

## *Golden Delicious almák és Packham körték mechanikai kifáradási mutatóinak összehasonlítása*

**Kulcsszavak:** gyümölcsök sérülése, TTF (time to failure), gyümölcsök reológiai vizsgálata, viszkoelasztikus modellek, időfüggő alakváltozás, terhelési és tehermentesítési görbék, disszipált energia, biológiai folyáshár, biológiai töréspont, sérülési határérték, sérülési ellenállás, kúszási görbe, deformáció

### 1. ÖSSZEFOGLALÁS

A kertészeti termények feldolgozási folyamataiban az egyik legjelentősebb, a gyümölcs tönkremeneteléhez vezető jelenség az ismétlődő mechanikai igénybevételek miatt bekövetkező kifáradás, ami főleg a szállítás során veszélyezteti a termények épségét. Ilyen sérülések esetében a károsodott gyümölcs közvetlen környezete, vagy akár a teljes terményhalmaz is veszélybe kerülhet, hiszen a romláshoz vezető biológiai folyamatok nem korlátozódnak a károsodott terményegyedre. Az ismétlődő hatások esetében a statikus határtértékhez képest kisebb erő is elegendő a tönkremenetelhez, de a terhelés mellett az adott termény anyagi tulajdonságai, valamint a károsodás közben megfigyelhető energiamérleg is fontos szerepet játszik a mechanikai ellenállás meghatározásában. Munkánkban ennek megfelelően a választott terményeket leginkább jellemző anyagmodellekre, az ismételt terhelések során mért disszipált-energia mutatókra, valamint a tönkremeneteli idő definiálására és meghatározására építjük a tönkremeneteli folyamat leírását. A kísérletek során az Európai Unió almatermelésének legnagyobb arányú képviselője, a Golden Delicious alma, valamint a hosszú tárolhatóságú Packham körte kifáradási jellemzőit hasonlítjuk össze lineáris regressziós modellek felállításával.

<sup>1</sup> Szent István Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Folyamatmérnöki Intézet, Gödöllő (2021. február 1. óta: Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem, Műszaki Intézet)

<sup>2</sup> Szent István Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Géptani és Informatikai Intézet, Gödöllő (2021. február 1. óta: Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem, Műszaki Intézet)

## 2. Bevezetés

A termények szortírozásánál nem csupán a méret és az alak, de az esetleges sérülés kiterjedése, vagy sok esetben maga a károsodás ténye is a válogatás alapját képezi. Az automatizált gépi felismerés – amelyet legtöbb esetben spektrális képalkotási módszerekkel végeznek – napjainkban már hatékonyan különíti el a sérült terményszövetet az egészségestől, a technológia számára pedig a szabad szemmel nem látható, felszín alatti károsodások észlelése sem jelent akadályt [1, 2]. A megbízhatóság egyrészt a hardveres kialakításnak (vagyis a felhasznált eszközök pontosságának), másrészt az alkalmazott algoritmusoknak a függvénye [3]. A módszerrel a válogatáson túl olyan kamerás megfigyelést is alkalmaznak, amely a megfelelő szoftver segítségével a paradicsomok érési állapotát is figyelembe tudja venni, és amely a szedőrobotok teljesen automatizált működését teszi lehetővé [4].

Bár az eredményes felismeréssel a sérült termények könnyedén eltávolíthatók a feldolgozási láncból, a szűrés mellett azt a célkitűzést is szem előtt kell tartani, hogy a betakarítás és a szükséges kezelési folyamatok után minél több egészséges áru jusson el a vevőkhöz. Mivel a nemzetközi felmérések szerint a feldolgozás különböző fázisaiban keletkező veszteségek miatt a termények jelentős része már nem kerül a fogyasztók elé a piacon [5, 6, 7], a sérülések precíz feltárása mellett a megelőzésnek is kiemelten fontos szerepet kell kapnia. Ehhez a termények roncsolásos úton történő vizsgálatára és a tönkremeneteli folyamat közvetlen megfigyelésére is szükség van.

A különféle mezőgazdasági és kertészeti termények anyagi tulajdonságai viszkoelasztikus modellek segítségével írhatók le, amelyek részben rugalmas, részben pedig viszkózus alkotóelemekből állnak. A sorban vagy párhuzamosan kapcsolt alaptagokból összetett anyagi struktúrák is előállíthatók, a háromelemes rendszerek közül pedig a Poynting-Thomson modellt már korábbi kutatásokban is többször alkalmazták az almástermésűek jellemzéséhez [8, 9, 10]. A viszkoelasztikus rendszerek esetében a mechanikai kölcsönhatások miatt létrejövő deformáció nem csupán az igénybevétel nagyságától, de a terhelés sebességétől is függ, a kúszás és a relaxáció pedig fontos részét képezi a terhelési és az alakváltozási folyamatnak: míg az előbbi esetében az állandó terhelés növekvő deformációt eredményez, addig az utóbbi jelenség során az állandó deformáció folyamatos feszültségcsökkenéssel jár [11].

Egy adott termény valamilyen mechanikai behatásra adott reakciója a terhelés-deformáció görbén jelenik meg, amely a kúszási és relaxációs paraméterek mellett a terhelési folyamatban keletkező összes energiamennyiségről is információt ad: a terhelési és tehermentesítési görbék által határolt terület egyéb szakterületeken is alapját képezi a disszipált energiaszámításoknak [12, 13], ez pedig szoros összefüggésben áll a vizsgált anyag viszkoelasztikus tulajdonságaival, valamint a termények esetében a mechanikai ellenállóképességgel és a sérülési hajlandósággal [14].

Azt a terhelési határértéket, amely a sejtszerkezetben bekövetkező mikroszkopikus károsodáshoz vezet – és amely a termény romlását is okozhatja - biológiai folyáshatárnak nevezzük. Bár biológiai anyagként a különböző termények a gyógyulásra, vagy akár a teljes regenerációra is képesek lehetnek, a feldolgozás során alkalmazott mechanikai hatásokat érdemes a biológiai folyáshatár alatt tartani. A határértéket ezen kívül a szabad szemmel is jól látható, nagyobb kiterjedésű károsodás is jelentheti, amelyet a szakirodalom töréspontnak nevez. Ilyen roncsolódás esetén a termény már nagy valószínűség szerint ténylegesen tönkremegy [15, 16]. A sérülési határértékek között általában jelentős szórás tapasztalható (teljesen azonos terhelőerő esetében is), amelyre az adott termény érési állapota, valamint a tárolás és feldolgozás közben biztosított körülmények is hatást gyakorolnak.

A nem megfelelő kezelésemből adódó ütközések mellett a sérülések zömét a szállítás során kialakuló rezgések okozzák. A sérüléssel végződő folyamatok roncsolásos vizsgálatokkal történő megfigyelése sajnos kiesik napjaink kutatási irányvonalából, pedig az ismételt terhelés hatására kialakuló kifáradási jelenség feltérképezése a gyümölcsöknél is elengedhetetlen [17].

A szállítási szimulációk során a legnagyobb károsodást előidéző frekvenciákat már egybehangzóan kimutatták [18, 19, 20], az ismétlődő terhelésekkel végzett roncsolásos vizsgálatoknál a tapasztalatok alapján így a 10 Hz alatti frekvenciatartományt érdemes beállítani.

A zöltségek és a gyümölcsök egy-egy mechanikai tulajdonságának leírásához gyakran alkalmaznak többváltozós regressziós modelleket, amelyek a különböző vizsgálati paraméterek figyelembevételével készülnek [21, 22]. Kutatásunk célja a termények esetében kevésbé tárgyalt kifáradási jelenség tanulmányozása, valamint a sérülési határértékek (biológiai folyáshatár vagy töréspont), és az ezzel összefüggésben álló tényezők (energiamérleg, anyagtulajdonságok) közötti összefüggés meghatározása. A cél egy sérülési határértékre vonatkozó lineáris egyenlet felállítása, amelyet az ismétlődő nyomóterhelés során mérhető paraméterek figyelembevételével határozunk meg.

### 3. Anyag és módszer

#### 3.1. Mérőeszköz és a gyümölcsök rögzítése

A roncsolásos vizsgálatokat a DyMaTest nevű berendezéssel végeztük, amelyet a NAIK Mezőgazdasági Gépesítési Intézet bocsátott a rendelkezésünkre. Az eszköz egy hengeres (lapos felszínű) nyomócsappal terheli a gyümölcsöket, a nyomóerő pedig tetszőlegesen beállítható a készülékhez fejlesztett szoftveres kezelőfelületen [23]. A termény deformációja a mérőcsap elmozdulását érzékelő lézeres szenzorral, az erő pedig a műszerhez kialakított speciális mérőcellával regisztrálható. A vizsgálatok egy szinuszos nyomóerő beállítását követően a gyümölcsök tönkremeneteli határáig történnek.

A terményeket a mérések lebonyolításához egy homokágyban rögzítettük. Annak ellenőrzéséhez, hogy az alkalmazott homok kúszása nem befolyásolja a gyümölcsöknél kapott eredményeket, kontroll méréseket végeztünk, ehhez pedig egy teljesen rugalmatlan, 32 mm átmérőjű csapágygolyót alkalmaztunk. A nyomóterhelések során a fotoelektromos érzékelő mérési tartományában nem volt kimutatható elmozdulás, ezért a homok alakváltozása a gyümölcsök terhelési görbéin egyáltalán nem jelenik meg. A vizsgálatok előtt a homok előkészítése nedvesítési, szítálási és tömörítési műveletekből állt [24].

#### 3.2. A termények alakváltozási görbéi

Az ismétlődő terhelésekkel végzett vizsgálatokhoz egy ciklikus jelalakot alkalmaztunk, amely az alábbi függvénnyel jellemezhető:

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

ahol  $F_{max}$  a periodikus terhelési függvény csúcserőértéke [N],  $\omega$  pedig a terhelés szögsebessége [ $s^{-1}$ ].

A periodikus terhelés hatására a keletkező deformáció szintén periodikus. Az **1.a ábrán** egy Golden alma deformációjának időfüggvénye látható, a **3.b ábrán** pedig az erő-deformáció görbéje. A Packham körtéknél tapasztalható tipikus deformációs görbéket **a 3.c és 3.d ábra** mutatja.

Az állandó amplitúdójú ciklikus terhelés hatására az alakváltozás folyamatosan módosul, ezt pedig a burkológörbék (vagy a középérték) növekedésén vehetjük észre. Mivel ezek a burkológörbék hasonlóan növekednek, mint a statikus terheléskor megfigyelhető kúszási görbék, ezt a folyamatot dinamikus kúszásnak nevezik [25].

A ciklikus terhelésre adott válaszfüggvény a

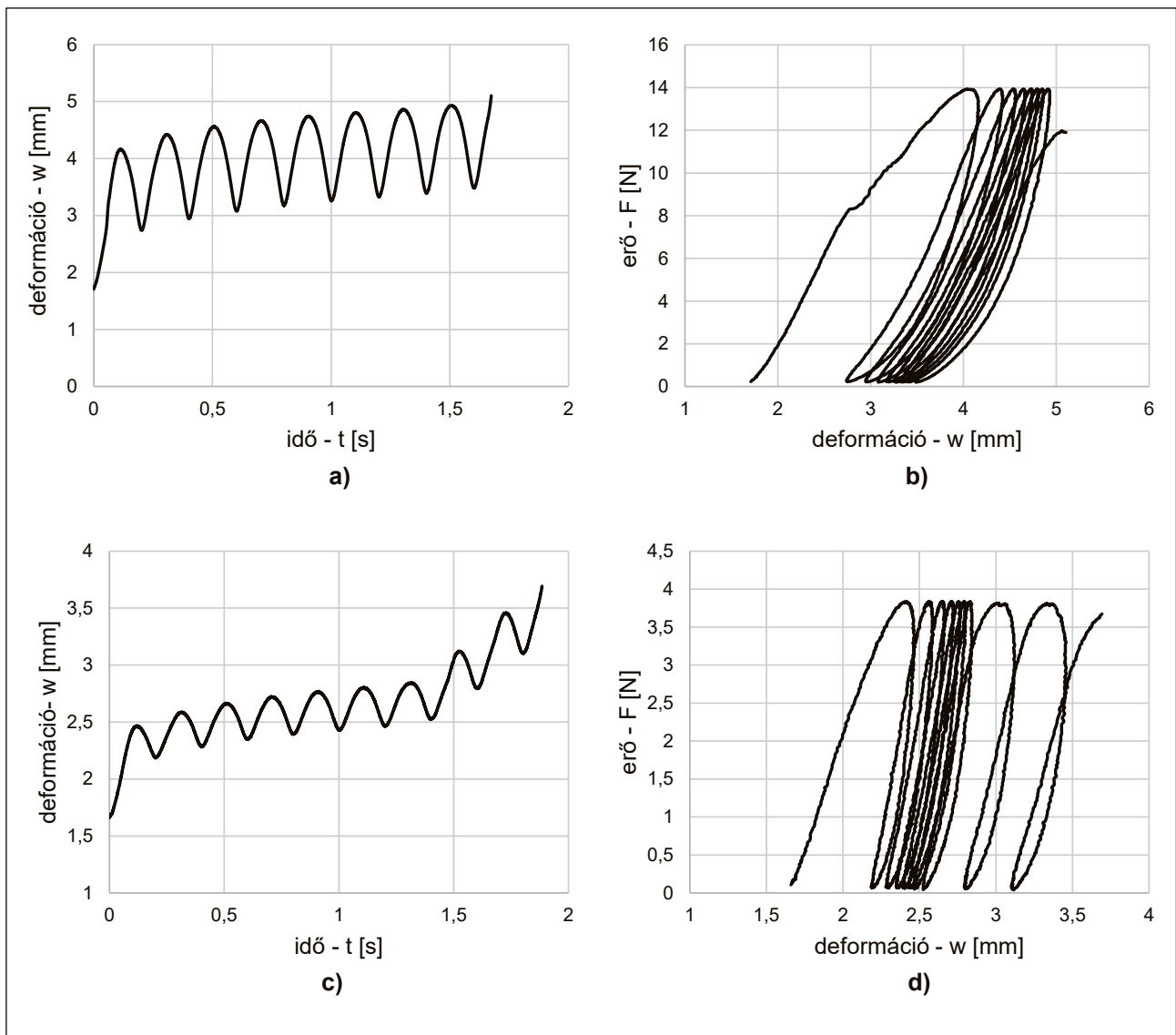
$$w_m = \beta + w_{max} (1 - \cos(\omega t - \delta))$$

egyenlettel írható le, ahol  $w$  a deformáció [mm],  $\beta$  a kúszási tag,  $w_{max}$  a periodikus alakváltozási függvény csúcserőértéke [mm],  $\omega$  a szögsebesség [ $s^{-1}$ ],  $\delta$  pedig a terhelés és az alakváltozás időfüggvényei közötti fáziseltolódás.

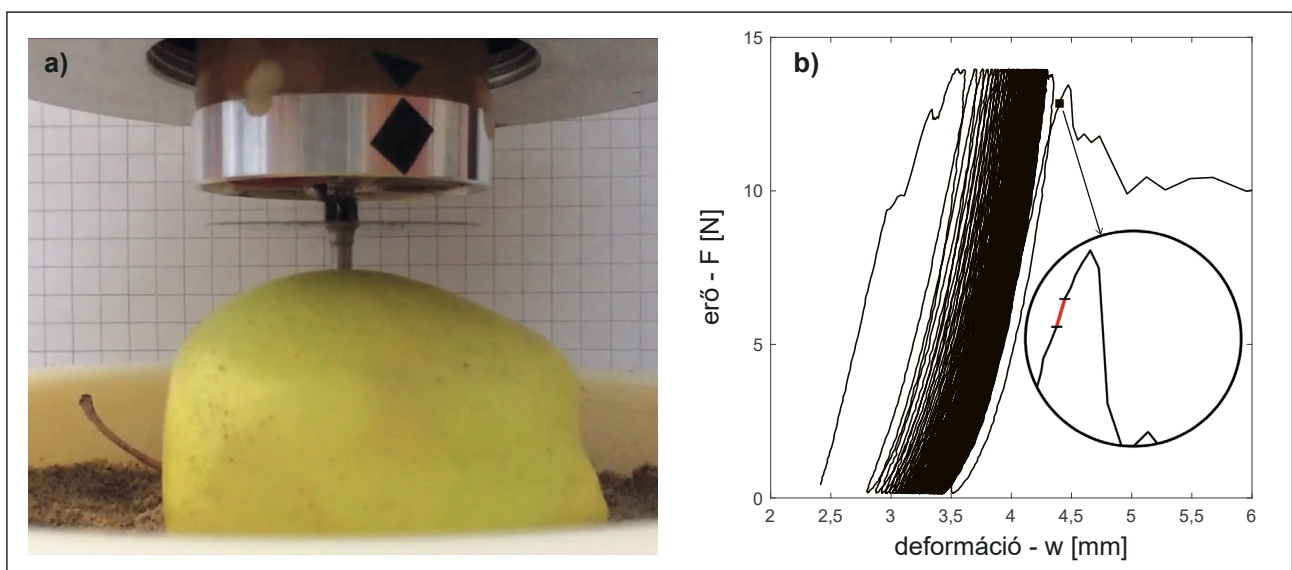
A kúszás jellemzéséhez (jelen esetben a  $\beta$  megadásához) a szakirodalom általában lineáris közelítést alkalmaz. Bár a kúszás jelentős szakaszához ez a közelítés a legtöbb esetben megfelelő lehet, a görbe kezdete és tönkremeneteli szakasza már nem linearizálható, így a módszer a teljes kúszási folyamatot tekintve pontatlanságokat hordoz. Ennek elkerülése érdekében az alakváltozást érintő adatkezelési folyamatokban olyan numerikus megoldásokat alkalmaztunk, amelyben a műveleteket nem közelítéssel, hanem az adatsorok közvetlen feldolgozásával végeztük.

Az **1. ábrán** látható görbék esetében a gyümölcsök tönkremeneteli határértékét – jelen esetben a töréspontot – már meghatároztuk, a diagramokról pedig az ezt követő adatokat eltávolítottuk. Az így kapott görbék elemzésével már ténylegesen a tönkremenetelig bekövetkező energiaviszonyokról, valamint az eddig tapasztalható anyagtulajdonságokról kapunk információkat.

Mivel a töréspont sok esetben – főleg a gyorsan lezajló terheléseknél, és az ezzel együtt meredeken változó alakváltozási folyamatoknál – nem vehető ki tisztán a diagramok elemzésénél, a pontos meghatározást nagy képkockasebességű videós megfigyeléssel végeztük (**2. ábra**). Az alkalmazott kamera másodpercenként 240 képkockát rögzített, a keresett töréspontot pedig a tönkremeneteli szakasz első képkockája jelenti, amikor a mérőcsap jól láthatóan kilép a kúszási fázis során lassan növekedő deformációs tartományból, és 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 közelítettük.



1. ábra. Golden delicious alma deformációjának időfüggvénye (a) és erő-deformáció függvénye (b), valamint egy Packham körte deformációjának időfüggvénye (c) és erő-deformáció függvénye (d)



2. ábra. Töréspont meghatározása nagy képkockasebességű felvétel elemzésével

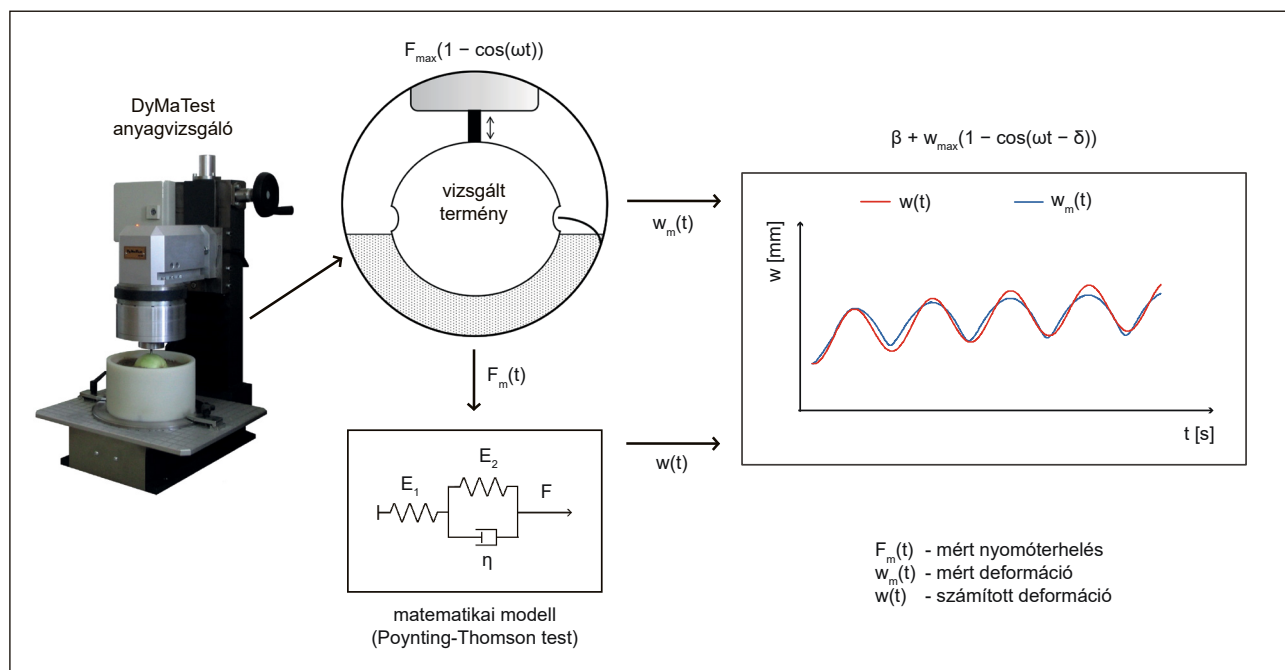
A DyMaTest mintavételi frekvenciája 2 kHz, ami 8,3-szor nagyobb, mint a töréspontból készített videófelvételek esetében. A képkockaelemzés abszolút hibája az anyagvizsgáló berendezéssel gyűjtött adatokhoz képest 4,16 milliszekundum – ami a kamera legkisebb felbontási egysége. A **2.b ábra** a töréspontban tartózkodó hibásávot szemlélteti. A töréspontot, mint vizsgálati paramétert a továbbiakban a *TTF* jelöléssel tüntetjük fel, ami a *time to failure* (azaz a sérülésig eltelt időtartam) kifejezésre utal.

### 3.3. Viszkoelasztikus anyagtulajdonságok

A gyümölcsök anyagtulajdonságainak a meghatározásához a háromelemes Poynting-Thomson modellt használtuk, amelyet almák esetében már korábbi kutatásokban is alkalmaztak. A modell kapcsolása a **3. ábrán** látható, ami az alábbi egyenlettel jellemezhető:

$$F_m + \frac{\eta}{E_1 + E_2} \dot{F}_m = \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2} w_m + \frac{E_1 \eta}{E_1 + E_2} \dot{w}_m,$$

ahol  $E_1$  és  $E_2$  a mechanikai modell rugalmas komponensei [ $\text{N mm}^{-1}$ ],  $\eta$  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 [ $\text{mm}$ ].



3. ábra. Számítógépes matematikai modell identifikációja

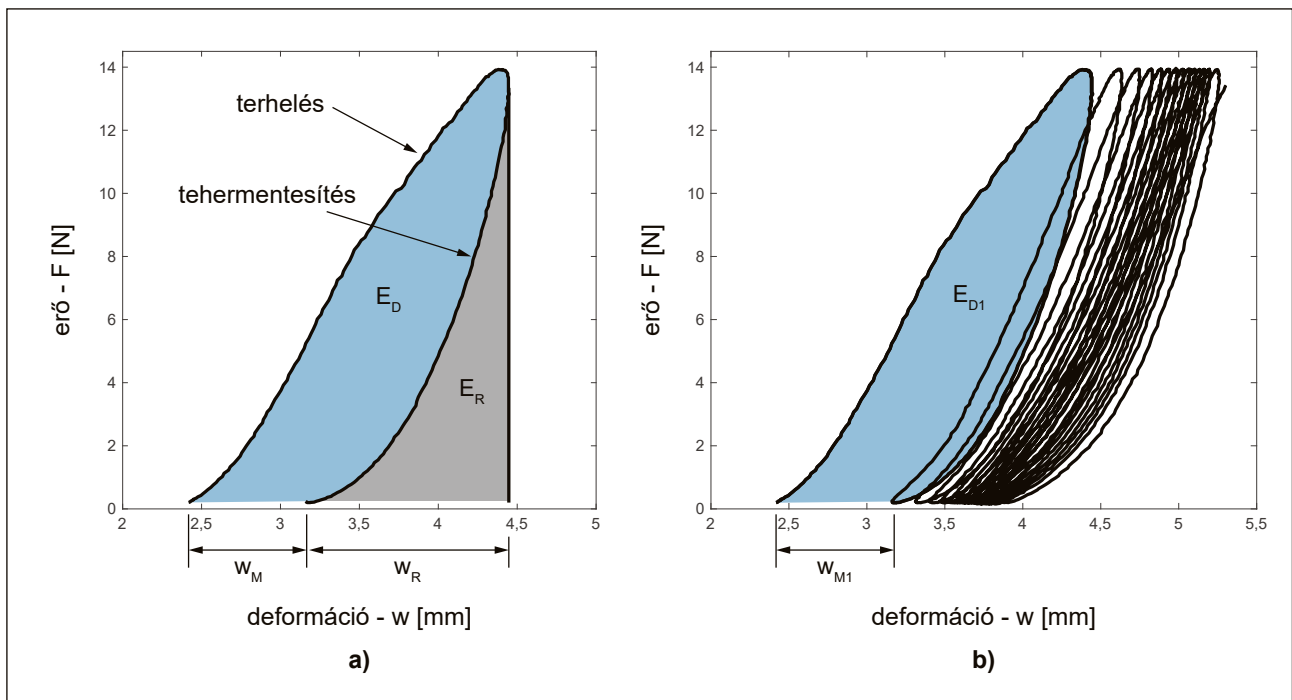
Az egyenlet blokkorientált felírását Matlab Simulink környezetben végeztük, ahol a modellt a mérések során kapott erő és deformáció adatokkal identifikáltuk (**3. ábra**). A rugalmas és viszkózus együtthatók értékeit annál a számított görbénél ( $w$ ) határoztuk meg, ami a legjobban illeszkedik a mért eredményekre ( $w_m$ ). A két adatsor közötti eltérés minimalizálásához olyan eljárást alkalmaztunk, amely a legkisebb négyzetek módszerén alapul:

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

A minimumkeresési folyamat futtatása után az  $E_1$ ,  $E_2$  és  $\eta$  modellegyütthatókat rögzítettük, és vizsgálati paraméterként felhasználtuk. A bemutatott matematikai rendszerrel végzett közelítések  $R^2 = 0,967 - 0,998$  értékek között változtak.

### 3.4. A hiszterézis görbék elemzése

Az **1.b és 1.d**, valamint a **4. ábrán** látható erő-deformáció diagramokon olyan ismétlődő hiszterézis folyamatok figyelhetők meg, ahol a terhelési és tehermentesítési görbék által határolt terület szoros összefüggésben áll a termény adott ciklusra jellemző energiamutatóival. A vízszintes tengelyen látható, hogy a görbe a tehermentesítés után nem záródik, így az anyagban a következő nyomóterhelésig minden ciklusban egy  $w_M$  maradó alakváltozás keletkezik, az adott termény  $w_R$  rugalmas alakváltozása pedig a terhelési csúcspont és a maradó alakváltozás közötti különbségből adódik (a kettő összege így az alakváltozás teljes nagyságát adja az adott ciklusban).



4. ábra. Egy terhelési ciklus erő-deformáció görbéje (a), a termény erő-deformáció görbéje a tönkremenetelig egy Golden Delicious alma esetében (b)

Ha a görbék közötti területeket vizsgáljuk, a rugalmas alakváltozáshoz tartozó energiát ( $E_R$ ) a teljes munkából ( $E$ ) kivonva a ciklus disszipált energiáját kapjuk ( $E_D$ ). Ez az energiaveszteség a görbék közötti terület meghatározásával számítható:

$$E_D = \int_0^{t_{w_M}} F \frac{dw}{dt} dt,$$

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

Mivel a területszámítást az erő- és deformáció-adatok idő szerinti numerikus integrálásával végeztük, a korábban említett közelítő függvények, és az ezekkel együtt járó pontatlanságok elkerülhetők.

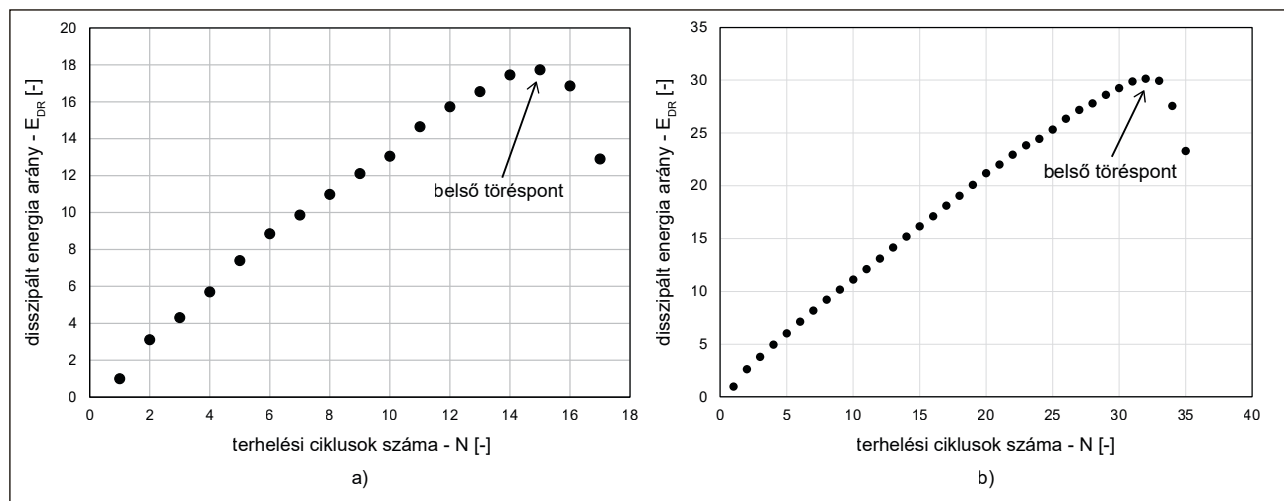
Bár az energiaveszteségek számítása több kutatásban hozzátartozik a sérülési mechanizmus leírásához, a hiszterézis görbéből meghatározható disszipált energiának csak egy része kötődik az anyag károsodásához és a tönkremeneteli folyamathoz [13]. Más szakterületeken, például az útburkolati aszfaltrétegek reológiai leírásánál olyan számítási módszereket is kidolgoztak, amelyek a disszipált-energia adatokat felhasználva közvetlenül mutatnak rá a tönkremenetel pillanatára. Ezek közé tartozik az ún. disszipált energia hányados, amely a következő összefüggéssel számítható [26]:

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

ahol  $E_{Di}$  az adott ciklusig összegzett energiaveszteség [N mm],  $E_{Dn}$  pedig az adott ciklus energiavesztesége [N mm].

Amikor a disszipált energiahányadost a ciklusszám függvényében ábrázolják (**5. ábra**), akkor az két károsodási mutatóra is utalhat: az adott aszfalt repedésképződési folyamatának a kezdetét a görbe felfutási meredekségének 10%-os zuhanása jelzi, a csúcsponton látható törés pedig a kifáradásos tönkremenetelt [26].

A gyümölcsökön végrehajtott kísérleteink során az említett meredekség zuhanása a legtöbb esetben nem figyelhető meg ennyire egyértelműen, ami valószínűleg a gyors terhelési beállítások következménye. A belső töréspont viszont a saját eredményeinkben is egyértelműen megjelenik. Ezt az adatot a töréspontig eltelt idő és a viszkoelasztikus modellegyütthatók mellett szintén felhasználjuk a károsodási folyamatot leíró egyenletek felállításához.



5. ábra. A kifáradásra utaló belső töréspont a disszipált energiákból képzett hányados alapján egy Golden Delicious (a) és egy Packham (b) termény esetén

### 3.5. Vizsgálati paraméterek, terhelési beállítások

Célunk, hogy a sérülési folyamattal összefüggésben álló paraméterek felhasználásával a töréspontig eltelt időtartamot írjuk le ( $TTF$ ), ami a kapott egyenletek függő változója lesz. A tönkremenetel jellemzésénél lineáris regressziós egyenletek felállítására törekszünk.

A nyomóterheléseket 25 db Golden Delicious almán és 25 db Packham körtén hajtottuk végre (a mérésorozat ismétlési száma terményenként tehát 25), minden gyümölcsön hat különböző mérési frekvenciát állítottunk be. Ezek a frekvenciák a szállítással foglalkozó kutatások legveszélyesebbnek ítélt tartományába, a főleg 10 Hz alatti sávba esnek, a műszerünk beállítási lehetőségeihez mérten ezek 2,5, 3,7, 5, 7,5, 10 és 11,6 Hz voltak. Így összesen 300 nyomóterhelés történt, a terhelések során kapott erő, deformáció- és időadatokról pedig a fent részletezett módszerekkel minden esetben meghatároztuk az anyagmodell  $E_1$ ,  $E_2$  és  $\eta$  együtthatóit, a  $TTF$  tönkremeneteli időt, valamint az  $E_{DRmax}$  belső károsodási mutatót. Ezek mellett azt is figyelembe vettük, hogy a vizsgálati frekvenciák befolyásolják-e a folyamatot.

A Golden és Packham termények eltérő terhelési ellenállása miatt különböző nyomóerők beállítására volt szükség: a Packham körték esetében 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 energiaértékek összehasonlíthatóságát figyelembe véve a körtéket 4 N-nal, az almákat pedig 14 N-nal terheltük. 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.

## 4. Eredmények

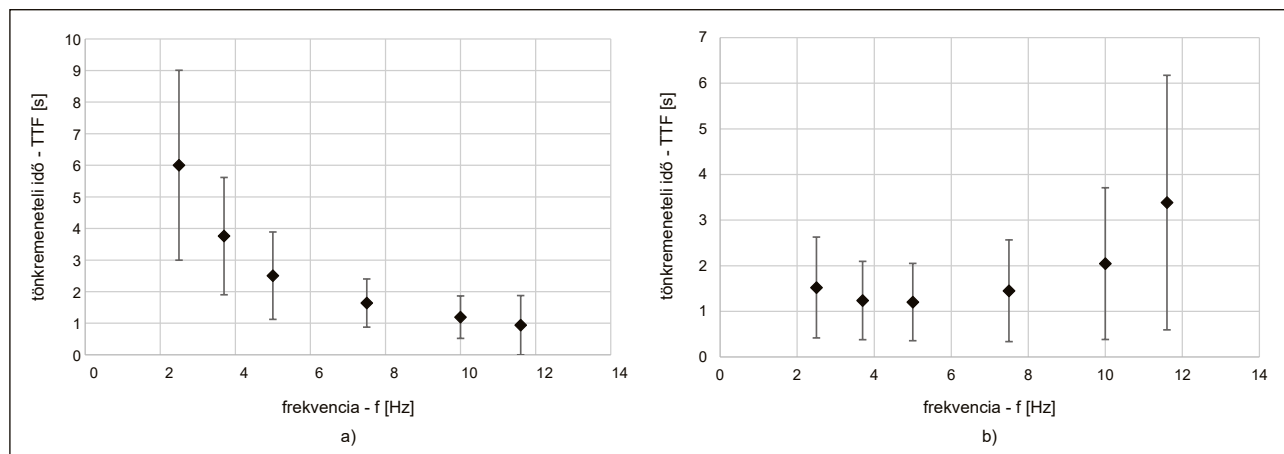
### 4.1. Tönkremeneteli időtartamok és a belső károsodásra utaló energiamutatók

A töréspontig eltelt időtartamok egyes frekvenciabeállításokhoz tartozó átlag- és szórásértékeit az **1. táblázat** tartalmazza. A **6.a ábrán** a Golden almák átlagértékeiből készített grafikon látható, a Packham körték esetében pedig a **6.b ábrán** tekinthetők meg az ábrázolt eredmények. Az almák esetében a töréspont bekövetkezése a várakozásoknak megfelelően alakult, vagyis a nagyobb frekvenciákon hamarabb következett be a visszafordíthatatlan károsodás, a körtékénél kapott átlagértékek tekintetében ehhez képest viszont változás tapasztalható, ugyanis az 5 Hz feletti beállításoknál egy növekvő tendencia kezdődik a tönkremeneteli idő tekintetében.

1. táblázat. A töréspontig eltelt időtartam átlagai és az eredmények szórása

frekvencia [Hz]	Golden		Packham	
	TTF [s]	szórás - $s_{TTF}$ [s]	TTF [s]	szórás - $s_{TTF}$ [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

A Golden termények esetében az alacsonyabb frekvenciabeállításoknál nagyobb szórásmezőkkel találkozunk, a magasabb frekvenciákon viszont a hibasávok szélsőértékei már közelebb kerülnek az átlaghoz. A szórásmezők végpontjai a Golden almáknál még hasonló trendet mutatnak az átlag frekvenciafüggéséhez, a körték esetében azonban szórásmezők minimumértékei már nem reprezentálják az átlagértékek változását, a körtékénél tehát eltérőbb karakterisztikák tapasztalhatók a 25 mérés között.



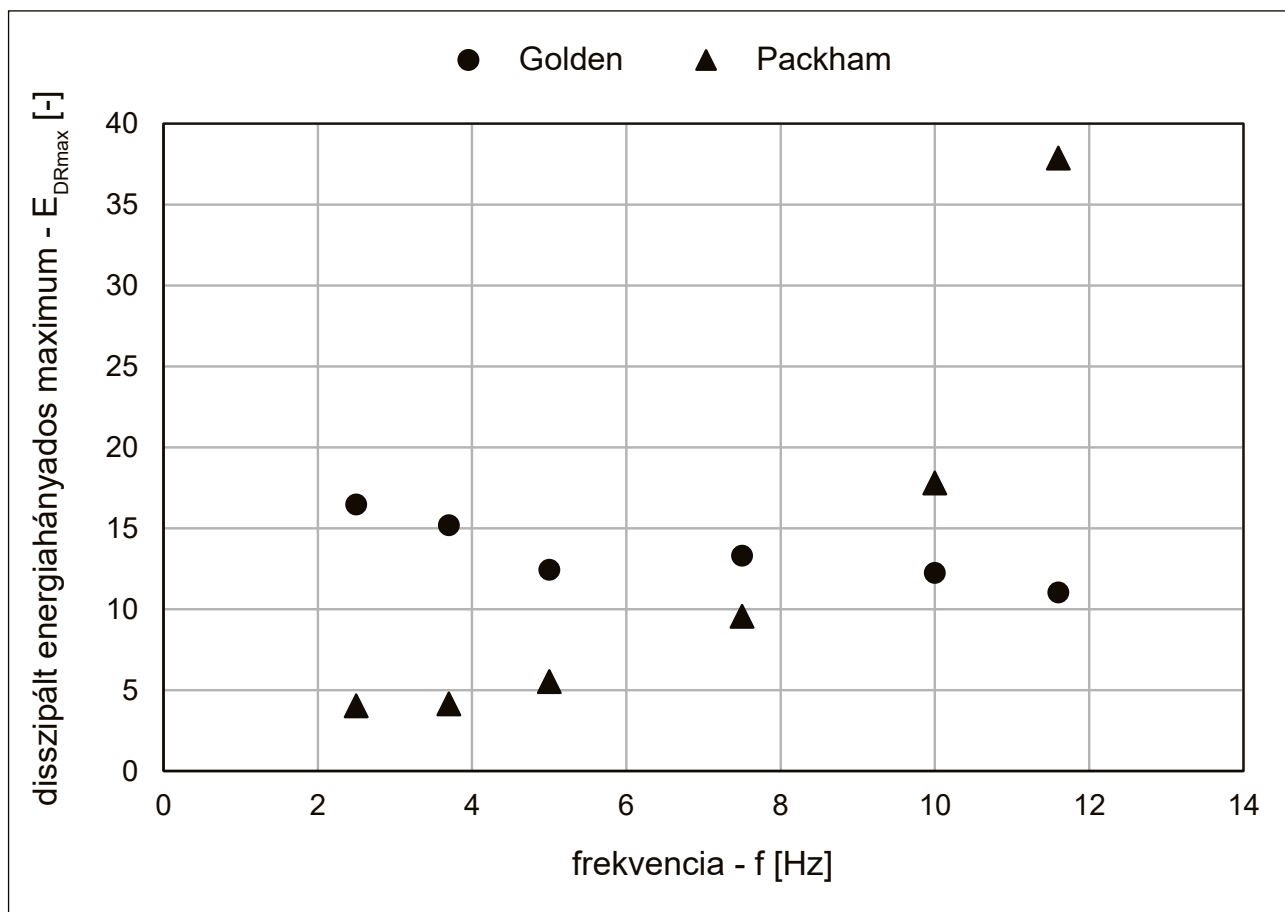
6. ábra. A töréspontig eltelt időtartamok frekvenciafüggése Golden Delicious almák (a) és Packham körték (b) esetében

Mivel a szórás az almák és körték esetében is elég jelentős (**1. táblázat**), a vizsgálatnál figyelembe vett további paraméterek (a viskoelasztikus modellegyütthatók, valamint az energiamutatók) szerepe kiemelten fontos, amikor a károsodási folyamatra gyakorolt hatásukat vesszük figyelembe a tönkremeneteli idő leírása során.

A **7. ábra** a disszipált energiából számított energiaveszteségi hányados csúcserkéit mutatja, a 25-25 terményhez tartozó eredményeket szintén átlagoltuk az egyes frekvenciabeállításokhoz tartozóan.

A vizsgált Golden almák esetében a ciklusonként rögzített energiaveszteségi értékek, valamint a belső törésre utaló maximális hányadosértékek a magasabb frekvenciabeállítások felé haladva csökkenő tendencia szerint változnak, a körtékénél ez a folyamat viszont fordítottan jelenik meg. Ezzel együtt a frekvenciafüggést jellemző trend is más jelleget ölt.





7. ábra. A halmozódó disszipált energiák átlagértékeinek frekvenciafüggése

#### 4.2. Viszkoelasztikus modellparaméterek kiértékelése

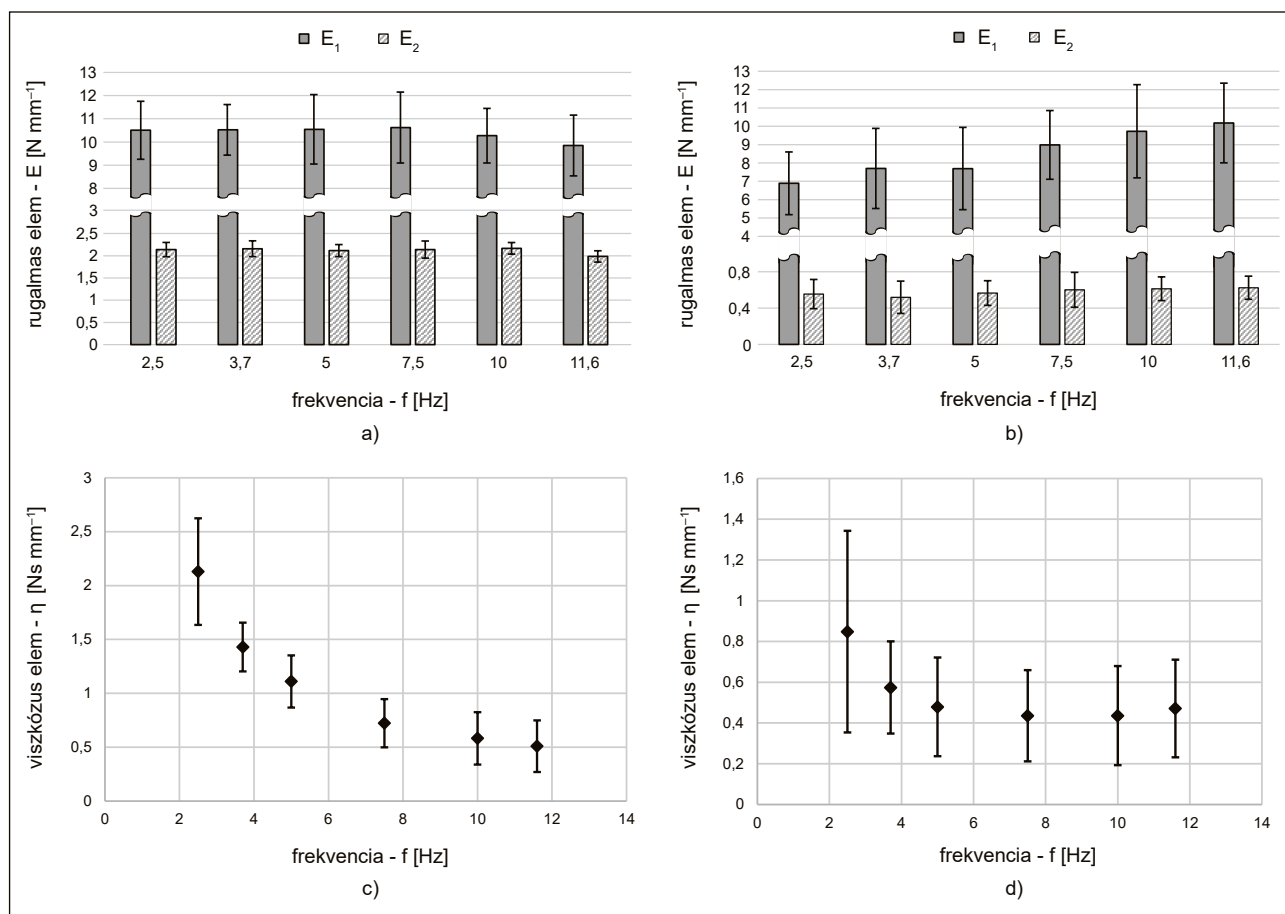
A termények rugalmas ( $E_1$ ,  $E_2$ ) és viszkózus ( $\eta$ ) anyagtulajdonságainak frekvenciafüggését a **8. ábra** mutatja be, ahol a méréssorozat értékeit az egyes frekvenciabeállításoknál átlagolva jelenítjük meg. A számszerű eredményeket a **2. táblázat** és a **3. táblázat** foglalja össze.

2. táblázat. Viszkoelasztikus modellparaméterek átlagértékei és szórások az egyes terhelési frekvenciákon Golden Delicious almák esetében

Golden						
f [Hz]	$E_1$ [N mm <sup>-1</sup> ]	$E_1$ szórás [N mm <sup>-1</sup> ]	$E_2$ [N mm <sup>-1</sup> ]	$E_2$ szórás [N mm <sup>-1</sup> ]	$\eta$ [Ns mm <sup>-1</sup> ]	$\eta$ szórás [Ns mm <sup>-1</sup> ]
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

3. táblázat. Viszkoelasztikus modellparaméterek átlagértékei és szórások az egyes terhelési frekvenciákon Packham körték esetében

Packham						
f [Hz]	$E_1$ [N mm <sup>-1</sup> ]	$E_1$ szórás [N mm <sup>-1</sup> ]	$E_2$ [N mm <sup>-1</sup> ]	$E_2$ szórás [N mm <sup>-1</sup> ]	$\eta$ [Ns mm <sup>-1</sup> ]	$\eta$ szórás [Ns mm <sup>-1</sup> ]
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



8. ábra. Rugalmas és viszkozus modellparaméterek átlagai Golden almák (a, c) és Packham körték (b, d) esetében

A rugalmas együtthatók a Golden almák esetében nem mutatnak szembeűnő frekvenciafüggést, az  $E_1$  paraméterek esetében enyhe csökkenés fedezhető fel, amikor magasabb vizsgálati frekvenciákat használunk. Korábbi kísérletekben a nagyobb sebességű terhelés során az almák általában merevebben viselkednek [25]: ha a nagyobb terhelési sebességnek jelen esetben a nagyobb frekvencia felel meg, akkor ez a reakció egybevág a régebbi tapasztalatokkal.

A körték esetében azonban egyértelmű a növekedés, amikor az  $E_1$  komponenst vizsgáljuk, ez az eredmény pedig magyarázatot adhat a tönkremeneteli időtartamok esetében kapott adatokra: a vizsgált körtéknél az 5 Hz feletti frekvenciákon egy rugalmasabb, puhább felület keletkezik a terhelési zóna közelében, a megnövekedett rugalmasság pedig kedvezőbb mechanikai ellenállást biztosít a termények számára. A legveszélyesebb frekvenciatartományban így nem feltétlenül a magasabb értékek hordozzák a legjelentősebb károsodási potenciált. Az  $E_2$  rugalmas együttható a vizsgált tartományban a Golden és Packham termények esetében is állandó.

A viszkózus paramétereket ábrázolva a Golden és a Packham terményeknél is egyértelmű frekvenciafüggést kaptunk. Az almáknál kapott görbe hasonlóságot mutat egy korábbi kutatásban prezentált dinamikus viszkózus tényező frekvenciafüggéséhez [27], a körtéknél pedig szintén az 5 Hz körüli frekvencia töri meg az addigi csökkenő tendenciát – ez szintén összefüggésben állhat a tönkremeneteli időtartamok frekvenciagörbéjénél tapasztalt törésponttal.

A szórásokat megjelenítő hibasávok a körték esetében nagyobbak, az adatokat a 2,5 Hz-es beállításánál rögzítettük a legszélesebb szórástartományban. Ennek egyik oka, hogy ennél a beállításnál több körte már az első ciklus első felterhelési szakaszában azonnal tönkrement.

4. táblázat. Viszkoelasztikus modellparaméterek varianciaanalízise

Golden			Packham		
Együttható	F	p	Együttható	F	p
$E_1$	1,196	0,314	$E_1$	8,008	<0,001
$E_2$	1,408	0,225	$E_2$	1,488	0,198
$\eta$	75,393	<0,001	$\eta$	6,427	<0,001

A frekvenciafüggés mértékét varianciaanalízis (ANOVA - Analysis of Variance) segítségével ellenőriztük, az eredményeket a 4. táblázat foglalja össze. A Golden almák esetében kizárólag az  $\eta$  együtthatónál fedezhető fel szignifikáns összefüggés ( $p < 0,05$ ), ez pedig megerősíti a diagramok alapján levonható következtetést, amit az  $E_1$  és  $E_2$  együtthatók esetében tettünk: a rugalmas elemek és a frekvencia a vizsgált tartományban nem állnak kimutatható összefüggésben. A Packham körték esetében viszont az  $\eta$  mellett az  $E_1$  rugalmas együttható frekvenciafüggése is kimutatható, ami jelentős szerepet játszik az 5 Hz felett tapasztalt mechanikai ellenállásban.

### 4.3. Lineáris tönkremeneteli modellek

A bemutatott vizsgálatok eredményeit, valamint a terhelési frekvenciák értékeit felhasználva a Golden Delicious almák esetében négy különböző tönkremeneteli modell lehetősége vetődik fel, a következő keresőfüggvény szerint:

$$TTF = A + B\eta + CE_{DRmax} + Df + KE_1 + JE_2,$$

ahol  $A, B, C, D, K$  és  $E$  konstansok. Az egyes változatokat az 5. táblázat ismerteti. Ezek között a termények rugalmas és viszkózus anyagtulajdonságai, valamint a disszipált energia csúcserőértéke is rendre megjelenik, a frekvenciabeállítások azonban nem.

5. táblázat. A mért paraméterekből létrehozható lineáris modellek Golden almák esetében

Modell	R	R <sup>2</sup>	Módosított R <sup>2</sup>	A becslés standard hibája	R <sup>2</sup> 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:  $\eta$

(b) változók:  $\eta, E_{DRmax}$

(c) változók:  $\eta, E_{DRmax}, E_1$

(d) változók:  $\eta, E_{DRmax}, E_1, E_2$

A modellparamétereket bemutató görbéken, valamint a varianciaanalízis nyomán az elasztikus együtthatók nem álltak szignifikáns összefüggésben a frekvenciával, a Golden almák rugalmassága azonban egyértelmű hatást gyakorol a tönkremeneteli folyamatra, kimutatható növekedést eredményezve. Míg az  $E_1$  rugalmas együttható meghatározó része az egyenletnek, az  $E_2$  csupán elhanyagolható mértékben ad hozzá az illeszkedés pontosságához, ezért a Golden almák tönkremenetelének legegyszerűbb leírásához a harmadik egyenletet választottuk:

$$TTF = 0,533 + 2,736\eta + 0,141E_{DRmax} - 0,261E_1$$

A Packham körtékre alkalmazható modelleket a **6. táblázat** foglalja össze. Ezekben a változatokban már a terhelési frekvencia is megjelenik, ami ezúttal fontos szerepet játszik a tönkremeneteli idő leírásában.

6. táblázat. A mért paraméterekből létrehozható lineáris modellek Packham körték esetében

Modell	R	R <sup>2</sup>	Módosított R <sup>2</sup>	A becslés standard hibája	R <sup>2</sup> 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:  $E_{DRmax}$   
 (b) változók:  $E_{DRmax}, \eta$

(c) változók:  $E_{DRmax}, \eta, f$   
 (d) változók:  $E_{DRmax}, \eta, f, E_2$

Bár az  $E_1$  paraméter a frekvenciával összefüggésbe került, a tönkremenetelt mégsem ez az együttható befolyásolja, hanem a viszkózus komponenssel párhuzamosan kapcsolt  $E_2$ . Mivel a frekvencia, valamint az  $E_2$  rugalmas tényező jelentősen hozzájárul a lineáris közelítés pontosságához, így a Packham körték esetében a negyedik egyenletet írjuk fel:

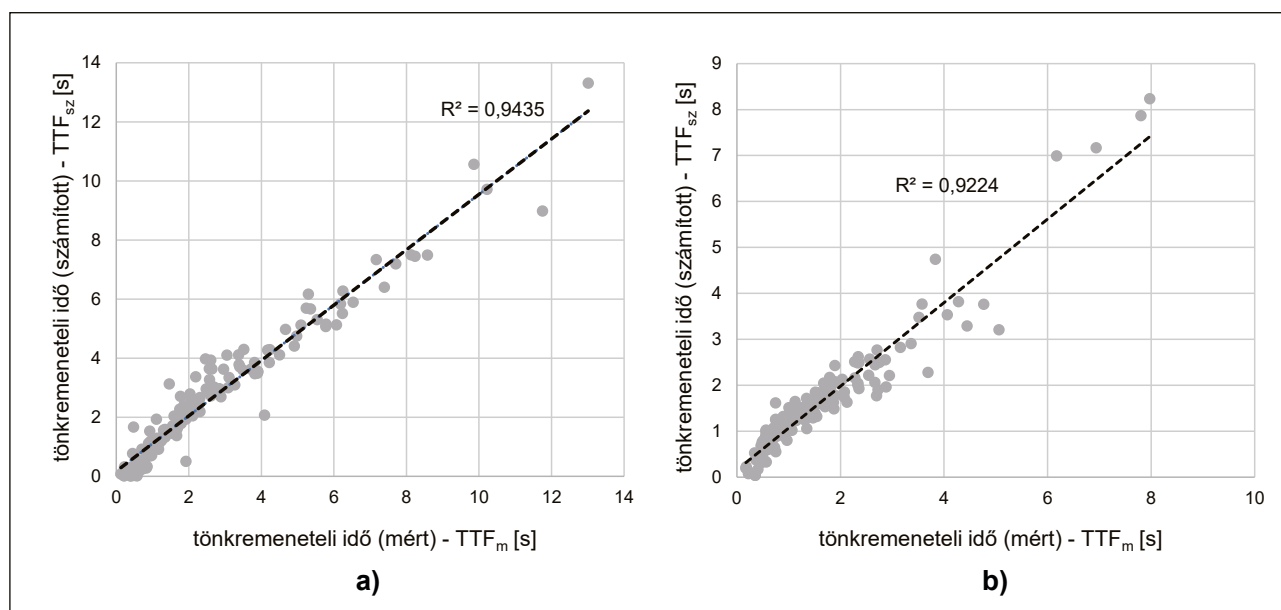
$$TTF = 0,091 + 0,788\eta + 0,085E_{DRmax} - 0,103f + 1,524E_2.$$

Az egyenletek érvényességét ellenőrző varianciaanalízis eredményeit a **7. táblázat** tartalmazza. Mivel a kapott F értékek szignifikánsnak minősülnek ( $p < 0,05$ ), a felírt közelítések érvényesek.

7. táblázat. Közelítő egyenletek varianciaanalízise

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

A létrehozott modellek behelyettesítés utáni törésponti eredményeit ( $TTF_{sz}$ ), valamint a mért eredmények ( $TTF_m$ ) kapcsolatát a **9. ábra** mutatja be a teljes vizsgálati tartományban. A Golden Delicious almáknál alkalmazott közelítés frekvenciánként átlagolt eredményei az 1,54% és 3,85% relatív hiba közé esnek, a terményenként átlagolt eredmények pedig 1,01% és 31,13% között alakulnak. A Packham körtéknél az egyes frekvenciabeállításoknál kapott eredményeket átlagolva a relatív hibák 2,42 és 6,22% közé esnek, a terményegyenként számított értékek eltérései pedig 0,04% és 34,51% között alakulnak a mért tönkremeneteli időtartammal összehasonlítva. A jelentősebb hibaértékek nem az adott frekvenciabeállításokhoz, hanem az egyes termények eltérő mechanikai ellenállóképességéhez és anyagtulajdonságaihoz kötődnek.



9. ábra. Mért és számított tönkremeneteli időtartamok kapcsolata Golden Delicious almák (a) és Packham körték (b) esetében az összes mérési eredményt kiértékelve

## 5. Következtetések

Az ismétlődő terhelés a gyümölcsök feldolgozási és szállítási folyamataiban jelentős mértékű károsodást okoz, munkánkban ezért a kifáradás okozta tönkremenetelt vizsgáltuk, ennek érdekében pedig olyan többváltozós lineáris regressziós modelleket dolgoztunk ki, amelyek a tönkremeneteli folyamathoz kötődő legfontosabb anyagtulajdonságokra és energiamutatókra utaló paraméterekre támaszkodnak, és amelyek a vizsgált almástermésűek (Golden Delicious almák és Packham körték) sérülési ellenállására adnak előrejelzést.

A tönkremenetelt jelző töréspont bizonyos esetekben nem értékelhető ki a mérések során kapott deformációs adatokból, ilyenkor a gyorsfilmezéssel és képkocka-elemzéssel megállapított határérték nyújthat segítséget a vizsgálatok során. Ennek pontossága az alkalmazott kamerák képkockafrissítésén múlik, ez pedig a képfelbontással együtt a mobileszközökben is folyamatosan fejlődik, így ezek az eszközök a hasonló jellegű mérés technikai feladatokhoz is alkalmassá válnak. Használatuk a gyümölcsök alakváltozásának figyelésében már napjainkban sem példa nélküli.

Az energiaszámításokon alapuló belső károsodás megfigyelése új kutatási irányokat jelenthet a gyümölcssérülések vizsgálatában, hiszen a feldolgozási folyamatokban fellépő környezeti hatásokat ennek függvényében kell kezelni (megfogási, ejtési és rezgési határértékek korlátozása vagy módosítása). A jelenség pontos definiálása azonban a sejtszerkezetben létrejövő károsodási folyamat részletesebb leírása érdekében még mikroszintű vizsgálatra és megerősítésre vár.

## 6. Köszönetnyilvánítás

A DyMaTest anyagvizsgáló berendezés biztosítása miatt a szerzők köszönetüket fejezik a NAIK Mezőgazdasági Gépesítési Intézet felé. Köszönjük továbbá Dr. Földi Lászlónak a számítógépes modellezésben, valamint Dr. Székely Lászlónak a többváltozós egyenletek felállításában nyújtott segítségét.

## 7. Irodalom

- [1] 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. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.01.013>
- [2] Tan, W., Sun, L., Yang, F., Che, W., Ye, D., Zhang, D., Zou, B. (2018): Study on bruising degree classification of apples using hyperspectral imaging and GS-SVM. *Optik* 154, pp. 581-592. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2017.10.090>
- [3] Gergely, Z., Beke, J. (2015): Az osztályozási hibák csökkentésének lehetőségei a HPV-I sorozatú paprikaválogató gépeken, *Mezőgazdasági Technika* 2015/11, pp. 2-4.
- [4] 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. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.183>
- [5] FAO, (2011): Global Food Losses and Waste. Extent, Causes and Prevention. <http://www.fao.org/docrep/014/mb060e/mb060e00.pdf> (Hozzáférés / Aquired: 12.08.2020)
- [6] 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 / Aquired: 12.08.2020)
- [7] Yahia, E. M., Fonseca, J. M., Kitinoja, L. (2019): Postharvest Losses and Waste. p. 43. In: Yahia, E. M, Postharvest Technology of Perishable Horticultural Commodities. Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813276-0.00002-X>
- [8] Morrow, C., Mohsenin, N. (1966): Consideration of Selected Agricultural Products as Viscoelastic Materials. *Journal of Food Science* 31 (5) pp. 686-698. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1966.tb01925.x>
- [9] Tscheuschner, H., Doan, D. (1988): Modelling of mechanical properties of apple flesh under compressive load. *Journal of Food Engineering* 8 (3) pp. 173-186. [https://doi.org/10.1016/0260-8774\(88\)90052-0](https://doi.org/10.1016/0260-8774(88)90052-0)
- [10] Fenyvesi, L. (2004): Mezőgazdasági termények sérülésvizsgálata. Akadémiai Kiadó, Budapest.
- [11] Szendrő, P. (2000): Mezőgazdasági Gépszerkezettan. Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest.
- [12] Kim, J., Roque, R., Birgisson, B. (2006): Interpreting Dissipated Energy from Complex Modulus Data. *Road Materials and Pavement Design* 7 (2) pp. 223-245. <https://doi.org/10.1080/14680629.2006.9690034>

- [13] 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. <https://doi.org/10.3141/1723-18>
- [14] 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. <https://doi.org/10.1016/j.eaef.2015.09.005>
- [15] Mohsenin, N. (1986): *Physical properties of plant and animal materials*. Gordon and Breach Science Publishers, Amsterdam.
- [16] Sitkei, Gy. (1981): *A mezőgazdasági anyagok mechanikája*. Akadémiai Kiadó, Budapest.
- [17] 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. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12296>
- [18] 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. <https://doi.org/10.13031/2013.26078>
- [19] 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. <https://doi.org/10.13031/2013.28431>
- [20] 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 (5) pp. 311-320.
- [21] 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. <https://doi.org/10.1007/s13197-012-0811-z>
- [22] Vursavus K., Kesilmis Z., Oztekin B. (2017): Nondestructive dropped fruit impact test for assessing tomato firmness. *Chemical Engineering Transactions* 58, pp. 325-330.
- [23] 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. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.12.003>
- [24] Pillinger, G., Géczy, A., Hudoba, Z., Kiss, P. (2018): Determination of soil density by cone index data. *Journal of Terramechanics* 77, pp. 69-74. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2018.03.003>
- [25] Fenyvesi, L. (2004): *Mezőgazdasági termények sérülésvizsgálata*. Akadémiai Kiadó, Budapest.
- [26] 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* 74, pp. 1-42.
- [27] 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. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2004.02.008>