra gyakorolt hatásukat vesszük figyelembe.

A Golden almáknál kapott eredmények a várakozásoknak megfelelően alakultak, hiszen a nagyobb frekvenciák gyorsabb tönkremeretelhez vezetnek, a Packham körtéknél viszont a magasabb frekvenciabeállítások átlagosan nagyobb mechanikai ellenállóképességet váltanak ki a terményekből. Ennek legfőbb oka lehet a fejezet első bekezdésében is említett rugalmasság, ami eltérő kifáradási tulajdonságokat eredményez a két termény esetén – a körtéknél tapasztalható rugalmasabb szerkezeti viselkedés ezért sok esetben kedvezőbb tönkremereteli időtartamot biztosít a sűrűbben ismétlődő terhelések esetén.

4.1.2. A belső töréspontig eltelt időtartamok

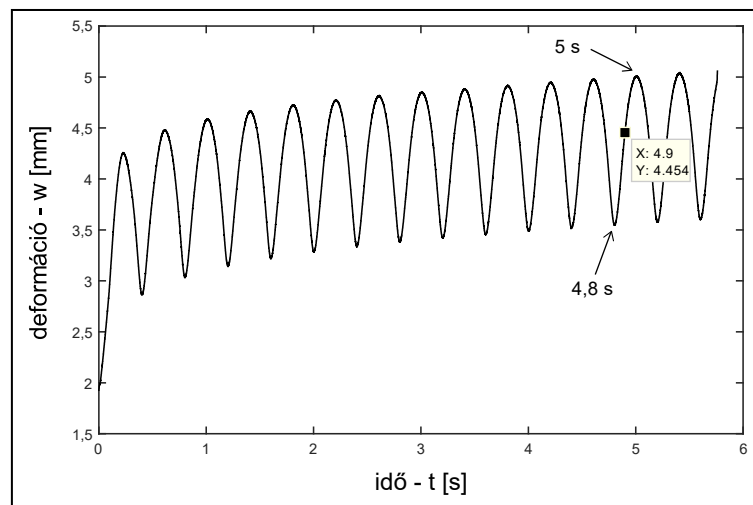
A külső és belső töréspontokhoz tartozó mérési eredmények összegzéséhez és összehasonlításához először a halmozódó disszipált energiákból képzett hányadosok maximális értékeinek frekvenciafüggését kell értékelni. Ehhez az adott terményeknél alkalmazott 25 ismétlés átlagát határoztam meg az egyes frekvenciabeállításoknál.

Az energiamutatók meghatározása a tönkremereteli időhöz hasonlóan ellentmondásos eredményekhez vezetett: A Golden almák esetén a ciklusonként regisztrált disszipált energiák összege, és ezzel együtt a tönkremeretelt jelző maximális hányadosértékek a nagyobb frekvenciák felé haladva csökkenő tendenciát mutatnak, a körtéknél ez a folyamat viszont teljesen fordítottan jelenik meg – ezúttal pedig a frekvenciafüggést jellemző trend is máshogyan alakul (4.3. ábra).



4.3. ábra A halmozódó disszipált energiák átlagértékeinek frekvenciafüggése

A belső és külső károsodásig eltelt időtartamok összevetéséhez a belső töréspont idejét is meg kell határozni: a maximális energiahányadoshoz tartozó ciklusszámnál a belső sérülés minden bizonnyal a felterhelés alatt következik be, mégpedig valahol az erő kifejtés kezdete és végpontja között (TTF_{Bmin} és TTF_{Bmax}). Ilyenkor tehát az adott ciklus felfutó szakaszán jelöltem ki a belső tönkremenetel időpontját, a szélsőértékek számtani közepénél (4.4. ábra).



4.4. ábra Belső töréspontig eltelt időtartam meghatározása az energiahányados csúcserkének ciklusszámanál

A kiértékelés a különböző frekvenciaértékek esetén a 4.2. táblázatban szereplő abszolút hibaértékeket hordozza, ami mindig az adott felterhelési és tehermentesítési időtartam negyede, hiszen a felterhelés a folyamat felét teszi ki, a középérték pedig a felfutás felénél található.

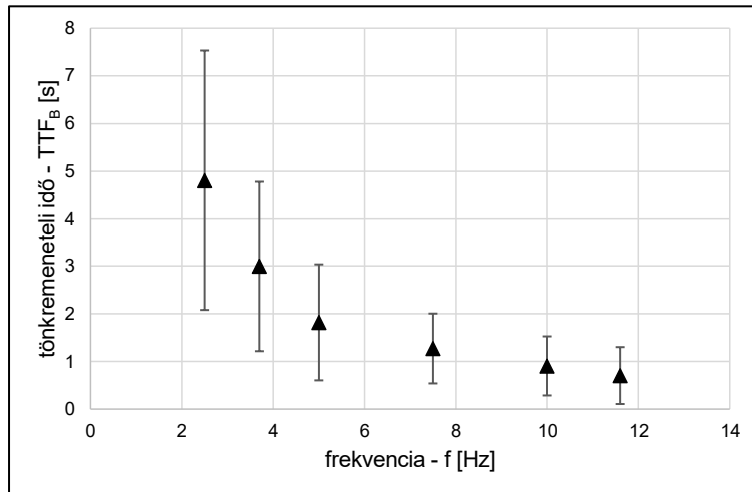
4.2. táblázat A belső töréspont kiértékelésénél adódó abszolút hiba

frekvencia [Hz]	2,5	3,7	5	7,5	10	11,6
abszolút hiba [s]	0,1	0,067	0,05	0,033	0,025	0,022

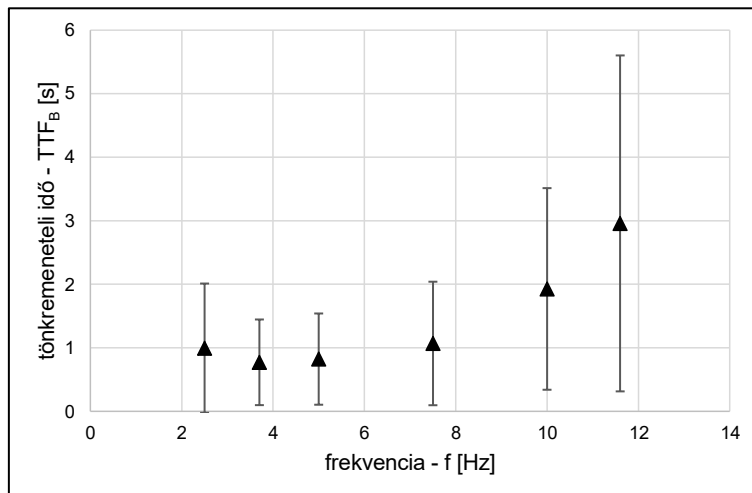
A belső töréspontok átlagolt időpontjait a 4.3. táblázat, valamint a 4.5. és 4.6. ábra összegzi.

4.3. táblázat A belső töréspontig eltelt időtartam átlagai és az eredmények szórása

frekvencia [Hz]	Golden		Packham	
	TTF _B [s]	szórás - STTF [s]	TTF _B [s]	szórás - STTF [s]
2,5	4,804	2,727	1,081	1,015
3,7	2,997	1,783	0,771	0,673
5	1,818	1,216	0,822	0,718
7,5	1,271	0,731	1,068	0,971
10	0,905	0,619	1,927	1,586
11,6	0,703	0,596	2,958	2,644



4.5. ábra A belső töréspontig eltelt időtartamok frekvenciafüggése Golden Delicious almák esetén

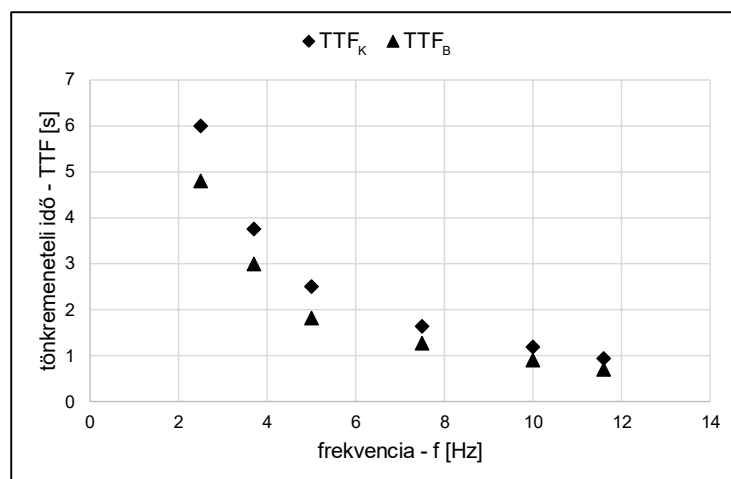


4.6. ábra A belső töréspontig eltelt időtartamok frekvenciafüggése Packham körték esetén

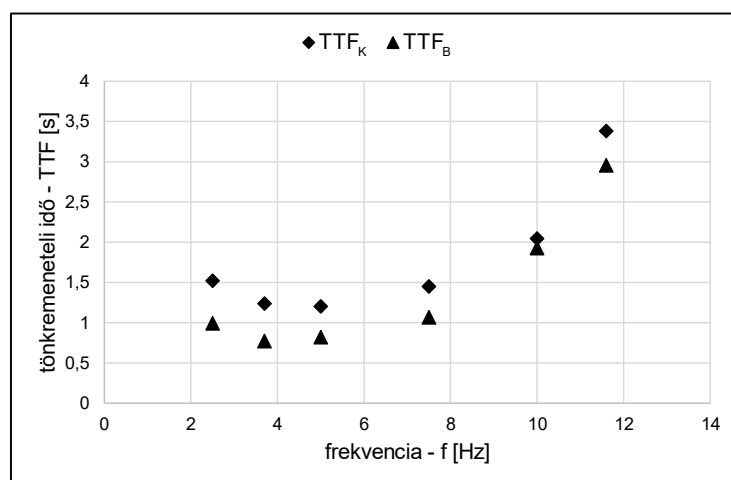
Az energiamutatók alapján kalkulált belső törésponti időtartamok frekvenciafüggése a képkockaelemzés során kapott eredményekkel azonos tendenciát mutat: az átlagértékek, valamint az adatsorok szélsőértékei és a szórás szintén hasonló az előző fejezetben bemutatott időtartamokhoz. Ez azt jelenti, hogy a sejtszerkezetben keletkező károsodási határérték és a külső töréspont közötti időtartam közel állandó, így a roncsolási határértékek megállapításával a belső károsodás időtartamára is következtetni lehet. Ennek megállapításához a frekvenciagörbék összehasonlítására lesz szükség.

4.1.3. Tönkremeneteli időtartamok összehasonlítása

A 4.7. és 4.8. ábra a külső és belső töréspontok frekvenciafüggését mutatja. A Golden almáknál kapott eredmények esetén a két károsodási mutató közötti időbeli eltérés a nagyobb frekvenciák felé haladva egyre jobban csökken - ez természetesen azzal is magyarázható, hogy a tönkremenetel bekövetkezése is egyre hamarabb megtörténik. A tönkremeneteli időtartamok aránya (R_{TTF}) azonban nincs szoros összefüggésben az alkalmazott frekvenciával, a mérési beállításokhoz tartozó átlagértékeket és szórásokat a 4.4. táblázat ismerteti.



4.7. ábra Külső (TTF_K) és belső (TTF_B) tönkremenetelig eltelt időtartamok frekvenciafüggése Golden Delicious almák esetén

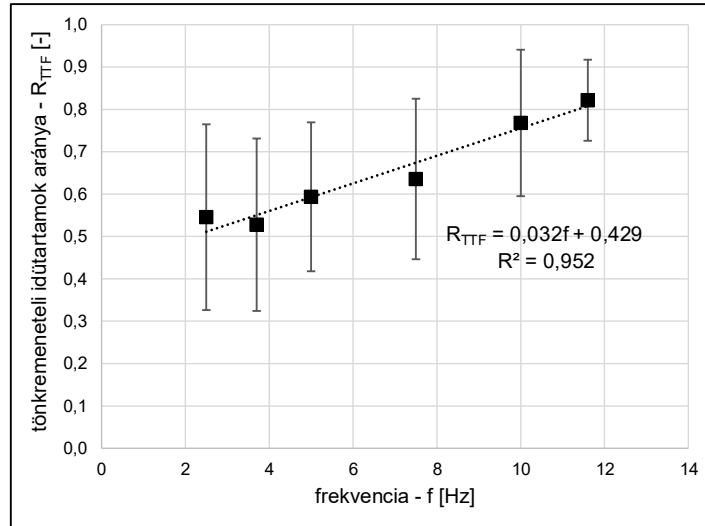


4.8. ábra Külső (TTF_K) és belső (TTF_B) tönkremenetelig eltelt időtartamok frekvenciafüggése Packham körték esetén

4.4. táblázat A tönkremeneteli időtartamok aránya és szórása

frekvencia [Hz]	Golden		Packham	
	R_{TTF} [-]	szórás - S_{RTTF} [-]	R_{TTF} [-]	szórás - S_{RTTF} [-]
2,5	0,771	0,079	0,546	0,219
3,7	0,756	0,099	0,528	0,203
5	0,701	0,147	0,594	0,175
7,5	0,744	0,175	0,636	0,189
10	0,709	0,110	0,768	0,172
11,6	0,663	0,161	0,822	0,095

A körték esetén az almákhoz képest konzekvens frekvenciafüggést kapunk a tönkremeneteli arány kiértékelésekor: az átlagértékek hányadosai a nagyobb frekvenciaértékek felé haladva lineárisan növekednek, a szórás pedig ezzel együtt csökken (4.9. ábra). Míg az értékek az almák esetén sokkal állandóbbak, a körték anyagi szerkezetében a belső sejtkárosodás és a külső roncsolódás között végbemenő tönkremeneteli folyamat az ismétlődő mechanikai hatás frekvenciájával összefüggésben áll.

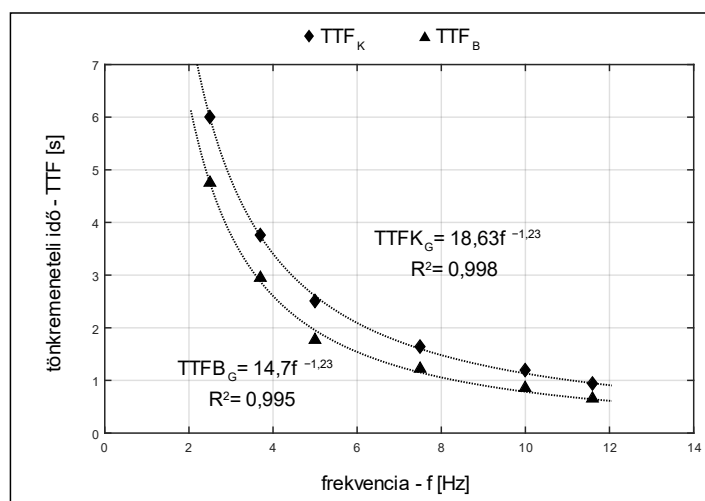


4.9. ábra A tönkremeneteli időtartamok hányadosa a frekvencia függvényében Packham körték esetén

Mivel a vizsgált frekvenciatartományban a tönkremeneteli mutatók viszonya a hányados alkalmazásával az almák esetén nem írható le egyértelműen, a károsodási határértékek kapcsolata a trendek összehasonlításával is megadható. A két termény esetén tapasztalható eltérő frekvenciafüggés miatt különböző közelítéseket kell alkalmazni, a Golden Delicious almáknál a

$$TTF_G = a_G f^{-b_G} \quad (4.2)$$

egyenletet használtam, ahol a_G és b_G a közelítés együtthatói. A közelítő görbék a 4.10. ábrán láthatók.



4.10. ábra A tönkremenetel frekvenciafüggésére felírt modellek Golden almák esetén

A külső tönkremeneteli időtartamoknál felírt

$$\text{TTFK}_G = 18,63 f^{-1,23}, \quad (4.3)$$

valamint a belső károsodási értékeknél használt

$$\text{TTFB}_G = 14,7 f^{-1,23} \quad (4.4)$$

egyenletekbe történő behelyettesítés után az alkalmazott modellek átlagértékekre vonatkozó pontosságát a 4.5. táblázat tartalmazza.

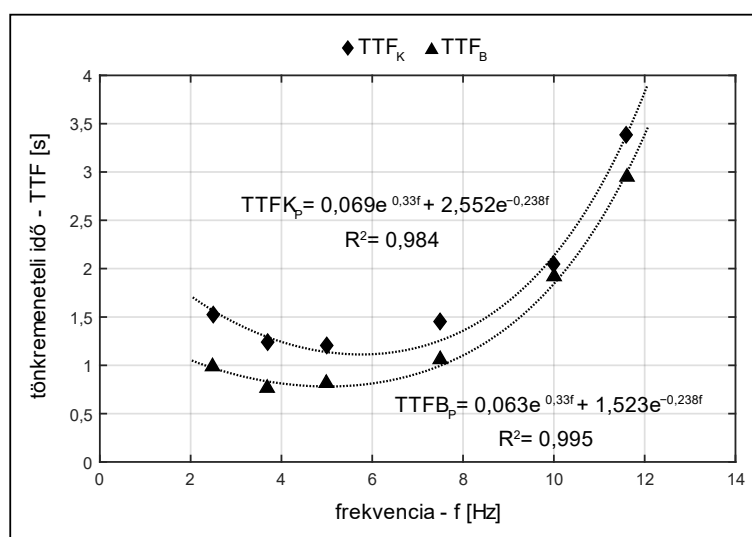
4.5. táblázat Frekvenciafüggésre felírt modellek pontossága Golden almánál

frekvencia [Hz]	Golden					
	TTF _K [s]	TTFK _G [s]	hiba [%]	TTF _B [s]	TTFB _G [s]	hiba [%]
2,5	6,002	6,036	0,553	4,804	4,763	0,879
3,7	3,758	3,727	0,849	2,997	2,941	1,907
5	2,505	2,573	2,698	1,818	2,030	11,676
7,5	1,639	1,563	4,657	1,271	1,233	2,986
10	1,192	1,097	7,981	0,905	0,866	4,362
11,6	0,938	0,914	2,562	0,703	0,721	2,555

A körtéknél tapasztalható tönkremeneteli tendenciák az almánál felírt közelítéssel egyáltalán nem jellemezhetők, ezekenél a terményeknél ráadásul olyan egyenletet kell alkalmazni, amivel a folyamat 5 Hz-nél bekövetkező szélsőértékét is kezelni lehet. Ezek alapján a

$$\text{TTF}_P = a_P e^{b_P f} + c_P e^{d_P f} \quad (4.5)$$

egyenletet használtam, ahol a_P , b_P , c_P és d_P a két részből álló exponenciális folyamat együtthatói. Az így definiált görbék a 4.11. ábrán láthatók.



4.11. ábra A tönkremenetel frekvenciafüggésére felírt modellek Packham körték esetén

A körték esetén a külső töréspontokra alkalmazott közelítés:

$$\text{TTFK}_P = 0,069 e^{0,33f} + 2,552 e^{-0,238f}, \quad (4.6)$$

a belső tönkremeneteli határértékekre pedig a

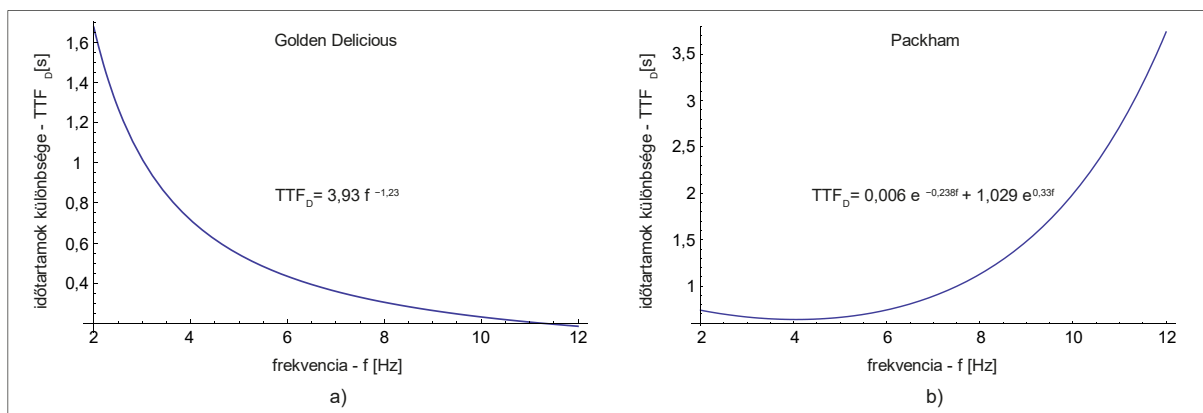
$$TTFB_P = 0,063 e^{0,33f} + 1,523 e^{-0,238f} \quad (4.7)$$

egyenletet használtam. A modellek átlagértékekre vonatkozó pontosságát a 4.6. táblázat ismerteti. A görbéknél a külső töréspont esetén 7,5 Hz-nél, a belső károsodási határállapotok között pedig 3,7 Hz-nél találhatók kiugró értékek.

4.6. táblázat Frekvenciafüggésre felírt modellek pontossága Packham körtéknél

frekvencia [Hz]	Packham					
	TTF _K [s]	TTF _{KP} [s]	hiba [%]	TTF _B [s]	TTF _{BP} [s]	hiba [%]
2,5	1,522	1,563	2,692	1,081	0,982	9,170
3,7	1,237	1,291	4,353	0,771	0,843	9,287
5	1,203	1,136	5,544	0,822	0,79	3,893
7,5	1,451	1,256	13,40	1,068	1,006	5,853
10	2,046	2,133	4,293	1,927	1,859	3,544
11,6	3,384	3,384	0,003	2,958	3,013	1,871

A kitevőkben szereplő együtthatók az egyes terményekre alkalmazott egyenletekben megegyeznek, így a függvényeknél a konstansok megváltoztatásával kapjuk meg a belső töréspontot a külső roncsolódás ismeretében. A 4.12. ábra a Golden és Packham terményekre alkalmazott egyenletek különbségét mutatja, ami behelyettesített formában megadja, hogy az egyes frekvenciákon mekkora az eltérés a két károsodási mutató között. A 4.7. táblázat az alkalmazott modelleket összegzi.



4.12. ábra A tönkremeneteli mutatók közötti eltérés függvénye az egyes frekvenciákon Golden Delicious almák és Packham körték esetén

4.7. táblázat A tönkremeneteli időtartamokra felírt közelítések összegzése

termény	közelítő függvények		függvények különbsége
Golden	külső töréspont	$18,63 f^{-1,23}$	$3,93 f^{-1,23}$
	belső töréspont	$14,7 f^{-1,23}$	
Packham	külső töréspont	$0,069 e^{0,33f} + 2,552 e^{-0,238f}$	$0,006 e^{-0,238f} + 1,029 e^{0,33f}$
	belső töréspont	$0,063 e^{0,33f} + 1,523 e^{-0,238f}$	

4.2. A viszkoelasztikus modellparaméterek kiértékelése

A mért adatsorok és a Simulink rendszerben futatott kúszási görbék közötti minimumkeresési folyamat a Golden almák esetében 1, a Packham körték esetében pedig 13 alkalommal nem futott le, ennek következtében a mintaszám a tervezetthez képest csökkent. A frekvenciabeállításokhoz tartozó ismétlések számát a 4.8. táblázat foglalja össze. A kiértékelt paramétereket az M3.2. melléklet 8.3. és 8.4. táblázata tartalmazza, a mérési beállításokhoz tartozó átlagértékeket és szórásokat pedig a 4.9. és 4.10. táblázat összegzi.

4.8. táblázat Minimumkeresési hiba miatt módosult mintaszámok az egyes frekvenciákon

frekvencia [Hz]	2,5	3,7	5	7,5	10	11,6
mintaszám – Golden [db]	24	25	25	25	25	25
mintaszám – Packham [db]	21	24	25	24	22	21

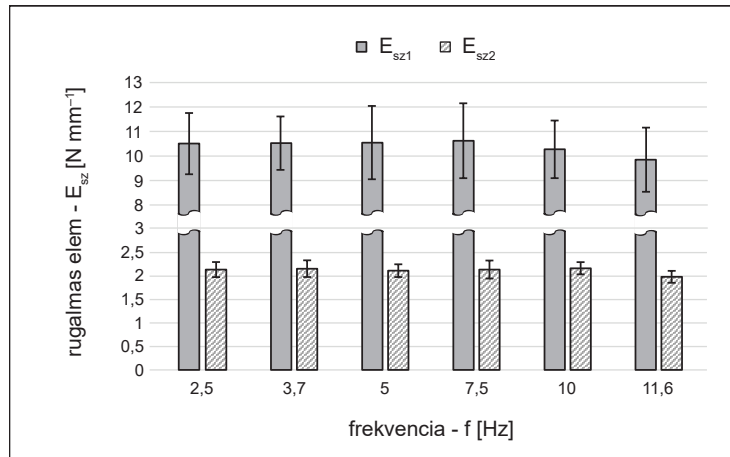
A Golden almák rugalmas tulajdonságait vizsgálva nem fedezhető fel jelentős frekvenciafüggés, az E_{sz1} paraméter a nagyobb frekvenciákon enyhe csökkenést mutat (4.13. ábra) – ez egybevág Fenyvesi (2004) megfigyelésével, miszerint az almák nagyobb sebességű terhelésekor merevebb reakciót tapasztalunk (jelen esetben a nagyobb terhelési sebességnek a nagyobb frekvencia felel meg). A Packham körtéknél viszont az E_{sz1} komponensek növekednek (4.14. ábra), ez a rugalmasság-növekedés pedig nagymértékben hozzájárul a nagyobb frekvenciákon tapasztalt mechanikai ellenállóképességhez, mely az alacsonyabb frekvenciabeállításokhoz képest jelentősen javul. Az E_{sz2} rugalmas elem az adott tartományon belül a Golden és Packham termények esetén is állandó (4.13. és 4.14. ábra).

4.9. táblázat Viszkoelasztikus modellparaméterek átlagértékei és szórások az egyes terhelési frekvenciákon Golden Delicious almák esetén

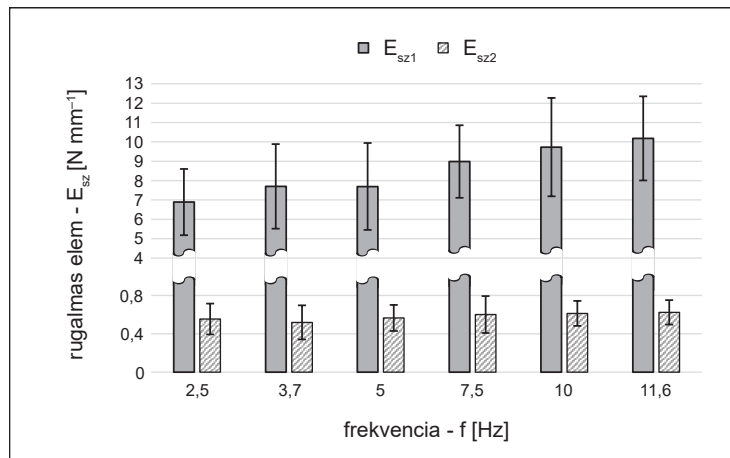
Golden						
f [Hz]	E_{sz1} [N mm⁻¹]	E_{sz1} szórás [N mm⁻¹]	E_{sz2} [N mm⁻¹]	E_{sz2} szórás [N mm⁻¹]	η_{sz1} [Ns mm⁻¹]	η_{sz1} szórás [Ns mm⁻¹]
2,5	10,504	1,250	2,139	0,277	2,129	0,703
3,7	10,523	1,091	2,158	0,277	1,429	0,358
5	10,546	1,497	2,116	0,292	1,109	0,251
7,5	10,622	1,529	2,139	0,269	0,722	0,204
10	10,271	1,177	2,167	0,206	0,581	0,154
11,6	9,848	1,310	1,984	0,361	0,509	0,106

4.10. táblázat Viszkoelasztikus modellparaméterek átlagértékei és szórások az egyes terhelési frekvenciákon Packham körték esetén

Packham						
f [Hz]	E_{sz1} [N mm⁻¹]	E_{sz1} szórás [N mm⁻¹]	E_{sz2} [N mm⁻¹]	E_{sz2} szórás [N mm⁻¹]	η_{sz1} [Ns mm⁻¹]	η_{sz1} szórás [Ns mm⁻¹]
2,5	6,896	1,710	0,554	0,160	0,848	0,494
3,7	7,705	2,184	0,518	0,177	0,574	0,226
5	7,695	2,243	0,565	0,135	0,479	0,242
7,5	8,981	1,873	0,600	0,192	0,435	0,223
10	9,730	2,540	0,613	0,130	0,436	0,243
11,6	10,178	2,172	0,623	0,127	0,471	0,239

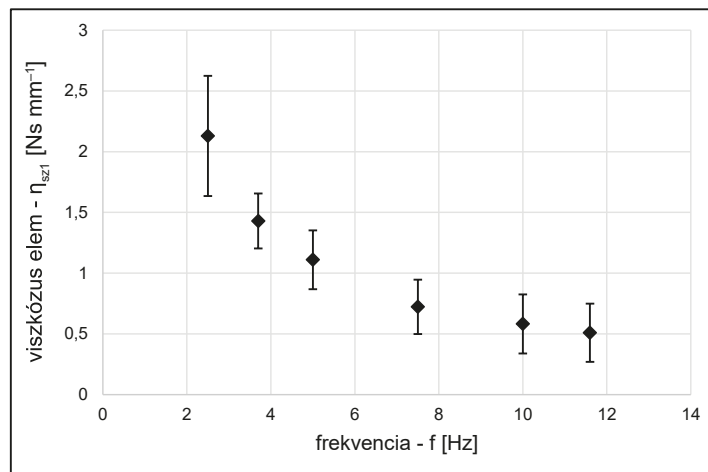


4.13. ábra Rugalmas modellparaméterek Golden Delicious almák esetén

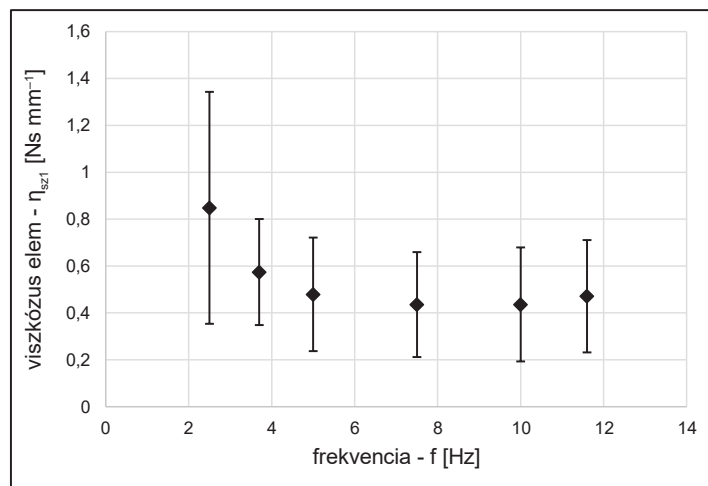


4.14. ábra Rugalmas modellparaméterek Packham körték esetén

Az alkalmazott Poynting-Thomson test viszkózus paramétere mindkét termény esetén egyértelmű frekvenciafüggést mutat (4.15. és 4.16. ábra). A Golden almáknál kapott görbe (4.15. ábra) hasonló a Van Zeebroeck és tsai. (2004) által meghatározott dinamikus viszkózitási tényező frekvenciafüggéséhez, amit Jonagold almáknál mutattak be. A körték esetében viszont a tönkremeneteli időtartamokhoz hasonlóan - és valószínűleg azokkal ok-okozati összefüggésben - a csökkenő tendencia megszakad, és növekedésbe fordul (4.16. ábra).



4.15. ábra Viszkózus modellparaméterek Golden Delicious almák esetén



4.16. ábra Viszkózus modellparaméterek Packham körték esetén

A választott vizsgálati tartomány közepén tehát a körték anyagtulajdonságai részben megváltoznak, hiszen az 5 Hz feletti frekvenciákon egy rugalmasabb, puhább felület keletkezik a terhelési zóna közelében – ami a várakozásokkal és az almáknál tapasztalt eredményekkel ellentétben kedvezőbb tönkremeneteli időtartamot tesz lehetővé. A legveszélyesebb tartományban így nem feltétlenül a magasabb frekvenciák hordozzák a legjelentősebb károsodási potenciált.

A 4.13, 4.14, 4.15. és 4.16. ábrákon feltüntetett hibasávok a mérési beállításokhoz tartozó szórásokokat jelenítik meg. A hibasávok szélsőértékei az átlagértékek tendenciáját követik. A Packham körték esetén az almáknál nagyobb eltérések jöttek létre az átlagos értékektől, az adatok a 2,5 Hz-es beállításnál keletkeztek a legszélesebb tartományban. Ennek egyik oka, hogy ennél a frekvenciabeállításnál több körte már az első ciklus első felterhelési szakaszában azonnal tönkrement.

A tönkremeneteli regressziós modell felállítása előtt a frekvenciafüggés mértékét a viszkoelasztikus modellparaméterek esetében varianciaanalízis (ANOVA - analysis of variance) segítségével is ellenőriztem (4.11. táblázat), ami a Golden almák esetén kizárólag az η_{sz1} együtthatónál mutatott ki szignifikáns összefüggést ($p < 0,05$). A rugalmas elemek 4.13. ábrán szereplő diagramján nem észlelhető szembetűnő kapcsolat a frekvenciával, ezt a megfigyelést pedig a varianciaanalízis is megerősítette.

4.11. táblázat Viszkoelasztikus modellparaméterek varianciaanalízise

Golden			Packham		
együttható	F	p	együttható	F	p
E_{sz1}	1,196	0,314	E_{sz1}	8,008	<0,001
E_{sz2}	1,408	0,225	E_{sz2}	1,488	0,198
η_{sz1}	75,393	<0,001	η_{sz1}	6,427	<0,001

Mivel azonban a körték tönkremeneteli folyamatában a rugalmas viselkedés jelentős szerepet játszik, ezért az előzetes elvárások alapján az elasztikus paramétereknek kimutatható összefüggésben kell állniuk a terhelés frekvenciájával - ezt a feltételezést a varianciaanalízis szintén megerősítette az E_{sz1} paraméter esetében.

Bár az alkalmazott frekvencia jelentősen befolyásolja a tönkremeneteli folyamatot, a viszkózus paraméterekkel fennálló kapcsolata ellenére nem biztos, hogy a tönkremenetelre felírható

regressziós modellre hatást gyakorol. Az összefüggés felállításánál elsősorban egy lineáris közelítést kidolgozására törekszem, a viszkózus elemek frekvenciafüggése azonban nem lineáris.

4.3. Lineáris regressziós tönkremeneteli modellek kidolgozása

A mérések során kapott paramétereket felhasználva (3.6.1. fejezet, 3.3. táblázat) a Golden Delicious almák esetén négy különböző tönkremeneteli modell lehetősége vetődik fel, amelyeket a 4.12. táblázat ismertet. Az egyes változatok között az anyag rugalmas és viszkózus tulajdonságai, valamint a disszipált energia csúcserő is képviselteti magát, a frekvenciabeállítások azonban egyik egyenletben sem jelennek meg.

4.12. táblázat A mért paraméterekből létrehozható lineáris modellek Golden almák esetén

modell	R	R ²	módosított R ²	a becslés standard hibája	R ² változása	F változása	F szignifikanciájának változása
1	0,902(a)	0,814	0,812	1,03413	0,814	641,502	0,000
2	0,963(b)	0,927	0,926	0,64922	0,113	226,984	0,000
3	0,971(c)	0,943	0,941	0,57824	0,015	39,039	0,000
4	0,972(d)	0,945	0,943	0,56840	0,002	6,064	0,015

a változók: (konstans), η_{sz1}

c változók: (konstans), η_{sz1} , E_{DRmax} , E_{sz1}

b változók: (konstans), η_{sz1} , E_{DRmax}

d változók: (konstans), η_{sz1} , E_{DRmax} , E_{sz1} , E_{sz2}

Bár a frekvenciagörbéken nem volt kimutatható összefüggés az elasztikus paraméterekkel, a tönkremeneteli folyamatra a Golden almák rugalmassága is egyértelműen hatást gyakorol, ami a korrelációs együttható értékében is látható növekedést eredményez. Az E_{sz1} paraméter tehát egyértelműen meghatározó része az összefüggésnek, míg az E_{sz2} csak elhanyagolható mértékben járul hozzá az illeszkedés pontosságához, ezért a legegyszerűbb leírás érdekében a harmadik modell kiválasztása javasolt. Ezeket figyelembe véve és a számított állandókat felhasználva a Golden Delicious almák esetén az alábbi közelítés állítható fel:

$$TTF_K = 0,533 + 2,736 \eta_{sz1} + 0,141 E_{DRmax} - 0,261 E_{sz1}. \quad (4.8)$$

A Packham körtékre alkalmazható modelleket a 4.13. táblázat összegzi. Az almákhoz képest az egyes változatokban már a terhelési frekvencia is megjelenik, ami a tönkremeneteli idő leírásában ezúttal fontos szerepet játszik.

4.13. táblázat A mért paraméterekből létrehozható lineáris modellek Packham körték esetén

modell	R	R ²	módosított R ²	a becslés standard hibája	R ² változása	F változása	F szignifikanciájának változása
1	0,886(a)	0,785	0,783	0,66044	0,785	488,514	0,000
2	0,933(b)	0,871	0,869	0,51404	0,086	88,193	0,000
3	0,946(c)	0,896	0,893	0,46299	0,025	31,948	0,000
4	0,959(d)	0,920	0,917	0,40765	0,024	39,273	0,000

a változók: (konstans), E_{DRmax}

c változók: (konstans), E_{DRmax} , η_{sz1} , f

b változók: (konstans), E_{DRmax} , η_{sz1}

d változók: (konstans), E_{DRmax} , η_{sz1} , f, E_{sz2}

A rugalmas elemek átlagolásakor az E_{sz1} paraméter a frekvenciával már összefüggésbe került, ennek ellenére a tönkremenetelt nem ez az együttható befolyásolja, hanem a viszkózus komponenssel párhuzamosan kapcsolt E_{sz2} . Mivel a frekvencia és az említett rugalmas tényező jelentősen hozzájárul a lineáris közelítés pontosságához, így a Packham körték esetén felírható egyenlet:

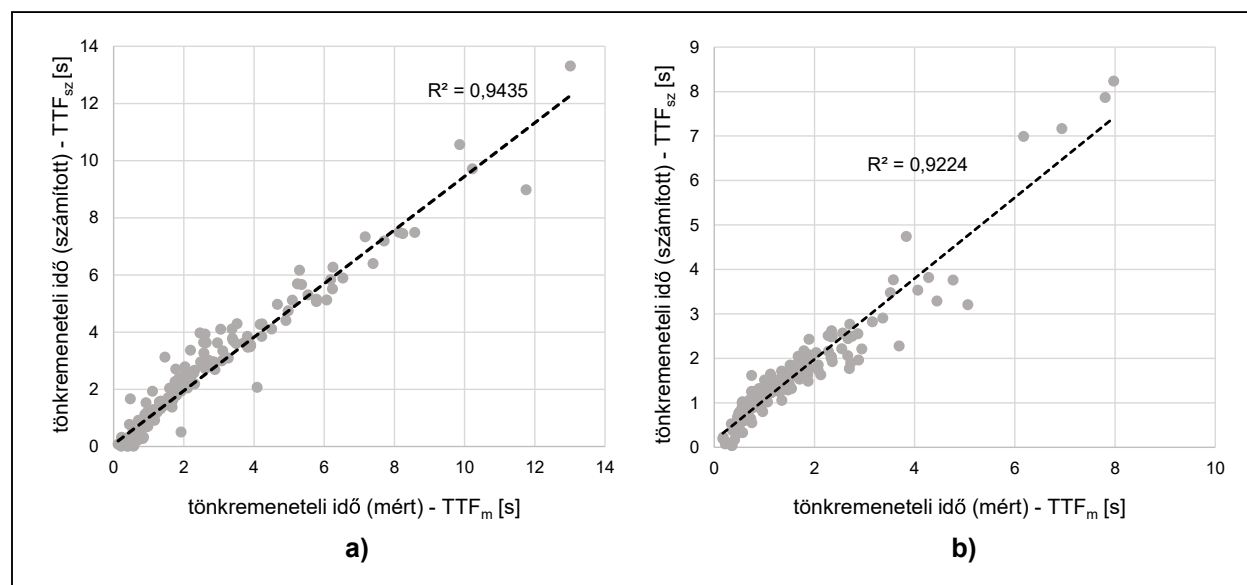
$$TTF_K = 0,091 + 0,788 \eta_{sz1} + 0,085 E_{DRmax} - 0,103 f + 1,524 E_{sz2}. \quad (4.9)$$

Az egyenletek érvényességét ezúttal is a varianciaanalízissel ellenőriztem, melynek eredményeit a 4.14. táblázat tartalmazza. Mivel a kapott F értékek szignifikánsnak minősülnek ($p < 0,05$), a felírt közelítések érvényesek.

4.14. táblázat Közelítő egyenletek varianciaanalízise

Golden		Packham	
F	p	F	p
792,307	<0,001	375,742	<0,001

A behelyettesítés utáni adatok (TTF_{sz}), valamint a mért eredmények (TTF_m) kapcsolatát a 4.17. ábra mutatja be a teljes vizsgálati tartományban, az egyes frekvenciabeállításoknál ábrázolt összefüggések pedig az M3.3. melléklet 8.1. és 8.2. ábráján láthatók. A frekvenciabeállításokhoz tartozó átlagos hibaértékeket a 4.15. táblázat ismerteti (frekvenciánként 25 ismétlést feldolgozva), az egyes terményeknél átlagolt eredmények relatív hibáit pedig a 4.16. táblázat tartalmazza (mindegyik esetben 6 mérést feldolgozva).



4.17. ábra Mért és számított tönkremeneteli időtartamok kapcsolata Golden Delicious almák és Packham körték esetén az összes mérési eredményt kiértékelve

A Golden Delicious almáknál alkalmazott modell eredményei frekvenciánként átlagolva az 1,54% és 3,85% relatív hiba közé esnek, a terményenként átlagolt eredmények pedig 1,01% és 31,13% között vannak. A Packham körték esetén az egyes frekvenciabeállításoknál rögzített eredményeket átlagolva a relatív hibák 2,42 és 6,22% közé esnek, a terményegyenként számított értékek eltérése pedig 0,04% és 34,51% között vannak a mért tönkremeneteli időtartamtól. A 4.15. és 4.16. táblázat alapján a nagyobb hibaértékek keletkezése nem a frekvenciabeállításokhoz, hanem az egyes termények eltérő mechanikai ellenállóképességéhez és anyagtulajdonságaihoz kötődik.

4.15. táblázat A frekvenciabeállításokhoz tartozó átlagos eredmények és a relatív hiba

	Golden			Packham		
frekvencia [Hz]	TTF _m [s]	TTF _{sz} [s]	hiba [%]	TTF _m [s]	TTF _{sz} [s]	hiba [%]
2,5	6,079	5,976853	1,69	1,757	1,715	2,42
3,7	3,759	3,838437	2,12	1,280	1,313	2,51
5	2,506	2,570076	2,57	1,204	1,279	6,22
7,5	1,639	1,613864	1,54	1,425	1,383	2,97
10	1,192	1,180311	0,99	1,820	1,708	6,16
11,6	0,938	0,974067	3,85	2,777	2,906	4,66

4.16. táblázat A terményegyedekhez tartozó átlagos eredmények és a relatív hiba

Golden				Packham			
termény	TTF _m [s]	TTF _{sz} [s]	hiba [%]	termény	TTF _m [s]	TTF _{sz} [s]	hiba [%]
G1	3,127	3,013	3,67	P1	1,436	1,580	10,03
G2	2,980	2,821	5,32	P2	2,824	2,825	0,04
G3	3,294	3,153	4,30	P3	2,194	2,265	3,24
G4	2,515	2,541	1,01	P4	1,104	1,484	34,51
G5	2,333	2,201	5,66	P5	0,943	1,206	27,89
G6	3,053	2,910	4,69	P6	3,830	3,260	14,90
G7	4,769	4,446	6,75	P7	0,649	0,872	34,29
G8	1,769	1,697	4,06	P8	2,230	2,240	0,45
G9	3,981	3,741	6,01	P9	1,776	1,923	8,30
G10	1,407	1,566	11,31	P10	1,140	1,187	4,12
G11	1,510	1,680	11,28	P11	2,077	1,980	4,68
G12	2,946	2,560	13,11	P12	0,840	0,829	1,35
G13	1,345	1,438	6,90	P13	0,336	0,355	5,60
G14	1,310	1,465	11,77	P14	0,481	0,620	29,08
G15	1,301	1,484	14,11	P15	1,731	2,067	19,38
G16	2,856	2,601	8,93	P16	1,250	1,376	10,08
G17	2,058	2,088	1,49	P17	1,179	1,236	4,82
G18	0,870	1,141	31,13	P18	0,919	1,059	15,27
G19	3,429	3,634	5,98	P19	3,466	3,102	10,50
G20	1,060	1,275	20,22	P20	2,562	2,268	11,48
G21	4,285	4,508	5,20	P21	3,226	3,136	2,80
G22	4,411	4,746	7,59	P22	0,618	0,627	1,54
G23	2,584	2,670	3,33	P23	2,177	1,933	11,21
G24	4,842	4,746	2,00	P24	1,336	1,401	4,84
G25	2,266	2,399	5,90	P25	1,483	1,515	2,16

4.4. Új tudományos eredmények

Munkámban Golden Delicious almák és Packham körték mechanikai ellenállóképességét vizsgáltam, melyet elsősorban a tönkremeneteli idő definiálásához és meghatározásához kötöttem. A vizsgálatok során elsősorban az ismétlődő terhelés hatására bekövetkező kifáradásos tönkremenetelre koncentráltam, az elvégzett kutatómunka tudományos eredményeit pedig az alábbi tézisekben foglalom össze:

1. *Golden Delicious almák külső és belső tönkremeneteli időtartamának kapcsolata*

A nagy képkocasebességű videófelvétel segítségével kiértékelt külső tönkremeneteli idő (TTFK_G), valamint az energiaveszteségi-hányados alapján megállapított belső károsodási időtartam (TTFB_G) átlagértékeinek frekvenciafüggését az alábbi, két azonos kitevőjű egyenlettel írtam le:

$$\text{TTFK}_G = 18,63 f^{-1,23},$$

$$\text{TTFB}_G = 14,7 f^{-1,23},$$

ahol f a terhelés frekvenciája. A két különböző terhelési határérték megállapítására az erő-deformáció görbék eltérő jellege miatt a korábbi kutatásokban nem született egységes módszer, a közelítések segítségével pedig az energiaveszteség-számítás a belső károsodás megállapításához a külső töréspont ismeretében elhagyható. A vizsgált tartományban (2,5-11,6 Hz) a külső tönkremeneteli időtartamra vonatkozó egyenlet 7,98%-os, a külső tönkremeneteli időtartamra felírt egyenlet pedig 11,67%-os maximális hibával írja le az átlagos károsodási határértékek frekvenciafüggését.

2. *Packham körték külső és belső tönkremeneteli időtartamának kapcsolata*

A képkockaelemzéssel megállapított külső tönkremeneteli időtartam (TTFK_P) és az energiamutatók meghatározásával számított belső tönkremeneteli időtartam (TTFB_P) frekvenciafüggését a Golden almákhoz hasonlóan azonos kitevőjű közelítésekkel adtam meg:

$$\text{TTFK}_P = 0,069 e^{0,33f} + 2,552 e^{-0,238f},$$

$$\text{TTFB}_P = 0,063 e^{0,33f} + 1,523 e^{-0,238f},$$

ahol f a terhelés frekvenciája. A kutatás frekvenciatartományában (2,5-11,6 Hz) a külső tönkremeneteli időtartamra vonatkozó egyenlet 13,4%-os, a külső tönkremeneteli időtartamra felírt egyenlet pedig 9,29%-os maximális hibával írja le az átlagos károsodási határértékek frekvenciafüggését.

3. *Lineáris modell a Golden Delicious almák tönkremeneteli idejének leírására*

A Poynting-Thomson egyenleten alapuló anyagtulajdonságok (E_{sz1} rugalmas tényező, valamint η_{sz1} viszkózus komponens) és az energiamutatók meghatározásából származó energiaveszteségi-hányados csúcserőértékének (E_{DRmax}) felhasználásával olyan lineáris közelítő egyenletet állítottam fel, amely a Golden almák tönkremeneteli idejét írja le:

$$\text{TTF}_K = 0,533 + 2,736 \eta_{sz1} + 0,141 E_{DRmax} - 0,261 E_{sz1}.$$

A modell a vizsgált tartományban a frekvenciáknál átlagolt eredményeket tekintve 3,85%-os, az egyes terményeket átlagait tekintve pedig 31,13%-os maximális eltéréssel adja meg a külső töréspontig eltelt időtartam értékét.

4. Lineáris modell a Packham körték tönkremeneteli idejének leírására

A tönkremeneteli idő közelítéséhez a Golden almától eltérően a Poynting-Thomson egyenlet E_{sz2} rugalmas komponense került, az η_{sz1} viszkózus tényező és az E_{DRmax} paraméter mellett pedig a terhelési frekvencia is befolyásolja a folyamatot. A Packham körték tönkremeneteli időtartamának leírására így a következő egyenletet állítottam fel:

$$TTF_K = 0,091 + 0,788 \eta_{sz1} + 0,085 E_{DRmax} - 0,103 f + 1,524 E_{sz2}.$$

A modell a kutatás frekvenciatartományában a mérési beállításoknál átlagolt eredményeket tekintve 6,22%-os, az egyes terményeket átlagait tekintve pedig 34,51%-os maximális eltéréssel adja meg a külső töréspontig eltelt időtartam értékét.

5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

A kutatómunkámban meghatározott mérési módszerek és egyenletek a Golden Delicious almák, valamint a Packham körték tönkremeneteli sajátosságainak meghatározására irányultak. A szakirodalomban „töréspontként” definiált tönkremeneteli határértéket egy nagy képkockasebességű videófelvétel segítségével állapítottam meg. A belső töréspont meghatározása a más szakterületeken már alkalmazott, de a gyümölcsöknél egyáltalán nem elterjedt energiavesztés számításán alapult. A két károsodási határérték megadására a szakirodalom egységesen elterjedt módszert nem ismert, ami részben a kúszási folyamatok közelítése során felmerülő bizonytalanságokból ered.

A töréspont az erő-deformáció görbén gyakran megjelenik, sokszor viszont a terhelés gyorsasága nem ad lehetőséget a pontos kiértékelésre. Ezekben az esetekben a képkockaelemzés pontosabb és minden terhelési esetben alkalmazható adatfeldolgozást tesz lehetővé. A megbízhatóságot itt a képkockasebesség korlátozza – ami a képfelbontással együtt a mobileszközökben is folyamatosan fejlődő tendenciát mutat, így ezek az eszközök a hasonló jellegű méréstechnikai feladatokhoz is alkalmassá válnak.

A sejtszerkezetben megjelenő kezdeti károsodás dinamikus és ismétlődő hatások esetén a deformációs görbék alapján szintén kivehetetlen. Ennek a határértéknek az ismerete azonban a feldolgozási folyamatokban elengedhetetlen, hiszen az ilyenkor fellépő környezeti hatásokat ennek függvényében kell korlátozni vagy módosítani (megfogási, ejtési és rezgési határértékek). Az energiaszámításon alapuló eredményeket felhasználva, majd a közelítő egyenleteket alkalmazva a külső és belső töréspontok kapcsolata megfelelő pontossággal leírható, így az adott termények esetén a megfelelő mintaszámban végzett roncsolási határállapot megállapítása elegendő.

A károsodással összefüggésben álló anyagtulajdonságok, valamint energiaállapotok ismeretében a mechanikai ellenállóképesség még a legegyszerűbb lineáris közelítéssel is kellő hatékonysággal leírható, noha az anyagtulajdonságok frekvenciafüggése nem minden esetben lineáris. A kutatásban a lineáris regressziós modellek alkalmazásánál kapott hibaértékek a mérési eljárásokra és módszerekre visszavezetve három különböző okból származnak:

1. A Poynting-Thomson modell együtthatói szintén illeszkedéssel lettek meghatározva, ami önmagában is bizonytalanságot hordoz. A két görbe közötti eltérés terményegyenként változik.
2. A külső tönkremeneteli időtartam egy 4,16 ms-os állandó hibasávban helyezkedik el, ami a rögzítőeszköz képkockasebességéből adódik.
3. Az energiamutatók számítása után egy energiavesztési hányados meghatározása vezet a belső tönkremeneteli folyamat kijelöléséhez. A jelenség definiálása az adott gyümölcsök esetén viszont mikroszintű vizsgálatra és megerősítésre vár, amely során a sejtszerkezetben létrejövő károsodási folyamat részletesebben is leírható.

Li és tsai. (2017) tanácsára a jövőben érdemes a gyümölcsök sérülésvizsgálatát közvetlenül a szedés után elvégezni, hiszen a feldolgozás általában még éretlen állapotban történik, ilyenkor tehát más terhelési határértékek dominálhatnak, mint a piacon kapható termények esetében. A tönkremenetel leírásába ezzel együtt egy érési állapotra utaló tényezőt (pl. nedvességtartalom) is érdemes feltüntetni, a modelleket pedig eszerint módosítani.

A közelítések használhatósága hosszabb idejű terheléssel is összevethető, aminek kivitelezése egy továbbfejlesztett informatikai infrastruktúrával valósítható meg, az adatok mentési sebessége, nagy mintavételezési frekvenciával történő tárolása ugyanis a jelenleginél nagyobb tárolási és feldolgozási kapacitást igényel.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

BIOLÓGIAI ANYAGOK SÉRÜLÉSVIZSGÁLATA

A szedést követő feldolgozási és szállítási folyamatok során keletkező erőhatások miatt a gyümölcsök mechanikai ellenállóképességének és a sérülési hajlamának tanulmányozása kiemelten fontos feladat: mivel a külső hatások gyakran okoznak sérülést a kezelt gyümölcsök felszínén vagy belső szerkezetében, a leszedett termények jelentős része soha sem kerül a fogyasztó elé a piacon, részben a vizuális elvárások, részben pedig a ténylegesen romlást okozó hatások miatt, amiket a válogatás során eleve kiszűrnék. A kezelés közben ébredő terhelések sokaságában az ismétlődő terhelés az egyik legjelentősebb veszélyforrás, ami gyakran a szállítás közben fellépő rezgésekből adódik.

Munkámban ezért az ismételt terhelés hatására bekövetkező kifáradásos tönkremenetellel foglalkoztam: a ciklikus nyomóterheléssel vizsgált Golden Delicious almák és Packham körték esetén olyan többváltozós lineáris regressziós modellt állítottam fel, ami a tönkremeneteli folyamathoz kötődő paramétereket tartalmazza, és amely a vizsgált almástermésűek sérülési ellenállására vonatkozóan ad előrejelzést.

A dolgozatban ismertetett eredmények különböző módszerekkel meghatározott alaptényezőkre támaszkodnak: a gyümölcsök anyagtulajdonságait hordozó viszkoelasztikus modellparaméterekre, a terhelés közben számítható disszipált energiára, valamint az adott termények töréspontjára, amit a tönkremeneteli idő (TTF – time to failure) formájában definiáltam. A viszkoelasztikus tulajdonságok meghatározásához a Poynting-Thomson egyenletet használtam, a számítógépes matematikai modellt pedig a kúszási vizsgálatok közben rögzített adatsorokkal identifikáltam. A disszipált energia a termények erő-deformáció diagramjainak hiszterézisgörbéi alapján határozható meg, az adatok numerikus integrálásával pedig a korábban alkalmazott közelítések, és az ezekkel járó pontatlanságok elkerülhetők. A gyümölcsök tönkremenetelét jelző töréspontot – ahol a terhelőberendezés mérőcsapja a héjat átszakítva jól látható roncsolódást okoz – egy nagy képkockasebességű videófelvétel alapján határoztam meg. A mérések során azokat a frekvenciabeállításokat alkalmaztam, amelyek a szállítással foglalkozó kutatásokban a legkiterjedtebb károsodott terményhányadért felelősek.

Az alkalmazott matematikai modellt felhasználva a rugalmas és viszkózus együtthatókat egy minimumkeresési folyamat során határoztam meg, amik a kúszási folyamatnál található legjobb illeszkedésnél lettek kiszámítva. Az egyes paramétereket a legveszélyesebb vizsgálati tartományban hat különböző frekvenciabeállításon értékeltem ki, az anyagtulajdonságok és a vizsgált paraméterek az almák és körték esetében különböző frekvenciafüggést mutatnak: a tartomány nagyobb frekvenciáin a körték többsége a rugalmas viselkedés hatására kedvezőbb mechanikai ellenállással rendelkezik, mint az almák.

A viszkoelasztikus modelleket alkalmazó más szakterületek (például az aszfaltrétegek belső tulajdonságaival foglalkozó kutatások) a disszipált energia-számítás és a tönkremeneteli folyamatok között már olyan kidolgozott számítási módszerekkel teremtenek kapcsolatot, amik a gyümölcsök esetén is átvehetők és alkalmazhatók. Az ismétlődő terhelés során megfigyelt energiahalmozódás, valamint a hiszterézisterületek meghatározása után számítható disszipált-energia hányados a termény belső tönkremeneteli folyamatára utal, ami a feldolgozásban alkalmazott gépelemek és környezet tervezésekor a terhelési határértéket jelentheti. A képkockaelemzéssel számított külső és belső tönkremeneteli határértékek között viszont olyan kapcsolat fedezhető fel, amivel a belső sejtkárosodás az energiamutatók meghatározása nélkül is megadható egy adott terményszorta esetén. A kutatásomban ismertetett egyenletek ezen tönkremeneteli határértékek kapcsolatát, valamint a sérüléshez kötődő paraméterek mechanikai ellenállóképességre vonatkozó hatását írják le.

7. SUMMARY

FAILURE CHARACTERISTICS OF BIOLOGICAL MATERIALS

Studying the damage resistance and failure susceptibility of fruits are one of the most important topics in the area of food processing and logistics. A very significant amount of the agricultural and horticultural crops never gets to the customer, because the mechanical effects are often leading to a failure in the cell structure and consequential spoiling of the product, decreasing market value. From the variety of different mechanical effects, the repeated compressive loads are one of the most important risk factors during the postharvest procedures of fruits.

In this work, a multiple linear regression model of mechanical properties related to the failure mechanism of Golden Delicious apple and Packham pear tissue under repeated compressive load is investigated. More refined failure characteristics may lead to improved processing and logistics aspects of the given fruits.

For this study, the following failure-related factors are considered during the cyclic measurements of the examined specimens: the viscoelastic parameters, the dissipated energy, and the rupture point of the cell-structure, which is described with the time to failure parameter (TTF). For the determination of viscoelastic components, the three element Poynting-Thomson body was applied, and a closed-loop control system is identified with the measured creep data. From the hysteresis loop - in each cycle of the force-deformation parametric curve - the dissipated energy can be calculated with a numeric integration method. The rupture point of the fruit tissue - where the measuring pin is breaking through the peel and the cortex - is observed with a high-frame-rate video analysis, so that the time index of the failure point can be evaluated.

The developed control-loop system is based on the Poynting-Thomson body and, during the validating dynamic creep tests, different repeated compressive loads were applied. The examined frequencies were chosen from the most common components of the frequency distribution during the transportation process; the given range is responsible for the highest volume of fruit damage and the most extensive losses. The identified mathematical system determines the viscoelastic model parameters with the best fit to the measured creep data. The model properties of the tested fruit textures are compared in six different frequency setups, with the inspected pome species showing different elastic and viscous responses for the adjusted load conditions. The custom testing device with variable load functions and the proposed solution allow system identification with a wide range of setup possibilities. The resulted viscoelastic parameters can be used for further failure analysis and for the comparison of different pome fruit materials.

The applied and absorbed mechanical energy is greatly responsible for the volume of the resulting fruit damage during an impact, a compression, or a vibration process. The dissipated energy is strongly related to the failure mechanism of the biological materials, which can be calculated from the hysteresis loop of the stress-strain characteristics; for the investigation of the energy indicators, the area between the loading and unloading curve is observed, and a dissipated energy ratio is calculated for the indication of the inner rupture process in case of the examined pome fruits.

The focus is to define the influence of the mentioned factors to the TTF parameter of the examined fruit material. During the statistical evaluation of the resulted data, the failure of time can be successfully determined with a multiple linear regression model of the determined viscoelastic and dissipated energy variables. With the resulted equation, the failure time of Golden Delicious apples and Packham pears can be predicted based on the measured failure-related parameters obtained during the compressive load tests.

8. MELLÉKLETEK

M1. Irodalomjegyzék

1. Abbott, J., Massie, D. (1998): Nondestructive sonic measurement of kiwifruit firmness. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 123(2), pp. 317-322.
2. Ahmadi, E., Barikloo, H., Kashfi, M. (2016): Viscoelastic finite element analysis of the dynamic behavior of apple under impact loading with regard to its different layers. *Computers and Electronics in Agriculture*, 121, pp. 1-11.
3. Alam, M., Yadama, V., Cofer, W., Englund, K. (2012): Analysis and evaluation of a fruit bin for apples. *Journal of Food Science and Technology*, 51(12), pp. 3722-3730.
4. Arseneault, M., Cline, J. (2016): A review of apple preharvest fruit drop and practices for horticultural management. *Scientia Horticulturae*, 211, pp. 40-52.
5. Baranowski, P., Mazurek, W., Wozniak, J., Majewska, U. (2012): Detection of early bruises in apples using hyperspectral data and thermal imaging. *Journal of Food Engineering*, 110(3), pp. 345-355.
6. Berardinelli, A., Donati, V., Giunchi, A., Guarnieri, A., Ragni, L. (2005): Damage to pears caused by simulated transport. *Journal of Food Engineering*, 66(2), pp. 219-226.
7. Blahovec, J., Mares, V., Paprstein, F. (2004): Static and dynamic tests of pear bruise sensitivity. *Research in Agricultural Engineering*, 50, pp. 54-60.
8. Bollen, A.F., Nguyen, H.X., Dela Rue, B.T. (1999): Comparison of methods for estimating the bruise volume of apples. *Journal of Agricultural Engineering Research* 74, pp. 325-330.
9. Borsa, B., Fekete, A., Felföldi, J. (2002): Kertészeti termékek mechanikai és minőségi jellemzői. Gödöllő: FVM Műszaki Intézet.
10. Bourne, M.C. (1965): Studies on punch testing of apples. Cit. Janick, J. (2010): *Horticultural Reviews*, Volume 20. John Wiley & Sons.
11. Bourne, M.C. (2014): Food Security: Postharvest Losses. p. 338. Van Alfen, N., *Encyclopedia of agriculture and food systems*. Encyclopedia of Agriculture and Food Systems. Academic Press.
12. Cakmak, H. (2019): Assessment of fresh fruit and vegetable quality with non-destructive methods. p. 303. Galanakis, C.H., *Food Quality and Shelf Life*.
13. Che, W., Sun, L., Zhang, Q., Tan, W., Ye, D., Zhang, D., Liu, Y. (2018): Pixel based bruise region extraction of apple using Vis-NIR hyperspectral imaging. *Computers and Electronics in Agriculture*, 146, pp. 12-21.
14. Csatár, A. (2008): Globális sugárzás és az időjárás hatása a többretegű mezőgazdasági csomagoló fóliák mechanikai jellemzőire (Ph.D. értekezés). Gödöllő, Szent István Egyetem.
15. Csatár, A. (2009): Műanyagok anyagmodelljei. 103-117. o. Csizmadia, B, Sajátos anyagmodellek alkalmazása a mezőgépészetben. Gödöllő: FVM Mezőgazdasági Gépesítési Intézet.
16. Csizmadia, B., Nándori, N. (2003): Modellalkotás. Budapest: Nemzeti Tankönyvkiadó.
17. Csizmazia, Z. (2011): Műszaki ismeretek. Debreceni Egyetem, Nyugat-Magyarországi Egyetem, Pannon Egyetem.

18. de Francisco, L., Rosseto, H., de Alcântara Sica de Toledo, L., dos Santos, R., de Souza Ferreira, S., Bruschi, M. (2019): Organogel composed of poloxamer 188 and passion fruit oil: Sol-gel transition, rheology, and mechanical properties. *Journal of Molecular Liquids*, 289, p. 111170.
19. Delgadillo, R., Bahia, H. (2005): Rational fatigue limits for asphalt binders derived from pavement analysis. *Asphalt paving thechnology: Journal of the association of asphalt paving technologists*, Vol 74, pp. 1-42.
20. Diels, E., Odenthal, T., Keresztes, J., Vanmaercke, S., Verboven, P., Nicolaï, B., Saeys, W., Ramon, H. and Smeets, B. (2016): Development of a visco-elastoplastic contact force model and its parameter determination for apples. *Postharvest Biology and Technology*, 120, pp. 157-166.
21. Diezema I.B., Ruiz-Altisent, M., Orihuel, B. (2003): Acoustic impulse response for detecting hollow heart in seedless watermelon. *Acta Horticulturae*, 599, pp. 249-256.
22. Du, D., Wang, B., Wang, J., Yao, F., Hong, X. (2019). Prediction of bruise susceptibility of harvested kiwifruit (*Actinidia chinensis*) using finite element method. *Postharvest Biology and Technology*, 152, pp. 36-44.
23. Duprat, F., Grotte, M., Pietri, E., Loonis, D., Studman, C. (1997): The acoustic impulse response method for measuring the overall firmness of fruit. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 66(4), pp. 251-259.
24. ElMasry, G., Wang, N., Vigneault, C., Qiao, J., ElSayed, A. (2008): Early detection of apple bruises on different background colors using hyperspectral imaging. *LWT - Food Science and Technology*, 41(2), pp. 337-345.
25. Fadiji, T., Coetzee, C., Chen, L., Chukwu, O., Opara, U.L. (2016): Susceptibility of apples to bruising inside ventilated corrugated paperboard packages during simulated transport damage. *Postharvest Biology and Technology* 118, pp. 111-119.
26. FAO, (2011): Global food losses and waste. Extent, causes and prevention. <http://www.fao.org/docrep/014/mb060e/mb060e00.pdf> (hozzáférés: 2019.08.12)
27. Farkas, I. (2001): Folyamatirányítás. Gödöllő: Szent István Egyetemi Kiadó.
28. Fekete, A. (1997): Modeling the compression test process of fruits. *IFAC Proceedings Volumes*, 30(5), pp. 323–328.
29. Felföldi, J. (2004): Zárójelentés a “Módszer kidolgozása kertészeti termények felületi és belső keménység-jellemzőinek meghatározására” c. kutatómunkáról (OTKA T046756 AG4). http://real.mtak.hu/1567/1/46756_ZJ1.pdf (Hozzáférés: 2019.08.20.)
30. Fenyvesi, L. (2004): Mezőgazdasági termények sérülésvizsgálata. Budapest: Akadémiai Kiadó.
31. Fenyvesi, L., Fenyvesi, D., Csatár, A. (2013): Stress Analysis in Fruits. *Advances in Mechanical Engineering*, 5, p.874673.
32. Ferreira, M., Sargent, S., Brecht, J., Chandler, C. (2008): Strawberry fruit resistance to simulated handling. *Scientia Agricola*, 65(5), pp. 490-495.
33. Finney, E.E. (1970): Mechanical resonance within Red Delicious apples and its relation to fruit texture. *Transactions of the ASAE*, 13(2), pp. 0177-0180.
34. Firtha, F. (2009): Fizika élelmiszermérnököknek I. (Mechanika, áramlástan, reológia, fénytan). Budapesti Corvinus Egyetem.

35. Fischer, D., Craig, W.L., Watada, A.E., Douglas, W., Ashby, B.H. (1992): Simulated in-transit vibration damage to packaged fresh market grapes and strawberries. *Applied Engineering in Agriculture*, 8(3), pp. 363-366.
36. Franco, J.M., Partal, P. (2010): *The newtonian fluid*. Gallegos, C., Rheology. Oxford: EOLSS Publishers Co Ltd.
37. Fu, H., He, L., Ma, S., Karkee, M., Chen, D., Zhang, Q., Wang, S. (2016): Bruise responses of apple-to-apple impact. *IFAC-PapersOnLine*, 49(16), pp. 347-352.
38. Ganai, S., Ahsan, H., Tak, A., Mir, M., Rather, A., Wani, S. (2016): Effect of maturity stages and postharvest treatments on physical properties of apple during storage. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 17(3), pp. 310-316.
39. García-Ramos, F., Valero, C., Homer, I., Ortiz-Cañavate, J., Ruiz-Altisent, M. (2005): Non-destructive fruit firmness sensors: a review. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 3(1), p. 61.
40. Gnedenko, B., Pavlov, I., Ushakov I., Chakravarty, S. (1999): *Statistical reliability engineering*. New York: John Wiley & Sons Inc.
41. Gergely, Z. (2016): *Étkezési paprikafajták újszerű minősítése automata képfeldolgozó rendszerrel (Ph.D. értekezés)*. Gödöllő, Szent István Egyetem.
42. Ghuzlan, K., Carpenter, S. (2000). Energy-derived, damage-based failure criterion for fatigue testing. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1723(1), pp. 141-149.
43. Goliáš, J., Bejček, L., Grätz, P., Klusáček, S. (2011): Mechanical resonance method for evaluation of peach fruit firmness. *Horticultural Science*, 30, pp. 1–6.
44. Hameed, K., Chai, D., Rassau, A. (2018): A comprehensive review of fruit and vegetable classification techniques. *Image and Vision Computing*, 80, pp. 24-44.
45. Harker, R. (2009): Consumer preferences and choice of fruit: the role of avocado quality. Cit. Umezuruike, L.O., Pankaj, B.P., (2014): Bruise damage measurement and analysis of fresh horticultural produce – A review. *Postharvest Biology and Technology* 91 (2014), pp. 9-24.
46. Hilton, D.J. (1994): Impact and vibration damage to fruit during handling and transportation. Cit. Van Zeebroeck, M., Van linden, V., Ramon, H., De Baerdemaeker, J., Nicolaï, B., Tijskens, E. (2007): Impact damage of apples during transport and handling. *Postharvest Biology and Technology*, 45(2), pp. 157-167.
47. Hinsch, R.T., Slaughter, D.C., Craig, W.L., Thompson, J.F. (1993): Vibration of fresh fruits and vegetables during refrigerated truck transport. *Transactions of the ASAE*, 36(4), pp. 1039-1042.
48. Hooke, R.J. (1678): *De potentia restitutiva, or of spring*. Explaining the power of springing bodies, London: J. Martyn.
49. Idah, P.A., Yisa, M.G., Chukwu O., Morenikeji, O.O. (2012): Simulated transport damage study on fresh tomato (*Lycopersicon esculentum*) fruits. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 14(2), pp. 119-126.
50. Jahangir, A.D., Ajaz, A.W., Maroof, A., Rameez, N., Sajad, M.Z., Kousar, J. (2019): Peel colour in apple (*Malus domestica* Borkh.): An economic quality parameter in fruit market. *Scientia Horticulturae* 244, pp. 50-60.

51. Ji, W., Qian, Z., Xu, B., Chen, G., Zhao, D. (2019). Apple viscoelastic complex model for bruise damage analysis in constant velocity grasping by gripper. *Computers and Electronics in Agriculture*, 162, pp. 907-920.
52. Jung, H., Park, J. (2012). Effects of vibration stress on the quality of packaged apples during simulated transport. *Journal of Biosystems Engineering*, 37(1), pp. 44-50.
53. Kader, A.A. (2002): Post harvest technology of horticultural crops. Cit. Umezuruike, L. O., Pankaj, B.P., (2014): Bruise damage measurement and analysis of fresh horticultural produce - A review. *Postharvest Biology and Technology* 91 (2014), pp. 9-24.
54. Kim, J., Roque, R., Birgisson, B. (2006): Interpreting dissipated energy from complex modulus data. *Road Materials and Pavement Design*, 7(2), pp. 223-245.
55. Lee, J., Tan, J., Waluyo, S. (2016): Hysteresis characteristics and relationships with the viscoelastic parameters of apples. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 9(1), pp. 36-42.
56. Li, Z., Miao, F., Andrews, J. (2017): Mechanical models of compression and impact on fresh fruits. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 16(6), pp. 1296-1312.
57. Love, A. (1892): A treatise on the mathematical theory of elasticity. Cambridge: At the University Press. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01307751/document> (hozzáférés: 2019.08.14)
58. Lü, Q., Tang, M. (2012): Detection of hidden bruise on kiwi fruit using hyperspectral imaging and parallelepiped classification. *Procedia Environmental Sciences*, 12, pp. 1172-1179.
59. Magness, J.R., Taylor, G.F. (1925): An improved type of pressure tester for the determination of fruit maturity. U.S. Department of Agriculture, Department Circular 350.
60. Malik, M., Zhang, T., Li, H., Zhang, M., Shabbir, S., Saeed, A. (2018): Mature tomato fruit detection algorithm based on improved HSV and Watershed algorithm. *IFAC-PapersOnLine*, 51(17), pp. 431-436.
61. Malkin, A.Y., Isayev, A. (2017): Viscoelasticity. Malkin, A.Y., Isayev, A., Rheology. Toronto: ChemTec Publishing.
62. McLaughlin, N.B., Pitt, R.E. (1984): Failure characteristics of apple tissue under cyclic loading. *Trans. ASAE*, 27, pp. 311-320.
63. Mehinagic, E., Royer, G., Symoneaux, R., Jourjon, F. (2006): Relationship between apple sensory attributes and instrumental parameters of texture. *Journal of Fruit and Ornamental Plant Research*. Volume 14, pp. 25-37.
64. Mises, R. (1945): On Saint Venant's principle. *Bulletin of the American Mathematical Society*, 51(8), pp. 555-563.
65. Mohsenin, N. (1970): Physical properties of plant and animal materials. 1: structure, physical characteristics and mechanical properties. New York, N.Y.: Gordon and Breach.
66. Morrow, C., Mohsenin, N. (1966): Consideration of selected agricultural products as viscoelastic materials. *Journal of Food Science*, 31(5), pp. 686-698.
67. Mowatt, C. (1997). Factors influencing the susceptibility of apples to bruising. Palmerston North: Massey University.
68. Muramatsu, N., Sakurai, N., Yamamoto, R., Nevins, D. (1996): Nondestructive acoustic measurement of firmness for nectarines, apricots, plums, and tomatoes. *HortScience*, 31(7), pp. 1199-1202.

69. Newton, I. (1687): *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (A természetfilozófia matematikai alapjai). London.
70. NRDC, (2012): Wasted: How America is losing up to 40 percent of its food from farm to fork. NRDC Issue PAPER. <https://www.nrdc.org/sites/default/files/wasted-food-IP.pdf> (hozzáférés: 2019.08.13)
71. Oveisi, Z., Minaei, S., Rafiee, S., Eyvani, A., Borghei, A. (2012): Application of vibration response technique for the firmness evaluation of pear fruit during storage. *Journal of Food Science and Technology*, 51(11), pp. 3261-3268.
72. Petróczki, K., Fenyvesi, L. (2014): Improvement of compressive testing instrument with wide range of speed for examining agricultural materials. *Computers and Electronics in Agriculture*, 101, pp. 42-47.
73. Pék, L. (2000): *Anyagszerkezetan és anyagismeret*. Budapest: Dinasztia Kiadó.
74. Pék, L. (2010): *Fémes és nemfémes szerkezeti anyagok*. Gödöllő: Szent István Egyetemi Kiadó.
75. Pillinger, G., Géczy, A., Hudoba, Z., Kiss, P. (2018): Determination of soil density by cone index data. *Journal of Terramechanics*, 77, pp. 69-74.
76. Praeger, U., Surdilovic, J., Truppel, I., Herold, B., Geyer, M. (2013): Comparison of electronic fruits for impact detection on a laboratory scale. *Sensors*, 13(6), pp. 7140-7155.
77. Prusky, D. (2011): Reduction of the incidence of postharvest quality losses, and future prospects. *Food Security Volume 3*, pp. 463-474.
78. Roylance, D. (2001): *Engineering viscoelasticity*. Massachusetts Institute of Technology.
79. Ruiz Altisent, M. (1991): Damage mechanisms in the handling of fruits. p. 233. Matthews, J., *Progress in Agricultural Physics and Engineering*. Wallingford: C.A.B. International.
80. Safranyik, F., (2016): *Silók gravitációs és vibrációs üritése*. (Ph.D. értekezés). Gödöllő, Szent István Egyetem.
81. Saint-Venant, M. (1853): *Memoire sur la torsion des prismes, avec des considerations sur leur flexion ainsi que sur l'equilibre interieur des solides élastiques en général*. <https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=hvd.32044091959866&view=1up&seq=7> (hozzáférés: 2019.08.14)
82. Scheffler, O., Coetzee, C., Opara, U. (2018). A discrete element model (DEM) for predicting apple damage during handling. *Biosystems Engineering*, 172, pp. 29-48.
83. Shirvani, M., Ghanbarian, D., Ghasemi-Varnamkhasti, M. (2014). Measurement and evaluation of the apparent modulus of elasticity of apple based on Hooke's, Hertz's and Boussinesq's theories. *Measurement*, 54, pp. 133-139.
84. Sitkei, Gy. (2005): *A gyümölcs- és zöldségtermesztés műszaki vonatkozásai*. Gödöllő: FVM Mezőgazdasági Gépesítési Intézet (MGI).
85. Sitkei, Gy. (1981): *A mezőgazdasági anyagok mechanikája*. Budapest: Akadémiai Kiadó.
86. Soleimani, B., Ahmadi, E. (2015): Evaluation and analysis of vibration during fruit transport as a function of road conditions, suspension system and travel speeds. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 8(1), pp. 26-32.

87. Springael, J., Paternoster, A., Braet, J. (2018): Reducing postharvest losses of apples: Optimal transport routing (while minimizing total costs). *Computers and Electronics in Agriculture*, 146, pp. 136-144.
88. Steffe, J. (1996): *Rheological methods in food process engineering*. East Lansing (Michigan): Freeman Press.
89. Steinbrener, J., Posch, K., Leitner, R. (2019): Hyperspectral fruit and vegetable classification using convolutional neural networks. *Computers and Electronics in Agriculture*, 162, pp. 364-372.
90. Stropek, Z., Gołacki, K. (2015): A new method for measuring impact related bruises in fruits. *Postharvest Biology and Technology*, 110, pp. 131-139.
91. Szendrő, P. (2000): *Mezőgazdasági Gépszerkezettan*. Budapest: Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó.
92. Szendrő, P. (2007): *Gépelemek*. Budapest: Mezőgazda Kiadó.
93. Terasaki, S., Wada, N., Sakurai, N., Muramatsu, N., Yamamoto, R., Nevins, D.J. (2001): Nondestructive measurement of kiwifruit ripeness using a laser doppler vibrometer. *Transactions of the ASAE*, 44(1), pp. 81-87.
94. Tscheuschner, H., Doan, D. (1988): Modelling of mechanical properties of apple flesh under compressive load. *Journal of Food Engineering*, 8(3), pp. 173-186.
95. Umezuruike, L.O., Pankaj, B.P. (2014): Bruise damage measurement and analysis of fresh horticultural produce - A review. *Postharvest Biology and Technology* 91, pp. 9-24.
96. Van der Varst, P., Van de Ven, A., de With, G. (2016): Load-depth sensing of isotropic, linear viscoelastic materials using rigid axisymmetric indenters. *Technische Universiteit Eindhoven*.
97. Van Zeebroeck, M., Dintwa, E., Tijskens, E., Deli, V., Loodts, J., De Baerdemaeker, J., Ramon, H. (2004). Determining tangential contact force model parameters for viscoelastic materials (apples) using a rheometer. *Postharvest Biology and Technology*, 33(2), pp. 111-125.
98. Van Zeebroeck, M., Tijskens, E., Dintwa, E., Kafashan, J., Loodts, J., De Baerdemaeker, J., Ramon, H. (2006). The discrete element method (DEM) to simulate fruit impact damage during transport and handling: Case study of vibration damage during apple bulk transport. *Postharvest Biology and Technology*, 41(1), pp. 92-100.
99. Van Zeebroeck, M., Van linden, V., Ramon, H., De Baerdemaeker, J., Nicolai, B., Tijskens, E. (2007): Impact damage of apples during transport and handling. *Postharvest Biology and Technology*, 45(2), pp. 157-167.
100. Varga, A., (2018): Szabad keverőcsigák környezetében létrejövő szemcsemozgások elemzése (Ph.D. értekezés). Gödöllő, Szent István Egyetem.
101. Vursavuş, K., Özgüven, F. (2004): Determining the effects of vibration parameters and packaging method on mechanical damage in Golden Delicious apples. *Turkish Journal Of Agriculture And Forestry* 28, pp. 311-320.
102. Vursavus K., Kesilmis Z., Oztekin B. (2017): Nondestructive dropped fruit impact test for assessing tomato firmness. *Chemical Engineering Transactions* 58, pp. 325-330.
103. Wang, W., Yang, Z., Lu, H., Fu, H. (2018): Mechanical damage caused by fruit-to-fruit impact of litchis. *IFAC-PapersOnLine*, 51(17), pp. 532-535.

104. WAPA, (2018): European apple & pear crop forecast August 2018. <https://prognosfruit.eu/wp-content/uploads/2018/08/European-Apple-Pear-Crop-Forecast-FINAL.pdf> (hozzáférés: 2019.08.13)
105. Xing, J., Landahl, S., Lammertyn, J., Vrindts, E., Baerdemaeker, J. (2003): Effects of bruise type on discrimination of bruised and non-bruised 'Golden Delicious' apples by VIS/NIR spectroscopy. *Postharvest Biology and Technology*, 30(3), pp. 249-258.
106. Yahia, E.M., Fonseca, J.M., Kitinoja, L. (2019): Postharvest losses and waste. p. 43. Yahia, E.M, *Postharvest Technology of Perishable Horticultural Commodities*. Woodhead Publishing.
107. Yousefi, S., Farsi, H., Kheiralipour, K. (2016). Drop test of pear fruit: experimental measurement and finite element modelling. *Biosystems Engineering*, 147, pp. 17-25.
108. Yurtlu, Y.B., Erdoğan, D. (2005): Effect of storage time on some mechanical properties and bruise susceptibility of pears and apples. *Turkish Journal Of Agriculture And Forestry* 29, pp. 469-482.
109. Zarifneshat, S., Rohani, A., Ghassemzadeh, H., Sadeghi, M., Ahmadi, E., Zarifneshat, M. (2012): Predictions of apple bruise volume using artificial neural network. *Computers and Electronics in Agriculture*, 82, pp. 75-86.
110. Zhang, H., Wu, J., Ma, H. (2019): Acoustic firmness measurement of differently shaped pears: Comparison of resonance indices with propagation indices. *Postharvest Biology and Technology*, 148, pp. 151-157.

M2. Az értekezés témaköréhez kapcsolódó publikációk

Lektorált cikk idegen nyelven

1. **Farkas, C.**, Petróczki, K., Fenyvesi, L. (2016): Method for measuring fruit failure caused by different mechanical loads. Hungarian Agricultural Engineering, (29), pp. 51-54. ISSN 2415-9751
2. **Farkas, C.**, Fenyvesi, L., Petróczki, K. (2019): Identification and Frequency Dependence of Viscoelastic Parameters during Dynamic Creep Tests on Selected Pome Fruits. AgriEngineering, 1(3), pp. 324-331. ISSN 2624-7402
3. **Farkas, C.**, Fenyvesi, L., Petróczki, K. (2019): Multiple linear regression model of Golden apple's failure characteristics under repeated compressive load. Potravinárstvo Slovak Journal of Food Sciences, 13(1), pp. 793-799. ISSN 1337-0960

Lektorált cikk magyar nyelven

4. **Farkas, C.**, Fenyvesi, L., Petróczki, K. (2019): Almástermésű gyümölcsökben kialakuló energiátranszport-elemzés ismétlődő terheléssel végzett roncsolásos vizsgálat útján. Mezőgazdasági Technika, 2019/07, pp. 2-5. ISSN 0026 1890
5. **Farkas, C.**, Fenyvesi, L., Petróczki, K. (2019): Vilmos körték viszkoelaszikus paramétereinek és energiamutatóinak terhelésfüggése ismétlődő mechanikai igénybevétel hatására. Mezőgazdasági Technika, 2019/10, pp. 2-5. ISSN 0026 1890
6. **Farkas, C.**, Fenyvesi, L., Petróczki, K. (2020): Golden Delicious almák és Vilmos körték kifáradási mutatóinak összehasonlítása. Élelmiszervizsgálati Közlemények, ISSN 2676 8704 - Közlésre elfogadva.

Idegen nyelvű könyvrészlet

7. **Farkas, C.**, Petróczki, K., Fenyvesi, L. (2017): Effects of repeated mechanical load on selected grape and pome fruits. Nyéki, A., Kovács, A.J., Milics, G. (szerk.) Towards sustainable agricultural and biosystems engineering. ISBN: 978-615-577-603-8 pp. 229-242.
8. **Farkas, C.**, Petróczki, K., Fenyvesi, L. (2018): Methods to investigate the repeated mechanical effects on selected grape and pome fruits. Géczi, G., Korzenszky, P. (szerk.) Researched Risk Factors of Food Chain, Gödöllő, Szent István Egyetemi Kiadó, pp. 143-148. ISBN 978-963-269-775-8

Idegen nyelvű konferencia abstract

9. **Farkas, C.**, Petróczki, K., (2013): Bruise investigation of horticultural crops with Dymatest material tester. III. Synergy International Conference – Engineering, Agriculture, Waste Management and Green Industry Innovation, Abstracts. Gödöllő, Hungary, 13-19. October 2013, p. 86. ISBN 978-963-269-371-2
10. **Farkas, C.**, Petróczki, K., Fenyvesi, L. (2015): Method for measuring fruit failure caused by different mechanical loads. IV. Synergy International Conference – Engineering, Agriculture and Green Industry Innovation, Abstracts. Gödöllő, Hungary, 12-15. October 2015, p. 40. ISBN 978-963-269-505-1

11. **Farkas, C**; Petróczki, K; Fenyvesi, L (2018): Methods to investigate the repeated mechanical effects on selected grape and pome fruits. XIX. Risk Factors of Food Chain 2018, Book of Abstracts. Mátrafüred, Hungary, 26-28. September 2018. p. 21. ISBN 978-963-269-774-1

M3. Mérési adatok*M3.1. A termények tönkremeneteli paramétereit*

8.1. táblázat Golden Delicious almák tönkremeneteli időtartama és energiaveszteségi hányadosainak csúcsértéke

Golden					
termény	f [Hz]	TTF_K [s]	E_{DRmax} [-]	n_{DRmax} [-]	TTF_B [s]
G1	2,5	6,179	17,314	13	4,9
	3,7	2,845	11,682	8	1,959
	5	4,087	6,256	4	0,65
	7,5	1,923	16,192	12	1,485
	10	1,274	12,343	10	0,925
	11,6	2,456	30,979	25	2,085
G2	2,5	5,783	16,658	13	4,9
	3,7	4,222	16,911	12	3,04
	5	3,714	21,959	17	3,25
	7,5	1,641	14,935	11	2,352
	10	1,346	15,035	11	1,025
	11,6	1,172	13,444	10	0,795
G3	2,5	8,235	21,081	17	6,5
	3,7	2,843	11,306	9	2,232
	5	3,888	18,935	15	2,85
	7,5	1,661	13,085	9	1,09
	10	2,047	21,756	18	1,725
	11,6	1,092	11,450	10	0,795
G4	2,5	3,814	12,587	8	2,9
	3,7	3,898	16,277	12	3,04
	5	2,31	12,902	10	1,85
	7,5	2,961	25,237	20	2,53
	10	1,147	13,305	9	0,825
	11,6	0,961	12,792	9	0,716
G5	2,5	2,634	8,408	5	1,705
	3,7	4,174	18,056	13	3,31
	5	3,081	17,665	13	2,45
	7,5	1,922	17,483	12	1,485
	10	0,851	9,723	7	0,625
	11,6	1,337	17,044	13	1,054
G6	2,5	6,533	17,871	14	5,3
	3,7	4,972	21,620	17	4,4
	5	3,267	14,641	14	2,65
	7,5	2,477	20,617	16	2,025
	10	0,941	10,528	7	0,625
	11,6	0,13	1,000	1	0,02

termény	f [Hz]	TTF _K [s]	EDR _{max} [-]	nDR _{max} [-]	TTF _B [s]
G7	2,5	11,75	30,045	25	9,7
	3,7	5,536	22,350	18	4,66
	5	5,094	27,869	23	4,45
	7,5	2,597	19,903	17	2,145
	10	2,04	20,724	18	1,725
	11,6	1,594	17,740	15	1,226
G8	2,5	4,23	12,592	9	3,3
	3,7	1,764	9,058	5	1,152
	5	1,351	8,236	5	0,85
	7,5	1,537	14,961	10	1,22
	10	1,163	14,582	10	0,925
	11,6	0,568	8,254	5	0,365
G9	2,5	8,129	23,732	18	6,9
	3,7	4,498	19,869	15	3,85
	5	4,908	20,733	20	3,85
	7,5	3,492	29,209	22	2,804
	10	1,244	9,048	9	0,825
	11,6	1,612	18,609	15	1,225
G10	2,5	3,402	10,287	7	2,5
	3,7	1,464	4,402	4	0,88
	5	1,301	6,595	5	0,85
	7,5	0,972	8,676	5	0,562
	10	0,572	4,561	4	0,325
	11,6	0,73	7,311	6	0,451
G11	2,5	3,382	9,812	7	2,5
	3,7	1,767	6,350	5	1,152
	5	1,701	8,589	6	1,05
	7,5	1,231	9,930	6	0,683
	10	0,749	9,630	6	0,525
	11,6	0,228	2,333	2	0,108
G12	2,5	7,393	20,596	16	6,1
	3,7	6,073	22,482	21	5,472
	5	1,686	10,160	6	1,05
	7,5	0,856	6,851	5	0,562
	10	0,776	9,763	6	0,525
	11,6	0,893	12,061	8	0,623
G13	2,5	2,561	8,817	5	1,705
	3,7	1,799	8,378	5	1,152
	5	1,486	9,457	6	1,05
	7,5	1,26	11,478	8	0,96
	10	0,568	6,258	4	0,325
	11,6	0,396	4,474	4	0,287

termény	f [Hz]	TTF _K [s]	EDR _{max} [-]	nDR _{max} [-]	TTF _B [s]
G14	2,5	2,603	8,611	5	1,705
	3,7	2,608	12,670	8	1,9595
	5	0,89	5,996	4	0,65
	7,5	0,482	4,890	3	0,298
	10	0,465	6,250	4	0,325
	11,6	0,814	11,763	8	0,624
G15	2,5	3,373	9,910	7	2,5
	3,7	2,048	10,479	6	1,421
	5	0,706	4,963	3	0,45
	7,5	0,449	3,346	3	0,298
	10	0,656	5,809	5	0,425
	11,6	0,573	4,709	5	0,367
G16	2,5	6,238	15,449	14	5,3
	3,7	5,778	22,191	19	4,931
	5	1,693	6,519	6	1,05
	7,5	1,665	11,821	8	0,96
	10	1,552	15,860	12	1,126
	11,6	0,21	1,705	2	0,108
G17	2,5	6,249	17,388	13	4,9
	3,7	2,839	10,247	7	1,68
	5	1,105	4,425	4	0,65
	7,5	0,994	7,622	6	0,683
	10	0,759	5,999	5	0,425
	11,6	0,399	4,587	4	0,28
G18	2,5	2,568	8,974	5	1,705
	3,7	0,947	4,766	3	0,6127
	5	0,475	2,321	2	0,25
	7,5	0,738	5,941	4	0,43
	10	0,265	2,369	2	0,125
	11,6	0,226	2,384	2	0,108
G19	2,5	9,86	23,863	22	8,5
	3,7	5,293	20,761	17	4,4
	5	2,697	11,462	10	1,85
	7,5	1,518	8,979	7	0,824
	10	0,563	4,075	4	0,325
	11,6	0,645	6,344	5	0,365
G20	2,5	4,164	10,145	8	2,9
	3,7	2,306	8,186	7	1,68
	5	0,922	3,809	4	0,65
	7,5	1,129	8,300	7	0,824
	10	0,552	4,638	4	0,325
	11,6	0,392	3,223	3	0,195

termény	f [Hz]	TTF _K [s]	EDR _{max} [-]	nDR _{max} [-]	TTF _B [s]
G21	2,5	8,582	24,319	20	7,703
	3,7	7,168	26,234	24	6,281
	5	3,514	18,908	15	2,85
	7,5	1,647	11,255	10	1,22
	10	3,048	27,052	27	2,625
	11,6	1,751	20,773	17	1,398
G22	2,5	10,22	28,657	24	9,3
	3,7	5,236	21,522	17	4,4
	5	4,668	24,942	20	3,85
	7,5	2,197	18,122	15	1,882
	10	1,954	19,690	16	1,525
	11,6	2,191	28,111	23	1,912
G23	2,5	3,819	9,544	7	2,5
	3,7	3,902	15,581	12	3,04
	5	2,105	11,807	8	1,453
	7,5	1,787	14,355	12	1,485
	10	1,86	21,038	17	1,625
	11,6	2,031	23,978	21	1,742
G24	2,5	13,01	30,754	27	10,5
	3,7	7,703	28,828	26	6,817
	5	2,885	16,184	12	2,25
	7,5	2,579	21,161	17	2,145
	10	2,047	21,498	18	1,725
	11,6	0,83	9,094	8	0,623
G25	2,5	5,358	14,273	10	3,7
	3,7	2,282	9,329	6	1,421
	5	3,107	15,480	14	2,65
	7,5	1,262	8,366	7	0,824
	10	1,365	14,245	12	1,126
	11,6	0,219	1,935	2	0,108

8.2. táblázat Packham körték tönkremeneteli időtartama és energiaveszteségi hányadosainak csúcsértéke

Packham					
termény	f [Hz]	TTF_K [s]	E_{DRmax} [-]	n_{DRmax} [-]	TTF_B [s]
P1	2,5	1,866	5,933	4	1,3
	3,7	0,746	1,935	2	0,35
	5	0,558	2,140	2	0,25
	7,5	2,338	13,749	14	1,754
	10	1,673	12,822	14	1,325
	11,6	9,948	115,468	111	9,481
P2	2,5	2,663	7,526	6	2,1
	3,7	2,358	8,999	8	1,963
	5	1,941	8,050	7	1,257
	7,5	2,341	17,149	15	1,88
	10	1,468	12,614	10	0,925
	11,6	6,174	76,885	68	5,698
P3	2,5	1,892	4,872	4	1,3
	3,7	1,529	4,242	3	0,61
	5	2,546	10,725	12	2,25
	7,5	2,335	13,292	13	1,619
	10	2,67	21,736	23	2,225
	11,6	4,446	48,245	45	3,719
P4	2,5	0,994	3,394	2	0,525
	3,7	0,983	3,734	3	0,61
	5	1,343	7,016	6	1,05
	7,5	0,897	5,541	5	0,565
	10	0,968	8,748	7	0,625
	11,6	1,436	16,309	13	1,054
P5	2,5	1,125	2,635	2	0,525
	3,7	0,715	1,915	2	0,35
	5	1,338	6,826	6	1,05
	7,5	0,894	6,944	5	0,563
	10	0,674	5,472	6	0,525
	11,6	0,912	9,188	9	0,711
P6	2,5	5,061	11,981	12	4,5
	3,7	3,691	11,868	10	2,503
	5	1,126	6,234	5	0,85
	7,5	1,024	6,709	5	0,563
	10	4,278	37,128	39	3,825
	11,6	7,802	84,675	83	7,072

Packham					
termény	f [Hz]	TTF _K [s]	EDR _{max} [-]	nDR _{max} [-]	TTF _B [s]
P7	2,5	0,308	1,000	1	0,2
	3,7	0,442	1,000	1	0,15
	5	0,34	1,000	1	0,1
	7,5	0,488	2,542	2	0,172
	10	0,97	7,055	8	0,725
	11,6	1,005	8,656	10	0,796
P8	2,5	2,279	4,376	4	1,3
	3,7	1,809	6,153	6	1,423
	5	3,155	13,491	13	2,45
	7,5	1,677	10,238	9	1,091
	10	7,371	64,583	70	6,925
	11,6	7,799	86,366	81	6,9
P9	2,5	1,013	1,707	2	0,525
	3,7	1,792	5,654	5	1,158
	5	2,332	9,486	9	1,65
	7,5	1,549	8,010	9	1,091
	10	2,273	19,847	20	1,925
	11,6	1,696	18,089	17	1,397
P10	2,5	0,298	1,000	1	0,2
	3,7	0,727	1,752	2	0,35
	5	0,934	4,194	4	0,65
	7,5	0,504	2,919	3	0,306
	10	1,677	16,500	16	1,525
	11,6	1,859	20,206	20	1,655
P11	2,5	1,871	5,247	4	1,3
	3,7	1,311	5,185	4	0,891
	5	1,511	7,601	6	1,05
	7,5	2,709	22,255	18	2,269
	10	2,357	22,755	22	2,125
	11,6	2,705	28,592	24	1,988
P12	2,5	0,675	1,000	1	0,2
	3,7	0,493	1,000	1	0,15
	5	0,759	4,316	3	0,45
	7,5	0,351	1,907	2	0,173
	10	1,062	8,965	9	0,825
	11,6	1,701	17,383	17	1,398
P13	2,5	0,276	0,000	0	0
	3,7	0,206	0,000	0	0
	5	0,535	1,891	2	0,25
	7,5	0,221	1,000	1	0,067
	10	0,179	1,000	1	0,05

Packham					
termény	f [Hz]	TTF _K [s]	EDR _{max} [-]	ndR _{max} [-]	TTF _B [s]
P13	11,6	0,408	3,245	4	0,285
P14	2,5	0,661	1,000	1	0,2
	3,7	0,703	2,399	2	0,35
	5	0,547	2,803	2	0,25
	7,5	0,231	1,000	1	0,067
	10	0,173	1,000	1	0,05
	11,6	0,569	5,911	5	0,367
P15	2,5	1,112	2,334	2	0,525
	3,7	0,749	2,669	2	0,35
	5	0,748	4,220	3	0,458
	7,5	2,868	22,868	21	2,674
	10	1,08	11,269	10	0,925
	11,6	3,831	53,790	40	3,367
P16	2,5	1,073	3,691	2	0,525
	3,7	1,526	6,125	5	1,158
	5	1,561	7,212	7	1,25
	7,5	0,365	2,258	2	0,173
	10	1,276	10,730	11	1,025
	11,6	1,698	17,551	16	1,311
P17	2,5	1,462	3,985	3	0,9
	3,7	0,48	1,000	1	0,15
	5	0,526	2,184	2	0,25
	7,5	0,497	2,603	2	0,173
	10	2,074	17,984	17	1,625
	11,6	2,034	23,062	20	1,655
P18	2,5	0,289	0,000	0	0
	3,7	0,467	1,000	1	0,15
	5	0,561	2,229	2	0,25
	7,5	0,742	5,450	5	0,563
	10	1,474	12,411	12	0,925
	11,6	1,351	11,720	10	0,796
P19	2,5	1,896	3,824	3	0,9
	3,7	2,882	9,715	8	1,963
	5	2,128	9,798	9	1,65
	7,5	1,151	8,442	8	0,960
	10	4,765	40,879	44	4,425
	11,6	7,974	90,036	84	7,157
P20	2,5	2,699	7,062	6	2,1
	3,7	1,542	78,824	5	1,158
	5	0,546	3,492	2	0,25
	7,5	4,447	29,355	28	3,601

Packham					
termény	f [Hz]	TTF _K [s]	EDR _{max} [-]	nDR _{max} [-]	TTF _B [s]
P20	10	1,18	12,141	11	1,025
	11,6	3,574	42,272	38	3,202
P21	2,5	3,514	7,403	8	2,9
	3,7	1,561	5,190	5	1,158
	5	0,559	2,276	2	0,25
	7,5	2,725	15,656	12	1,486
	10	4,062	33,204	36	3,525
	11,6	6,936	78,824	78	6,643
P22	2,5	1,024	2,213	2	0,525
	3,7	0,46	1,000	1	0,15
	5	0,511	2,742	2	0,25
	7,5	0,607	3,775	3	0,306
	10	0,353	3,052	3	0,225
	11,6	0,75	8,205	7	0,538
P23	2,5	1,516	3,983	3	0,9
	3,7	2,069	6,699	5	1,1585
	5	2,946	12,208	11	2,05
	7,5	2,076	11,477	14	1,754
	10	2,569	18,924	23	2,225
	11,6	4,097	36,875	39	3,289
P24	2,5	1,036	3,024	2	0,525
	3,7	1,252	5,372	4	0,891
	5	0,479	1,000	1	0,1
	7,5	2,75	20,061	20	2,542
	10	1,162	11,815	10	0,925
	11,6	1,339	16,321	15	1,216
P25	2,5	1,469	3,612	3	0,9
	3,7	0,444	1,000	1	0,15
	5	0,561	3,024	2	0,25
	7,5	0,496	3,688	3	0,306
	10	3,364	27,153	31	3,025
	11,6	2,562	29,145	27	2,258

M3.2. A termények viszkoelasztikus modellparaméterei

8.3. táblázat Rugalmas és viszkózus elemek értékei az egyes frekvenciabeállításokon Golden almák esetén

Golden				
f [Hz]	termény	E_{sz1} [N mm ⁻¹]	E_{sz2} [N mm ⁻¹]	η_{sz1} [Ns mm ⁻¹]
2,5 Hz	G1	10,4906	1,9562	2,0469
	G2	9,6057	1,943	1,7454
	G3	11,5341	2,1665	2,5415
	G4	8,595	1,9381	1,3857
	G5	10,0816	2,1118	1,6628
	G6	10,7867	2,155	2,067
	G7	9,998	1,8398	2,4947
	G8	9,9046	1,8605	1,6689
	G9	10,7691	2,3171	2,3492
	G10	8,8491	2,0208	1,4749
	G11	9,7095	1,9831	1,6066
	G12	10,6614	2,032	2,1016
	G13	10,0765	2,0766	1,6427
	G14	11,6722	2,6672	1,9113
	G15	10,2119	2,076	1,7721
	G16	9,5532	1,6944	1,9364
	G17	11,8786	2,5733	2,334
	G18	9,5269	1,8919	1,4466
	G19	12,6306	2,6317	3,6402
	G20	minimumkeresés nem teljesült		
3,7 Hz	G21	10,8516	2,3953	2,3251
	G22	12,2689	2,2852	3,051
	G23	7,9301	1,8236	1,3396
	G24	11,9915	2,6157	4,2283
	G25	12,539	2,2893	2,3376
	G1	10,5619	2,1439	1,2846
	G2	9,5604	1,9088	1,2525
	G3	9,7872	2,0098	1,187
	G4	10,7624	1,959	1,2927
	G5	11,1096	2,2149	1,4958
	G6	10,8881	2,1159	1,464
	G7	10,0307	2,1578	1,55
	G8	10,9055	2,3518	1,1484
	G9	10,4312	2,0864	1,2802
	G10	8,8085	1,7305	1,5625
	G11	10,4949	2,0763	1,47
	G12	10,0497	1,7639	1,4805
	G13	10,4825	2,0848	1,0982
	G14	11,5913	2,3103	1,2538
	G15	9,3786	1,961	0,9595

Golden				
f [Hz]	termény	E_{sz1} [N mm ⁻¹]	E_{sz2} [N mm ⁻¹]	η_{sz1} [Ns mm ⁻¹]
3,7 Hz	G16	10,7804	2,0381	1,5443
	G17	10,5703	2,5383	1,3682
	G18	8,7089	1,9883	0,8262
	G19	13,5665	3,021	2,2823
	G20	9,4408	2,0784	1,2589
	G21	11,5846	2,3943	2,24
	G22	10,7779	2,6331	1,8042
	G23	9,1256	2,0157	1,1646
	G24	12,0669	2,2825	2,0985
	G25	11,6328	2,1028	1,375
5 Hz	G1	11,5355	1,9009	1,3393
	G2	9,3632	1,7263	0,892
	G3	11,2007	2,0864	1,1737
	G4	10,893	2,0116	0,9793
	G5	11,8246	2,2215	1,1195
	G6	11,8464	2,2581	1,3105
	G7	10,5595	2,1404	1,2461
	G8	11,2748	2,2938	0,9412
	G9	11,1174	1,9201	1,4087
	G10	8,8208	2,0338	0,8773
	G11	12,1401	2,5007	1,1489
	G12	8,9027	1,9948	0,7248
	G13	10,1224	2,0871	0,8599
	G14	8,7621	2,061	0,7404
	G15	9,5553	2,2594	0,7961
	G16	8,9859	1,6717	1,0229
	G17	9,4697	1,7788	1,1876
	G18	8,0375	1,6288	1,0604
	G19	13,5185	2,2099	1,6082
	G20	8,9407	1,8197	1,0222
	G21	10,9728	2,8777	1,449
	G22	11,4947	2,4848	1,4357
	G23	8,9784	2,3314	0,7998
	G24	12,3644	2,1132	1,1359
	G25	12,9892	2,4906	1,4693
7,5 Hz	G1	10,1463	1,7949	0,6456
	G2	10,0888	2,1294	0,5849
	G3	10,13	2,0418	0,673
	G4	9,6668	1,9829	0,7529
	G5	11,836	2,1409	0,218
	G6	10,486	2,0266	0,8246
	G7	12,1552	2,5989	1,0301
	G8	12,2763	2,4412	0,7392
	G9	12,2243	2,4636	0,7832

Golden				
f [Hz]	termény	E_{sz1} [N mm ⁻¹]	E_{sz2} [N mm ⁻¹]	η_{sz1} [Ns mm ⁻¹]
	G10	9,9353	2,0649	0,5654
	G11	10,7452	2,137	0,7547
	G12	8,7237	1,8336	0,6317
	G13	10,189	2,2406	0,6354
	G14	10,025	2,0815	0,5206
	G15	7,9465	1,7864	0,6735
	G16	9,2206	1,8505	0,579
	G17	9,317	1,9652	0,6379
	G18	9,7771	2,076	0,5285
	G19	11,8265	2,0403	1,0223
	G20	9,5581	1,9679	0,7608
	G21	10,6555	2,1294	0,807
	G22	11,2792	2,2902	0,8048
	G23	9,4865	2,0828	0,6249
	G24	15,1343	2,9762	1,1869
	G25	12,7411	2,3497	1,079
10 Hz	G1	10,0384	1,9883	0,6099
	G2	8,9563	1,9311	0,4651
	G3	9,8495	2,0666	0,5947
	G4	9,212	2,0108	0,4087
	G5	11,7804	2,4637	0,5485
	G6	10,1516	2,335	0,4835
	G7	11,617	2,2185	0,6656
	G8	11,9306	2,2057	0,5276
	G9	11,6487	2,1414	0,9226
	G10	9,9418	1,9839	0,5306
	G11	10,2213	2,1657	0,4403
	G12	9,5288	2,3048	0,4163
	G13	9,3842	2,1031	0,3733
	G14	9,0578	2,2287	0,3781
	G15	10,0412	2,1572	0,6503
	G16	9,1448	2,1597	0,4854
	G17	9,4962	1,8682	0,5599
	G18	9,3182	2,2051	0,5233
	G19	10,3038	1,9522	0,7085
	G20	8,4995	2,0919	0,5879
	G21	11,1373	2,1236	0,9732
	G22	10,9381	2,198	0,7012
	G23	9,5587	1,9394	0,5067
	G24	13,1348	2,6512	0,7489
	G25	11,892	2,7043	0,7356
11,6 Hz	G1	10,0457	1,8173	0,6201
	G2	9,754	2,0414	0,4481
	G3	9,7246	1,9446	0,4806

Golden				
f [Hz]	termény	E_{sz1} [N mm ⁻¹]	E_{sz2} [N mm ⁻¹]	η_{sz1} [Ns mm ⁻¹]
11,6 Hz	G4	9,1097	1,976	0,3409
	G5	11,5202	2,305	0,5604
	G6	8,9541	1,2023	0,5777
	G7	9,6977	1,9857	0,562
	G8	10,6027	2,2091	0,3617
	G9	13,4558	2,773	0,6897
	G10	9,813	1,7953	0,4569
	G11	9,5063	1,8908	0,5
	G12	9,6067	2,0602	0,3515
	G13	7,725	1,8354	0,3785
	G14	9,5013	2,0838	0,4344
	G15	9,6221	1,8789	0,6282
	G16	7,2263	1,0258	0,4148
	G17	8,7671	1,8857	0,4022
	G18	9,4748	2,2966	0,4693
	G19	10,84	2,5054	0,5836
	G20	8,2198	1,8715	0,5345
	G21	10,2249	2,1227	0,5398
	G22	11,7013	2,3296	0,7039
	G23	9,3679	1,9337	0,4817
	G24	11,5093	2,2075	0,5369
	G25	10,2458	1,6464	0,6765

8.4. táblázat Rugalmas és viszkózus elemek értékei az egyes frekvenciabeállításokon Packham körték esetén

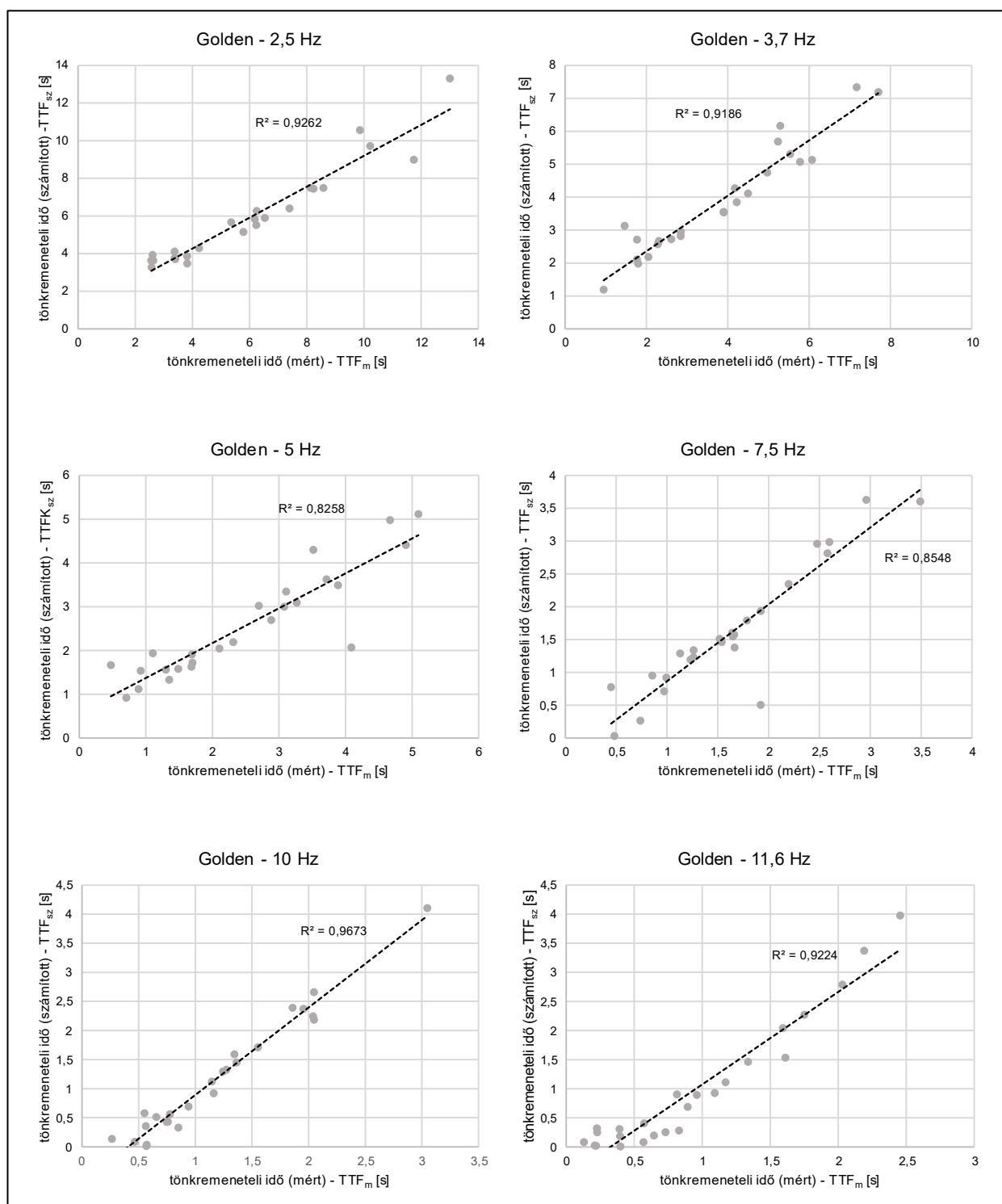
Packham				
f [Hz]	termény	E_{sz1} [N mm⁻¹]	E_{sz2} [N mm⁻¹]	η_{sz1} [Ns mm⁻¹]
2,5 Hz	P1	5,7754	0,6014	0,4748
	P2	5,9906	0,6992	0,6624
	P3	9,8127	0,8379	1,1468
	P4	4,4828	0,5081	0,3479
	P5	7,9628	0,5493	0,9583
	P6	8,0526	0,8921	1,2676
	P7	minimumkeresés nem teljesült		
	P8	6,9024	0,4411	1,6281
	P9	6,6735	0,1818	0,9621
	P10	minimumkeresés nem teljesült		
	P11	5,3637	0,5533	0,4625
	P12	7,3918	0,3029	0,4756
	P13	minimumkeresés nem teljesült		
	P14	7,4903	0,3681	0,4662
	P15	6,347	0,4536	0,8417
	P16	5,9955	0,56	0,6061
	P17	6,4954	0,5614	0,6616
	P18	minimumkeresés nem teljesült		
	P19	7,0224	0,5613	0,9755
	P20	6,22	0,5717	0,5918
	P21	11,0895	0,6673	2,532
	P22	6,0658	0,5089	0,6764
	P23	9,7627	0,6717	0,8267
	P24	4,2833	0,5149	0,6198
	P25	5,6517	0,6396	0,6334
3,7 Hz	P1	8,7598	0,5929	1,061
	P2	7,3208	0,6868	0,5158
	P3	8,0689	0,5776	1,0183
	P4	6,5399	0,5459	0,4601
	P5	11,7867	0,3789	0,6756
	P6	7,6887	0,7181	0,5923
	P7	13,1877	0,1955	0,5228
	P8	10,5205	0,6854	0,8236
	P9	8,2087	0,8849	0,7989
	P10	7,6044	0,1465	0,7138
	P11	5,5087	0,5387	0,3427
	P12	6,4658	0,4382	0,3506
	P13	minimumkeresés nem teljesült		
	P14	6,5158	0,5011	0,4968
	P15	6,2521	0,6007	0,5126
	P16	7,8412	0,6077	0,5283
	P17	9,0159	0,328	0,4846

Packham				
f [Hz]	termény	E_{sz1} [N mm ⁻¹]	E_{sz2} [N mm ⁻¹]	η_{sz1} [Ns mm ⁻¹]
3,7 Hz	P18	8,8168	0,3404	0,4689
	P19	8,6372	0,523	0,7996
	P20	5,0504	0,4992	0,3457
	P21	9,4747	0,6522	0,7521
	P22	3,8937	0,3206	0,179
	P23	7,5617	0,6718	0,5548
	P24	5,3492	0,6755	0,4047
	P25	4,8638	0,3442	0,2804
5 Hz	P1	8,4595	0,5176	0,4355
	P2	7,0436	0,646	1,0383
	P3	10,2236	0,6101	1,013
	P4	8,2875	0,7719	0,4661
	P5	7,531	0,7032	0,419
	P6	8,5816	0,5591	0,3445
	P7	9,4842	0,3661	0,3899
	P8	12,6933	0,9247	0,8798
	P9	8,6951	0,6998	0,7144
	P10	7,2925	0,4985	0,4027
	P11	6,3966	0,594	0,3328
	P12	5,1529	0,4913	0,2433
	P13	8,431	0,3401	0,4763
	P14	5,2708	0,4661	0,2746
	P15	6,8691	0,6837	0,3526
	P16	11,4721	0,5651	0,7831
	P17	5,3531	0,4648	0,3602
	P18	9,5167	0,5607	0,515
	P19	9,3353	0,561	0,4654
	P20	4,931	0,4624	0,1427
	P21	8,8375	0,5503	0,4945
	P22	4,1021	0,4914	0,3125
	P23	9,0667	0,6966	0,6801
	P24	4,6479	0,3319	0,197
	P25	4,713	0,5812	0,2508
7,5 Hz	P1	8,5254	0,6826	0,6518
	P2	10,8003	0,9725	0,4587
	P3	12,559	0,736	1,1612
	P4	8,8536	0,6979	0,3448
	P5	8,0316	0,7915	0,2618
	P6	7,3008	0,6552	0,332
	P7	9,3971	0,6231	0,3583
	P8	13,0531	0,8876	0,6424
	P9	11,0309	0,8317	0,7295
	P10	8,0658	0,4673	0,3213
	P11	8,5847	0,6155	0,4447

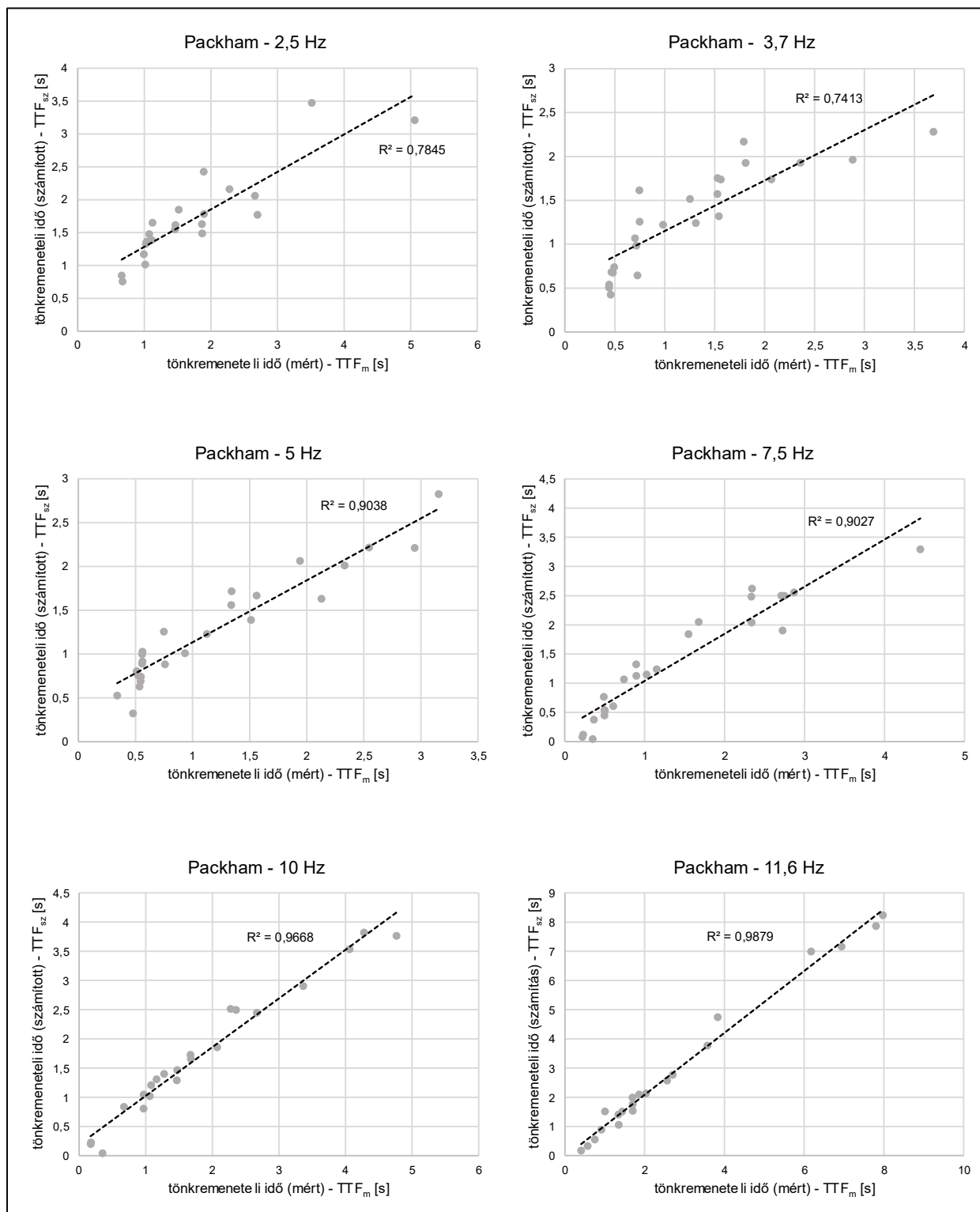
Packham				
f [Hz]	termény	E_{sz1} [N mm ⁻¹]	E_{sz2} [N mm ⁻¹]	η_{sz1} [Ns mm ⁻¹]
7,5 Hz	P12	7,909	0,259	0,2126
	P13	7,9239	0,325	0,2284
	P14	6,147	0,3729	0,1838
	P15	9,4304	0,6418	0,3995
	P16	9,013	0,4252	0,2754
	P17	10,3467	0,2127	0,7415
	P18	8,0709	0,6575	0,3583
	P19	10,5213	0,5275	0,5049
	P20	9,5026	0,7375	0,4509
	P21	10,0376	0,596	0,4376
	P22	7,1157	0,495	0,2715
	P23	minimumkeresés nem teljesült		
	P24	8,6115	0,7083	0,5002
	P25	4,7173	0,5012	0,1857
10 Hz	P1	10,2603	0,651	0,7421
	P2	7,7425	0,653	0,2067
	P3	13,4424	0,7977	0,4075
	P4	7,9699	0,5419	0,2209
	P5	11,1127	0,6585	0,3898
	P6	10,764	0,7408	0,6028
	P7	11,2072	0,4261	0,9335
	P8	minimumkeresés nem teljesült		
	P9	10,8513	0,6909	0,9049
	P10	9,1358	0,6306	0,2914
	P11	8,9387	0,6509	0,6464
	P12	9,783	0,6432	0,2754
	P13	6,2523	0,3368	0,1435
	P14	7,5261	0,3498	0,1553
	P15	6,7226	0,6788	0,1956
	P16	15,4404	0,5848	0,6801
	P17	9,8927	0,6521	0,3463
	P18	9,9208	0,6828	0,3933
	P19	10,9507	0,6061	0,3842
	P20	minimumkeresés nem teljesült		
	P21	14,4128	0,7128	0,7177
	P22	5,175	0,3644	0,2102
	P23	minimumkeresés nem teljesült		
	P24	8,2815	0,6819	0,2576
	P25	8,2808	0,7519	0,4951
11,6 Hz	P1	minimumkeresés nem teljesült		
	P2	11,2419	0,6998	0,6241
	P3	minimumkeresés nem teljesült		
	P4	7,1527	0,6843	0,2323
	P5	9,1367	0,6542	0,2708

Packham				
f [Hz]	termény	E_{sz1} [N mm ⁻¹]	E_{sz2} [N mm ⁻¹]	η_{sz1} [Ns mm ⁻¹]
	P6	11,3833	0,6807	0,9364
	P7	15,7122	0,8013	0,8394
	P8	minimumkeresés nem teljesült		
	P9	10,902	0,7054	0,6105
	P10	11,5274	0,7128	0,5021
	P11	9,356	0,7113	0,4531
	P12	7,7603	0,6134	0,2845
	P13	9,8664	0,1664	0,513
	P14	8,8091	0,5081	0,1978
	P15	8,5229	0,6266	0,4041
	P16	13,311	0,6719	0,4421
	P17	10,7588	0,7068	0,2487
	P18	9,3689	0,5179	0,474
	P19	10,4884	0,6854	0,8154
	P20	10,1607	0,6384	0,3869
	P21	13,4717	0,5571	0,9151
	P22	7,0247	0,5535	0,1485
	P23	minimumkeresés nem teljesült		
	P24	9,9811	0,5976	0,2621
	P25	7,8102	0,6108	0,3368

M3.3. Mért és számított tönkremeneteli időtartamok kapcsolata



8.1. ábra Mért és számított tönkremeneteli időtartamok kapcsolata az egyes frekvenciabeállításokon Golden Delicious almák esetén



8.2. ábra Mért és számított tönkrementeli időtartamok kapcsolata az egyes frekvenciabeállításokon Packham körték esetén