



TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI KONFERENCIA

2021. november 24.

ISMÉTLŐDŐ NYOMÓTERHELÉSSSEL VIZSGÁLT GOLDEN DELICIOUS ALMÁK ENERGIAMUTATÓINAK MEGHATÁROZÁSA

Determination of energy indicators of Golden Delicious apples under repetitive
compressive loads

Készítette: Körmöczy Dávid H26JCR
Gépészmérnök MSc
Nappali tagozat
Szent István Campus

Témavezető: Dr. Farkas Csaba
Adjunktus, Járműtechnika tanszék
Dr. Korzenszky Péter
Egyetemi docens, Mezőgazdasági és
Élelmiszeripari Gépek Tanszék

**Gödöllő
2021.**



AZ INNOVÁCIÓS ÉS TECHNOLÓGIAI MINISZTERIUM ÚNKP-21-4 KÓDSZÁMÚ ÚJ NEMZETI
KIVÁLÓSÁG PROGRAMJÁNAK A NEMZETI KUTATÁSI, FEJLESZTÉSI ÉS INNOVÁCIÓS ALAPBÓL
FINANSZÍROZOTT SZAKMAI TÁMOGATÁSÁVAL KÉSZÜLT



Tartalomjegyzék

1.	Bevezetés, célkitűzés.....	4
1.1.	Bevezetés	4
1.2.	Célkitűzés	4
2.	Irodalomfeldolgozás	5
2.1.	A mechanikai sérülések vizsgálatának jelentősége.....	5
2.2.	A terményeket érő mechanikai hatások, sérülések	5
2.3.	Anyagmodellek.....	6
2.3.1.	Elemi modellek	6
2.3.1.1.	Hooke-test	6
2.3.1.2.	Newton-test.....	6
2.3.1.3.	Saint-Venant-test.....	7
2.3.2.	Összetett anyagmodellek	7
2.3.2.1.	Viszkoelasztikus modellek	8
2.3.2.2.	Elastoplasztikus anyagmodellek.....	9
3.	Anyag és módszer.....	13
3.1.	A DyMaTest mérőberendezés bemutatása	13
3.2.	A mérés leírása	15
3.3.	A számítások elvégzéséhez felhasznált mérési adatok	15
3.4.	A számítandó mennyiségek	16
3.4.1.	A terhelési ciklusok csúcspontjainak jellemző értékei	16
3.4.2.	A tönkremenetelig eltelt ciklusok száma	17
3.4.3.	A rugalmas energia értéke	19
3.5.	A számítások elvégzésére használt algoritmus	20
4.	Eredmények	24
4.1.	A mérési adatsorok csoportosítása	24
4.2.	A rugalmas és disszipált energiák aránya és a tönkremenetelig eltelt ciklusszám közötti összefüggés meghatározása	26
4.3.	A ciklusonkénti maradó alakváltozás állandósult értéke és a tönkremenetelig eltelt ciklusszám közötti összefüggés meghatározása	28
4.4.	A mereedség meghatározása	31
4.5.	A ciklikus kúszási modell alkalmazása.....	32
5.	Összefoglalás	34
6.	Javaslatok	35
7.	Irodalomjegyzék	36
8.	Ábrajegyzék	38

8.1. Ábrák	38
8.2. Táblázatok	38
9. Mellékletek.....	39

1. Bevezetés, célkitűzés

1.1. Bevezetés

A Golden Delicious alma Magyarországon is elterjedt gyümölcsfajta. Az almák szállítása, tárolása, feldolgozása során jelentős mennyiségű hulladék keletkezik a gyümölcs mechanikai sérülése miatt az élelmiszeriparban. A termények sérülésének elkerülése nem csak a közvetlen vagyoni kár, hanem környezetvédelmi és élelmiszerminőségügyi szempontok miatt is fontos. A mechanikai sérülések elkerüléséhez elengedhetetlen a sérülési és tönkremeneteli jelenségek minél pontosabb ismerete.

1.2. Célkitűzés

Dolgozatomban az almák roncsolásos mechanikai vizsgálata során mért adatsorokat dolgozok fel. Létrehozok egy, a mért adatsorok számítógépes kiértékeléséhez szükséges algoritmust, amivel a terhelési ciklusok jellemző csúcspontjai meghatározhatók, valamint a rugalmas energia értékeinek meghatározása numerikus integrálással elvégezhető. Az így meghatározott energiaértékek alapján számított különböző jellemzők és a tönkremenetelig eltelt ciklusok száma között függvénykapcsolatot keresek. Az első terhelési ciklus jellemzésére meghatározom a mereedség paraméter értékeit, és ezt összevetem a kiindulási adatként rendelkezésre álló viszkoelasztikus modellparaméterekkel. Megvizsgálom az először szerkezeti anyagok (Ahmadzadeh és Varvani-Farahani, 2012), később biológiai szövetek (csont, porc) jellemzésére (Hashemi et al., 2019) is használt ciklikus kúszási modell alkalmazhatóságát az általam vizsgált termények esetén. Dolgozatom zárásaként összefoglalom a kutatás folytatásaként tervezett további vizsgálatokat, módszereket.

2. Irodalomfeldolgozás

2.1. A mechanikai sérülések vizsgálatának jelentősége

Az Európai Unióban évente 35 millió tonna élelmiszerhulladék keletkezik az iparban. (Bagherzadeh et al., 2014). A gyümölcsök esetében a hulladék jelentős százaléka mechanikai sérülés, például zúzódás miatt keletkezik. A sérülések leginkább szállítási és csomagolási folyamatok során lépnek fel, legfőképp dinamikus terhelések hatására. A mechanikai sérülések a gyümölcs jelentős mértékben gyorsíthatják a gyümölcs rothadását. Becslések szerint a termények 30-40 %-a szenved sérülést a betakarítás, szállítás vagy feldolgozás során. (Eissa et al., 2013)

2.2. A terményeket érő mechanikai hatások, sérülések

Almák esetében a sérülések legnagyobb része zúzódás. Ezt okozhatja vibráció vagy bizonyos magasságból történő esés. (Eissa et al., 2013) A szállítás során bekövetkezett sérülések vizsgálata során a gyümölcsöket jellemzően 5-15 Hz frekvenciájú rezgés éri, a rezgés maximális gyorsulása 0,33-0,63 g (Vursavus és Ozguven, 2004). A szállítás során a gyümölcsöket a szállítás módjától, körülményeitől, a gyümölcsök csomagolásától függően érik terhelése. Az 5. táblázat egy Starkspur Golden Delicious almákon végzett, különböző hatásokat vizsgáló mérés eredményeit mutatja. A mérés során a gyümölcsöket hagyományos fa ládában, három rétegben helyezték el. A mérést a valós szállítási körülményeket szimulálva, laboratóriumi körülmények között, a rezgést és ütésszerű hatást mesterségesen előállító mérőpadon végezték. Az erő mérésére a ládák véletlenszerűen kiválasztott pontjain elhelyezett, elektronikus adatgyűjtő rendszerre kapcsolt dinamométert használtak. (Acican et al., 2006)

1. táblázat: Golden Delicious almákat érő erőhatások (Acican et al., 2006)

Réteg	Ejtés következtében fellépő erő [N]	Vízszintes ütközési erő [N]	Vibrációs erő [N]	Átlagos mechanikai erő [N]
Alsó réteg	23,27	18,49	5,07	15,61
Középső réteg	13,97	20,58	4,28	12,94
Felső réteg	11,31	16,51	3,02	10,28

A gyümölcsök rugalmassági modulusa az egyik legfontosabb mechanikai jellemző, és értéke az egyik meghatározó kritérium a szállítás során fellépő sérülések szempontjából. (Shahbazi et al., 2010)

2.3. Anyagmodellek

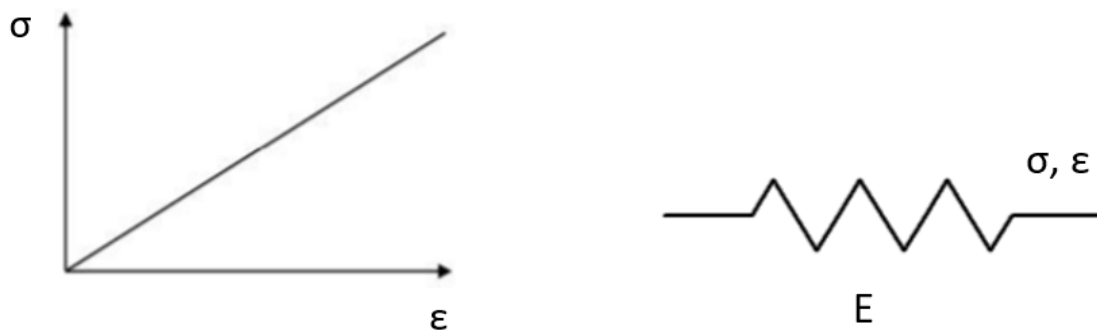
Az anyagok mechanikai viselkedésének vizsgálatához anyagmodelleket használunk. Az anyagok pontos modellezése igen összetett probléma, és tökéletesen pontos modell nem hozható létre. Emiatt a modell megalkotása során nem csak a vizsgált anyagot, hanem a vizsgálat jellegét és az elvárt pontosságot is figyelembe kell venni. Biológiai anyagok vizsgálatára legtöbbször reológiai modelleket alkalmaznak.

2.3.1. Elemi modellek

A reológiai modellek felépítéshez három ideális testet alkalmazhatunk.

2.3.1.1. Hooke-test

Lineárisan rugalmas anyagok esetén a Hooke modell alkalmazható. A modell deformáció-feszültség diagramja az 1. ábrán látható.



1. ábra: Hooke-test karakterisztikája és szimbolikus jelölése (Sheremeta, 2018)

A Hooke-test karakterisztikája a

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (1)$$

egyenlettel írható le, ahol

σ a feszültség [MPa],

ϵ a relatív alakváltozás [-],

E a rugalmassági modulus [MPa].

2.3.1.2. Newton-test

Ideálisan viszkózus modell. Az alakváltozás sebessége és az erő közötti összefüggés a

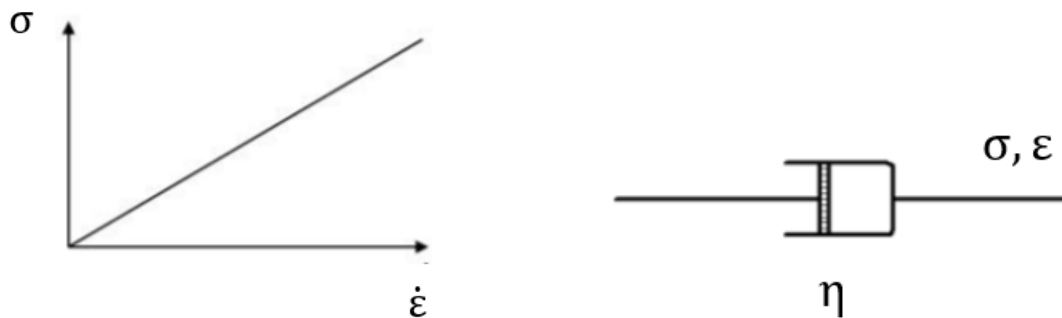
$$\sigma(t) = \eta \cdot \dot{\epsilon}(t) \quad (2)$$

összefüggés alapján határozható meg, ahol

$\sigma(t)$ a feszültség [MPa],

η a viszkozitási tényező [Ns/m²],

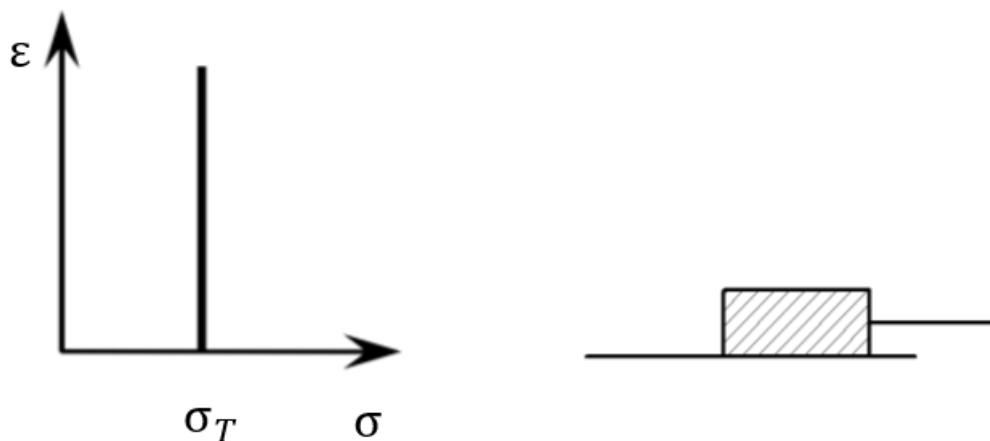
$\dot{\epsilon}(t)$ a relatív alakváltozás változásának gyorsasága [1/s].



2. ábra: Newton-test karakterisztikája és szimbolikus jelölése (Sheremeta, 2018)

2.3.1.3. Saint-Venant-test

Ideálisan plasztikus modell. Az alakváltozás egy bizonyos feszültség alatt nulla, a kritikus feszültség elérésekor a feszültségtől független. A Saint-Venant-test jellege egy súrlódásos kapcsolathoz hasonlítható.

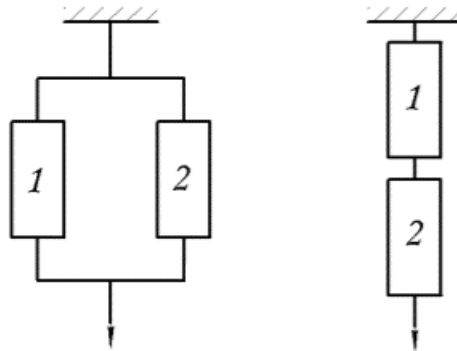


3. ábra: Saint-Venant-test karakterisztikája és szimbolikus jelölése (Sheremeta, 2018)

2.3.2. Összetett anyagmodellek

Az előzőekben felsorolt ideális testeket jellemzően nem önállóan alkalmazzuk, hanem ezek különböző kombinációiból hozzuk létre a modellt. Attól függően, hogy a három elemi test közül melyeket tartalmazza az összetett modell, viszkoelasztikus, elasztoplasztikus, viszkoplasztikus, és viszkoelasztoplasztikus modellekről beszélhetünk. Lineáris modellek esetén a 4. ábrán látható módon elemek soros, illetve párhuzamos kapcsolásban helyezhetők el. (Sheremeta,

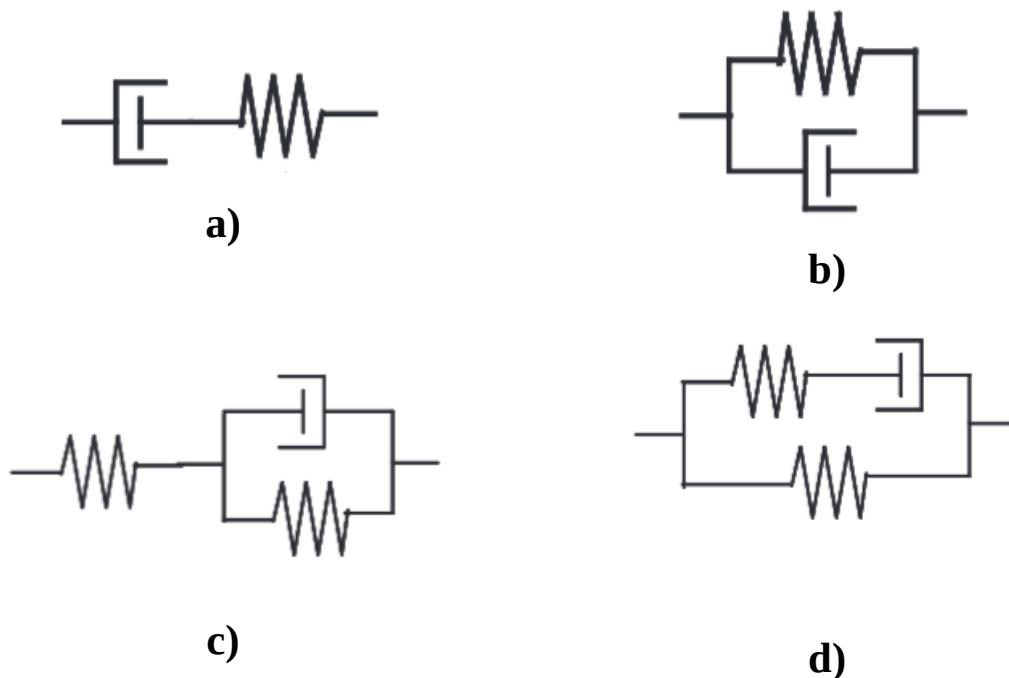
2018) A mezőgazdasági terményeket érő dinamikus hatások jellemzése szempontjából elsősorban a viszkoelasztikus és elasztoplastikus modelleknek van jelentősége.



4. ábra: Elemi testek párhuzamos és soros kapcsolása (Sheremeta, 2018)

2.3.2.1. Viskoelasztikus modellek

Amennyiben a modell Hooke és Newton féle testekből épül fel, úgy viszkoelasztikus modellről beszélhetünk. Az 5. ábra néhány gyakrabban alkalmazott viszkoelasztikus modell jelképes ábrázolását mutatja.



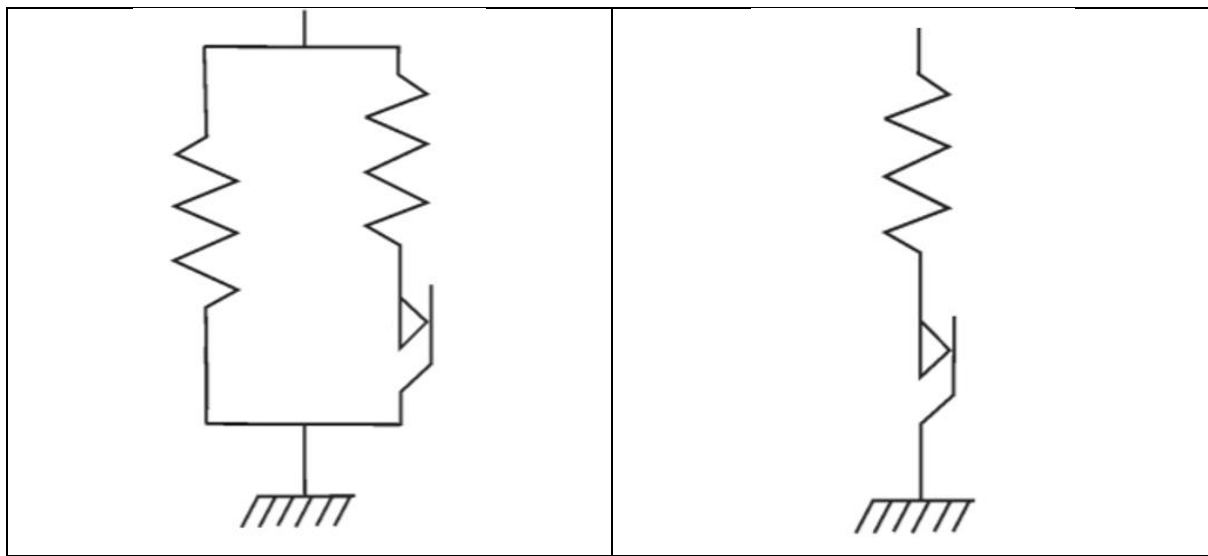
5. ábra: Viskoelasztikus modellek (Dao-Long et al., 2012)

- a) Maxwell modell
- b) Voigt modell
- c) Poynting-Thomson modell
- d) Zener modell

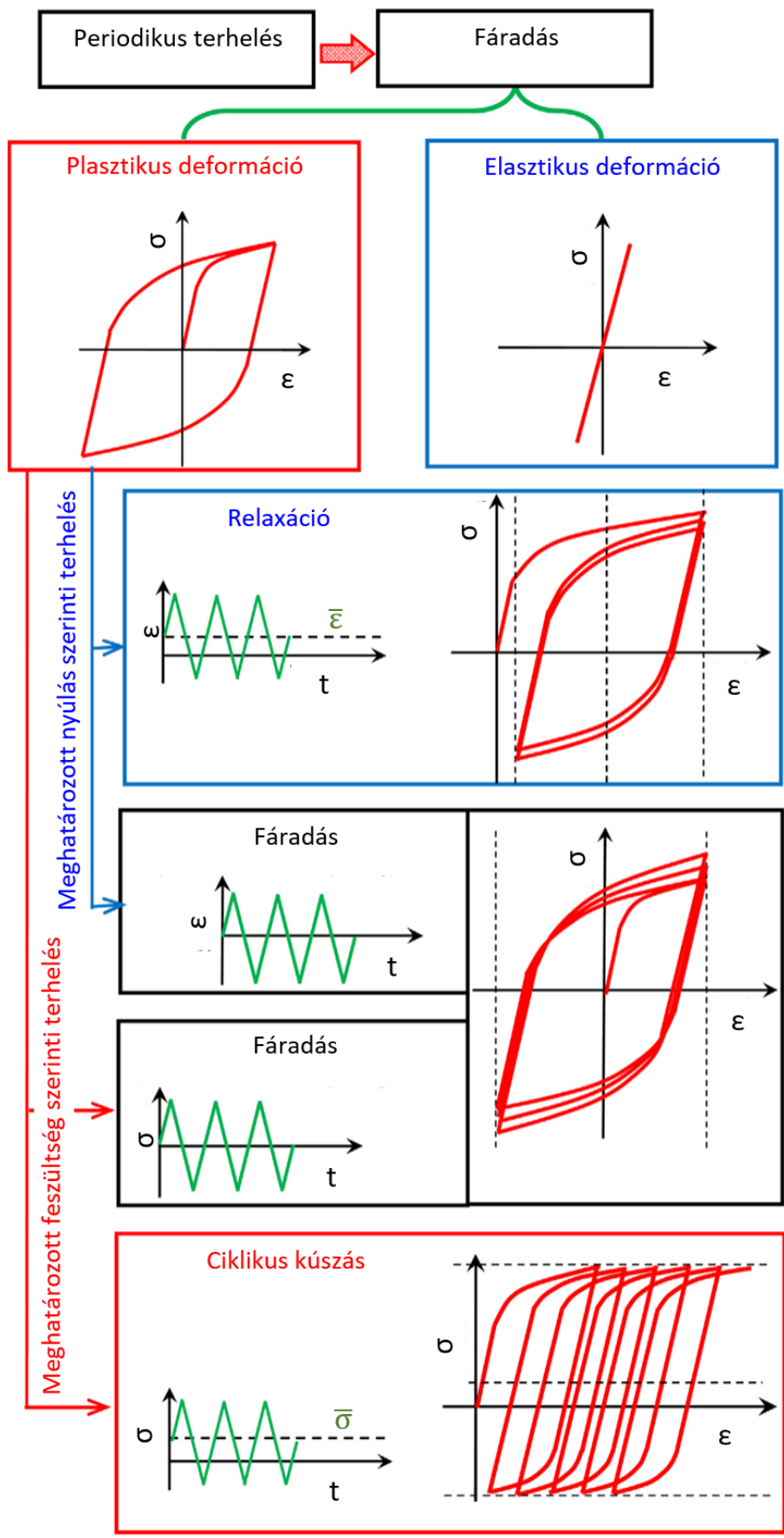
2.3.2.2. Elasztoplasztikus anyagmodellek

Amennyiben a modell Hooke és Saint-Venant testekből épül fel, úgy elasztoplasztikus modellről beszélhetünk. A 6. ábrán néhány elasztoplasztikus modell jelképes ábrázolása látható.

A 7. ábra az elasztoplasztikus modellel jellemezhető anyagokban a ciklikus terhelések hatására bekövetkező jelenségeket mutatja. (Surajit, 2019).



6. ábra: Elasztoplasztikus modellek (Zbiciak, 2009)

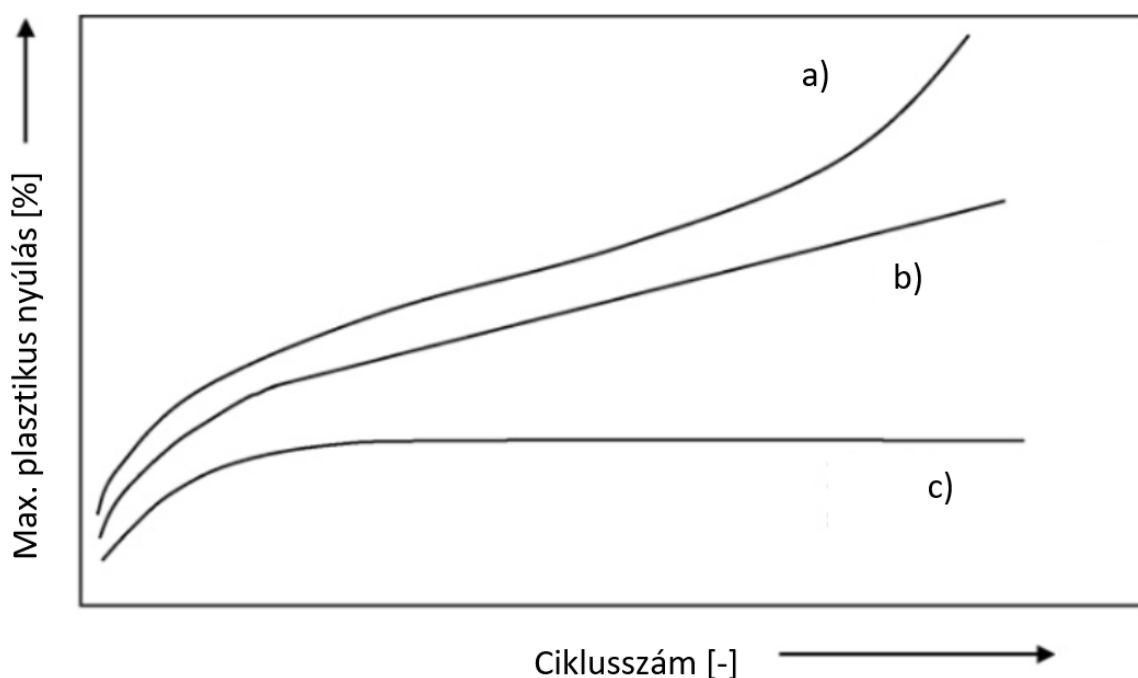


7. ábra (Surajit, 2019)

Mezőgazdasági termények esetén a leggyakrabban ezek közül a ciklikus kúszással találkozhatunk. A ciklikus kúszást a fő terhelés mellett másodlagos periodikus terheléssel ellátott anyag plasztikus deformációjának progresszív növekedéseként értelmezhetjük. A feszültség középértékét a terményre ható állandó erő, jellemzően a súlyerő (a termény saját súlya, illetve halmozott elhelyezés esetén a többi termény súlyából származó erő) jelenti, a periodikus másodlagos terhelést pedig a szállítás, feldolgozás, betakarítás során fellépő rezgések.

A maradó alakváltozás akkumulációját a terhelés nagysága és az anyag ciklikus keményedési vagy lágyulási tulajdonsága befolyásolja. Amennyiben a ciklusszám 100 alatti (ahogy az a későbbiekben vizsgált terményekre jellemző), nagyon alacsony ciklusszámú fáradásról beszélhetünk. A ciklikus kúszás lehetséges módjai a 8. ábrán láthatók. Három, eltérő karakterisztikájú ciklikus kúszási módot különböztetünk meg:

- a) A ciklikus kúszás következtében a plasztikus nyúlás fokozatosan növekszik, majd egy bizonyos ciklusszám után a plasztikus nyúlás gyorsuló növekedése néhány cikluson belül tönkremenetelhez vezet. Ez jellemzően olyan esetekben fordul elő, ahol az anyagot terhelő periodikus feszültség megközelíti a folyáshatárt.
- b) A kúszási nyúlás ciklusonkénti növekedése állandósul.
- c) A ciklusszám növekedésével az anyag elveszti elasztoplasztikus jellegét, az alakváltozás értéke állandósul. (Satyadevi et al., 2017)



8. ábra Ciklikus kúszás (Satyadevi et al., 2017)

Az anyagok ciklikus kúszás során bekövetkező deformációjának meghatározására az

$$\varepsilon_r = \alpha \left[A \left(\frac{\ln N}{\ln N_f} + C \left(\frac{N}{N_f} - \frac{\ln N}{\ln N_f} \right) \right) + B^2 \frac{\ln \left(1 - \frac{N}{N_f} \right)}{\ln \frac{1}{N_f}} \right] \quad (3)$$

egyenletet határozták meg (Ahmadzadeh és Varvani-Farahani, 2012).

Az egyenlet állandói

$$A = 2 \ln \left(\frac{\sigma_y}{E} \right)^{-1} \quad (4)$$

$$B = \ln \left(\frac{\Delta \sigma}{E} \right) \quad (5)$$

$$C = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\sigma_m}{\Delta \sigma} \right)^{\frac{1}{2n}} \quad (6)$$

ahol

ε_r a deformáció [-],

σ_y a folyáshatár [MPa],

$\Delta \sigma$ a feszültség terjedelme [MPa],

N_f a tönkrementelig eltelt ciklusok száma [-],

N a ciklusszám [-],

σ_m az átlagos feszültség [MPa],

E a Young féle modulus [MPa]

n a ciklikus keményedési kitevő [-].

Bár az összefüggést eredetileg szerkezeti anyagok viselkedésének leírására hozták létre, azt később biológiai szövetek vizsgálatokor is sikeresen alkalmazták (Hashemi et al., 2019).

3. Anyag és módszer

3.1. A DyMaTest mérőberendezés bemutatása

A romlandó gyümölcsöket a szállítás és feldolgozás folyamatai során elsősorban ismétlődő terhelések érik. Ennek vizsgálatára alkották meg a DyMaTest mérőberendezést (9. ábra). A mérőberendezés kétféle mérési mód elvégzésére alkalmas:

- Meghatározott idő-elmozdulás függvény alapján a reakcióerő mérhető.
- Meghatározott terhelő erő mellett az elmozdulás mérhető.



9. ábra: DyMaTest mérőberendezés (Farkas, 2020)

Az erő mérését nagy szilárdságú alumínium ötvözetből készült mérőtestre szerelt, 120 ohm ellenállású Kyowa KFG-2-120-C1-23 típusú önkompenzáló nyúlásmérő bélyegek végzik. A berendezés 8 nyúlásmérő bélyeget tartalmaz, azok páronként hídkapcsolásba vannak kötve. Az erőmérő cella kimenő jelének erősítését egy HBM RM4220 típusú mérőerősítő végzi el.

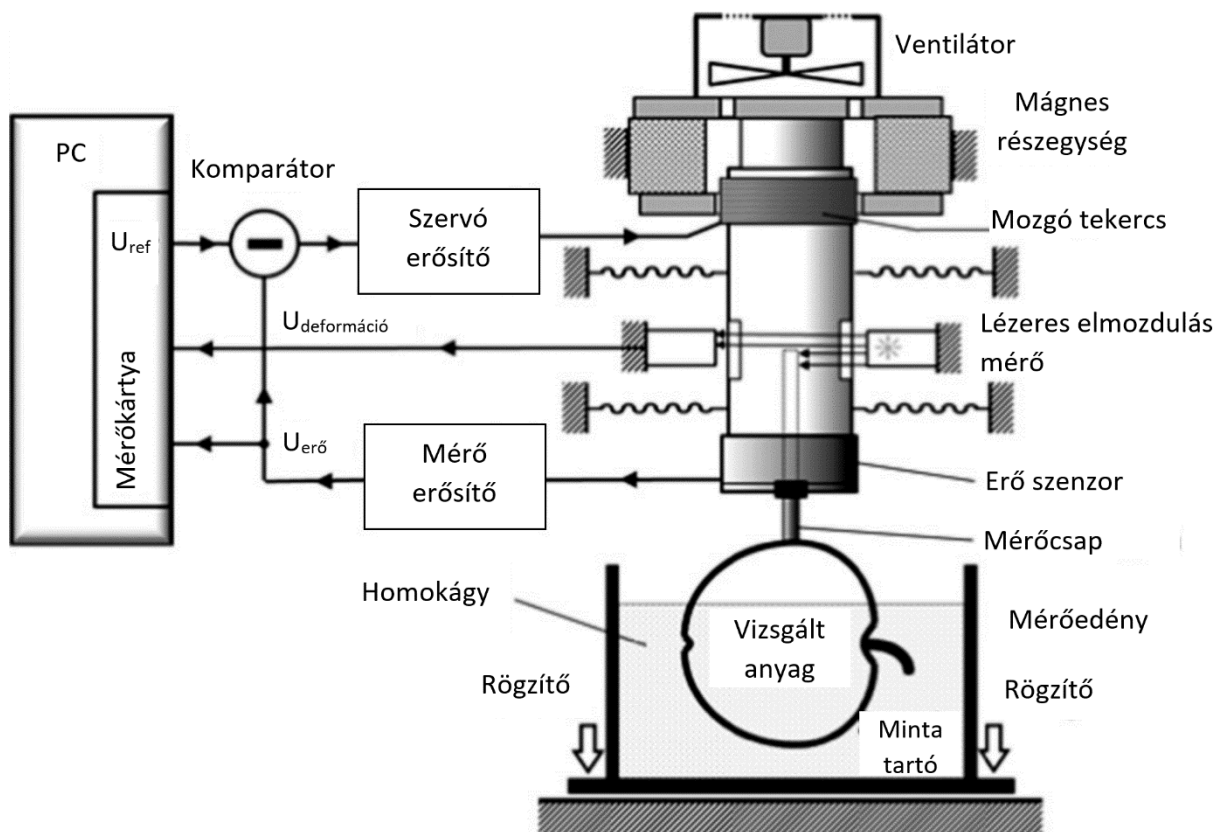
Az elmozdulás mérését OMRON ZX series ZX-LT010 típusú lézeres érzékelő és X-LDA41-N típusú erősítő egység végzi.

A mérőcsap lineáris mozgását, illetve a terhelő erő kifejtését statikus mágneses térbe helyezett lengőtekercs biztosítja. A meghatározott függvény szerinti erő értékét az elektromos áram vezérlésével lehet előállítani.

A DyMaTest készülék jellemző adatait a 2. táblázat tartalmazza, a berendezés és mérőrendszer vázlatát a 10. ábra mutatja.

2. táblázat: DyMaTest készülék adatai (Petróczki és fenyvesi, 2014)

Legnagyobb terhelő erő	15 N $\pm$ 1%
Terhelés erő-idő függvénye	Konstans, lineáris fel/le, koszinuszos, négyszögjel szerinti
Deformáció tartománya	Max. 10 mm
Deformáció felbontása	3 μ m / 12 μ m
Berendezés frekvenciatartománya (- 3 dB)	0-300 Hz
Mérőcsap átmérője	$\varnothing$ 4 mm; $\varnothing$ 5 mm; $\varnothing$ 6 mm



10. ábra: DyMaTest felépítése (Petróczki és Fenyvesi, 2014)

3.2. A mérés leírása

A mérések 25 terményen, terményeként 6 mérési pontban lettek elvégezve. A mérés beállításai a 3. táblázatban láthatóak. A mérést a terhelőerő-idő függvényt megadva, a deformációt mérve végezték el.

3. táblázat: Mérés beállításai (Farkas, 2020)

Előterhelő erő	0,2 N
Terhelő erő	13,8 N
Teljes terhelés	14 N
Terhelési függvény	Koszinuszos
Terhelés frekvenciája	2,5 Hz; 3,7 Hz; 5 Hz; 7,5 Hz; 10 Hz; 11,6 Hz

3.3. A számítások elvégzéséhez felhasznált mérési adatok

Kiindulási adatként az alábbi adatokat használtam fel a számítások elvégzéséhez:

- **Erő-deformáció adatsorok**

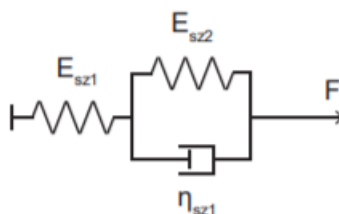
Az idő függvényében 2000 Hz mintavételi frekvenciával mért erő és deformáció adatsorok táblázatos formában álltak rendelkezésre.

- **Az egyes mérésekhez tartozó külső tönkremeneteli idő (TTF_K) értékei.**

Külső tönkremenetelről akkor beszélünk, ha a termény héja a mechanikai terhelés hatására átszakad. A külső tönkremenetel időpillanatának meghatározása nagy képkockasebességű videofelvétel elemzésével történt, a DyMaTest által mért értékektől függetlenül.

- **A termények viszkoelasztikus modelljének E_{sz1} , E_{sz2} és η jellemző értékei.**

A termények dinamikus terhelés hatására bekövetkező viselkedésének leírására a Poynting-Thomson modellt (11. ábra) alkalmazták. A modell a 11. ábrán látható. A modell paramétereit a mért adatsorok alapján számítógépes modellezés segítségével identifikálták (Farkas, 2016).

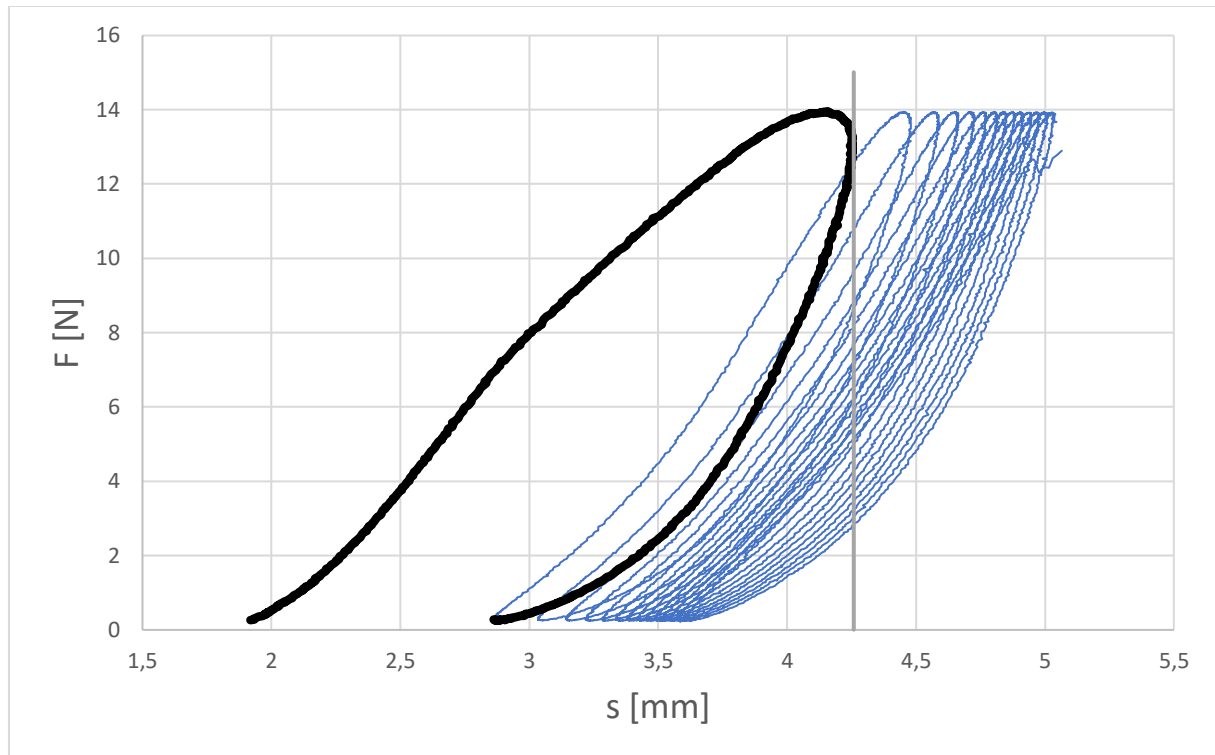


11. ábra: Poynting-Thomson modell (Farkas, 2020)

3.4. A számítandó mennyiségek

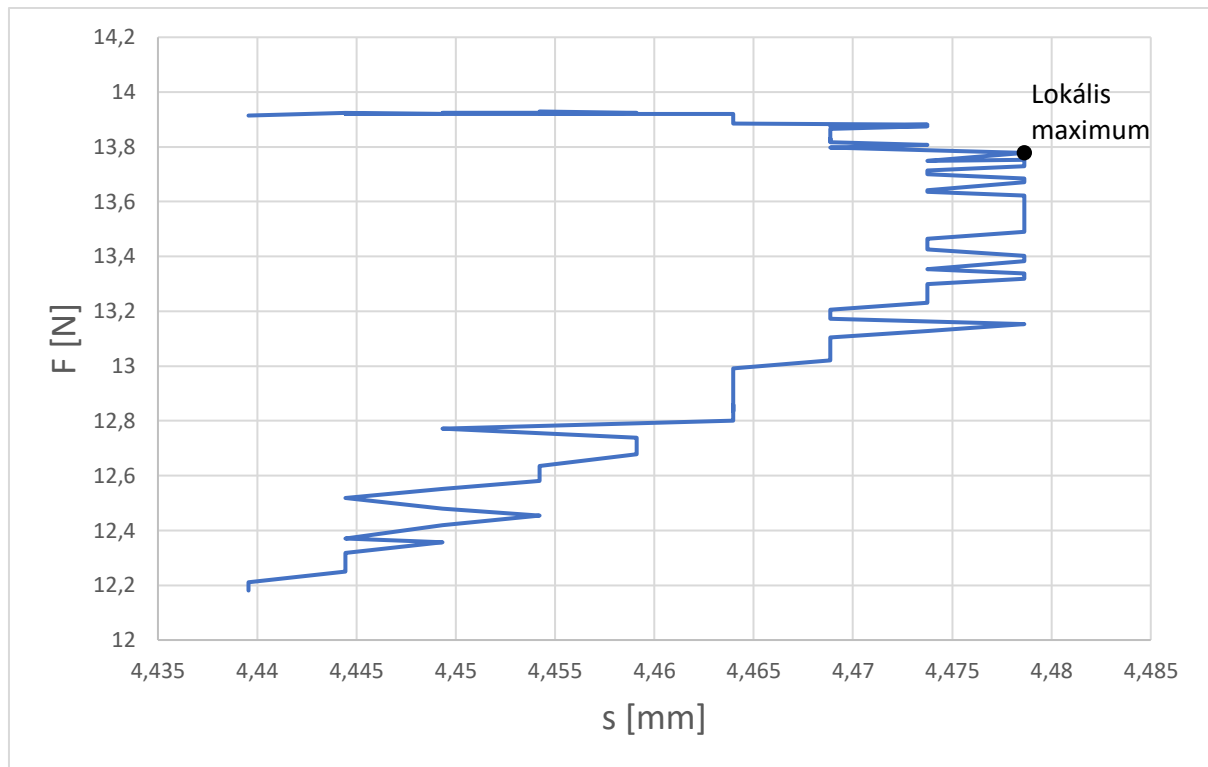
A rendelkezésre álló kiindulási adatok alapján az alábbi mennyiségeket határoztam meg:

3.4.1. A terhelési ciklusok csúcspontjainak jellemző értékei



12. ábra: A mérés eredményeként kapott erő-deformáció diagram

A 12. ábrán látható egy jellemző mérési adatsor $F[N]$ - $s[mm]$ grafikonon ábrázolva, a jobb átláthatóság érdekében egy ciklust kiemelve. A számítás során az adatsor egyes ciklusainak elmozdulás szempontjából vett lokális szélsőértékeit határoztam meg.



13. ábra: Az egyik terhelési ciklus csúcspontjának környezete

A 13. ábra egy lokális maximum értéket és annak környezetét ábrázolja. Ahogy az ábrán is látható, a legtöbb esetben több, egyenlő nagyságú erő érték tartozott egy adott deformáció értékhez a mérési adatsorban, ami a mérőeszközök véges nagyságú felbontásával magyarázható. Ilyen esetekben az egyszerűség miatt az egyenlő deformációhoz tartozó mérési pontok közül a legkisebb sorsszámút (a legkisebb időértékhez tartozót) tekintettem a lokális szélsőértéknek. Az ábra alapján jól látható, hogy a mért értékek - a mérőeszköz felbontása, pontatlansága és egyéb sztochasztikus körülmények miatt – erősen ingadoznak, emiatt a lokális szélsőérték hagyományos meghatározását alkalmazva igen sok lokális szélsőérték pont létezne. Ennek kiküszöbölésére azt a pontot tekintettem lokális szélsőértéknek, ahol ennek feltétele az adott pont r_2 sugarú környezetében valamennyi pontra teljesül. Ennek értékét iteráció alapján $r_2=25$ -re választottam.

3.4.2. A tönkremenetelig eltelt ciklusok száma

A TTF_K külső tönkremeneteli idő meghatározása a DyMaTest mérőberendezés által rögzített adatoktól függetlenül, 240 Hz felbontás videofelvétel elemzése alapján történt. Ez ugyan igen pontos, független eredményt ad, azonban rendkívül időigényes és mindenképpen manuális kiértékelést igényel, nem automatizálható. A rendelkezésre álló 150 adatsor esetén a TTF_K külső tönkremeneteli idő ugyan már meg lett határozva, azonban további, jövőbeni mérések

kiértékelése során fontos szempont lehet, hogy azt kizárólag a mérőrendszer részét képező számítógép által rögzített adatokból, automatikusan meg lehessen határozni. Amennyiben a tönkremenetel valamennyi termény esetén a terhelési ciklus egy adott pontjában következik be, akkor a továbbiakban a TTF_K idő helyett elegendő a jóval egyszerűbben meghatározható, könnyebben kezelhető, egész számmal leírható N ciklusszámot vizsgálni. Előzetes feltételezés szerint ez a pont a terhelő erő maximális értékénél található, ami – mivel koszinuszos terhelésről van szó – a terhelési ciklus felénél található. Annak vizsgálatára, hogy a tönkremenetel az adott ciklus melyik részén következik be, bevezettem az

$$T_A = \left(TTF_K - \frac{N}{f} \right) \cdot f \cdot 100 \% \quad (7)$$

jellemzőt, ahol

T_A a tönkremenetel cikluson belüli pontját jellemző mennyiség [%],

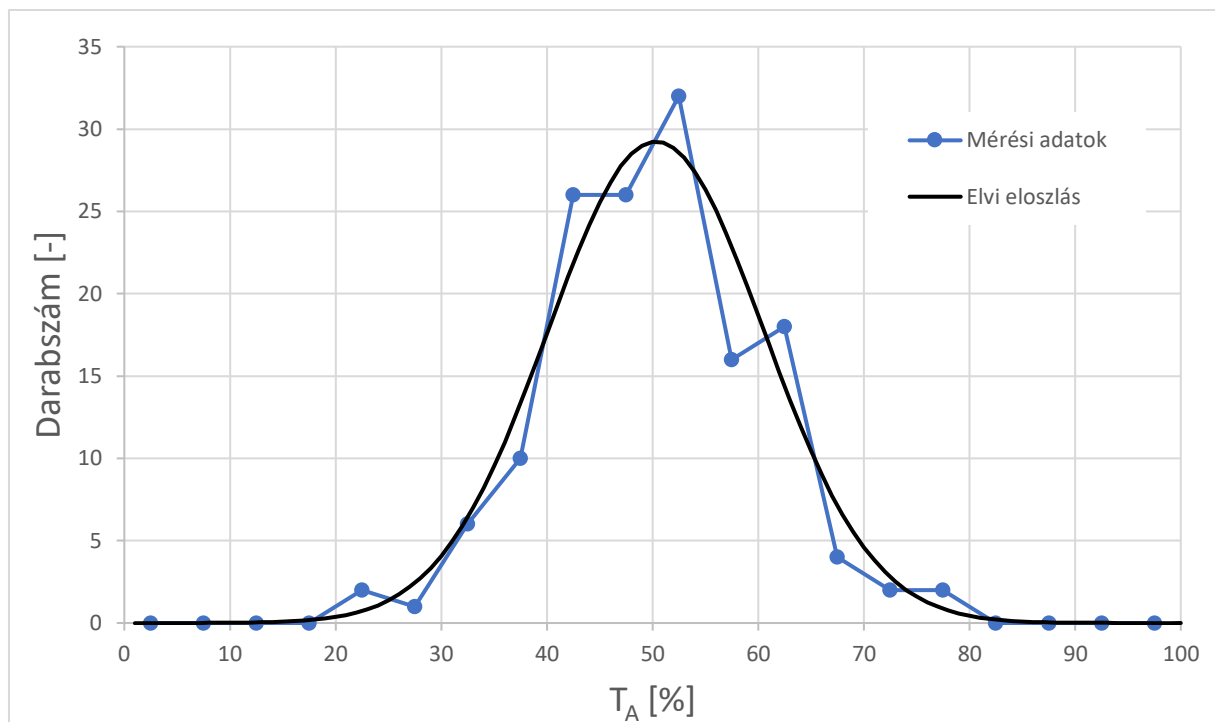
TTF_K a külső tönkremeneteli idő [s],

N a tönkremenetelig eltelt ciklusok száma [-],

f a terhelés frekvenciája [Hz].

Az így számított T_A értékeket az 1. melléklet tartalmazza. Az értékek 5% felosztású hisztogramon ábrázolva a 14 ábrán láthatók. A számítás során néhány T_A érték nem esett bele a [0 % ; 100 %] intervallumba, ami feltehetően az adatok hibájával indokolható. Ezeket a további számítások során nem vettem figyelembe. Az előzetes feltételezésnek megfelelően a tönkremenetel jellemzően a ciklus terhelési csúcspontjának környezetében következik be, így a tönkremenetelig értelmezett mérési adatsor „fél” ciklussal végződik. Az adatok közelítőleg normális eloszlást követnek, melynek középértéke 50,5 %, szórása 10,2 %.

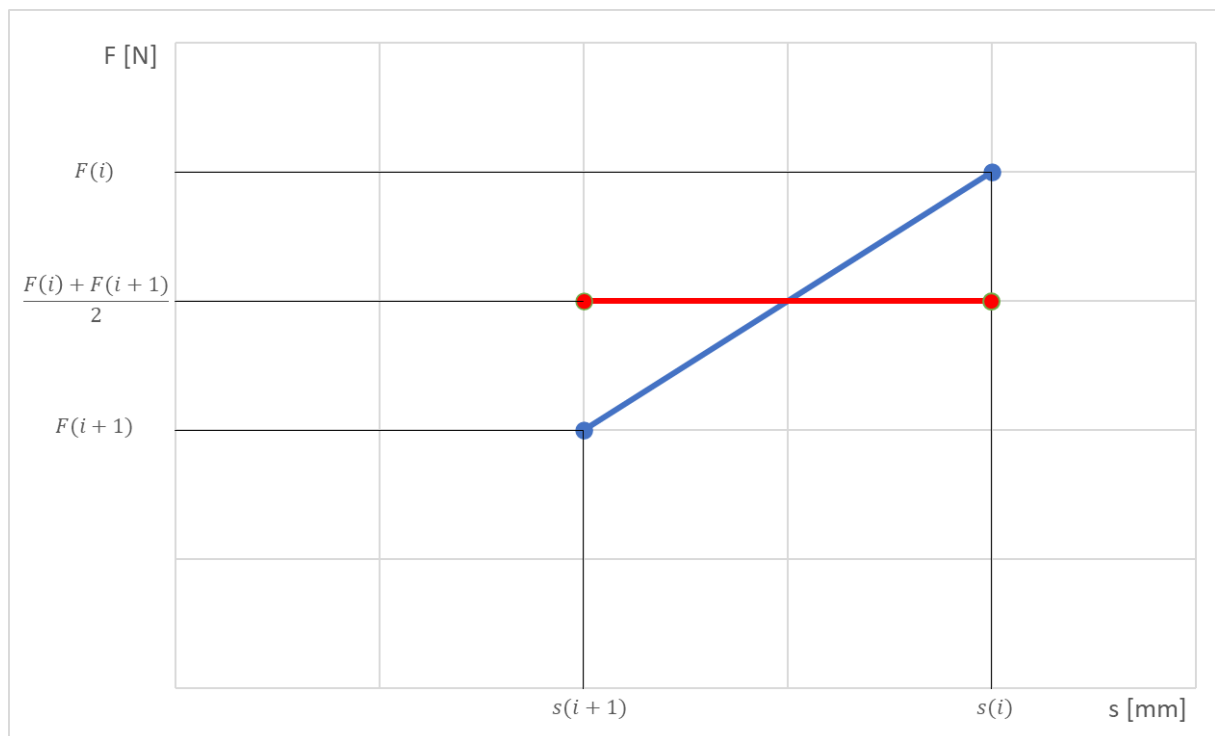
Ezek alapján a továbbiakban a TTF_K tönkremeneteli idő helyett az azzal – a vizsgálat jellegéhez képest kis mértékű szórását leszámítva – egyenértékűnek tekinthető, de jóval egyszerűbben kezelhető N ciklusszámot fogom alkalmazni.



14. ábra: A T_A jellemző eloszlása hisztogramon ábrázolva

3.4.3. A rugalmas energia értéke

A rugalmas energia értékeit numerikus integrálással határoztam meg. Az egymást követő mérési pontokat (15. ábra) lineárisan interpoláltam, és az így kapott energiaértékeket összegeztem.



15. ábra: Lineáris interpolálás

Az integrál értékét (ami definíció szerint a görbe alatti területtel egyenlő) az

$$E_R = \sum_{i=N_1(n)}^{N_2(n)} \frac{F(i) + F(i+1)}{2} [s(i+1) - s(i)] \quad (8)$$

összefüggéssel határoztam meg, ahol

$E_R(n)$ az n -edik terhelési ciklus rugalmas energia értéke [mJ],

$N_1(n)$ és $N_2(n)$ az n -edik terhelési ciklus kezdeti és végpontjának sorszáma [-],

$F(i)$ és $F(i+1)$ az i -edik és $(i+1)$ -esik mérési ponthoz tartozó erő [N],

$s(i)$ és $s(i+1)$ az i -edik és $(i+1)$ -edik mérési ponthoz tartozó deformáció [mm].

Mivel az így kapott energia értéke negatív, minden további számítás során az egyszerűség miatt ennek abszolútértékét veszem figyelembe.

3.5. A számítások elvégzésére használt algoritmus

A korábban ismertetett számításokat 150 mérési adatsorra kellett elvégezni. Mivel ez manuális módon észszerűen nem kivitelezhető, ezért a számítások elvégzésre kidolgoztam egy algoritmust, aminek segítségével valamennyi ciklus csúcspontjának értéke, a tönkremenetelig eltelt ciklusok száma és a rugalmas energiák integrálással történő meghatározása automatizáltan elvégezhető. Az algoritmus blokkvázlatát a 16. ábra mutatja. Az algoritmust végrehajtó kódot a Microsoft Excel VBA felületén készítettem el. Futtatás után az eredményeket a 4. táblázatban látható formában kapjuk meg.

4. táblázat: Az algoritmus alapján számított eredmények

Terhelési csúcspont				Tehermentesítési csúcspont			
Sorszám	t [s]	s [mm]	F [N]	Sorszám	t [s]	s [mm]	F [N]
424	0,21050	3,46764	13,39683	783	0,39000	2,41758	0,28327
1201	0,59900	3,64347	13,77778	1579	0,78801	2,56410	0,26862
2007	1,00202	3,74115	13,69475	2385	1,19101	2,65690	0,27839
2790	1,39349	3,81441	13,87057	3184	1,59048	2,73016	0,28327
3586	1,79146	3,86813	13,89011	3981	1,98895	2,78877	0,26862
4397	2,19693	3,91697	13,80708	4783	2,38992	2,83761	0,27350
5198	2,59740	3,96093	13,79731	5577	2,78689	2,87180	0,25885
5992	2,99437	4,00000	13,86081	6384	3,19036	2,91087	0,27350
6779	3,38785	4,02930	13,92918	7181	3,58883	2,94994	0,26862
7616	3,80632	4,06838	13,54335	7979	3,98780	2,98413	0,25885
8391	4,19388	4,09280	13,86569	8785	4,39096	3,00855	0,28327
9183	4,59004	4,12698	13,90965	9582	4,78962	3,03785	0,26862
9996	4,99670	4,17582	13,81197	10384	5,19078	3,06716	0,26862

Mivel a kódolás során alsó- és felsőindexek nem használhatók, így az ott használt változók nevében az algoritmus bemutatása során sem használok indexelést.

A blokkvázlaton használt jelölések:

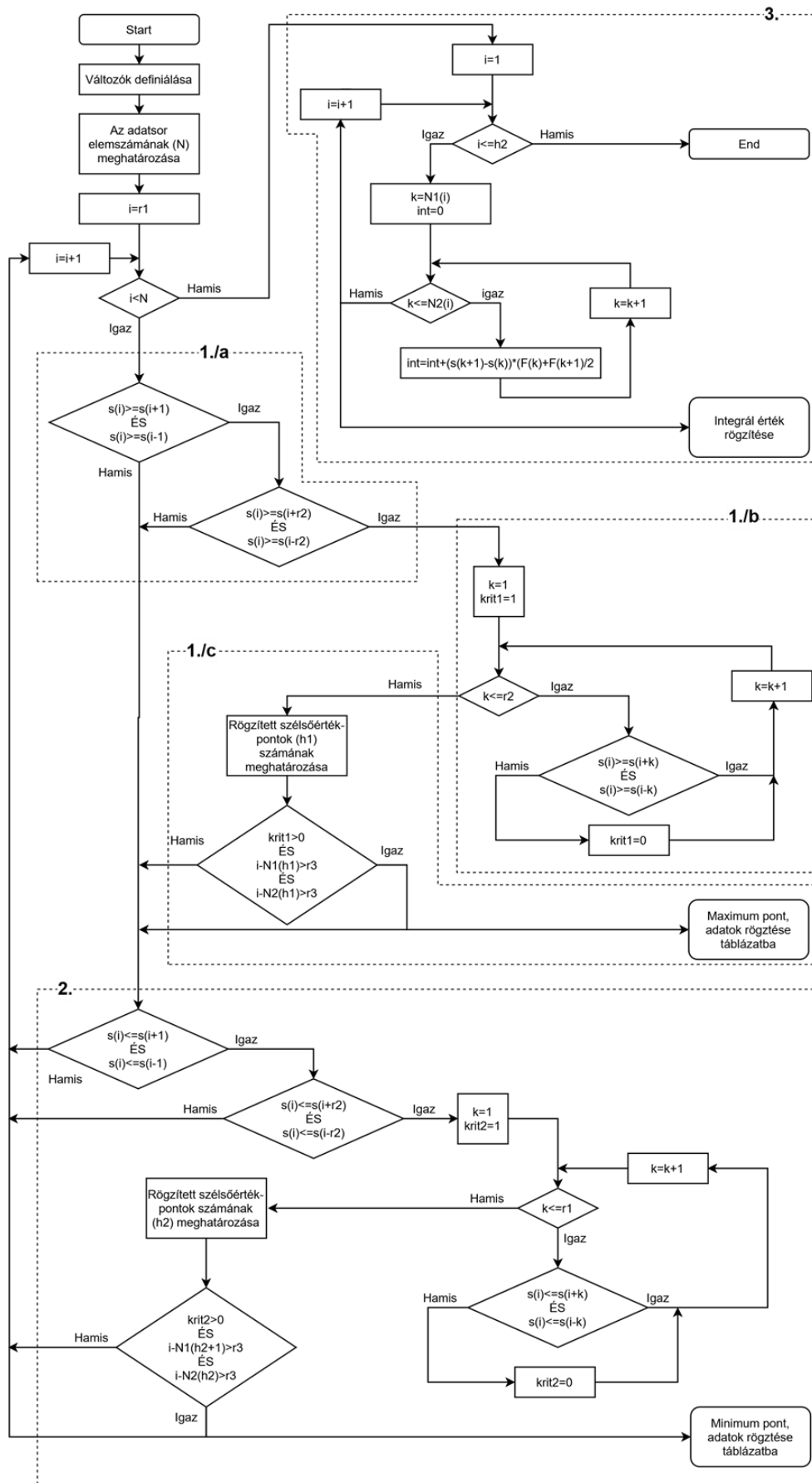
- N : A mért adatsor elemszáma
- i, k : Futó változó
- $s(i)$: Az i -edik mérési ponthoz tartozó elmozdulás
- $F(i)$: Az i -edik mérési ponthoz tartozó erő
- r_2 : A lokális szélsőérték keresés sugara
- $krit1, krit2$: A szélsőérték létezéséhez szükséges kritériumok teljesülését leíró változó
- $N1(h), N2(h)$: A h -adik, korábban már megtalált és rögzített lokális minimum, illetve maximum pont sorszáma,
- r_3 : Az utoljára rögzített és a vizsgált szélsőérték pont szükséges különbségét leíró változó
- int : Az integrál értéke.

Az algoritmus főbb elemei következnek:

- A terhelési csúcspontok meghatározása.
 - A lokális maximum létezésének szükséges, de nem elégséges feltétele az i -edik pontban, hogy az $s(i)$ alakváltozás ne legyen kisebb, mint az $s(i \pm 1)$ és az $s(i \pm r_2)$ deformáció értékek.
 - A lokális maximum létezésének szükséges és elégséges feltétele az i -edik pontban, hogy az $s(i)$ alakváltozás ne legyen nagyobb, mint az s értéke az $[i-r_2, i+r_2]$ halmaz valamennyi eleme esetén.
 - Az így teljesült feltételek kielégítik a lokális maximum általam meghatározott feltételeit. Azonban még meg kell vizsgálni, hogy az így kapott maximum pont sorszáma (idő értéke) megfelelő mértékben eltér-e az utoljára rögzített maximum értéktől (az első maximum keresésekor a táblázat nulladik sorában megadott konstanstól). Az adatsorok jellemzően több, teljesen azonos deformáció értéket tartalmaznak a maximum hely környezetében, és ezen feltétel vizsgálata nélkül valamennyi pont maximumként rögzítésre kerülne. Ezen felül meg kell vizsgálni, hogy az így kapott maximum pont sorszáma (idő értéke) nagyobb-e, mint az utolsóként rögzített minimum pont értéke, tehát a maximum és minimum pontok váltakozva követik-e egymást. Ha a feltételek

teljesülnek, akkor az így kapott maximum pont értékeit a táblázat külön oszlopában rögzítem.

- A tehermentesítési csúcspontok meghatározása a terhelési csúcspontokhoz hasonlóan történik.
- Numerikus integrálás



16. ábra: Az algoritmus blokkvázlata

4. Eredmények

4.1. A mérési adatsorok csoportosítása

Annak érdekében, hogy a termények tulajdonságai egyszerűen összehasonlíthatóvá váljanak, a több ezer adatpontot tartalmazó mérési adatsorok helyett azokat célszerű valamilyen módszerrel egyetlen mennyiséggel jellemezni. Ennek érdekében az első terhelési ciklus jellemzésére bevezettem az

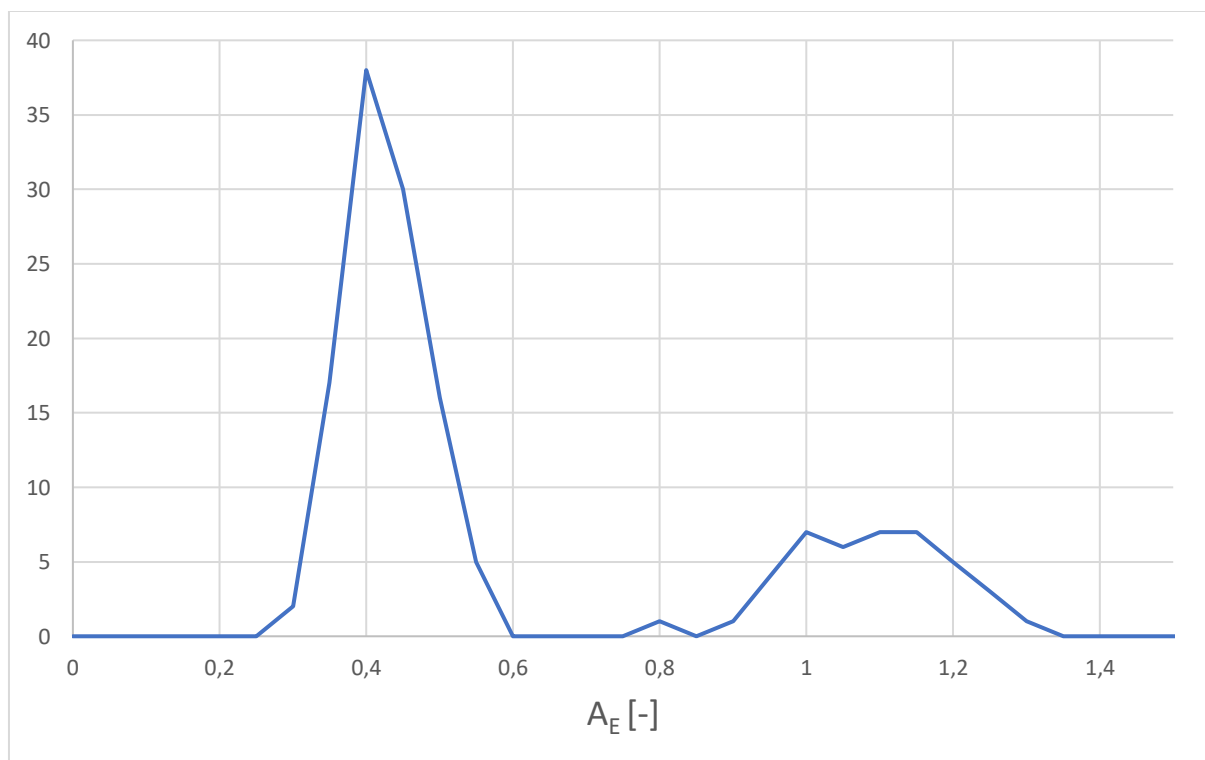
$$A_E = \frac{E_D}{E_R} \quad (9)$$

dimenzió nélküli arányszámot, ahol

E_R : A rugalmas energia értéke az első terhelési ciklusra [mJ],

E_D : A disszipált energia értéke az első terhelési ciklusra [mJ].

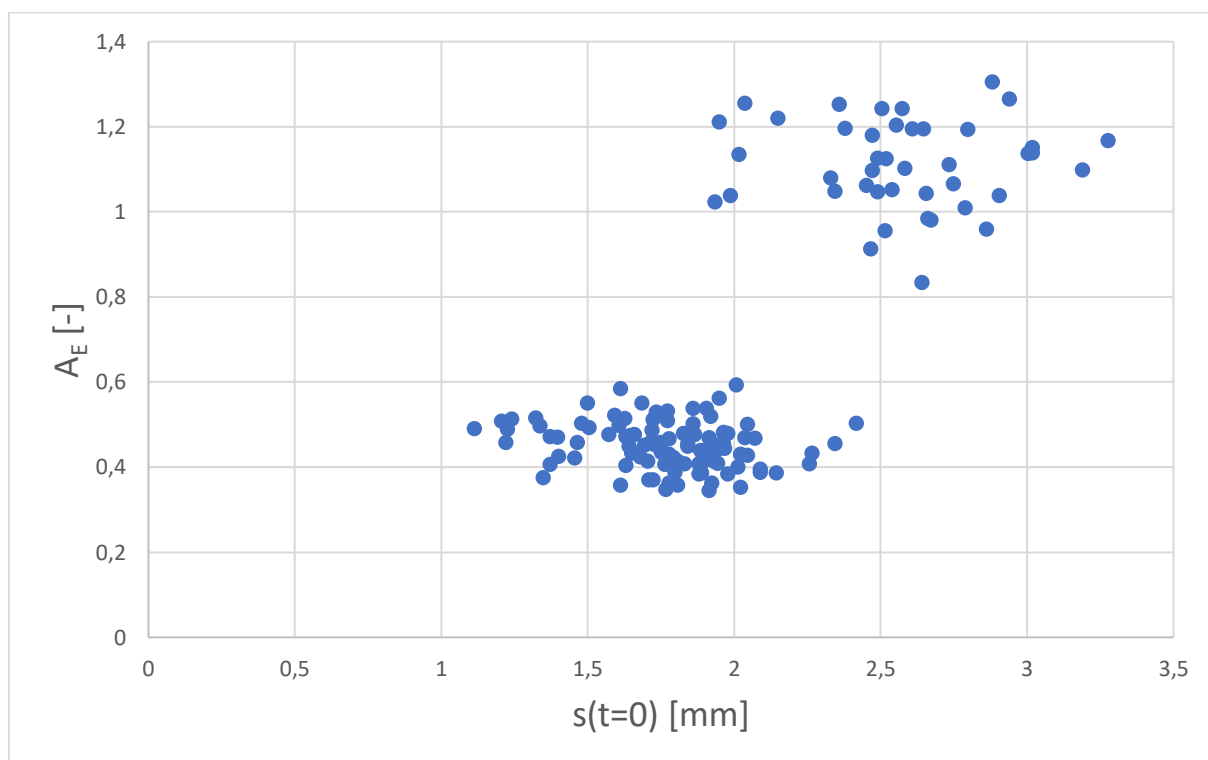
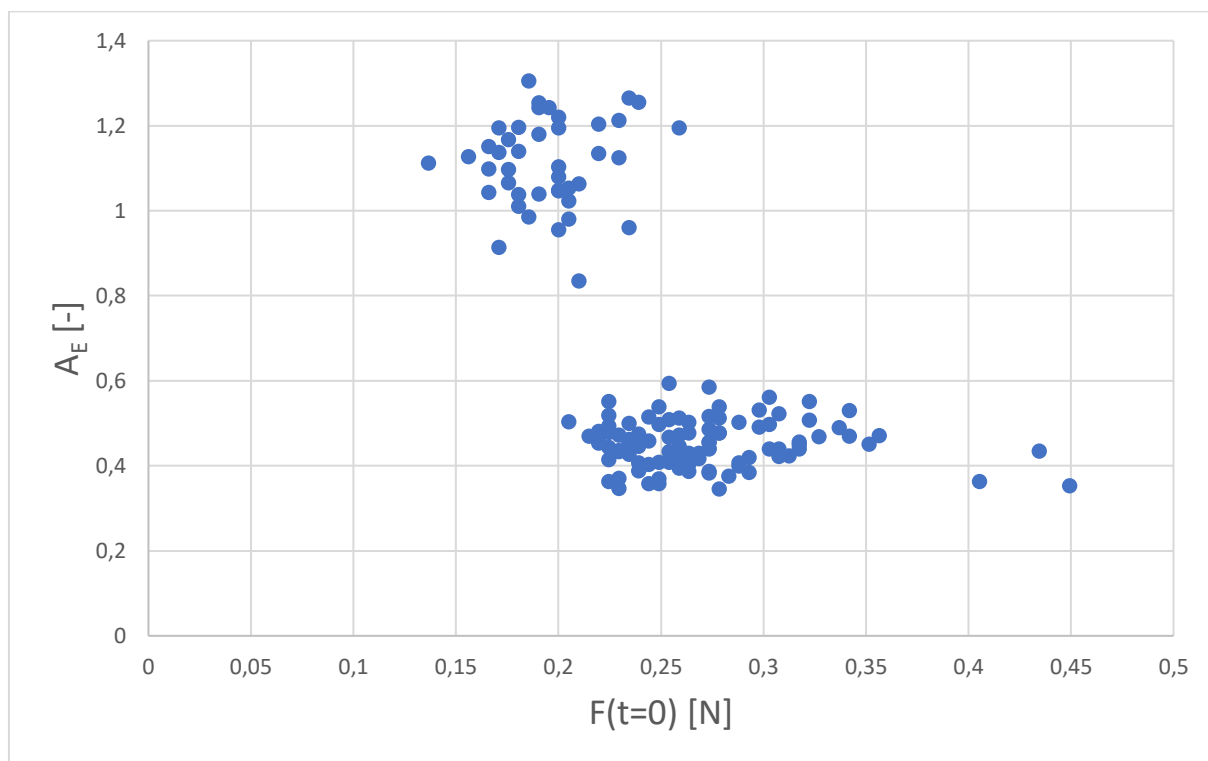
A további vizsgálatok során az A_E arányszám és a terményeket jellemző egyéb mennyiségek között nem volt összefüggés megállapítható. Az értékek vizsgálata során azonban megállapítható volt, hogy az A_E értékek két, egyértelműen elkülönülő csoportra osztható. Ennek szemléltetésére az A_E értékeit 0,05 felosztással hisztogramon ábrázoltam (17. ábra).



17. ábra: Az A_E energiaarány értékei hisztogramon ábrázolva

A két halmaz nem csak az A_E energiaarány tekintetében különül el. A 18. ábra az A_E arányt a $t=0$ időpontban mért értékek függvényében ábrázolja. A grafikonok alapján megállapítható,

hogy a két halmaz - bizonyos mértékű átfedéssel – az abszolút elmozdulás és erő értékének alapján is egyértelműen elkülönül.



18. Az A_E energiaarány a $t=0$ -ban mért értékek függvényében

Tekintve, hogy a mérés tárgya mezőgazdasági termény volt, nem váratlan, hogy a mért értékek - a műszaki gyakorlatban megszokotthoz képest - igen széles tartományban helyezkednek el.

Azonban ezzel nem magyarázható, hogy a két halmaz értékeit egy viszonylag széles, egyetlen adatpontot sem tartalmazó sáv választja el. Egy ilyen jelenség oka elvben lehetne a termények előélete (például eltérő szállítási, tárolási körülmények), azonban több esetben is ugyanazon termény különböző pontjain elvégzett mérések eredménye között is ugyanez az eltérés tapasztalható.

Jelenlegi ismereteim szerint a mérés során vizsgált Golden Delicious almának nincs olyan fizikai tulajdonsága, ami egy adott terület mentén bizonyos pontban bármilyen átmenet nélkül, egységugráshoz hasonlóan megváltozna. Amennyiben mégis létezne egy ilyen tulajdonság, figyelembe véve a mérőcsap és a vizsgált termények összemérhető nagyságú geometriai méreteit (a termények jellemző átmérője a mérőcsap átmérőjének ~15-szöröse) nagyon valószínűtlen, hogy a 150 véletlenszerűen kiválasztott mérési pont egyike sem helyezkedik el oly módon, hogy az mindkét (eltérő tulajdonságú) részt érintse.

Ezek alapján a jelenség oka pillanatnyilag nem ismert, vizsgálata későbbi mérések tárgyát képezheti. A dolgozatom további részében csak a jelentősen nagyobb elemszámú halmaz vizsgálatával foglalkozom.

4.2. A rugalmas és disszipált energiák aránya és a tönkremenetelig eltelt ciklusszám közötti összefüggés meghatározása

Az A_E arányszámhoz hasonlóan, azonban az adott mérés tönkremenetelig eltelt valamennyi ciklusára vonatkoztatva bevezettem az

$$A_V = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{E_D}{E_R}(i) \quad (10)$$

dimenzió nélküli arányszámot, ahol

$E_R(i)$ az i -edik ciklus rugalmas energiájának értéke [mJ],

$E_D(i)$ az i -edik ciklus disszipált energiájának értéke [mJ],

N a tönkremenetelig eltelt ciklusok száma [-].

Az így kapott értékeket grafikonon (19. ábra) ábrázoltam, az adathalmazra görbét illesztettem.

A grafikonon jellegét figyelembe véve

$$A_V = ae^{b(N-c)} + d \quad (11)$$

valamint

$$A_V = a(N+b)^c + d \quad (12)$$

alakú görbe illesztését végeztem el.

A görbeillesztéshez a célfüggvényt

$$J = \sum (A_{VM}(N) - A_{VSZ}(N))^2 \quad (13)$$

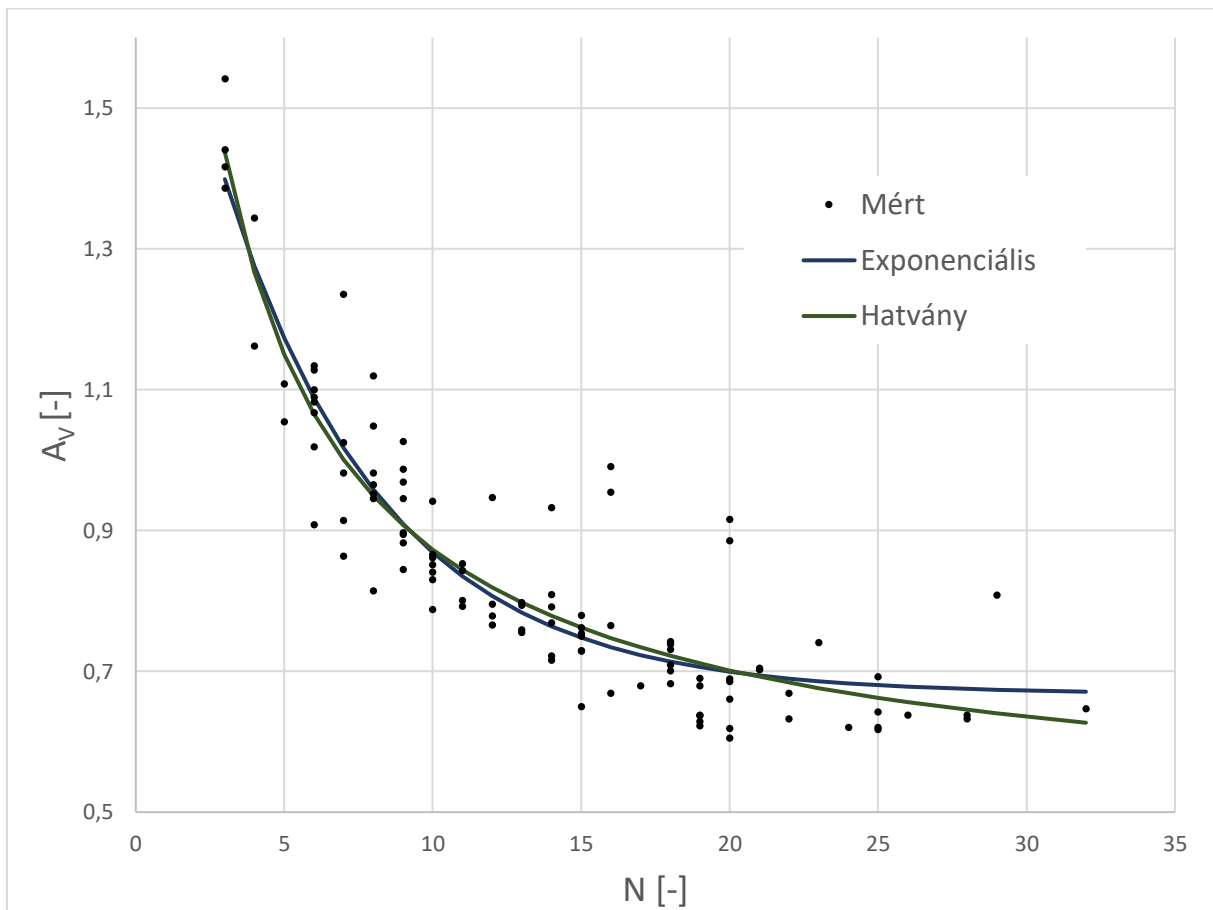
alakban határoztam meg, ahol

$A_{VM}(N)$ a mért adatsorhoz tartozó energiaarány [-],

$A_{VSZ}(N)$ az illesztés során számított energiaarány [-],

J a minimalizálandó célfüggvény [-].

A minimumkereséshez a nemlineáris általános redukált gradiens módszert használtam. A J célfüggvény meghatározása a minimumkereséshez, és így az illesztés elvégzéséhez elegendő, azonban a J minimalizált értékének ismerete önmagában nem szemlélteti az illesztés jóságát. Ennek érdekében a Pearson-féle korrelációs együttható négyzetét (R^2) is meghatároztam. Az eredmények (5. táblázat) alapján megállapítható, hogy a két függvény gyakorlatilag azonos pontossággal írja le a mért adatokat. Az így kapott görbék grafikonja a 19. ábrán látható.

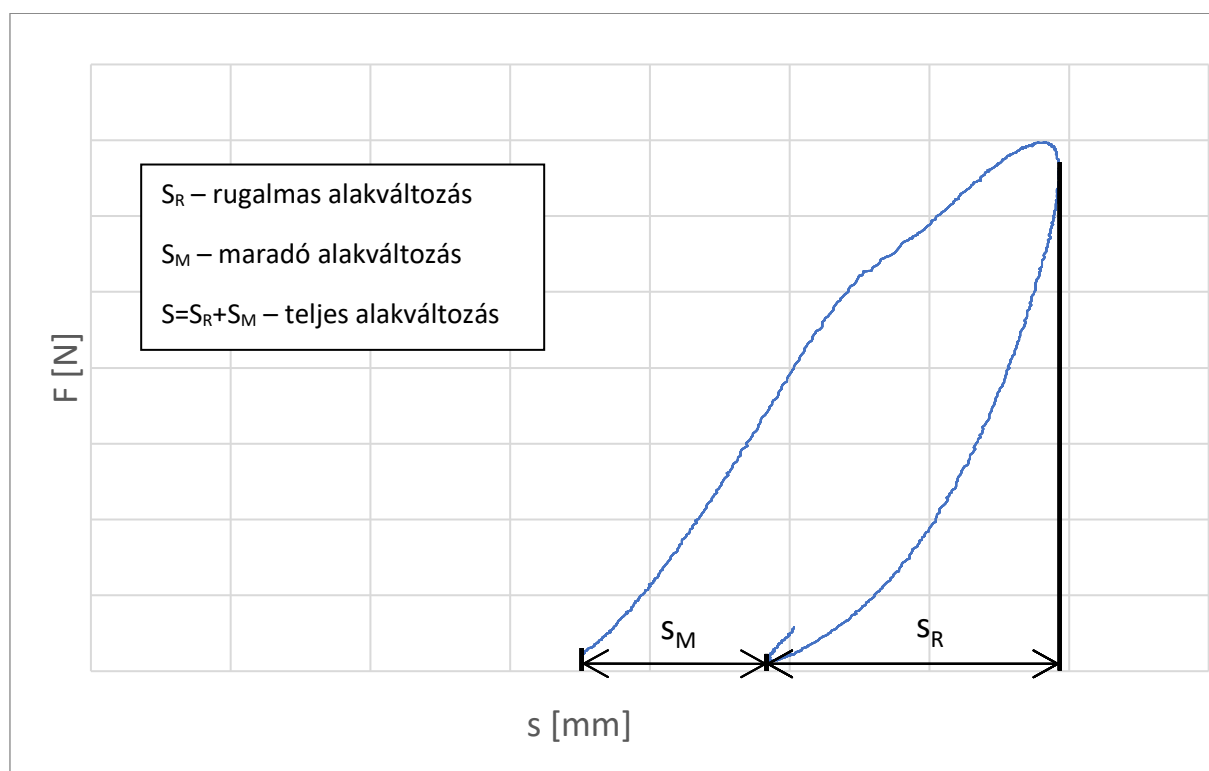


19. ábra: Az A_V értékek és az illesztett görbék

5. táblázat: Az adatsorra illesztett görbék paraméterei

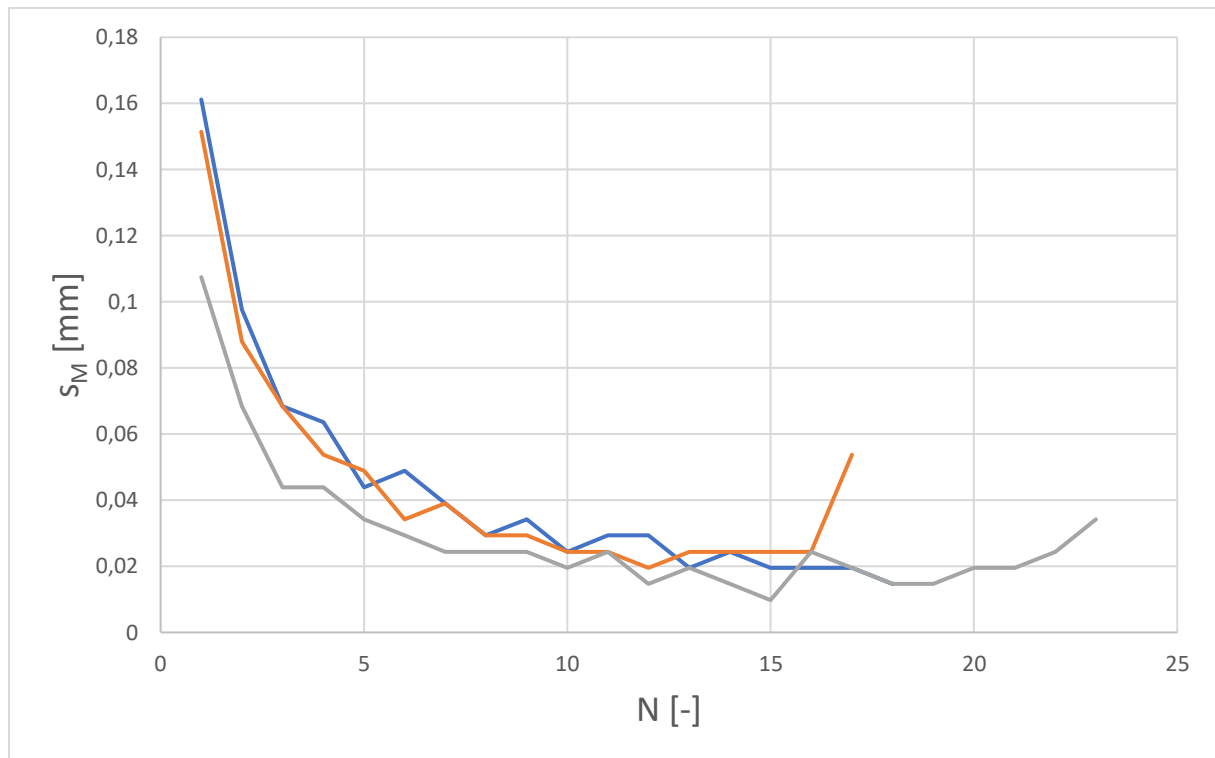
	$A_V = ae^{b(N-c)} + d$	$A_V = a(N + b)^c + d$
a	1,019	3,139
b	-0,184	-0,945
c	1,203	-0,858
d	0,668	0,470
J	0,647	0,626
R ²	0,845	0,850

4.3. A ciklusonkénti maradó alakváltozás állandósult értéke és a tönkremenetelig eltelt ciklusszám közötti összefüggés meghatározása



20. ábra: Egy ciklus rugalmas és maradó alakváltozása

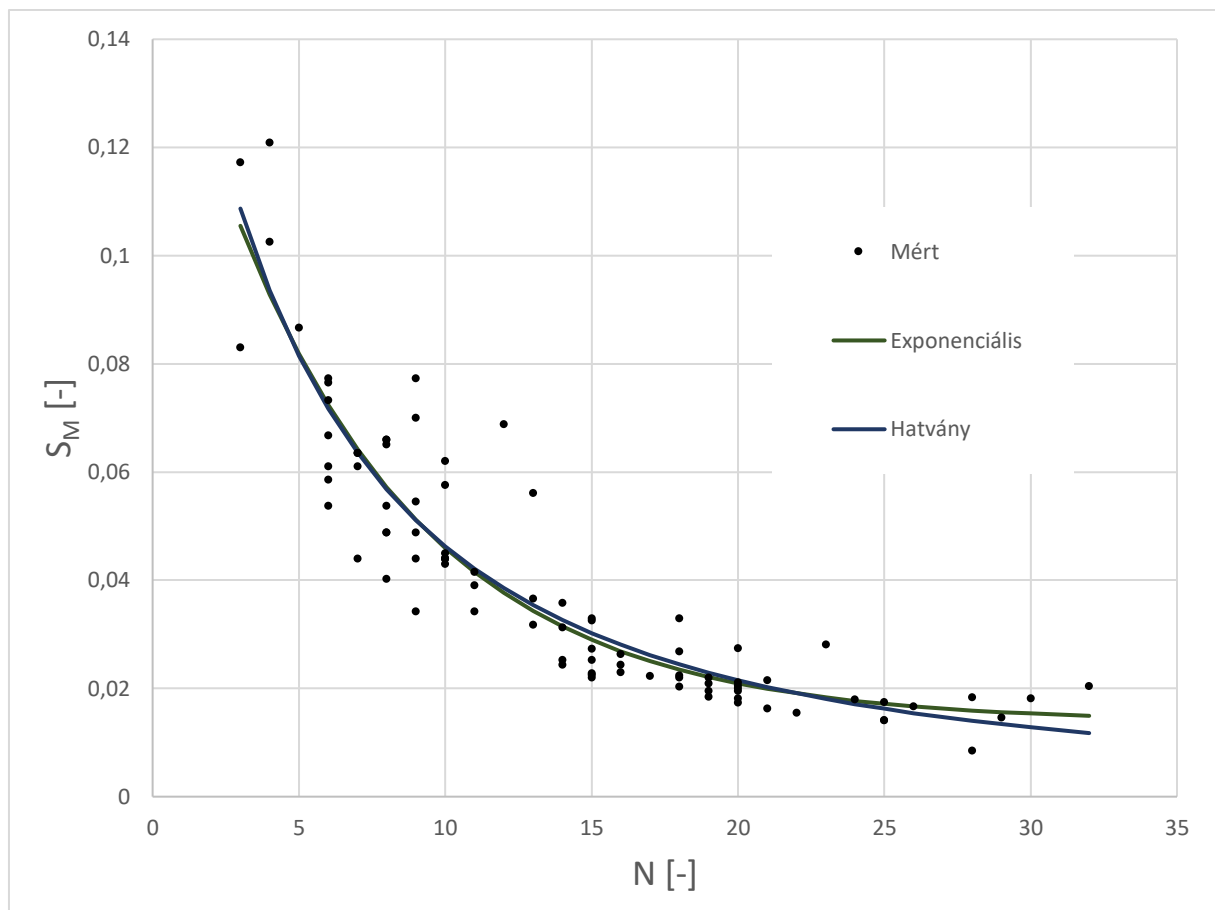
A 20. ábrán látható módon az egyes ciklusok alakváltozása két részre, a rugalmas S_R és a maradó S_M alakváltozásra osztható. A mért adatsorok vizsgálata során megállapítottam, hogy az adott termény esetén a ciklusonkénti maradó alakváltozás értéke jellemzően egy konstans (nullánál nagyobb) értékhez konvergál, ahogy az néhány kiválasztott ciklus példáján a 21. ábrán is látható. Mivel az egyes ciklusok maradó alakváltozása (azaz a teljes maradó alakváltozás növekedése) állandósul, ezért ez a jelenség jellegét tekintve hasonló a 8. ábrán látható, korábban ismertetett diagramhoz.



21. ábra: Az egyes ciklusok maradó alakváltozása

Megfigyelhető, hogy közvetlenül a tönkremenetel előtti ciklusoknál gyakran jelentősen eltérő nagyságú, és látszólag semmilyen szabályszerűséget nem követő, véletlenszerűen megjelenő értékek találhatók. Az állandósult érték meghatározásakor ezeket nem vettem figyelembe.

Mivel az alakváltozás értékeit ábrázoló diagram hasonló jellegű, mint az A_v energiaarány esetén, ezért ugyanolyan görbék illesztését végeztem el. Az eredményeket a 22. ábra és az 6. táblázat tartalmazza.

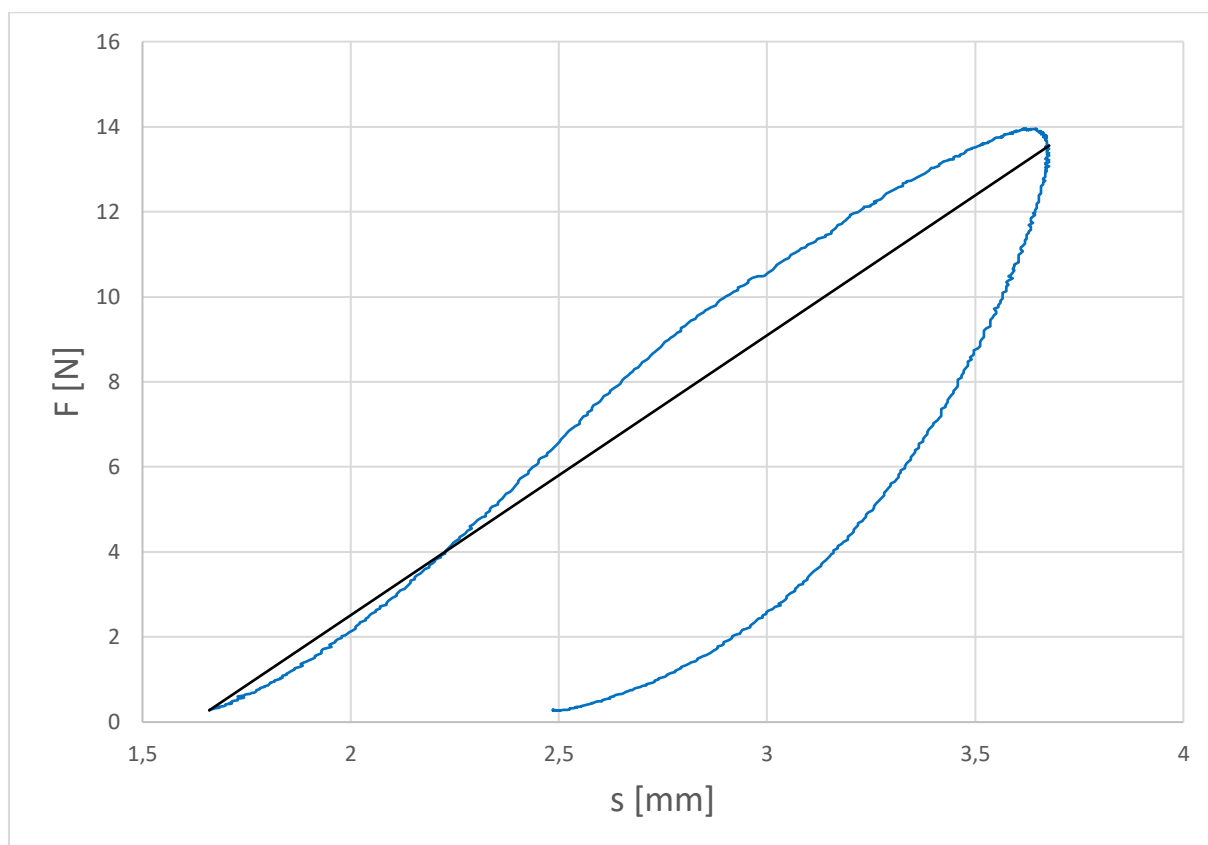


22. ábra: A ciklusonkénti maradó alakváltozás állandósult értékei

6. táblázat: A görbeillesztés során kapott paraméterek

	$S_M = ae^{b(N-c)} + d$	$S_M = a(N+b)^c + d$
a	0,141	10,359
b	-0,149	-8,748
c	0,126	-1,853
d	0,014	0,001
J	0,007	0,007
R ²	0,852	0,852

4.4. A meredekség meghatározása



23. ábra: A meredekség meghatározása

Az első terhelési ciklus kezdőpontját és terhelési csúcspontját összekötő egyenes (... ábra) meredekségeként bevezettem az M jellemzőt.

$$M = \frac{F_{CS} - F_K}{s_{CS} - s_K} \quad (14)$$

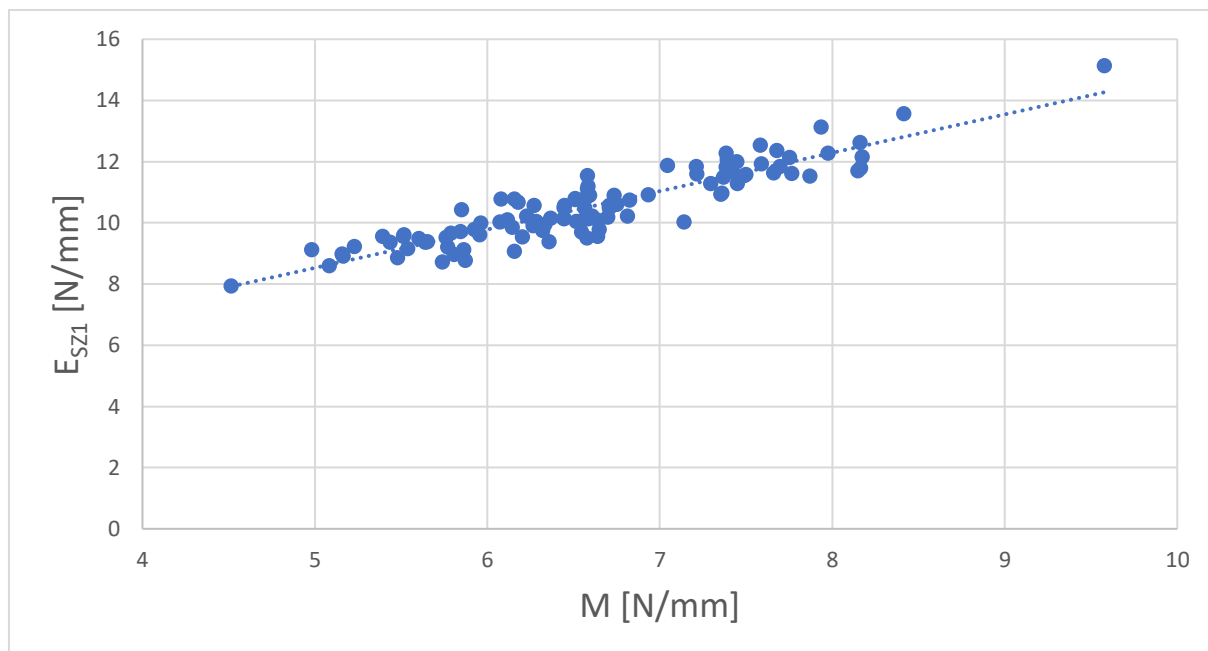
ahol

M a meredekség [N/mm],

F_{CS} , F_K az erő értéke a ciklus kezdeti- és csúcspontjában [N],

s_{CS} , s_K a deformáció értéke a ciklus kezdeti- és csúcspontjában [mm]

A meredekség és a viszkoelasztikus modell E_{SZ1} jellemzője között az 24. ábrán látható módon lineáris függvénykapcsolat határozható meg.



24. ábra: A meredekség és az E_{SZ1} modellparaméter kapcsolata

Az adathalmazra az

$$E_{SZ1} = 1,253 \cdot M + 2,26 \quad (15)$$

egyenlettel leírható egyenes illeszthető, az illesztés pontossága az $R^2=0,833$ értékkel jellemezhető. Az egyes frekvenciákhoz tartozó adatpontokra külön-külön ennél nagyobb pontossággal illeszthető egyenes. Az előzőekhez hasonlóan az egyenes egyenletét

$$E_{SZ1} = A \cdot M + B \quad (16)$$

alakban határoztam meg. Az így kapott értékeket a 7. táblázat tartalmazza. Az egyes frekvenciákhoz tartozó diagramok a 3. mellékletben láthatók.

7. táblázat: Az egyes frekvenciák adatsorára illesztett egyenesek paraméterei

f [Hz]	A	B	R^2
2,5	1,392	1,609	0,895
3,7	1,225	2,707	0,860
5	1,279	2,407	0,859
7,5	1,303	1,836	0,888
10	1,316	1,557	0,854
11,6	0,959	3,823	0,842

4.5. A ciklikus kúszási modell alkalmazása

A korábban (3. egyenlet) ismertetett ciklikus kúszási modellt szerkezeti anyagok jellemzésére hozták létre, de később különféle biológiai szövetek vizsgálata során is sikeresen alkalmazták,

azonban kimondottan mezőgazdasági terményekre nem. Ezért megvizsgálom, hogy a modell az általunk vizsgált almák tulajdonságainak jellemzésére használható-e.

$$\varepsilon_r = \alpha \left[A \left(\frac{\ln N}{\ln N_f} + C \left(\frac{N}{N_f} - \frac{\ln N}{\ln N_f} \right) \right) + B^2 \frac{\ln \left(1 - \frac{N}{N_f} \right)}{\ln \frac{1}{N_f}} \right] \quad (17)$$

A modell – mivel szerkezeti anyagok jellemzésére hozták – a fajlagos alakváltozás értékét adja meg. Ez egy szabályos alakú próbatest esetén megfelel, azonban a szabálytalan alakú és méretű mezőgazdasági termények esetén nem lehet a fajlagos alakváltozást egyetlen számértékkel megadni, hiszen az a termény különböző pontjaiban eltérő lehet. Ezért a fajlagos alakváltozás analógiájaként az abszolút alakváltozást fogom használni.

Az eredeti modellben az A, B és C tényezők valós fizikai jelentéssel rendelkeztek, az anyagra jellemző mechanikai mennyiségeket jelöltek. Jelen esetben azonban ezeket önálló paraméternek tekintem, azok fizikai tartalmának meghatározása nélkül. Emiatt az „ α ” szorzótényező elhagyható, ez a modellben nem okoz változást. Az „ α ” tényező elhagyása nem csak lehetséges, de feltétlenül szükséges is a paraméter identifikáció végrehajtásához, ugyanis az határozatlanná tenné a paraméterek meghatározását, és az eredmények nem lennének összehasonlíthatóak. A paraméterek identifikációját a 4.2. pontban ismertetett eljárással megegyező módon végeztem el a 2,5 Hz terhelési frekvencia mellett mért adatsorra. Az eredményeket a 4. melléklet tartalmazza. A paraméteridentifikáció sikeres volt, az egyes termények viselkedése igen pontosan jellemezhető a modellel. Azonban a különböző terményeket jellemző paraméterek között – bár ezzel kapcsolatban részletesebb elemzést nem végeztem – látszólag nincs összefüggés vagy szabályszerűség.

Azon felül, hogy az így meghatározott modellparaméterek nem rendelkeznek fizikai jelentéssel, a modell alkalmazásának az azt leíró egyenlet is korlátot szab. Az egyenlet

$$\ln \left(1 - \frac{N}{N_f} \right) \quad (18)$$

tagja ugyanis az utolsó ciklus esetén matematikailag nem értelmezhető, hiszen a logaritmus argumentumában 0 szerepelne, ami a természetes alapú logaritmus értelmezési tartományának nem része. Ez nem jelentett problémát a modell szerkezeti anyagokra történő alkalmazásakor, a magas ciklusszám miatt. Esetünkben azonban a jelentősen alacsonyabb ciklusszám miatt egyetlen érték elhagyása is jóval nagyobb pontatlanságot okozhat – különösen azért, mivel ez éppen a tönkremenetel szempontjából legfontosabb utolsó ciklus.

5. Összefoglalás

A gyümölcsök szüretelése, szállítása és ipari feldolgozása során keletkező sérülések elkerüléséhez elengedhetetlen a mechanikai sérülési és tönkremeneteli jelenségek minél pontosabb meghatározása.

Dolgozatomban Golden Delicious almák dinamikus mechanikai vizsgálata során mért adatokat dolgoztam fel. Algoritmust dolgoztam ki a terhelési ciklusok jellemző csúcspontjainak meghatározására és az energiaértékek numerikus integrálással történő kiszámítására. Az algoritmus alapján a számításokat végrehajtó kódot a Microsoft Excel VBA felületén készítettem el.

Megállapítottam, hogy a periodikus terhelés során az egyes ciklusok maradó alakváltozása egy állandó értékhez konvergál. Az általam létrehozott algoritmus alapján számított rugalmas, és a kiindulási adatként rendelkezésre álló disszipált energiák hánadosaként alapján arányszámot hoztam létre.

Az így meghatározott maradó alakváltozás nagysága és az energiaarány, valamint a tönkremenetelig eltelt ciklusok száma között exponenciális- és hatványfüggvény szerinti kapcsolatokat határoztam meg.

Megállapítottam, hogy a ciklikus kúszás reológiai modellje alkalmazható a gyümölcsöket érő periodikus terhelés hatásának jellemzésére is, azonban a modell alkalmazhatóságának korlátot szab a modell matematikai alakja, valamint a valós fizikai tartalommal nem rendelkező modellparaméterek használata.

6. Javaslatok

A kutatás folytatására az alábbi javaslatokat teszem:

A 4.1. pontban ismertetett módon a mérési adatsor két, egyértelműen elkülönülő halmazra osztható, melynek oka jelenleg nem ismert. A 2. melléklet alapján megfigyelhető, hogy a jelenség magasabb frekvencián nagyobb számban jelentkezik, tehát látszólag frekvenciafüggő. Azonban ezt egy ettől teljesen független hatás is okozhatja, ugyanis a mérések rendre a frekvencia szerint növekvő sorrendben lettek elvégezve. Annak ellenőrzésére, hogy a jelenség a frekvenciával vagy a terményen elvégzett korábbi mérések hatásával áll kapcsolatban, fordított sorrendben (csökkenő frekvenciával) elvégzett mérések szükségesek.

A ciklikus kúszás modelljét ugyan alkalmazható a gyümölcsök jellemzésére, azonban ennek paraméterei jelen esetben nem rendelkeznek valós fizikai tartalommal. Szerkezeti anyagok esetén ezek a paraméterek az anyag statikus körülmények között vett szilárdsági tulajdonságaival, valamint a terhelés időbeni függvényének jellemző értékeivel kifejezhetők. További vizsgálatok tárgyát képezheti, hogy ezzel analóg módon a gyümölcsök esetén is meghatározhatók-e ilyen jellemzők.

A mérések során a terhelő erő értéke úgy lett megválasztva, hogy a tönkremenetel jellemzően néhány másodperc alatt bekövetkezett. A mérőberendezés és az ahhoz használt szoftver ugyan alkalmas ennél nagyságrendileg alacsonyabb terhelés (és így nagyobb időtartamú mérés) kezelésére, azonban ennek a mérőrendszer részét képező számítógép teljesítménye korlátot szab, így ezek csak jelentősen alacsonyabb mérési frekvenciával lennének végrehajthatóak. A lehető legalacsonyabb, de még elfogadható pontosságot adó frekvencia meghatározására próbamérések végezhetők. Ez úgy végezhető el, hogy egy nagy frekvencián mért adatsornak csak bizonyos elemi vesszük figyelembe, például minden tizediket, így gyakorlatilag egy tized akkora frekvenciával mért adatsort mesterségesen előállítva. A két adatsor alapján számolt jellemzőket összehasonlítva (az eredeti, magas frekvenciával mért adatsort tökéletesen pontosnak tekintve) egyszerűen meghatározható a szűkített adatsor pontossága, és így – az elvárt pontosság meghatározása után – iterációval a legkisebb, még megfelelő mérési frekvencia.

7. Irodalomjegyzék

Ahmadzadeh, G.R., Varvani-Farahani, A., 2012, "Triphasic ratcheting strain prediction of materials over stress cycles", *Journal of Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* 35:929-935.

Bagherzadeh, M., M. Inamura and H. Jeong (2014), "Food Waste Along the Food Chain", *OECD Food, Agriculture and Fisheries Papers*, No. 71, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/5jxrcmftzj36-en>.

Dao-Long Chen, Ping-Feng Yang, Yi-Shao Lai (2012): A review of three-dimensional viscoelastic models with an application to viscoelasticity characterization using nanoindentation, *Microelectronics Reliability*, Volume 52, Issue 3, Pages 541-558, ISSN 0026-2714

Eissa, A. H. A., Albaloushi, N. S., & Azam, M. M. (2013). Vibration analysis influence during crisis transport of the quality of fresh fruit on food security. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 15(3), 181-190.

Farkas, Cs. (2014): *BIOLÓGIAI ANYAGOK SÉRÜLÉSVIZSGÁLATA*. Doktori értekezés, Szent István Egyetem, Gödöllő

Hashemi, Mahboubeh Sadat (2019): Ratcheting response of biological tissues over asymmetric loading cycles. Ryerson University. Thesis. <https://doi.org/10.32920/ryerson.14663346.v1>

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.

Satyadevi A., Sivakumar S.M., Bhattacharya S.S. (2007): A new failure criterion for materials exhibiting ratcheting during very low cycle fatigue, *Materials Science and Engineering*, Volumes 452–453, Pages 380-385, ISSN 0921-5093, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.10.098>.

Shahbazi, F., Rajabipour, A., Mohtasebi, S., & Rafie, S. (2010). Simulated in-transit vibration damage to watermelons. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 12(1), 23-34.

Shahbazi, Feizollah & Rajabipour, A. & Mohtasebi, Seyed & Rafie, Sh. (2010). Simulated In-transit Vibration Damage to Watermelons. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 12. 23-34.

Sheremeta, Roman. (2018). REVIEW OF REOLOGICAL MODELS. *Bulletin of Lviv National Agrarian University. Agroengineering Research*. 22-30. 10.31734/agroengineering2018.01.022.

Surajit Kumar Paul (2019) A critical review of experimental aspects in ratcheting fatigue: microstructure to specimen to component, Journal of Materials Research and Technology, Volume 8, Issue 5, Pages 4894-4914, ISSN 2238-7854, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.06.014>.

T. Acıcan, K. Alibaş, I.S. Özelkök (2007): Mechanical Damage to Apples during Transport in Wooden Crates. Biosystems Engineering. Volume 96, Issue 2, Pages 239-248, ISSN 1537-5110, <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.11.002>.

Vursavus K; Ozguven 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), 311–320

Zbiciak, Artur. (2009). Numerical analysis of dynamic behaviour of elastoplastic beams. Archives of Civil Engineering. 55. 403-420.

8. Ábrajegyzék

8.1. Ábrák

1. ábra: Hooke-test karakterisztikája és szimbolikus jelölése (Sheremeta, 2018)	6
2. ábra: Newton-test karakterisztikája és szimbolikus jelölése (Sheremeta, 2018)	7
3. ábra: Saint-Venant-test karakterisztikája és szimbolikus jelölése (Sheremeta, 2018)	7
4. ábra: Elemi testek párhuzamos és soros kapcsolása (Sheremeta, 2018)	8
5. ábra: Viszkoelasztikus modellek (Dao-Long et al., 2012)	8
6. ábra: Elasztoplasztikus modellek (Zbiciak, 2009)	9
7. ábra (Surajit, 2019)	10
8. ábra Ciklikus kúszás (Satyadevi et al., 2017)	11
9. ábra: DyMaTest felépítése (Petróczki és Fenyvesi, 2014)	14
10. ábra: Poynting-Thomson model (Farkas, 2020)	15
11. ábra: A mérés eredményeként kapott erő-deformáció diagram	16
12. ábra: Az egyik terhelési ciklus csúcspontjának környezete	17
13. ábra: A T_A jellemző eloszlása hisztogramon ábrázolva	19
14. ábra: Lineáris interpolálás	19
15. ábra: Az algoritmus blokkvázlata	23
16. ábra: Az A_E energiaarány értékei hisztogramon ábrázolva	24
17. Az A_E energiaarány a $t=0$ -ban mért értékek függvényében	25
18. ábra: Az A_V értékek és az illesztett görbék	27
19. ábra: Egy ciklus rugalmas és maradó alakváltozása	28
20. ábra: Az egyes ciklusok maradó alakváltozása	29
21. ábra: A ciklusonkénti maradó alakváltozás állandósult értékei	30
22. ábra: A meredekség meghatározása	31
23. ábra: A meredekség és az E_{SZ1} modellparaméter kapcsolata	32

8.2. Táblázatok

1. táblázat: Golden Delicious almákat érő erőhatások (Acican et al., 2006)	5
2. táblázat: DyMaTest készülék adatai (Petróczki és Fenyvesi, 2014)	14
3. táblázat: Mérés beállításai (Farkas, 2020)	15
4. táblázat: Az adatsorra illesztett görbék paraméterei	28
5. táblázat: A görbeillesztés során kapott paraméterek	30
6. táblázat: Az egyes frekvenciák adatsorára illesztett egyenesek paraméterei	32

9. Mellékletek

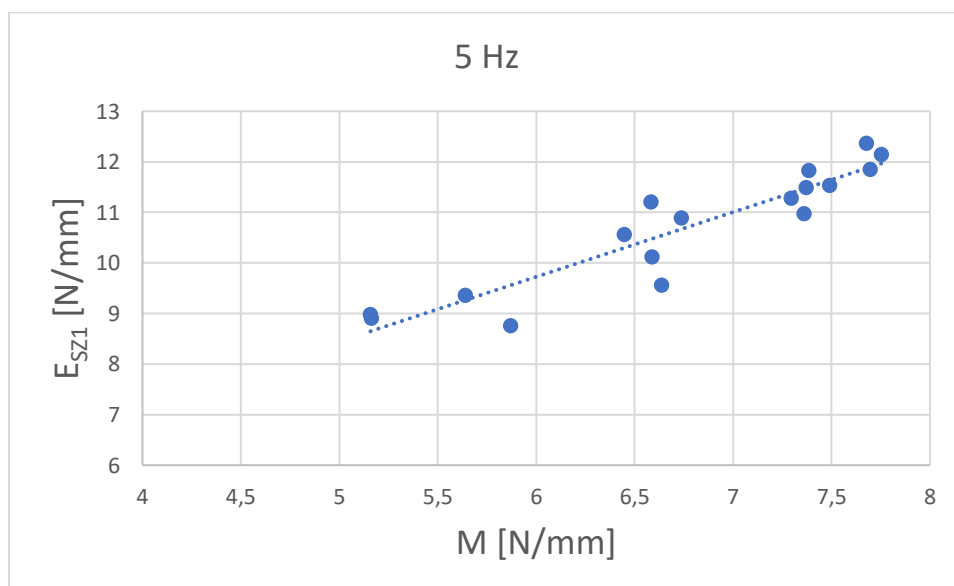
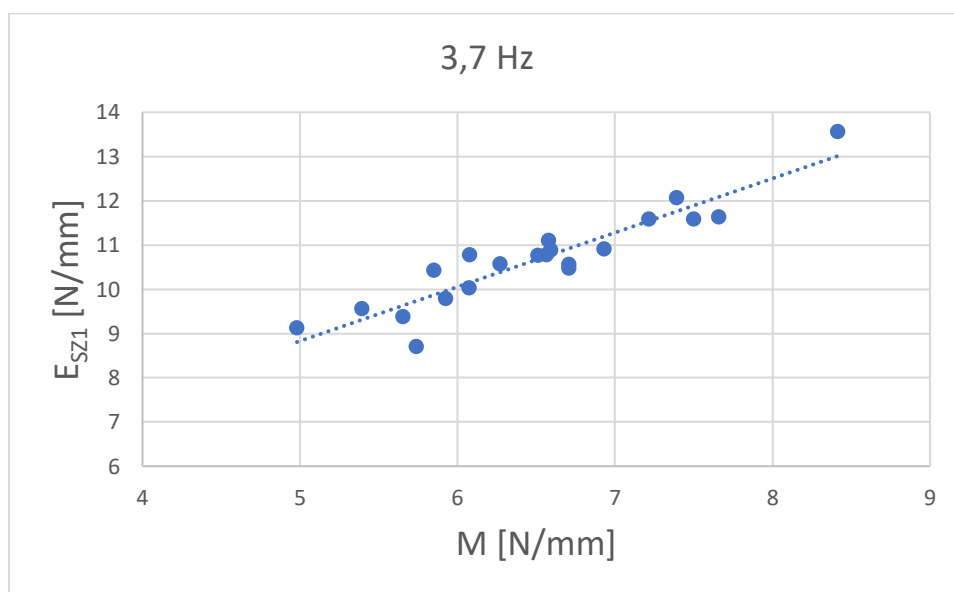
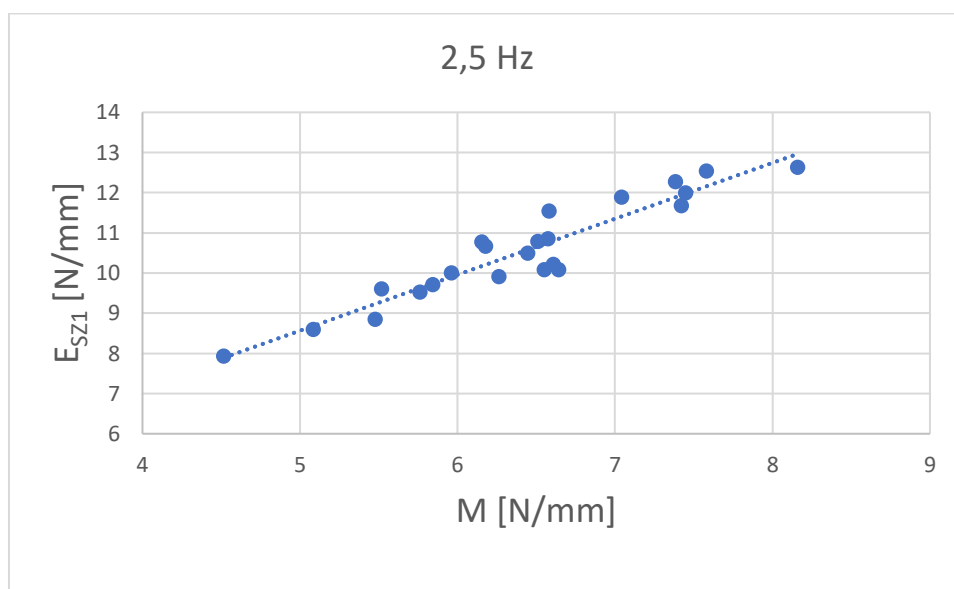
1. melléklet: A T_A jellemző számított értékei

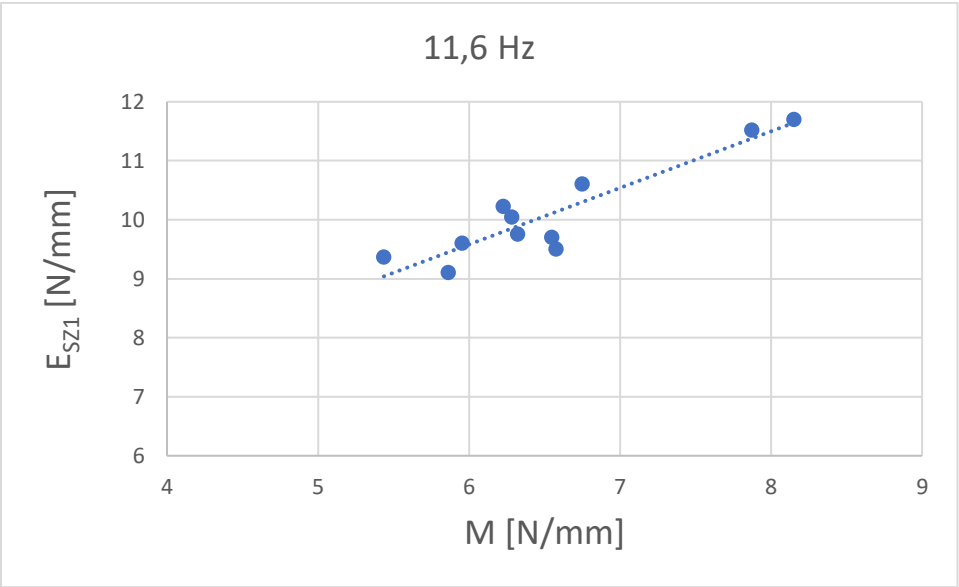
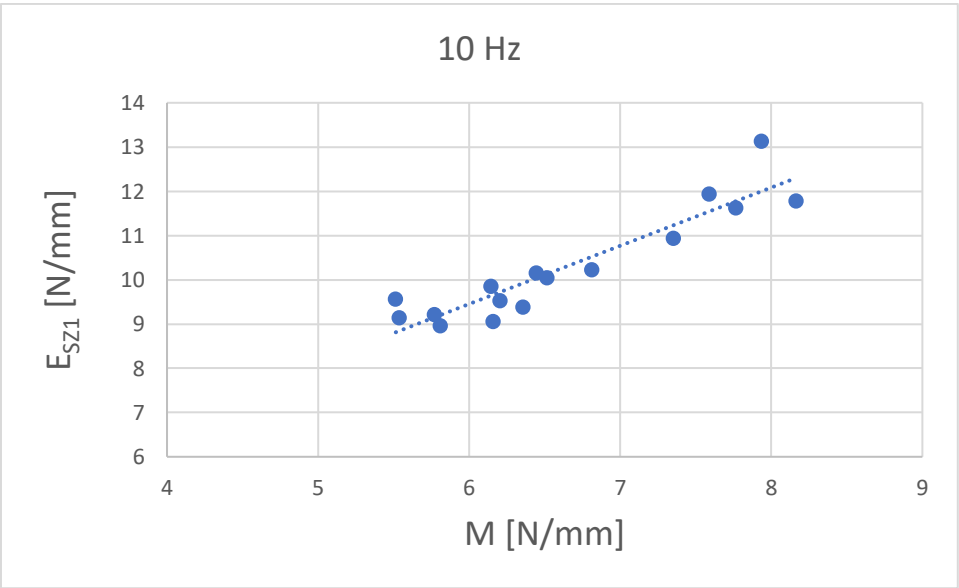
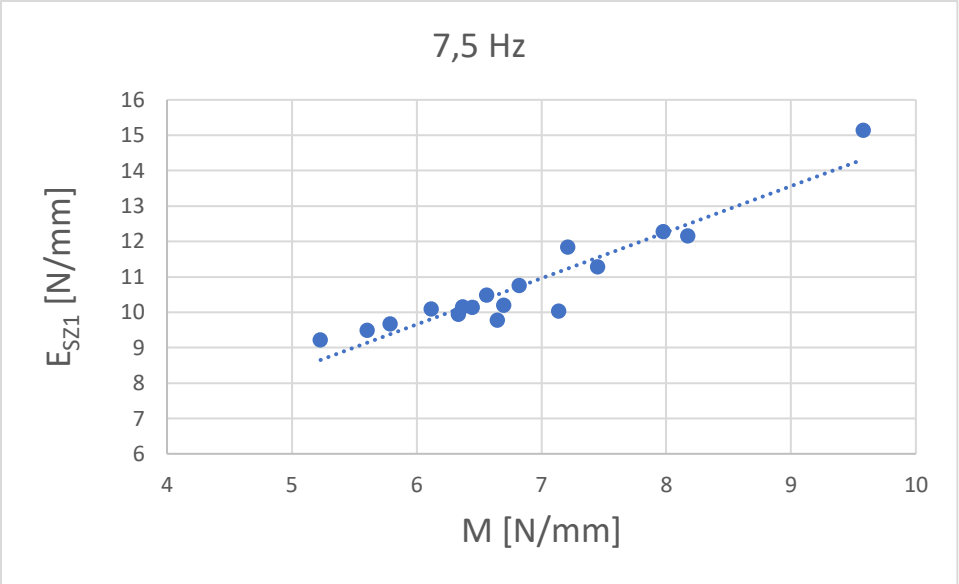
Termény	T_A [%]					
	2,5 Hz	3,7 Hz	5 Hz	7,5 Hz	10 Hz	11,6 Hz
G01	45	53	1744	42	74	49
G02	46	62	57	31	46	60
G03	59	52	44	46	47	67
G04	54	42	55	21	47	115
G05	59	44	41	41	51	51
G06	33	40	33	58	41	51
G07	38	48	47	48	40	49
G08	58	53	76	53	63	59
G09	32	64	54	119	44	70
G10	51	42	51	29	72	47
G11	46	54	51	23	49	64
G12	48	47	43	42	76	136
G13	40	66	43	45	68	59
G14	51	65	45	62	65	44
G15	43	58	53	37	56	65
G16	60	38	47	49	52	44
G17	62	50	53	46	59	63
G18	42	50	38	54	65	62
G19	65	58	49	39	63	48
G20	41	53	61	47	52	55
G21	46	52	57	35	48	31
G22	55	37	134	48	54	42
G23	55	44	53	40	60	56
G24	52	50	43	34	47	63
G25	39	44	54	47	65	54

2. melléklet: Az A_E energiaarány értékei

Termény	A_E [-]					
	2,5 Hz	3,7 Hz	5 Hz	7,5 Hz	10 Hz	11,6 Hz
G01	0,428	0,469	0,455	0,503	0,502	0,468
G02	0,417	0,412	0,433	0,458	0,455	0,432
G03	0,477	0,479	0,455	0,519	0,511	1,194
G04	0,407	0,386	0,395	0,433	0,408	0,455
G05	0,445	0,441	0,448	0,439	0,531	0,539
G06	0,423	0,439	0,479	0,446	0,477	0,955
G07	0,500	0,551	0,461	0,584	0,561	0,593
G08	0,407	0,404	0,414	0,449	0,439	0,477
G09	0,407	0,358	1,305	0,516	1,242	1,212
G10	0,388	1,137	1,097	0,408	1,195	1,139
G11	0,357	1,053	0,432	0,387	0,420	1,046
G12	0,427	1,151	0,370	1,038	0,471	0,440
G13	0,362	0,386	0,403	0,436	0,383	1,010
G14	0,375	0,369	0,347	0,384	0,407	0,430
G15	0,399	0,345	0,414	1,043	1,048	1,062
G16	1,167	0,467	1,098	0,481	0,493	0,834
G17	0,472	0,426	1,111	0,981	0,985	0,959
G18	0,353	0,363	0,913	0,444	1,038	1,023
G19	0,551	0,508	1,243	1,103	1,079	1,134
G20	0,410	1,126	1,065	1,264	1,196	1,180
G21	0,422	0,522	0,490	1,203	0,357	0,514
G22	0,423	0,512	0,502	0,509	0,538	0,529
G23	0,453	0,458	0,458	0,497	0,486	0,474
G24	0,489	0,451	0,430	0,497	0,470	1,125
G25	0,434	0,469	1,219	1,253	1,255	1,195

3. melléklet: A meredekség és az E_{SZ1} modellparaméter kapcsolata





4. melléklet: A ciklikus kúszási modell paraméteridentifikációjának eredményei

Termény	A	B	C	ΣJ
G01	0,8083	0,0001	0,0457	0,000178
G02	0,6818	0,2901	-0,2340	0,000516
G03	0,8002	0,0375	0,2075	0,001096
G04	0,6766	0,0023	-0,1007	0,000367
G05	0,5193	0,1612	-0,0350	0,000010
G06	0,6646	0,1832	-0,0248	0,000064
G07	0,9273	0,2464	0,0629	0,001586
G08	0,7044	0,0673	-0,0239	0,000269
G09	0,8660	0,1200	0,0650	0,000098
G10	0,6921	0,0837	0,0273	0,000218
G11	0,7308	0,1479	0,0151	0,000050
G12	0,6744	0,2693	-0,1807	0,000395
G13	0,6513	0,0731	-0,0152	0,000063
G14	0,5547	0,1390	-0,0199	0,000010
G15	0,6043	0,0609	0,0958	0,000155
G16	0,0982	0,2908	-0,1110	0,000021
G17	0,5934	0,1637	-0,0438	0,000050
G18	0,6392	-0,0579	0,0770	0,002843
G19	0,6321	0,2882	0,0928	0,000325
G20	0,5368	0,4638	-0,4133	0,000681
G21	0,7254	0,2768	-0,2900	0,001413
G22	0,7608	0,2315	0,1966	0,000378
G23	0,6144	0,4272	-0,1120	0,000146
G24	0,9404	0,2264	0,2026	0,033562
G25	0,6773	-0,0537	0,1370	0,000138