



SZENT ISTVÁN  
EGYETEM

## BIOLÓGIAI ANYAGOK SÉRÜLÉSVIZSGÁLATA

Doktori (PhD) értekezés tézisei

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

## TARTALOM

|  |           |
|--|-----------|
| JELÖLÉSJEGYZÉK.....  | 4         |
| 1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK.....  | 5         |
| <b>1.1. A téma időszerűsége, jelentősége.....</b>                          | <b>5</b>  |
| <b>1.2. Célkítűzések .....</b>   | <b>6</b>  |
| 2. ANYAG ÉS MÓDSZER.....   | 7         |
| <b>2.1. A mérésekhez használt eszközök.....</b>                            | <b>7</b>  |
| <b>2.2. A termények alakváltozási görbéi .....</b>                         | <b>10</b> |
| <b>2.3. Tönkremeneteli idő a töréspont meghatározásával.....</b>           | <b>11</b> |
| <b>2.4. Anyagtulajdonságok meghatározása .....</b>                         | <b>13</b> |
| <b>2.5. A terményekben kialakuló energiáttranszport .....</b>              | <b>15</b> |
| <b>2.6. A mérésekkel meghatározott paraméterek összefoglalása .....</b>    | <b>17</b> |
| 3. EREDMÉNYEK .....  | 18        |
| <b>3.1. A külső és belső tönkremeneteli időpontok kiértékelése .....</b>   | <b>18</b> |
| <b>3.2. A viszkoelasztikus modellparaméterek kiértékelése .....</b>        | <b>22</b> |
| <b>3.3. Lineáris regressziós tönkremeneteli modellek kidolgozása .....</b> | <b>24</b> |
| 4. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK .....  | 26        |
| 5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK.....                                      | 28        |
| 6. ÖSSZEFOGLALÁS .....   | 29        |
| 7. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ KIEMELT<br>PUBLIKÁCIÓK .....        | 30        |

## JELÖLÉSJEGYZÉK

|                    |  |                        |
|--------------------|--|------------------------|
| $E_{sz1}, E_{sz2}$ | számítógépes modell rugalmas elemei                            | [N mm <sup>-1</sup> ]  |
| $E_D$              | disszipált energia   | [N mm]                 |
| $E_{DR}$           | disszipált energia arány                                       | [-]                    |
| $E_{DRmax}$        | disszipált energia arány maximális értéke                      | [-]                    |
| $E_R$              | rugalmas alakváltozási energia                                 | [mJ]                   |
| $F$                | nyomóterhelés  | [N]                    |
| $F_m$              | periodikus nyomóterhelési függvény                             | [N]                    |
| $F_{max}$          | periodikus nyomóterhelés maximális értéke                      | [N]                    |
| $STTF$             | tönkrementeli idő szórása                                      | [s]                    |
| $t$                | idő  | [s]                    |
| $t_{wM}$           | a terhelés kezdete és a tehermentesítés vége között eltelt idő | [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]                   |
| $\eta_{sz1}$       | számítógépes modell viszkózus eleme                            | [Ns mm <sup>-1</sup> ] |
| $\omega$           | szögsebesség   | [s <sup>-1</sup> ]     |
| $TTF$              | tönkrementeli idő  | [s]                    |
| $TTF_B$            | termény belső töréspontjáig eltelt időtartam                   | [s]                    |
| $TTF_G$            | Golden almák tönkrementeli frekvenciafüggését leíró egyenlet   | [s]                    |
| $TTF_K$            | termény külső töréspontjáig eltelt időtartam                   | [s]                    |
| $TTF_P$            | Packham körték tönkrementeli frekvenciafüggését leíró egyenlet | [s]                    |
| $TTFB_G$           | Golden almák belső tönkrementeli frekvenciafüggése             | [s]                    |
| $TTFK_G$           | Golden almák külső tönkrementeli frekvenciafüggése             | [s]                    |
| $TTFB_P$           | Packham körték belső tönkrementeli frekvenciafüggése           | [s]                    |
| $TTFK_P$           | Packham körték külső tönkrementeli 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 terményegyedre.

Bár az alaki és minőségi tulajdonságok megkülönböztetésére és válogatására fókuszáló gépi módszerek hatékonysága folyamatosan növekszik 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. 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 vagy rezgésanalízis útján. 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.

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 összeggésekben is évről évre stabilan jelen van. 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 használom, 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.

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:

- viszkoelasztikus modell alkalmazása a gyümölcsök anyagi viselkedésének leírásához,
- a tönkremeneteli folyamattal leginkább összefüggésbe hozható disszipált-energia mutatók meghatározása,
- valamint a tönkremeneteli idő definiálása és megfelelő mérési módszer kidolgozása a meghatározásához.

A kapott paraméterekkel a tönkremeneteli idő leírására fókuszálok, a termények sérülési mechanizmusainak jellemzésére lineáris összefüggések felállítására törekszem.

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 terményfajta mechanikai ellenállóképességét írja le.

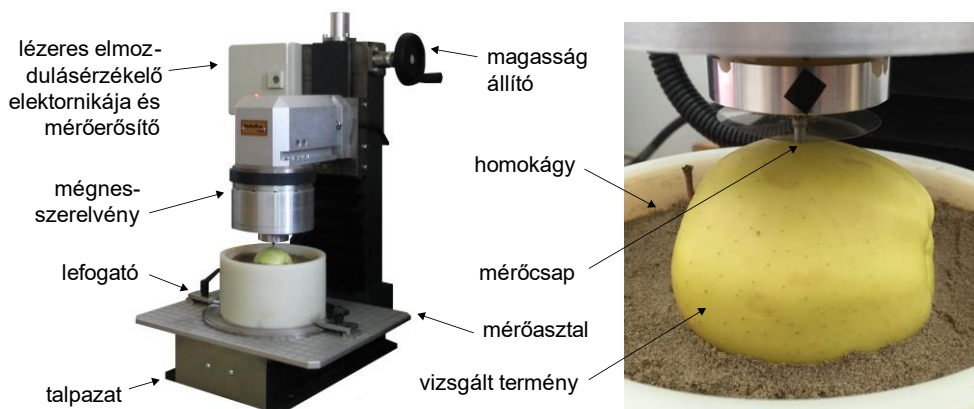
## 2. ANYAG ÉS MÓDSZER

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.

### 2.1. A mérésekhez használt eszközök

#### *A DyMaTest és a mérőrendszer*

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. A mérésekhez használt DyMaTest anyagvizsgáló berendezést az 1. ábra mutatja be.



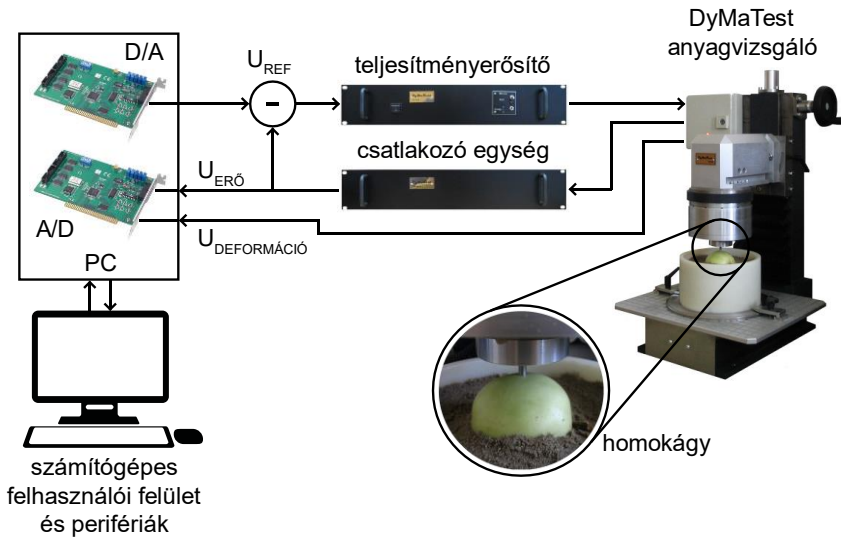
1. ábra A DyMaTest anyagvizsgáló berendezés felépítése

A deformáció-adatok a mérőcsap elmozdulása alapján regisztrálhatók, ami egy OMRON ZX LT010 lézeres szenzor segítségével történik 10 mm-es tartományban, 3  $\mu\text{m}$ -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, amelyben Kyowa KFG-2-120-C1-23 típusú nyúlásmérő ellenállások működnek. Az erő- és deformációadatok az idő függvényében is megjeleníthetők, a mérések során az adatrögzítéshez 2 kHz-es mintavételezést használtam.

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 mérések során a termények egy homokágyban helyezkednek el (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 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, szitálási és tömörítési műveletekből állt.

A 2. 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 eszközözig, amelyben egy elektromechanikus átalakító a villamos jelet erőhatássá transzformálja.



2. ábra A DyMaTest anyagvizsgáló és mérőrendszere

### *A terhelőerő beállítása*

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:

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

ahol  $F_{\max}$  a periodikus terhelési függvény csúcserőértéke [N],  $\omega$  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. Az 1. táblázat a Golden Delicious a Packham körték esetén alkalmazott terhelési beállításokat összegzi.

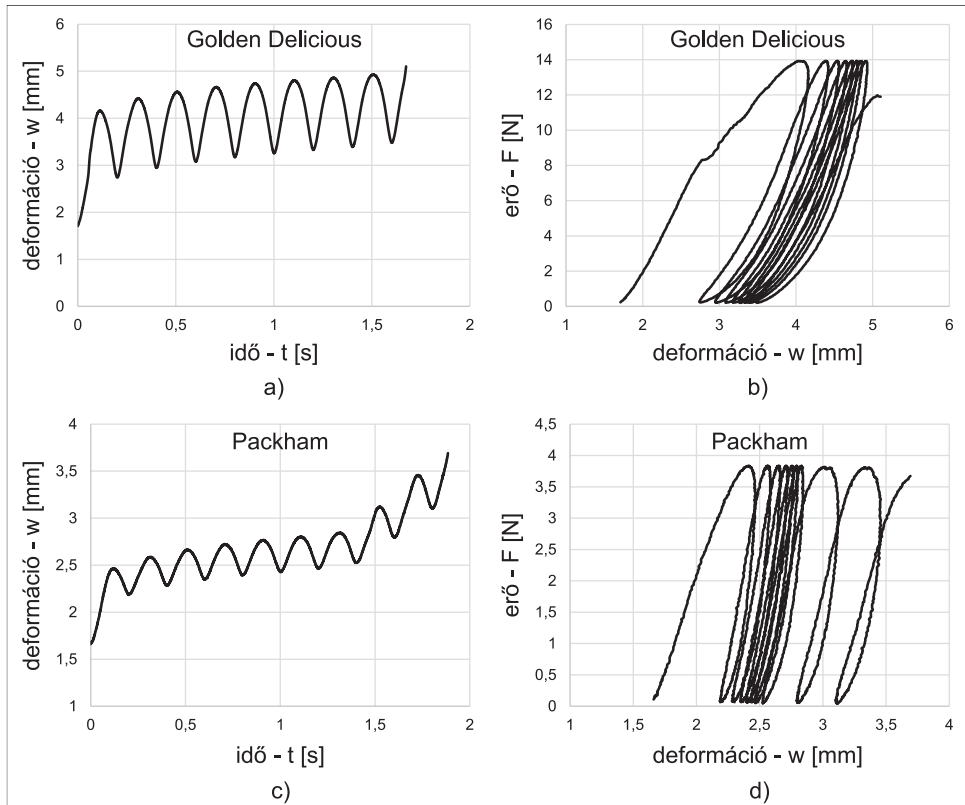
1. táblázat A mérések során beállított terhelőerők paramétere

| 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;<br>5; 7,5;<br>10; 11,6<br>Hz | Frekvencia          | f         | 2,5; 3,7;<br>5; 7,5;<br>10; 11,6<br>Hz |

A szállítással foglalkozó kutatásokból megismert legveszélyesebb frekvenciatartományból, 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.

## 2.2. A termények alakváltozási görbéi

Az alkalmazott ismétlődő terhelés hatására a 3. ábrán látható válaszfüggvényt kapjuk, 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. ábra Golden Delicious almák és Packham körték alakváltozási görbéi

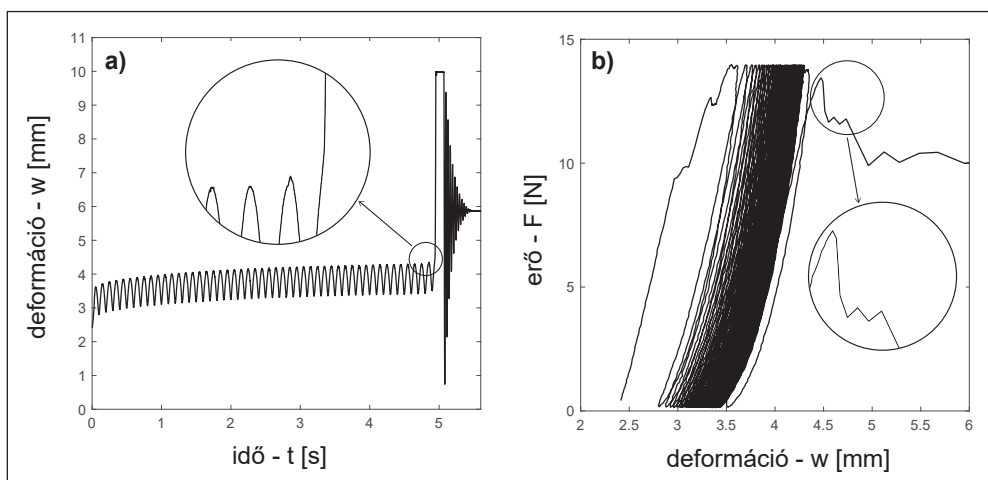
A termények erő-deformáció diagramjain egy ismétlődő hiszterézis görbe figyelhető meg (3/b és d ábra), ahol a dinamikus kúszás jelenségére a maradó alakváltozás növekedése utal. A terhelési és tehermentesítési görbék által határolt terület a termény adott ciklusra jellemző energiamutatóival szoros összefüggésben áll.

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.

### 2.3. 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 szövetében. Ilyenkor a héj és a gyümölcshús egyaránt károsodik, az anyagi viselkedést így nem egy homogén összetételű struktúra, hanem egy „szerkezet” modellezésével közelítem.

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 (4. ábra). A töréspontot a sejtszerkezet belsejében egy kezdeti törés előzi meg, a biológiai folyáshatár, ami a tönkremeneteli folyamat gyors lefolyása miatt ezeken a görbéken kimutathatatlan.



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

A töréspont a deformáció időfüggvényén a meredek felfutás előtt keresendő, az utolsó felterhelés és a felfutás határán viszont sokszor nem észlelhető jól kivehető inflexió pont.

A pontosabb meghatározás érdekében a terhelési folyamatokat egy másodpercenként 240 képkockát rögzítő kamerával is nyomon követtem, a feldolgozáshoz pedig egy olyan videószerkesztő 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 (5/b ábra), aminek a terhelési folyamatban az időpontját határozom meg.



a)

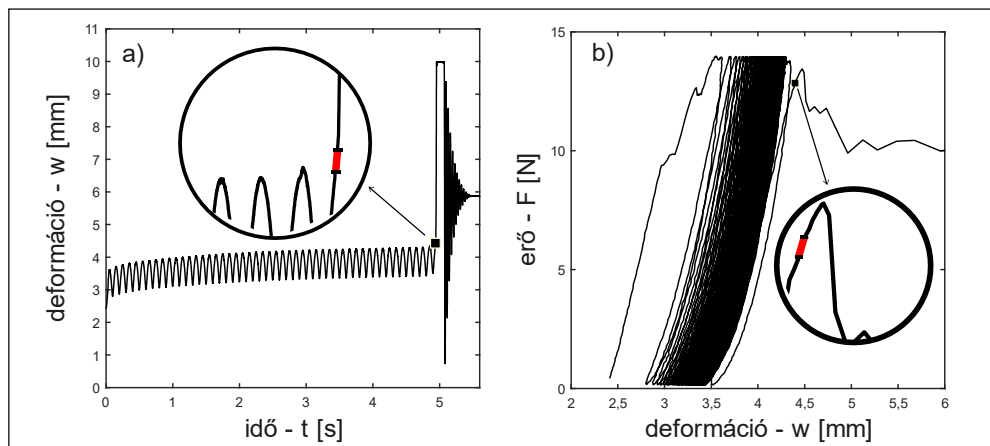
b)

5. ábra Nagy képkockasebességű felvétel elemzése

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 töréspontot egy időparaméterként kezeltem, 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.

Mivel a kamera legkisebb felbontási egysége 4,16 milliszekundum, a képkocka-elemzés ekkora abszolút hibával működik. Mivel a DyMaTest felbontása 8,3-szor akkora, mint a kameráé, a 6. ábrán kijelölt tartományban a tönkremeneteli idő a DyMaTest által mért adatsorban 8 további értéket vehet fel. A tényleges tönkremeneteli idő tehát az ábrán pirossal jelölt tartományban helyezkedik el.

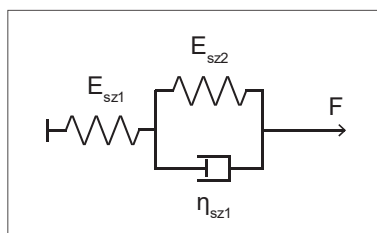


6. ábra Hibasáv a töréspont helyének behatárolására

## 2.4. Anyagtulajdonságok meghatározása

### *A viszkoelasztikus modell*

Munkámban korábbi kutatásokra támaszkodva a Poynting-Thomson modellt alkalmaztam a vizsgált termények anyagtulajdonságainak jellemzéséhez. A Poynting-Thomson test egy háromelemes modell (7. ábra), amellyel az almás-termésű gyümölcsök kúszási és relaxációs folyamata is jól leírható.



7. ábra A Poynting-Thomson test

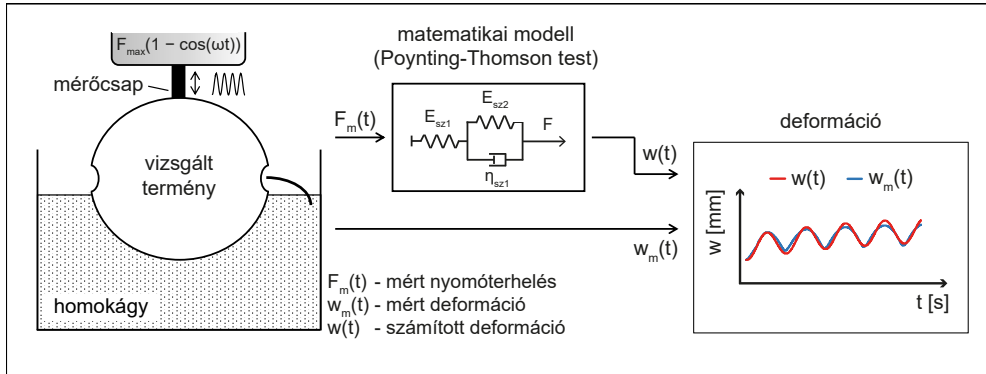
A Poynting-Thomson egyenlet azon együtthatóit keresem, amelyekkel a mérések során kapott kúszási folyamatokra a legjobb közelítés alkalmazható. A szakirodalmi alkalmazásokhoz képest a feszültség helyett erő értékekkel (és azok deriváltjával), a fajlagos nyúlások helyett pedig deformációval dolgoztam – hosszúságegységeknél méter helyett milliméterrel szerepel. A 7. ábrán szereplő kapcsolás így az alábbi egyenlettel írható le:

$$F_m + \frac{\eta_{sz1}}{E_{sz1} + E_{sz2}} \dot{F}_m = \frac{E_{sz1} E_{sz2}}{E_{sz1} + E_{sz2}} w_m + \frac{E_{sz1} \eta_{sz1}}{E_{sz1} + E_{sz2}} \dot{w}_m, \quad (2)$$

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

### *Számítógépes modell identifikációja*

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 8. 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 modellegyütthetők meghatározása.



8. ábra Számítógépes matematikai modell identifikációja

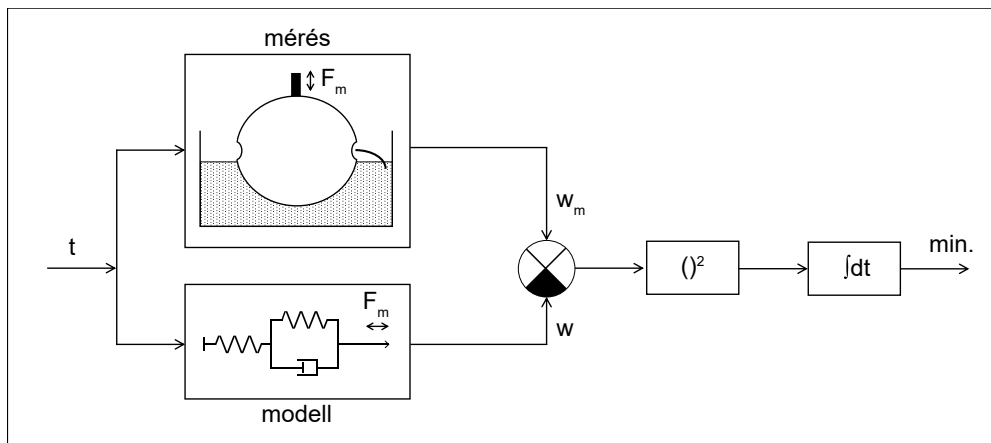
A matematikai modell által adható legjobb közelítés érdekében a két adatsor közötti eltérést kell minimalizálni:

$$w_m(t) - w(t) \rightarrow \min. \quad (3)$$

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

$$\int_0^T (w_m(t) - w(t))^2 dt \rightarrow \min. \quad (4)$$

Ezek alapján az identifikáció hatásvázlatát a 9. ábra szemlélteti. A minimumkeresési folyamat futtatása után a 300 méréshez tartozó  $E_{sz1}$ ,  $E_{sz2}$  és  $\eta_{sz1}$  modellegyütthatókat rögzítettem, a matematikai rendszerrel végzett közelítések  $R^2 = 0,967 - 0,998$  értékek között változtak.

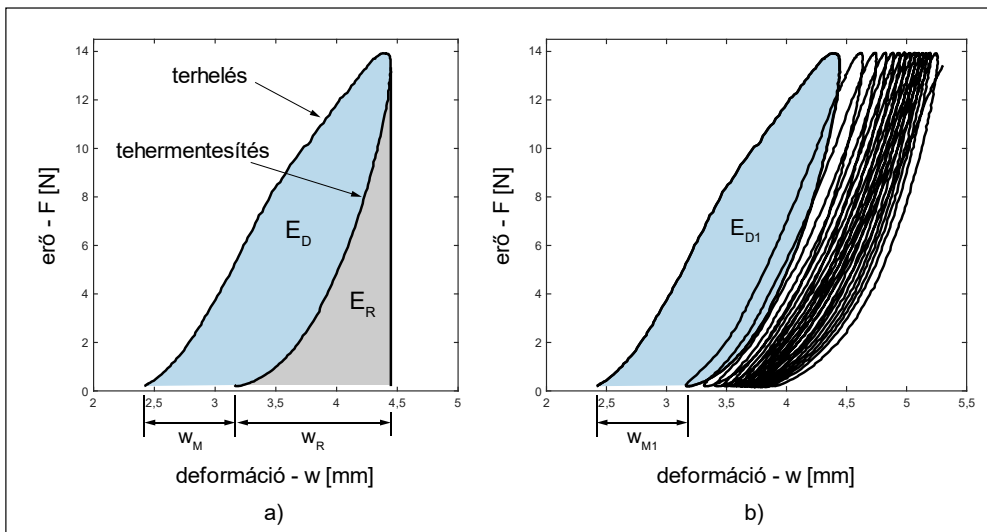


9. ábra A rendszeridentifikáció hatásvázlata

## 2.5. A terményekben kialakuló energiateranszport

### *A termények mechanikai hiszterézis görbéi*

Egy tetszőleges terhelési ciklusban megjelenített erő-deformáció görbe megmutatja a rugalmas és a visszafordíthatatlan folyamatokból származó alakváltozási és energiaviszonyokat (10/a ábra). 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.



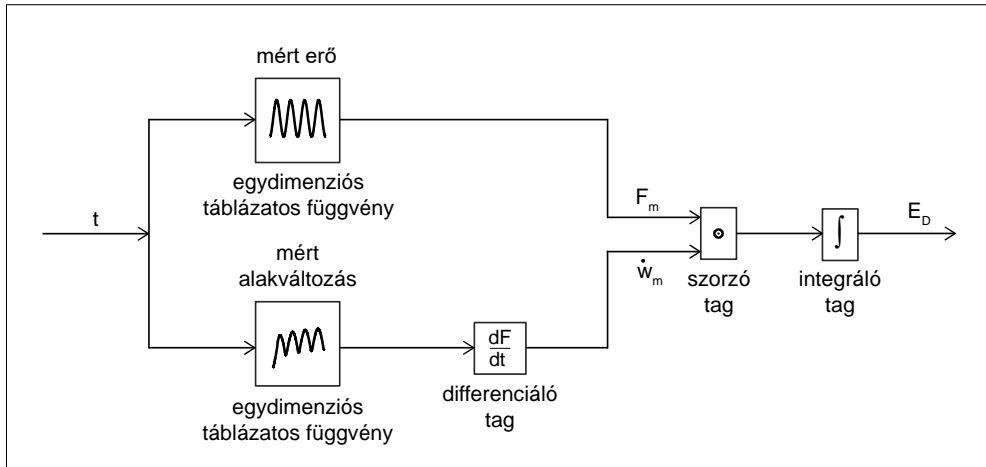
10. ábra Egy terhelési ciklus erő-deformáció görbéje, valamint a termény erő-deformáció görbéje a tönkrementelig egy Golden Delicious alma esetén

Az energiavesztés a terhelési és tehermentesítési görbék közötti terület meghatározásával számítható:

$$E_D = \int_0^{t_{w_M}} F \frac{dw}{dt} dt, \quad (5)$$

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

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. Az 5. egyenleten alapuló blokkorientált megoldást szintén Simulink környezetben valósítottam meg, melynek hatásvázlatát a 11. ábra mutatja be.



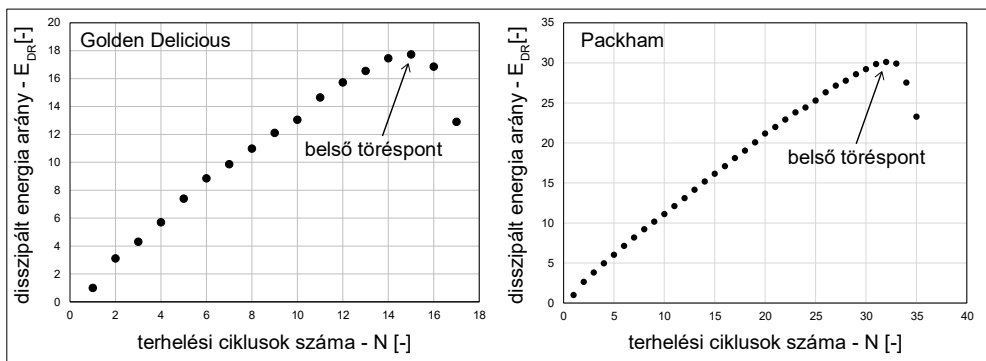
11. ábra Disszipált energia meghatározása Simulink környezetben

### Belső töréspont meghatározása

A ciklusonként meghatározott energiaveszteség értékekkel egy újabb tönkremeneteli paraméter definiálására is lehetőség nyílik. Ehhez az úgynevezett disszipált energia-arányt számoltam ki, melyet a különböző aszfaltrétegek reológiai vizsgálatánál alkalmaznak:

$$E_{DR} = \frac{\sum_{i=0}^n E_{Di}}{E_{Dn}}, \quad (6)$$

ahol  $E_{Di}$  az adott ciklusig összegzett energiaveszteség [mJ],  $E_{Dn}$  pedig az adott ciklus energiavesztesége [mJ]. Ha a kapott disszipált energia arányt a ciklusszám függvényében ábrázoljuk (12. ábra), a diagramokon egy jól kivehető maximális érték keletkezik. A kifáradással járó tönkremenetel tehát kétféleképpen is jellemezhető: egy belső törésponttal a halmozódó disszipált energiák tipikus görbéjén, valamint a héj átszakadásánál regisztrált időponttal.



12. ábra A kifáradásra utaló belső töréspont Golden Delicious almák és Packham körték esetén



## 2.6. A mérésekkel meghatározott paraméterek összefoglalása

Az előző fejezetekben ismertetett mérési eredmények a tönkremeneteli modell alapját képezik. A paramétereket a 2. táblázat ismerteti.

2. táblázat A mérések során kapott paraméterek

| Paraméter                          | Jelölés            | Leírás                                       | Mértékegység        |
|------------------------------------|--------------------|--|---------------------|
| Tönkremeneteli idő                 | TTF <sub>B</sub>   | termény belső töréspontjáig eltelt időtartam | s                   |
|                                    | TTF <sub>K</sub>   | termény külső töréspontjáig eltelt időtartam | s                   |
| Viszkoelasztikus modellegyütthetők | E <sub>sz1</sub>   | rugalmas elem                                | N mm <sup>-1</sup>  |
|                                    | E <sub>sz2</sub>   | rugalmas elem                                | N mm <sup>-1</sup>  |
|                                    | η <sub>sz1</sub>   | viszkózus elem                               | Ns mm <sup>-1</sup> |
| Disszipált energia                 | E <sub>DRmax</sub> | disszipált energia arány csúcsértéke         | -                   |
| Frekvencia                         | f                  | az ismétlődő terhelés frekvenciája           | Hz                  |

A vizsgálatok során egy terményhez hat vizsgálati frekvencia tartozik (2,5, 3,7, 5, 7,5, 10 és 11,6 Hz), a mérések 25 Golden Delicious alma és 25 Packham körte ciklikus terhelésével zajlottak.

Hipotézis H1: 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 mérések útján meghatározott paraméterek segítségével egy olyan lineáris többváltozós modell állítható fel, amely a

$$TTF = a + bE_{sz1} + cE_{sz2} + d\eta_{sz1} + hE_{DRmax} \quad (7)$$

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

### 3. EREDMÉNYEK

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

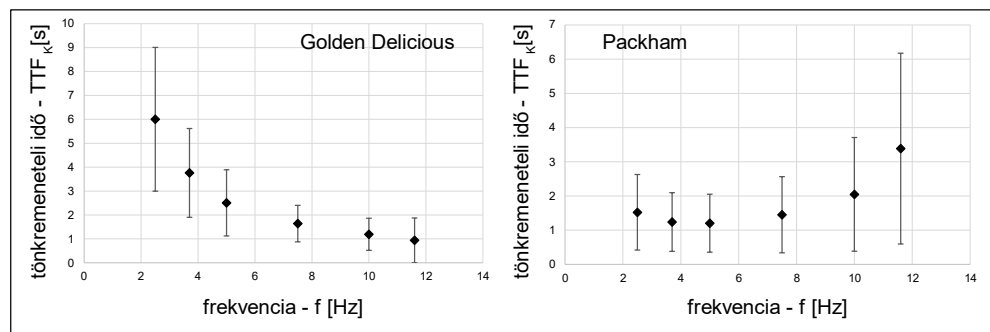
#### 3.1. A külső és belső tönkremeneteli időpontok kiértékelése

##### *A külső töréspontig eltelt időtartamok frekvenciafüggése*

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 3. táblázat a 25 mérés átlagát összegzi a vizsgált frekvenciatartományban, a 13. ábrán pedig az adatok alapján készített diagramok láthatók, ahol a feltüntetett hibasávok az egyes mérési beállításoknál végzett ismétlések szórását mutatják.

3. táblázat A külső törésponti idő átlagai és az eredmények szórása

| frekvencia<br>[Hz] | Golden               |                   | Packham              |                   |
|--------------------|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------|
|                    | TTF <sub>K</sub> [s] | szórás – STTF [s] | TTF <sub>K</sub> [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             |

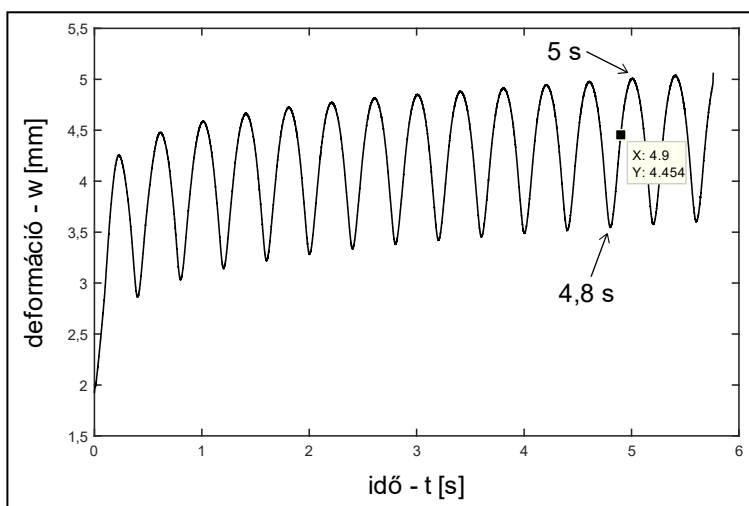


13. ábra A külső töréspontig eltelt időtartamok frekvenciafüggése Golden Delicious almák és Packham körték esetén

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

#### *A belső töréspontig eltelt időtartamok 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 erőkifejtés 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 (14. ábra).



14. ábra Belső töréspontig eltelt időtartam meghatározása az energiahányados csúcserőértékének ciklusszámnál

A kiértékelés a különböző frekvenciaértékek esetén a 4. táblázatban szereplő abszolút hibaértékeket hordozza.

#### 4. táblázat A belső töréspont kiértékelésénél adódó abszolút hiba

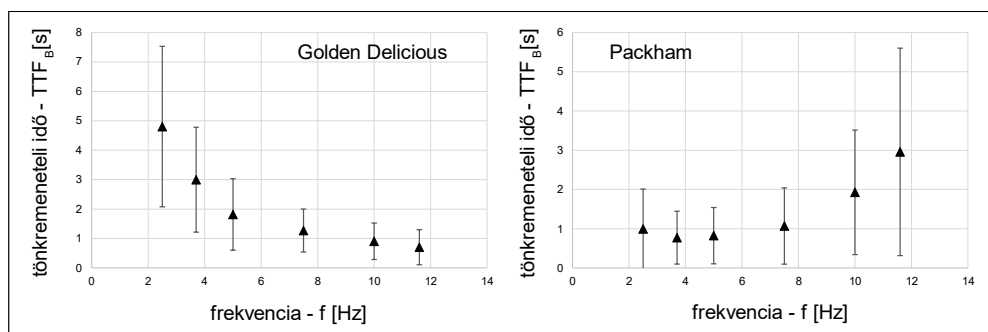
|                   |     |       |      |       |       |       |
|-------------------|-----|-------|------|-------|-------|-------|
| frekvencia [Hz]   | 2,5 | 3,7   | 5    | 7,5   | 10    | 11,6  |
| abszolút hiba [s] | 0,1 | 0,067 | 0,05 | 0,033 | 0,025 | 0,022 |

### 3. Eredmények

A belső töréspontok átlagolt időpontjait a 5. táblázat, valamint a 15. ábra összegzi.

5. táblázat A belső törésponti idő átlagai és az eredmények szórása

| frekvencia<br>[Hz] | Golden               |                   | Packham              |                   |
|--------------------|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------|
|                    | TTF <sub>B</sub> [s] | szórás – STTF [s] | TTF <sub>B</sub> [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             |



15. ábra A belső töréspontig eltelt időtartamok frekvenciafüggése Golden Delicious almák és Packham körték esetén

Az energiamutatók alapján kalkulált belső törésponti időtartamok frekvenciafüggése a képkockaelemzés során kapott eredményekkel azonos tendenciát mutat.

#### Tönkrementeli időtartamok összehasonlítása

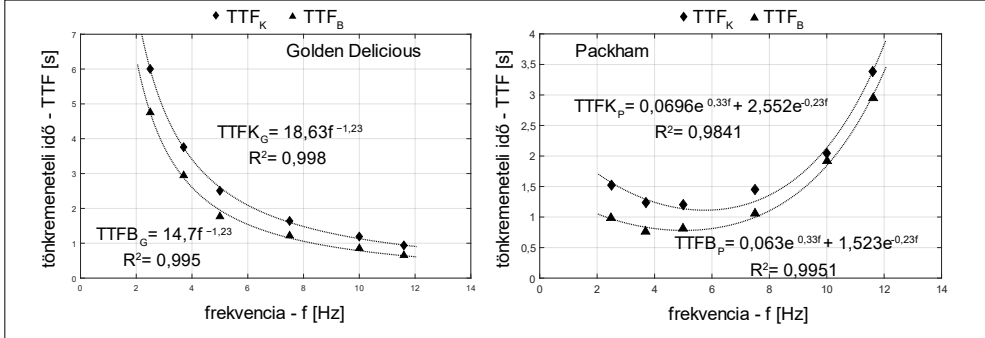
Az összehasonlítás érdekében először a külső és belső tönkrementeli időtartamok hányadosát vizsgáltam, ami csak a körték esetén mutat összefüggést a vizsgálati frekvenciával (a hányados értéke a nagyobb frekvenciák felé haladva lineárisan növekszik).

Mivel a vizsgált frekvenciatartományban a tönkrementeli 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

$$TTF_G = a_G f^{-b_G} \quad (8)$$

### 3. Eredmények

egyenletet használtam, ahol  $a_G$  és  $b_G$  a közelítés együtthatói. A közelítő görbék a 16. ábra bal oldalán láthatók. Az grafikonon feltüntetett egyenletekbe történő behelyettesítés után az alkalmazott modellek átlagértékekre vonatkozó pontosságát a 6. táblázat tartalmazza.



16. ábra A tönkrementel frekvenciafüggésére felírt modellek Golden Delicious almák és Packham körték esetén

6. táblázat Frekvenciafüggési modellek pontossága Golden almáknál

| frekvencia<br>[Hz] | Golden                  |                                     |             |                         |                                     |          |
|--------------------|-------------------------|-------------------------------------|-------------|-------------------------|-------------------------------------|----------|
|                    | TTF <sub>K</sub><br>[s] | TTF <sub>K<sub>G</sub></sub><br>[s] | hiba<br>[%] | TTF <sub>B</sub><br>[s] | TTF <sub>B<sub>G</sub></sub><br>[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 tönkrementeli tendenciák az almáknál felírt közelítéssel egyáltalán nem jellemezhetők, ezeknél a terményeknél ráadásul olyan egyenletet kell alkalmazni, amivel a folyamat 5 Hz-nél bekövetkező szélsőértékét is kezelni lehet. Ezek alapján a

$$TTF_P = a_P e^{b_P f} + c_P e^{d_P f} \quad (9)$$

egyenletet használtam, ahol  $a_P$ ,  $b_P$ ,  $c_P$  és  $d_P$  a két részből álló exponenciális folyamat együtthatói. Az így definiált görbék a 16. ábra jobb oldalán láthatók. A modellek átlagértékekre vonatkozó pontosságát a 7. táblázat ismerteti.

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.

7. táblázat Frekvenciafüggési modellek pontossága Packham körtéknél

| frekvencia<br>[Hz] | Packham                 |               |             |                         |                          |          |
|--------------------|-------------------------|---------------|-------------|-------------------------|--------------------------|----------|
|                    | TTF <sub>K</sub><br>[s] | TTFK<br>P [s] | hiba<br>[%] | TTF <sub>B</sub><br>[s] | TTFB <sub>P</sub><br>[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    |

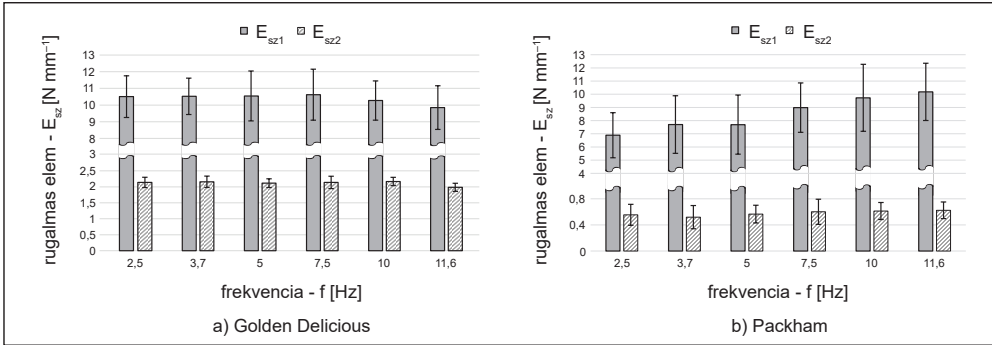
### 3.2. A viszkoelasztikus modellparaméterek kiértékelése

A Golden almák rugalmas tulajdonságait vizsgálva nem fedezhető fel jelentős frekvenciafüggés, az  $E_{sz1}$  paraméter a nagyobb frekvenciákon enyhén csökkenést mutat. A Packham körtéknél viszont az  $E_{sz1}$  komponensek növekednek, ez a rugalmasság-növekedés pedig nagymértékben hozzájárul a nagyobb frekvenciákon tapasztalt mechanikai ellenállóképességhez. Az  $E_{sz2}$  rugalmas elem az adott tartományon belül a Golden és Packham termények esetén is állandó. A rugalmas elemek átlagértékeit, valamint a szórást a 8. táblázat tartalmazza, az eredmények frekvenciafüggése pedig a 17. ábrán látható.

8. táblázat Rugalmas elem értékei Golden almáknál és Packham körtéknél

| Golden  |                                    |   |                                    |   |
|---------|------------------------------------|---|------------------------------------|---|
| f [Hz]  | $E_{sz1}$<br>[N mm <sup>-1</sup> ] | $E_{sz1}$ szórás<br>[N mm <sup>-1</sup> ] | $E_{sz2}$<br>[N mm <sup>-1</sup> ] | $E_{sz2}$ szórás<br>[N mm <sup>-1</sup> ] |
| 2,5     | 10,504                             | 1,250                                     | 2,139                              | 0,277                                     |
| 3,7     | 10,523                             | 1,091                                     | 2,158                              | 0,277                                     |
| 5       | 10,546                             | 1,497                                     | 2,116                              | 0,292                                     |
| 7,5     | 10,622                             | 1,529                                     | 2,139                              | 0,269                                     |
| 10      | 10,271                             | 1,177                                     | 2,167                              | 0,206                                     |
| 11,6    | 9,848                              | 1,310                                     | 1,984                              | 0,361                                     |
| Packham |                                    |   |                                    |   |
| f [Hz]  | $E_{sz1}$<br>[N mm <sup>-1</sup> ] | $E_{sz1}$ szórás<br>[N mm <sup>-1</sup> ] | $E_{sz2}$<br>[N mm <sup>-1</sup> ] | $E_{sz2}$ szórás<br>[N mm <sup>-1</sup> ] |
| 2,5     | 6,896                              | 1,710                                     | 0,554                              | 0,160                                     |
| 3,7     | 7,705                              | 2,184                                     | 0,518                              | 0,177                                     |
| 5       | 7,695                              | 2,243                                     | 0,565                              | 0,135                                     |
| 7,5     | 8,981                              | 1,873                                     | 0,600                              | 0,192                                     |
| 10      | 9,730                              | 2,540                                     | 0,613                              | 0,130                                     |
| 11,6    | 10,178                             | 2,172                                     | 0,623                              | 0,127                                     |

### 3. Eredmények

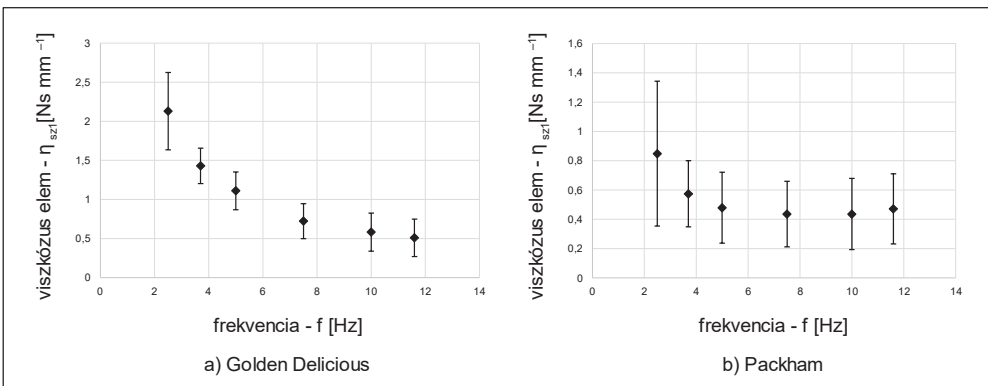


17. ábra Rugalmas modellparaméterek frekvenciafüggése

Az alkalmazott Poynting-Thomson test viszkózus paramétere mindkét termény esetén egyértelmű frekvenciafüggést mutat, a körték esetében viszont a tönkrementeli időtartamokhoz hasonlóan, és valószínűleg azokkal ok-okozati összefüggésben, a csökkenő tendencia megszakad, és növekedésbe fordul. A viszkózus elemek átlagértékeit és szórását a 9. táblázat mutatja, a frekvenciafüggés pedig a 18. ábrán látható.

9. táblázat Viszkózus elem értékei Golden almánál és Packham körtéknél

| f [Hz] | Golden                                 |   | Packham                                |   |
|--------|--|---|--|---|
|        | $\eta_{sz1}$<br>[Ns mm <sup>-1</sup> ] | $\eta_{sz1}$ szórás<br>[Ns mm <sup>-1</sup> ] | $\eta_{sz1}$<br>[Ns mm <sup>-1</sup> ] | $\eta_{sz1}$ szórás<br>[Ns mm <sup>-1</sup> ] |
| 2,5    | 2,129                                  | 0,703   | 0,848                                  | 0,494   |
| 3,7    | 1,429                                  | 0,358   | 0,574                                  | 0,226   |
| 5      | 1,109                                  | 0,251   | 0,479                                  | 0,242   |
| 7,5    | 0,722                                  | 0,204   | 0,435                                  | 0,223   |
| 10     | 0,581                                  | 0,154   | 0,436                                  | 0,243   |
| 11,6   | 0,509                                  | 0,106   | 0,471                                  | 0,239   |



18. ábra Viszkózus modellparaméterek frekvenciafüggése

A tönkrementeli regressziós modell felállítása előtt a frekvenciafüggés mértékét a viszkoelasztikus modellparaméterek esetében varianciaanalízis (ANOVA - analysis of variance) segítségével is ellenőriztem, ennek eredményét a 10. táblázat tartalmazza.

10. 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  |
| $\eta_{sz1}$ | 75,393 | <0,001 | $\eta_{sz1}$ | 6,427 | <0,001 |

A Golden almák esetén kizárólag az  $\eta_{sz1}$  együtthatónál van szignifikáns összefüggés ( $p < 0,05$ ). A rugalmas elemek esetén a diagramon nem észlelhető szembetűnő kapcsolat a frekvenciával, ezt a megfigyelést pedig a varianciaanalízis is megerősítette. A körték tönkrementeli 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.

### 3.3. Lineáris regressziós tönkrementeli modellek kidolgozása

A mérések során kapott paramétereket felhasználva a Golden Delicious almák esetén négy különböző tönkrementeli modell lehetősége vetődik fel, amelyeket a 11. táblázat ismertet.

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

| modell | $R^2$ | módosított $R^2$ | a becslés standard hibája | F változása | F szignifikanciájának változása |
|--------|-------|------------------|---------------------------|-------------|---------------------------------|
| a      | 0,814 | 0,812            | 1,03413                   | 641,502     | 0,000                           |
| b      | 0,927 | 0,926            | 0,64922                   | 226,984     | 0,000                           |
| c      | 0,943 | 0,941            | 0,57824                   | 39,039      | 0,000                           |
| d      | 0,945 | 0,943            | 0,56840                   | 6,064       | 0,015                           |

a változók:  $\eta_{sz1}$

c változók:  $\eta_{sz1}$ ,  $E_{DRmax}$ ,  $E_{sz1}$

b változók:  $\eta_{sz1}$ ,  $E_{DRmax}$

d változók:  $\eta_{sz1}$ ,  $E_{DRmax}$ ,  $E_{sz1}$ ,  $E_{sz2}$

Az  $E_{sz2}$  csak elhanyagolható mértékben járul hozzá az illeszkedés pontosságához, ezért a legegyszerűbb leírás érdekében a harmadik modell kiválasztása javasolt. Ezt figyelembe véve és a számított állandókat felhasználva a Golden Delicious almák esetén az alábbi közelítés állítható fel:



### 3. Eredmények

$$TTF_K = 0,533 + 2,736 \eta_{sz1} + 0,141 E_{DRmax} - 0,261 E_{sz1}. \quad (10)$$

A Packham körtékre alkalmazható modelleket a 12. táblázat összegzi. Az almákhoz képest az egyes változatokban már a terhelési frekvencia is megjelenik, ami a tönkremeneteli idő leírásában ezúttal fontos szerepet játszik.

12. táblázat A mért paramétereiből létrehozható lineáris modellek Packham körték esetén

| modell | R <sup>2</sup> | módosított R <sup>2</sup> | a becslés standard hibája | F változása | F szignifikanciájának változása |
|--------|----------------|---------------------------|---------------------------|-------------|---------------------------------|
| a      | 0,785          | 0,783                     | 0,66044                   | 488,514     | 0,000                           |
| b      | 0,871          | 0,869                     | 0,51404                   | 88,193      | 0,000                           |
| c      | 0,896          | 0,893                     | 0,46299                   | 31,948      | 0,000                           |
| d      | 0,920          | 0,917                     | 0,40765                   | 39,273      | 0,000                           |

a változók: E<sub>DRmax</sub>

c változók: E<sub>DRmax</sub>,  $\eta_{sz1}$ , f

b változók: E<sub>DRmax</sub>,  $\eta_{sz1}$

d változók: E<sub>DRmax</sub>,  $\eta_{sz1}$ , f, E<sub>sz2</sub>

A Packham körték esetén felírható egyenlet:

$$TTF_K = 0,091 + 0,788 \eta_{sz1} + 0,085 E_{DRmax} - 0,103 f + 1,524 E_{sz2}. \quad (11)$$

Az egyenletek érvényességét ezúttal is a varianciaanalízissel ellenőriztem, melynek eredményeit a 13. táblázat tartalmazza. Mivel a kapott F értékek szignifikánsnak minősülnek ( $p < 0,05$ ), a felírt közelítések érvényesek.

13. táblázat Közelítő egyenletek varianciaanalízise

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

A Golden Delicious almánál 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 nagyobb hibaértékek keletkezése nem a frekvenciabeállításokhoz, hanem az egyes termények eltérő mechanikai ellenállóképességéhez és anyagtulajdonságaihoz kötődik.

#### 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:

$$TTFK_G = 18,63 f^{-1,23},$$

$$TTFB_G = 14,7 f^{-1,23},$$

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:

$$TTFK_P = 0,069 e^{0,33f} + 2,552 e^{-0,238f},$$

$$TTFB_P = 0,063 e^{0,33f} + 1,523 e^{-0,238f},$$

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  $\eta_{sz1}$  viszkózus komponens) és az energiamutatók meghatározásából származó energiavesztéségi-hányados csúcstértékének ( $E_{DRmax}$ ) felhasználásával olyan lineáris közelítő egyenletet állítottam fel, amely a Golden almák tönkremeneteli idejét írja le:

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

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 almáktól eltérően a Poynting-Thomson egyenlet  $E_{sz2}$  rugalmas komponense került, az  $\eta_{sz1}$  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 sejtszerkezet belsejében megjelenő károsodási határérték ismerete 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. 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. A belső töréspont az adott gyümölcsök esetén mikroszintű vizsgálatra és megerősítésre vár, amely során a sejtszerkezetben létrejövő károsodási folyamat részletesebben is leírható.

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.

## 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 kiszűrnek. 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.

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 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, valamint az energiaértékekből számított belső tönkremeneteli határértékek között olyan kapcsolat fedezhető fel, amivel a belső sejtkárosodás az energiamutatók meghatározása nélkül is megadható egy adott terményfajta esetén. A kutatásomban ismertetett egyenletek ezen tönkremeneteli határértékek kapcsolatát, valamint a sérüléshez kötődő paraméterek mechanikai ellenállóképességre vonatkozó hatását írják le.

## 7. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ KIEMELT 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. Potravinarstvo 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 energiateranszport-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.