



Szent István Egyetem

# SZECSKÁZOTT SILÓKUKORICA HALMAZOK REOLÓGIÁJA

Doktori értekezés tézisei

Bense László

Gödöllő, 2001.

**A doktori program**

**Címe: A mezőgazdasági gépészet alapjai**

**Tudományága: Műszaki tudomány**

**Vezetője: Dr. Szendrő Péter** egyetemi tanár  
az MTA doktora

**Témavezető: Dr. Szendrő Péter** egyetemi tanár  
az MTA doktora

.....  
A programvezető jóváhagyása

.....  
A témavezető jóváhagyása

## TARTALOMJEGYZÉK

Alkalmazott főbb jelölések.....	4
1. A kutatás előzményei, célkitűzések.....	5
1.1. A téma elméleti és gyakorlati jelentősége.....	5
1.2. Célkitűzések.....	7
1.3. A kitűzött célok megvalósításának lehetséges módszerei.....	7
2. A kutatás módszere.....	9
2.1. Elméleti módszerek.....	9
2.1.1. A deformációs állapot leírása.....	9
2.1.2. A feszültségállapot leírása.....	9
2.1.3. A szecskázott silókukorica halmaz termo-mechanikája.....	9
2.2. Kísérleti módszerek.....	11
2.2.1. A vizsgálati terhelés meghatározása impedancia méréssel.....	11
2.2.2. A megterhelési jelleggörbe kiválasztása.....	12
2.2.3. A reológiai mérőrendszer felépítése.....	13
3. Az elvégzett vizsgálatok eredményei.....	15
3.1. A szecskázott silókukorica halmazok relaxációs anyagfüggvényei.....	15
3.2. A szecskázott silókukorica halmazok kúszási anyagfüggvényei.....	16
3.3. Új tudományos eredmények.....	19
4. Következtetések, javaslatok.....	22
5. Összefoglalás.....	23
A témakörben önállóan és szerzőtársként megjelentetett saját publikációk.....	24

## ALKALMAZOTT FŐBB JELÖLÉSEK

Jel	Megnevezés	Mértékegység
$A_i$	i-edik belső változóhoz konjugált belső erő	
$\alpha_i$	belső változók	
$\overline{\overline{B}}$	Cauchy -Green deformáció tenzor (baloldali)	
$\overline{\overline{C}}$	Cauchy -Green deformáció tenzor (jobboldali)	
$\varepsilon$	fajlagos alakváltozás	
$f$	szabad energia	[Jm <sup>-3</sup> ]
$F$	a szabad energia egyensúlyi része	[Jm <sup>-3</sup> ]
$g$	fajlagos ellenállás	[ $\Omega$ m <sup>-1</sup> ]
$g_0$	kontakt ellenállás fajlagos értéke	[ $\Omega$ m <sup>-1</sup> ]
$h$	pillanatnyi mintahosszúság	[m]
$h_e$	egyensúlyi mintahosszúság	[m]
$h_0$	kezdeti mintahosszúság	[m]
$I_i$	skalár invariánsok	
$\lambda$	térfogati viszkozitási jellemző (skalár)	[Nm <sup>-2</sup> ]
$\mu$	nyírási viszkozitási jellemző	[Nm <sup>-2</sup> ]
$\overline{N}$	egységvektor	
$\overline{\overline{O}}$	ortogonális deformáció gradiens tenzor	[s <sup>-1</sup> ]
$u$	belső energia	[J]
$\overline{\overline{U}}, \overline{\overline{V}}$	definit deformáció gradiens tenzor	[s <sup>-1</sup> ]
$p; P$	mechanikai teljesítmény	[W]
$\Pi$	dimenzió nélküli szám	
$\overline{\overline{\Psi}}$	utóhatás függvény (tenzormennyiség)	[Jm <sup>-3</sup> ]
$q$	hőmennyiség	[J]
$\overline{r}$	pillanatnyi konfiguráció (tértartomány)	
$\overline{R}$	referencia konfiguráció (tértartomány)	
$R$	ohmos ellenállás	[ $\Omega$ ]
$\rho$	sűrűség	[kgm <sup>-3</sup> ]
$\rho_0$	kezdeti sűrűség	[kgm <sup>-3</sup> ]
$s$	entrópia	[JK <sup>-1</sup> ]
$ds^2$	két pont távolsága	[m]
$dS^2$	két pont kezdeti távolsága	[m]
$\sigma$	mechanikai feszültség	[Nm <sup>-2</sup> ]
$\sigma_{BY}$	biológiai képlékeny határfeszültség	[Nm <sup>-2</sup> ]
$t; \tau$	idő	[s]
$T$	hőmérséklet	[K]
$\overline{\overline{T}}$	pillanatnyi feszültség tenzor	[Nm <sup>-2</sup> ]
$\overline{\overline{T}}_p$	Piola-Kichoff-féle feszültségtenzor	[Nm <sup>-2</sup> ]

## 1. A KUTATÁS ELŐZMÉNYEI, CÉLKITŰZÉSEK

### 1.1. A téma elméleti és gyakorlati jelentősége

A műszaki feladatok megoldásában gyakran nem maga a méretezés, hanem az alapadatok összegyűjtése jelenti a legnagyobb nehézséget. A tervező munka során természetesnek vesszük, hogy a kész konstrukciót fárasztó vizsgálatokkal, a felhasznált anyagokat anyagvizsgálatokkal és technológiai próbákkal ellenőrizni kell. Csak így lehetünk biztosak abban, hogy a legyártott széria valóban megfelel majd a szabványoknak és a gyártó tanúsítványának. A biológiai változatosság miatt darabonkénti (érzékszervi) vizsgálattá kell szigorítani az ellenőrzést, ha növényi (fa) vagy állati (bőr, csont) anyagot alkalmazunk. Tömeggyártás esetén többek között a munkaigényes gyártás és ellenőrzés szorította ki ezeket az anyagokat a szerkezeti anyagok köréből.

Ennek ellenére sem hagyhatunk fel a szerves anyagok vizsgálatával, sőt a vizsgált anyagok körét célszerű bővíteni, hiszen nem csak a szerkezeti anyagként számításba vehető, hanem a munkadarabként előforduló összes mezőgazdasági termény fizikai jellemzőit ismernünk kell. Munkadarabként már nem csak az anyag tönkremenetelére, kopására vagyunk kíváncsiak, hanem arra is, hogy különböző fémekkel és önmagukkal milyen súrlódási jellemzőket mutatnak, hogyan tömöríthetők, vagy lazíthatók, milyen a száradási és nedvesítési karakterisztikájuk, és ezek a tulajdonságok hogyan változnak térben és időben a gyártás, manipulálás, szállítás, stb. során. Az időelem színrelépésével előtérbe kerülnek a reológiai mérések. Az élelmiszeripar egyes területein (sütőipar, húsipar) a reológiai vizsgálatok a gyártásközi ellenőrzés szerves részét képezik, ugyanakkor a mezőgazdasági feldolgozóipar (takarmánygyártás, cukoripar, söripar, stb.) csak most kezdi felfedezni ezt a tudományágat.

Időben változó térbeli feszültségállapot leírásához a vizsgált minta minden pontjában és a vizsgálat minden időpillanatában ismerni kell a feszültségi és alakváltozási tenzor minden elemét, amely gyakorlatilag lehetetlen. Gépipari anyagvizsgálatoknál azért egyszerűbb a helyzet, mert csak a vizsgált minta egy kritikus keresztmetszetében, és csak egy kijelölt időpontban (pl. a minta tönkremenetele esetén) kell a feszültségi állapotot meghatározni. A silókukorica szállítása, és tartósítási technológiája során gyakorlatilag nem hat a szecska-elemekre akkora igénybevétel, amely további tönkremenetelhez vezetne, és a halmaz "gyenge" keresztmetszetét sem ismerjük. Ebben a megfogalmazásban tönkremenetel alatt a részecskék olyan mértékű tovább aprózódását értem, amely szignifikáns változást okoz a terményhalmaz fizikai jellemzőiben.

Szecskezésnek a szálal takarmányok szálaire merőleges metszéssel történő aprítását nevezzük. A szecskezés általában nem ad végterméket, hanem valamely technológia

előkészítő művelete. Az így előkészített takarmány jobban hasznosul, szállítása könnyen gépesíthető, kisebb energiafelhasználással szárítható, kedvező a tárolótér kihasználása és könnyen tömöríthető. A szecskázott silókukorica tartósítása során az utóbbi két tulajdonság a döntő, hiszen ekkor egy irányított erjesztési folyamat játszódik le, ahol a kedvező tejsavas fermentáció alapfeltétele a tömörített, anaerob feltételeket biztosító halmaz.

A szecskázás technológiája napjainkban megoldottnak tekinthető. Az alkalmazott szecskahosszúságnak nem a gépesítési lehetőségek szabnak határt, hanem a költségtényező, illetve a technológiai ésszerűség (a kérődzők számára élettanilag szükséges úgynevezett szerkezeti rosttartalom miatt nem célszerű 10 mm-nél kisebb átlagméretet választani [48]).

A szecskázott silókukorica különböző méretű, alakú és sűrűségű növényi részek (szár, levél, szemtermés) véletlenszerű elhelyezkedéséből kialakuló halmaz, amelyben a részecskék alakját a növény morfológiája éppúgy meghatározza, mint az előállítás technológiája. A halmaz önmagában keveréktakarmánynak tekinthető, tehát egy inhomogén, fizikai tulajdonságait nézve anizotróp anyagról van szó. Egyszerűsíti a feladatot, hogy a kísérletek az eredeti anyagon elvégezhetők, és hogy a halmazban nincs kijelölt irány, ezért durvaszemcsés felbontásban mégis homogénnek tekinthető.

Más szempontok szerint nézve reológiai anyagról van szó, hiszen rugalmas és késleltetett rugalmas viselkedést, relaxációt, és retardációt (kúszás) mutat, amely jelenségek a következőképpen fogalmazhatók meg: Állandó értéken tartott alakváltozás esetén a növényi anyagban kialakult feszültség értéke az idő függvényében csökken, és általában aszimptotikusan közeledik egy határértékhez. Ezt nevezzük feszültség-relaxációnak. Külső terhelés hatására a növényi anyagban feszültség keletkezik, amely alakváltozást idéz elő. Ha az anyagban a feszültséget állandó értéken tartjuk, akkor a kezdetben létrejött alakváltozás tovább növekszik, és bizonyos esetekben aszimptotikusan egy határértékhez közeledik, más esetekben olyan nagyságúra is növekedhet, hogy az anyag folytonossága megszakad. Ezt a jelenséget kúszásnak nevezzük.

A terhelés megszüntetése után a szecskázott silókukorica halmaznak maradó alakváltozása van, amely ismétlődő igénybevétel hatására megváltozik, tehát az anyag egyfajta memóriával is rendelkezik. A halmaz belső súrlódása miatt az entrópia produkció pozitív, így anyagi tulajdonságainak leírása a termodinamika eszközeivel célszerű.

## 1.2. Célkitűzések

Az 1.1. fejezetben leírtak alapján, a megmunkált növényi anyagok reológiai tulajdonságainak vizsgálatával kapcsolatban végzett sokrétű kutatótevékenységem témakörei közül az alábbi, eddig még kevésbé tisztázott részterület tanulmányozását választottam értekezésem fő célkitűzésének:

### **A szecskázott silókukorica halmaz relaxációja és kúszása során mutatott irreverzibilis állapotváltozását leíró anyagfüggvények elméleti és kísérleti meghatározása.**

A fő cél megvalósításához újszerű mérőkészülék és kísérleti metodika kidolgozása szükséges, amelynek során további, új tudományos eredményekkel is kecsegtető vizsgálatok elkerülhetetlenek. Ezek:

- A henger-dugattyú elven működő plasztométer alkalmazhatóságának vizsgálata. Elsősorban azt kell igazolni, hogy a mérési módszer független lehet a tartósítás technológiájától, tehát a modellparaméterek meghatározásakor nem szükséges nyomatékkal terhelt kerékekkel modellezni a falközi siló tömörítésmódját.
- A mintasiló méreteinek megválasztása, amely a homogénnek tekinthető minimális halmazméret megállapítása után lehetséges.
- A vizsgálat során alkalmazandó silónyomás, illetve mintasűrűség meghatározása, az anaerob határállapot kimérése alapján.
- A megterhelés jelleggörbéjének (vizsgálófüggvény) célszerű megválasztása.

## 1.3. A kitűzött célok megvalósításának lehetséges módszerei

Már most megfogalmazható, hogy a célkitűzésben meghatározott feladatok végrehajtásához milyen módszerek alkalmazása tűnik célravezetőnek.

- A szecskázott silókukorica halmaz belső szerkezetéből következik, hogy az entrópia produkció pozitív, hiszen belső súrlódása van, és viszkózus tulajdonságokat mutat. Az ilyen anyagok modellezése a termodinamika fogalomrendszerének alkalmazásával képzelhető el, hiszen a nemegyensúlyi termodinamika elmélete a termikus folyamatokon kívül mechanikai jelenségek és anyagtranszport folyamatok egzakt leírását is lehetővé teszi. További előnyt jelent, ha a kidolgozott elmélet olyan matematikai aparátust vonultat fel, amellyel elkerülhetők a hagyományos reológia parciális differenciálegyenletei, és kiküszöböli azokat a bizonytalanságokat, amelyeket az anyagszerkezetre vonatkozó hipotézisek egyszerűsítési törekvései okozhatnak.

- A gyakorlati szakembereket legjobban az anaerob állapot eléréséhez szükséges minimális tömörítő erő érdekli. A hézagterfogató szokásosnak tekinthető vizsgálati eljárásai a tömörítés alatt álló szecskahalmaz esetére nehezen alkalmazhatók. Ésszerű feltevésnek tűnik, hogy a stabil belső szerkezet megjelenését a fizikai tulajdonságok állandósulása jellemzi. Tehát a szecska összenyomás közbeni szerkezetváltozása során a fizikai paraméterek egy csoportjának folytonos változását egy vagy több fizikai mennyiség nem folytonos változása kíséri. Ezen mennyiségek közül a fajlagos elektromos ellenállás nem folytonos változásának mérését tartom a legegyszerűbben célra vezető útnak. Ez a vizsgálat támpontot adhat a kísérlet során alkalmazandó-, illetve az üzemi terhelés meghatározásához is.
- A relaxáció és kúszás mérések során alkalmazandó pillanatszerű terhelés a valóságban nehezen valósítható meg, azonban ha a vizsgált anyag relaxációs időállandója nagy, célszerűen megválasztott állandó alakváltozási sebességgel operáló műszer is alkalmas lehet a reológiai kísérletek végrehajtására. A "nagy relaxációs idő" megítélésére nincs általános érvényű szabály, élelmiszeripari analógiák keresése és további kísérletek szükségesek a kérdés eldöntésére. A megterhelés sebességigényét nyomóvizsgálatokkal, az alkalmazhatóság határait a relaxációs idő megméréssel keresem.
- A homogénnek tekinthető minimális halmazméret megítélésében sem egységes a szakma állásfoglalása. Az irodalmi áttekintés alapján spekulatív módszerekkel határozom meg az alkalmazandó mintasíló méretét, figyelembevéve, hogy a készülék kompakt kialakítása az esetleges gyakorlati alkalmazás esélyét is növeli.



## 2. A KUTATÁS MÓDSZERE

### 2.1. Elméleti módszerek

#### 2.1.1. A deformációs állapot leírása

A véges deformációk leírására a Cauchy-Green jobb ( $\bar{\bar{C}}$ ) és baloldali ( $\bar{\bar{B}}$ ) deformációs tenzort alkalmaztam. Felhasználtam, hogy a deformáció gradiens tenzor a poláris dekompozíció elve szerint ortogonális és szimmetrikus pozitív definit tenzorok szorzatára bontható, és hogy az ortogonális tenzor transzponáltja és reciproka megegyezik. Ennek megfelelően a deformálatlan állapot  $\bar{N}$  irányára vonatkoztatott relatív alakváltozása:

$$\varepsilon(\bar{N}) = \frac{ds}{dS} = \sqrt{\bar{N} \cdot \bar{U}^2 \cdot \bar{N}} = \sqrt{\bar{N} \cdot \bar{C} \cdot \bar{N}} = \sqrt{\bar{N} \cdot \bar{V}^2 \cdot \bar{N}} = \sqrt{\bar{N} \cdot \bar{B} \cdot \bar{N}}. \quad (1)$$

#### 2.1.2. A feszültségállapot leírása

A feszültségállapotot visszavezettem a deformálatlan állapot egységnyi felületére vonatkoztatott  $\bar{\bar{T}}_p$  Piola-Kirchhoff-féle feszültségtenzorra.

#### 2.1.3. A szecskázott silókukorica halmaz termo-mechanikája

Az Onsager-féle termodinamika szerint az entrópia produkció előállítható egy bilineáris függvénnyel

$$T \frac{ds_{irr}}{dt} = \frac{1}{\rho_0} \text{tr} \left[ \left( \bar{\bar{T}}_p - \bar{\bar{T}}_{prev} \right) \frac{d\bar{\bar{C}}}{dt} \right] - \sum_i A_i \frac{d\alpha_i}{dt} \geq 0, \quad (2)$$

ahol:  $\left( \bar{\bar{T}}_p - \bar{\bar{T}}_{prev} \right)$ , és  $A_i$  - termodinamikai erők

$\frac{d\bar{\bar{C}}}{dt}$ , és  $\frac{d\alpha_i}{dt}$  - termodinamikai áramok

A Curie elv szerint azonos vektori- illetve tenzori rendű mennyiségekre értelmezhető a skaláris szorzás, tehát a szecskázott silókukorica halmaz anyagi viselkedése felírható skaláris függvényekkel. A szecskázott halmazt durvaszemcsés leírásban izotrópnek tekintettem, bevezettem az  $f = u - Ts$  szabadenergiát, és kihasználtam, hogy a halmaznak nincs folytonos folyadék viselkedése.

Ekkor az alábbi hőmérsékletet nem tartalmazó anyagi egyenletet kaptam:

$$\frac{1}{\rho_0} \overline{T}_p = \frac{\partial F}{\partial C} + \int_0^t [\lambda(t-\tau) \overline{\delta tr} \left( \frac{d\overline{C}}{d\tau} \right) + 2\mu(t-\tau) \frac{d\overline{C}}{d\tau}] d\tau . \quad (3)$$

Innen látszik, hogy a szeccszázt silókukorica halmaz három skaláris függvénnyel jellemezhető,

$$\text{szabadenergia} \quad F = F(\overline{C}) , \quad (4)$$

$$\text{térfogati viszkozitási jellemző} \quad \lambda = \lambda(I_1, I_2, I_3; t - \tau) , \quad (5)$$

$$\text{nyírási viszkozitási jellemző} \quad \mu = \mu(I_1, I_2, I_3; t - \tau) , \quad (6)$$

amelyeket alkalmasan megválasztott kísérleti berendezéssel lehet meghatározni.

$\lambda(t)$  és  $\mu(t)$  tartalmazza  $\frac{\partial F}{\partial C}$ -t mint mért értéket, tehát a szabadenergia függvény

részletes vizsgálata csak akkor szükséges, ha általa további következtetések levonására nyílik lehetőség. A gyakorlati esetek nagy részére a szabadenergia függvény másodfokú alakkal közelíthető

$$F = a(I_1 - 3)^2 + b(I_2 - 3)^2 + c(I_3 - 1)^2 , \quad (7)$$

amelyet behelyettesítve az egyensúlyi feszültségeket leíró egyenletbe, azok között arányosságot találtam. Ennek következményei:

- a szabadenergia függvény megválasztása helyes,
- a kísérletek henger-dugattyú elven működő plasztométerben elvégezhetők.

## 2.2. Kísérleti módszerek

### 2.2.1. A vizsgálati terhelés meghatározása impedancia méréssel

A reológiai vizsgálatok metodikájának kidolgozásánál sarkalatos pont az anaerob viszonyok kialakulásához szükséges terhelés meghatározása. Az alábbiak szerint erre alkalmas a fajlagos elektromos ellenállás nem folytonos változásának vizsgálata.

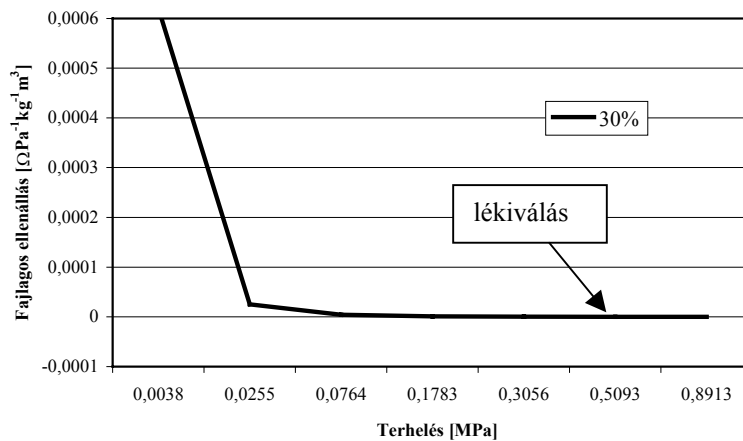
Nyomóvizsgálatokat végeztem szigetelő hengerben elhelyezett szeccskázott silókukorica halmazon, és a nedvességtartalom, a sűrűség és a mechanikai feszültség mellett mértem a minta impedanciáját 1 kHz frekvencián. A mintán kétféle áram folyik az ohmikus áram, mely a térerősséggel (feszültséggel) arányos és az eltolási (kapacitív) áram, amely a térerősség időbeli deriváltjával arányos. Ennek alapján a minta elektromos helyettesítő képe egy ellenállás és egy kapacitás párhuzamos kapcsolása. A minta méretei alapján megbecsültem a kapacitív reaktancia nagyságát, és megállapítottam, hogy nem tévedünk nagyot, ha csak az ohmos ellenállást vesszük figyelembe. A fajlagos ellenállás más fizikai paramétereiktől való függését a dimenzióanalízis módszerével vizsgáltam. Tekintettel arra, hogy a minta keresztmetszete és a fegyverzetek távolsága minden mérésnél

azonos, így a problémát leíró fizikai mennyiségek:  $g = R \left( \frac{l}{A} \right)^{-1}$ ,  $g_0$ ,  $\sigma$ ,  $\sigma_{BY}$ ,  $\rho_0$ ,  $\rho$ . A

fajlagos ellenállás függvény matematikai alakja

$$g = g_0 f \left( \frac{\sigma \rho}{\sigma_{BY} \rho_0} \right) \quad (8)$$

hirtelen változást mutat valamely alkalmasan választott paraméter függvényében.



1. ábra: A szeccskahalmaz fajlagos ellenállásának változása

Ez a hirtelen változás egy a fentiekben jelzett általános értelemben vett "fázis" - átalakulásra utal, ettől kezdve a fajlagos ellenállás  $\sigma\rho$  lineáris függvényévé válik, míg korábban a függvénykapcsolat kvadratikussá vált.

### 2.2.2. A megterhelési jelleggörbe kiválasztása

Az állandó megterhelési sebesség alkalmazhatóságát feltételül szabó "elegendő hosszú" relaxációs idő megítélésére nincs általánosan kidolgozott szabály. Ennek megfelelően szakirodalmi analógiák bemutatásával, a relaxációs idő mérésével és különböző alakváltozási sebességgel végrehajtott nyomóvizsgálatokkal keresem a megterhelési jelleggörbe optimális alakját.

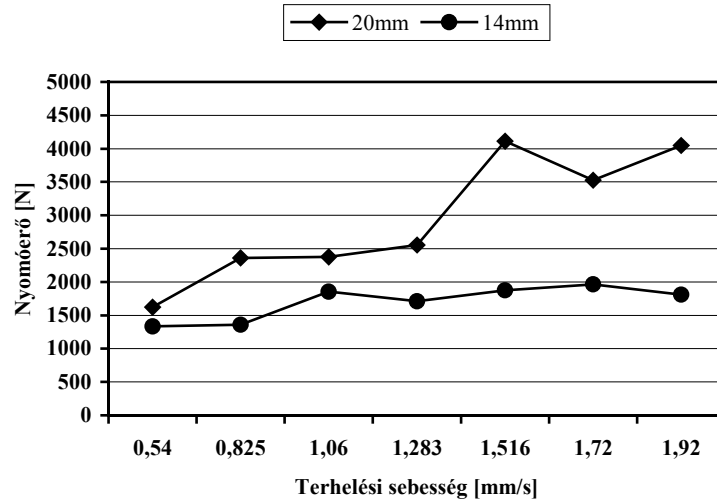
**1. táblázat:** A relaxációs idő és az alkalmazott terhelési sebesség alakulása különböző élelmiszeripari technológiák esetén.

	Relaxációs idő [s]	Terhelési sebesség [mms <sup>-1</sup> ]
Instant tealevél tablettázása 93% szárazanyag tartalom és 0,5-3 mm szemcseméret esetén.	60	130
Perectészta nyomóvizsgálata.	2160-3600	12,5-3,56
Makaróni tészta kisajtolása 6 MPa nyomáson $\phi 7$ mm x $\phi 4,5$ mm x 50 mm.	8640	0,07
A henger dugattyú elvű viszkoziméterek mérési tartománya.	-	0,08-8

**2. táblázat:** A relaxációs idő változása, a szárazanyag tartalom függvényében 14 mm szecskahosszúság esetén

Szárazanyag tartalom [%]	$p_{max}$ [kPa]	$T_r$ [s]
32.81	24.6	10 247
43.00	25.9	6890
54.55	22.6	6694

Megállapítható, hogy az élelmiszeripari példák (1. táblázat) és a relaxációs idő mérése (2. táblázat) alapján 0,07 - 4 mms<sup>-1</sup>, a nyomóvizsgálatok (2. ábra) alapján 1-2 mms<sup>-1</sup> sebességtartományban található az alakváltozási sebesség optimuma. Ennek megfelelően további kísérleteimhez a 2.2.3. fejezetben bemutatott készülékkel létrehozható legnagyobb alakváltozási sebességet (1,92 mms<sup>-1</sup>) választottam.

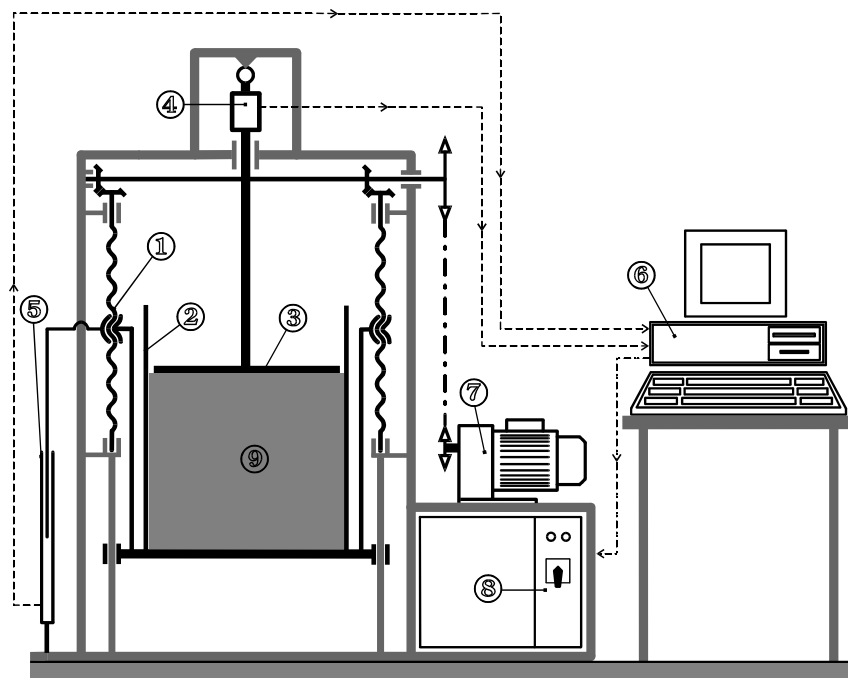


**2. ábra:** A nyomóerő és a megterhelés sebessége közötti összefüggés 14 és 20mm átlagos szecskahosszúság és  $\varepsilon_0=0,64$  relatív alakváltozás esetén

### 2.2.3. A reológiai mérőrendszer felépítése.

A 2.1.3. fejezet szerint a szecskázott halmaz anyagi tulajdonságait leíró függvények a Cauchy-Green alakváltozási tenzor skalár invariánsaitól függenek, így azok meghatározására bármilyen készülék alkalmas, amelyre az alakváltozási tenzor ismert. A reológiai kísérletekhez henger-dugattyú elven működő plasztométert választottam, mert a gátolt oldalirányú alakváltozás lényegesen leegyszerűsíti az alakváltozási tenzort. Az egytengelyű alakváltozás ellenére a halmazban térbeli feszültségállapot alakul ki, a hengerszimmetria miatt mégis elegendő a terhelőerő és a mintasiló falnyomásának a mérését megoldani (3. ábra).

Az alakváltozás a hengerbe fogott minta felemelésével hozható létre, az oldalirányú deformáció gátolt. A deformációs sebesség az aszinkronmotor áramkörébe kapcsolt frekvenciaváltó segítségével fokozatmentesen állítható. Az emelőhídhöz kapcsolódik egy lineáris induktív útdó, amely méri az elmozdulást. A terhelő test (jelen esetben dugattyú) áll, az erőmérő cella a mintáról a dugattyúrúdra átadódó erőhatásokat méri. A mintát befogadó edény palástján kialakított mérési helyekhez membrános nyomásmérő csatlakoztatható, így a falterhelés is mérhető. A mérőberendezés összeállításakor csak az emelőmechanizmust kellett legyártani, az adatgyűjtő és vezérlő berendezés (beleértve a mérő szoftvert is) kereskedelmi forgalomban kapható, illetve a Szent István Egyetem Géptani Intézetének Laboratóriumában rendelkezésemre álló elemekből építettem fel.



1. csavarorsós emelő    2. mérőedény    3. terhelő test    4. erőmérő cella  
 5. induktív elmozdulás jeladó    6. számítógép    7. aszinkronmotor  
 8. vezérlő elektronika    9. nyomásmérő cella

**3. ábra:** Mérő-összeállítás reológiai vizsgálatokhoz

A készülék alkalmas kúszás és relaxáció mérésére is, tehát miközben három mérőcsatornán rögzíti a terhelőerő, a deformáció és a mintasiló falnyomásának értékeit, a terhelő mechanizmust az erő-jel (kúszás) illetve az elmozdulás-jel (relaxáció) alapján képes önműködően szabályozni. A szoftverből történő vezérlést a mérőerősítő 5V-os digitális kimenete, a 230 V-os szilárdtest reléket tartalmazó relékártya és az általam kifejlesztett 0,4 kV-os motorvezérlés teszi lehetővé.

### 3. AZ ELVÉGZETT VIZSGÁLATOK EREDMÉNYEI

#### 3.1. A szecsázott silókukorica halmazok relaxációs anyagfüggvényei

A relaxáció jelenség mérésekor vizsgálófüggvényként a Cauchy-Green alakváltozási tenzor elemeit alkalmaztam. Ebben az esetben a térfogati viszkozitásra jellemző anyagfüggvény a

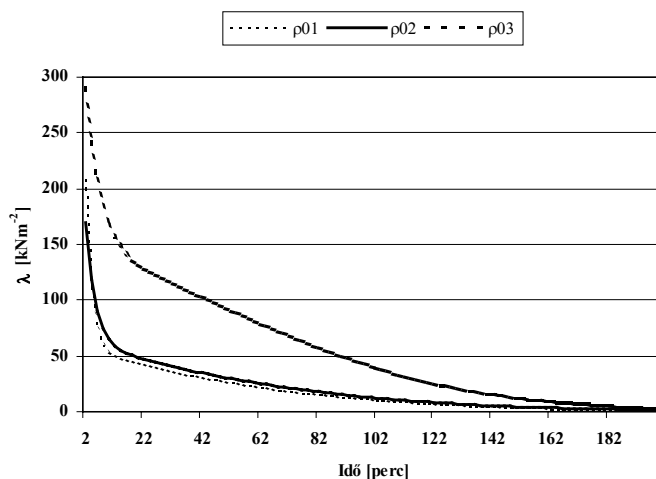
$$\lambda(t) = \frac{1}{2\varepsilon_0^2} \left[ \frac{1}{\rho_0} T_{p_{xx}} - \left( \frac{\partial F}{\partial C} \right)_{xx} \right], \quad (9)$$

a nyírási viszkozitásra jellemző pedig a

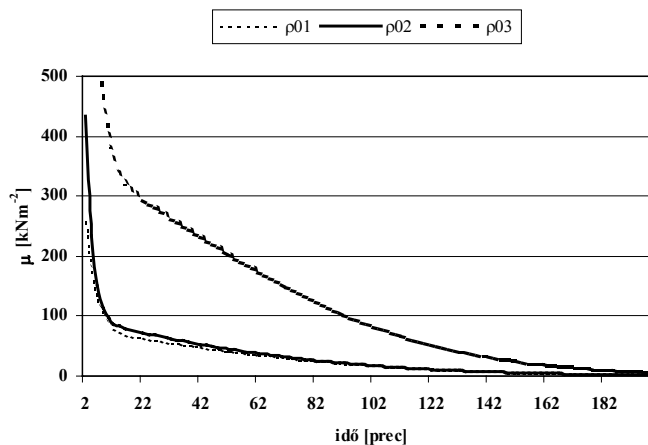
$$\mu(t) = \frac{1}{4\varepsilon_0^2} \left\{ \frac{1}{\rho_0} T_{p_{zz}} - \left( \frac{\partial F}{\partial C} \right)_{zz} - \left[ \frac{1}{\rho_0} T_{p_{xx}} - \left( \frac{\partial F}{\partial C} \right)_{xx} \right] \right\}. \quad (10)$$

összefüggésből határozható meg, ahol  $\left( \frac{\partial F}{\partial C} \right)_{xx} = \left( \frac{\partial F}{\partial C} \right)_{yy}$ ;  $\left( \frac{\partial F}{\partial C} \right)_{zz}$  a szabadenergia függvény alakváltozási tenzor szerinti deriválttenzorának megfelelő skalárkoordinátái.

A relaxáció-görbék illesztését a sorozatos maradékképzés elvét felhasználva végeztem, figyelembe véve, hogy a  $z$  irányban mért feszültséget a gátolt elmozdulásból adódó  $T_{xx}$  is növeli, valamint hogy a mért értékek nem relaxáló, tehát időfüggetlen feszültség komponens is tartalmaznak. A modell illesztésére a Wolfram Research Mathematica 2.2 verzióját alkalmaztam. Feltételeztem, hogy a relaxáció-görbe paramétereiben lineáris. A Mathematica 2.2 LinearFit parancsa a legkisebb négyzetek módszerét alkalmazza, és táblázatos formában közli az illesztés statisztikai jellemzőit is.



4. ábra: A  $\lambda(t)$  függvény változása a sűrűség függvényében



5. ábra: A  $\mu(t)$  függvény változása a sűrűség függvényében

Ahol  $\rho_{01} = 814 \text{ kgm}^{-3}$ ,  $\rho_{02} = 1000 \text{ kgm}^{-3}$ ,  $\rho_{03} = 1358 \text{ kgm}^{-3}$  átlagsűrűséget jelent. A minta anyaga silókukorica teljes növény zúzalék, szárazanyag tartalma 30%, a beállított elméleti szecskahosszúság 11 mm, térfogata pedig  $2,576 \text{ dm}^3$  volt. A relatív alakváltozás  $\varepsilon_0 = 0,2857$  volt.

A szecskázott silókukorica relaxációjának lefutását a halmazsűrűség határozza meg dominánsan. Háromszoros sűrűség növekedés két nagyságrenddel növeli meg  $\lambda$  és  $\mu$  kezdeti értékét. A minta szárazanyag tartalmának hatása ugyanakkor a várttól eltérően nem okozott nagyságrendi változást. Az általam vizsgált szecskaméret tartományban (10-45 mm) a halmaz relaxációja nem mutatott szignifikáns eltérést. Megállapítható továbbá, hogy az ismertetett relaxáció vizsgálat alapján a szecskázott silókukorica halmaz belső összetételére vonatkozó következtetéseket levonni csak igen nagy hibával lehetséges.

### 3.2. A szecskázott silókukorica halmazok kúszási anyagfüggvényei

A kúszás jelenség esetében az alakváltozási tenzorról, mint állapotváltozóról áttértem a Piola-Kirchhoff feszültségtenzorra, mint állapotváltozóra. Így kúszásra az alábbi függvényeket kaptam:

$$\lambda_K(t) = -\frac{1}{\rho_0 h_0^2} \cdot \frac{h^2(t) - h_e^2}{2(T_{zz} - T_{xx})} \cdot \frac{T_{xx}}{T_{zz} + 2T_{xx}}, \quad (11)$$

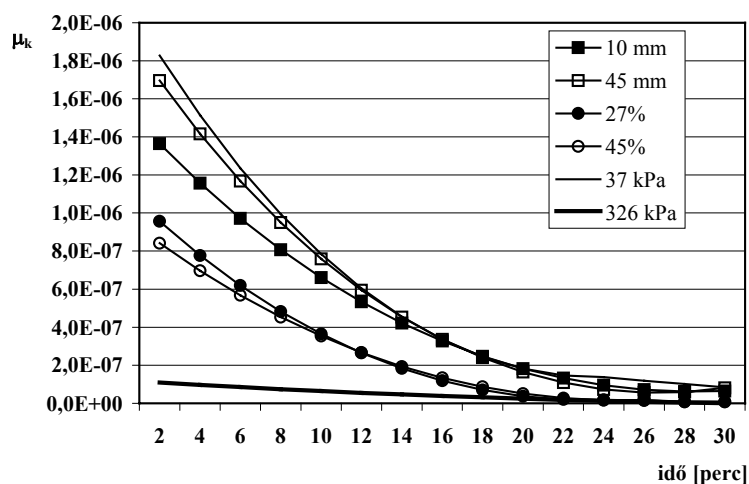
$$\mu_K(t) = \frac{1}{\rho_0 h_0^2} \cdot \frac{h^2(t) - h_e^2}{2(T_{zz} - T_{xx})}. \quad (12)$$



Egyensúlyi állapotban a  $\lambda_K(t)$  és  $\mu_K(t)$  függvények felveszik a zérus értéket, tehát a görbék meredeksége és a tengelymetszés helye jellemző a kúszási folyamatra. Vizsgálataim alapján a következő megállapításokat tettem:

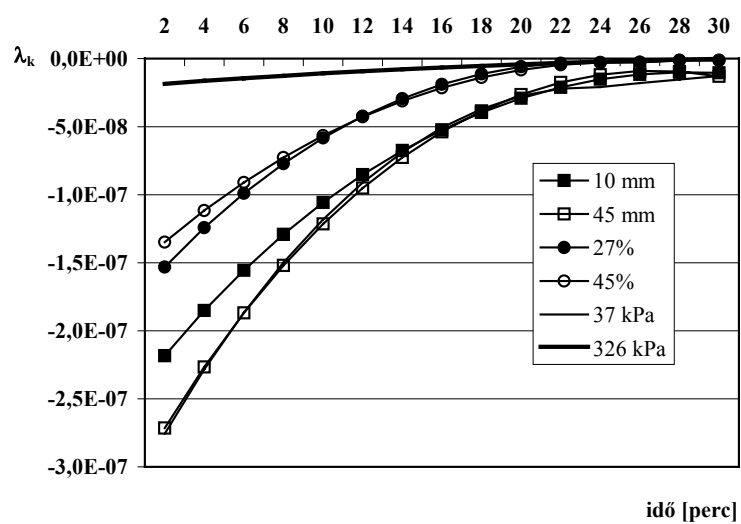
A szecskezott silókukorica szárazanyag tartalma és szecskehosszúsága a halmaz kúszását főként a folyamat kezdeti szakaszában befolyásolja. A szárazanyag tartalom 66%-os eltérése esetén már kb. 12 perc után  $\lambda_K(t)$  és  $\mu_K(t)$  görbék összesimulnak. Ez azért meglepő eredmény, mert tudjuk, hogy a növényi anyagok fizikai tulajdonságait a víztartalom dominánsan határozza meg.

A beállított szecskehosszúsában 350%-os eltérés okoz hasonló jelenséget. A görbék összesimulása ekkor kb. 15 perc után következik be. Ez várható eredmény, hiszen tudjuk, hogy a reológiai mérés alapján a halmaz méretösszetételére csak nagyon bizonytalan választ tudunk adni [13, 14].



**6. ábra:** A térfogati viszkozitásra jellemző anyagfüggvény ( $\mu_K$ ) alakulása a szecskezott silókukorica kúszása során.

Azokban az esetekben ahol nem tüntettem fel a vizsgálati terhelést, ott  $T_{zz} = 75$  kPa volt. Ahol a szárazanyag tartalom nincs jelölve, ott 30%-ot kell figyelembe venni, és a jelöletlen szecskehosszúság 11 mm. Megállapítható, hogy eltérő vizsgálati terhelés esetén a görbék csak a zérusban találkoznak.



7. ábra: A nyírási viszkozitásra jellemző anyagfüggvény ( $\lambda_k$ ) alakulása a szecskázott silókukorica kúszása során.

### 3.3. Új tudományos eredmények

1. Az Onsager-féle nemegyensúlyi termodinamika anyagi egyenleteiből kiindulva levezettem, hogy a szecsakázott anyagalmaz három skalár anyagi viselkedést kifejező függvénnyel jellemezhető, amelyeket alkalmasan választott kísérleti berendezéssel lehet meghatározni. Ezek a függvények a következők:

$$\begin{array}{ll} \text{szabadenergia} & F = F(\overline{C}), \\ \text{térfogati viszkozitási jellemző} & \lambda = \lambda(I_1, I_2, I_3; t - \tau), \\ \text{nyírási viszkozitási jellemző} & \mu = \mu(I_1, I_2, I_3; t - \tau), \end{array}$$

2. Az  $F = F(\overline{C})$  szabadenergia függvényt célszerű az alábbi másodrendű alakban felírni.

$$F = a(I_1 - 3)^2 + b(I_2 - 3)^2 + c(I_3 - 1)^2$$

Kimutattam, hogy ebben az esetben az egyensúlyi feszültségek ( $T_{xx}=T_{yy}$  és  $T_{zz}$ ) között arányosság áll fenn, ahol az arányossági tényező felírható a, b és c paraméterek lineáris kombinációjával. A paraméterek fizikai tartalmának meghatározásától eltekinthetünk, mert a második főtétel második részének értelmében az irreverzibilis állapotváltozás a térfogati és nyírási viszkozus feszültségek függvénye. Az a tény, hogy az egyensúlyi feszültségek között arányosság áll fenn, azt támasztja alá, hogy a kísérleti metodikának nem kell a tartósítás technológiájával hasonlóságot mutatnia, tehát alkalmazható a henger-dugattyú elven működő plasztométer.

3. Relaxációs kísérletekben az időbeli viselkedést leíró anyagfüggvények ( $\lambda$ ,  $\mu$ ) és a szabadenergia függvény ( $F$ ) is a Cauchy-Green-tenzor skalár invariánsaitól függ. Ez nagymértékben megkönnyíti a kísérleti munkát, hiszen tenzor-tenzor függvények helyett skalár-skalár függvények meghatározásáról van szó. Henger-dugattyú elven működő plasztométert alkalmazva további egyszerűsítésre nyílik lehetőség, hiszen az  $x$  és  $y$  irányú deformáció gátolva van, tehát a Cauchy-Green-tenzor mátrixa

$$[\overline{B}] = \begin{bmatrix} \varepsilon^2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ alakú.}$$

A skalár invariánsok pedig:

$$\begin{array}{l} I_1 = 2 + \varepsilon^2, \\ I_2 = 2\varepsilon^2 + 1, \\ I_3 = \varepsilon^2. \end{array}$$

Ez egyben azt is jelenti, hogy az általam alkalmazott elmélet és mérési metodika nem követeli meg a mérési eljárás és a feldolgozási technológia hasonlóságát. A relaxáció

folyamatra (feltéve hogy a deformáció sebesség Dirac-féle delta disztribúciónak tekinthető) levezettem, hogy térfogati viszkozitásra jellemző anyagfüggvény a

$$\lambda(t) = \frac{1}{2l_0^2} \left[ \frac{1}{\rho_0} T_{p_{xx}} - \left( \frac{\partial F}{\partial C} \right)_{xx} \right],$$

a nyírási viszkozitásra jellemző pedig a

$$\mu(t) = \frac{1}{4l_0^2} \left\{ \frac{1}{\rho_0} T_{p_{zz}} - \left( \frac{\partial F}{\partial C} \right)_{zz} - \left[ \frac{1}{\rho_0} T_{p_{xx}} - \left( \frac{\partial F}{\partial C} \right)_{xx} \right] \right\}$$

összefüggésből határozható meg.

Számítógépes szimuláció segítségével meghatároztam  $\lambda(t)$  és  $\mu(t)$  anyagfüggvényeket különböző sűrűségű, szecskahosszúságú és szárazanyag tartalmú szecskázott silókukorica halmazokra. A relaxációs görbék illesztését a sorozatos maradékképzés elvét felhasználva végeztem, figyelembe véve, hogy a  $z$  irányban mért feszültséget a gátolt elmozdulásból adódó  $T_{xx}$  is növeli, valamint hogy a mért értékek nem relaxáló, tehát időfüggetlen feszültség komponenset is tartalmaznak.

4. A kúzás jelenség a relaxációval analóg módon tárgyalható, ha az alakváltozási tenzorról, mint állapothatározóról áttérünk a Piola-Kirchoff-féle feszültségtenzorra, mint állapothatározóra. A szecskázott anyagalmaz kúzását szintén három skalár anyagi viselkedést kifejező függvény jellemzi, amelyeket alkalmasan választott kísérleti berendezéssel lehet meghatározni. Ezek a függvények a következők:

$$\begin{aligned} F_{ko} &= F_{ko}(T_p), \\ \lambda_K &= \lambda_K(I_1, I_2, I_3; t - \tau), \\ \mu_K &= \mu_K(I_1, I_2, I_3; t - \tau). \end{aligned}$$

A kúzás folyamatra levezettem, hogy a térfogati viszkozitásra jellemző anyagfüggvény a

$$\mu_K = \frac{1}{\rho_0 h_0^2} \cdot \frac{h^2(t) - h_e^2}{2(T_{zz} - T_{xx})},$$

a nyírási viszkozitásra jellemző pedig a

$$\lambda_K = \frac{1}{\rho_0 h_0^2} \cdot \left( - \frac{h^2(t) - h_e^2}{2(T_{zz} - T_{xx})} \cdot \frac{T_{xx}}{T_{zz} + 2T_{xx}} \right)$$

összefüggésből határozható meg.

Számítógépes szimuláció segítségével meghatároztam  $\lambda_K(t)$  és  $\mu_K(t)$  anyagfüggvényeket eltérő szecskahosszúságú, valamint különböző szárazanyag tartalmú mintákra.

5. Megterveztem és legyártottam egy készüléket, amely alkalmas a relaxációs idő és a retardációs idő mérésére, valamint empirikus relaxáció- és kúzásgörbék felvételére. A

mintasiló oldalnyomásának mérésével lehetővé tettem a térbeli feszültségállapot kialakulásának és megváltozásának követését is. A készülék az adatokat számítógépes adathordozóra gyűjti, tehát azok további feldolgozása, kiértékelése zárt rendszerben történhet. A készülék a hidás szakítógép elvén működik, ezért alkalmas akár 60 dm<sup>3</sup>-es minta befogadására is.

6. Az anaerob viszonyok kialakulásához szükséges vizsgálati terhelés meghatározható a szecskázott halmaz impedanciájának mérésével. A metodika kidolgozásánál a munkahipotézisem az volt, hogy a halmaz struktúra változását a fizikai jellemzők módosulása kíséri, így a stabil belső szerkezet kialakulását valamely fizikai paraméter állandósulása jelzi. Véleményem szerint erre a célra a fajlagos ellenállás nemfolytonos változásának vizsgálata alkalmas. Megállapítottam, hogy állandó fegyverzet távolság mellett a szecskázott silókukorica halmaz impedanciája függ a nedvességtartalomtól, és a sűrűségtől, de mérhetően nem változik a minta relaxációja alatt. A halmaz kapacitív reaktanciája elhanyagolhatóan kicsiny, ezért nem követünk el nagy hibát, ha a mért impedanciát ohmos ellenállással helyettesítjük. Bevezettem az  $\frac{R}{\sigma\rho}$  fajlagos ellenállást, amely a sűrűség, illetve a terhelés függvényében ábrázolva határozott töréspontot mutat. Mivel ezen a terhelésen a halmaz elemei nem szenvednek szemmel látható további károsodást, úgy vélem, hogy a változást a részecskék maximális érintkezési felületének kialakulása, tehát másképpen fogalmazva az anaerob állapot létrejötte okozza.

## 4. KÖVETKEZTETÉSEK, JAVASLATOK

Az eredmények hasznosítására és a kutatómunka továbbvitelére vonatkozó elképzeléseimet az alábbiak szerint foglalom össze:

- Véleményem szerint célszerű a modellezést különböző szinteken, eltérő bonyolultságú matematikai apparátust felhasználva elvégezni. Ha azt akarjuk, hogy munkánknak gyakorlati haszna legyen, ne akarjunk senkire általunk preferált bonyolult eljárásokat rákényszeríteni, hagyjuk, hogy a gyakorlati szakemberek válasszanak. A kutató feladata ennek a választéknak a bővítése.
- Az általam kidolgozott nemlineáris anyagmodell két különböző bonyolultsági fokkal rendelkező kimenetet is tartalmaz. Igény szerint a szabadenergia függvény paramétereinek fizikai jelentést adva a modell tetszés szerint tovább bővíthető, és bővítendő. Másrészt az általam publikált egyszerű mérési metodikával a modell minden átalakítást mellőzve a gyakorlat igényeinek mindenben megfelelő választ ad.
- A modellparaméterek számszerűsítését a célkitűzésben vállaltaknak megfelelően csak szecszkázott silókukorica halmazra, és csak a szokásos terhelési függvények esetére végeztem el. A modell természetesen érvényes más növényfaj és nem halmazszerű növényi struktúrák vizsgálatára is, a megfelelő kísérletek elvégzését követően.
- A célkitűzésben nem silómodell felállítása, hanem anyagvizsgálati módszer kidolgozása és a szecsakahalmaz irreverzibilis viselkedést leíró anyagfüggvények levezetése volt. Ezek átvitele a szilázs készítés gyakorlatára csak nagyszámú sikeres tartósítási és etetési kísérlet hozzárendelésével lehetséges, amelyek elvégzésére jelen munka keretében nem vállalkozhattam. Az anaerob határállapotra vonatkozó megállapításaim azonban véleményem szerint a gyakorlatban közvetlenül hasznosíthatók.
- Jelen disszertáció és korábbi saját- és társszerzős publikációim sem cáfolják, hogy a szecskaanyag halmazok vizsgálatánál napjainkban is létjogosultsága van a lineáris modelleknek is. Igaz ugyan, hogy a különböző típusú igénybevételekből más-más egyszerűsített lineáris modell vezethető le, de a modellek rendszerjellemező függvényei egymásba mindig átszámíthatók. Figyelembe kell vennünk továbbá, hogy a legegyszerűbb lineáris anyagmodell is alkalmas lehet egy jelenség leírására, amennyiben nem akarunk általános érvényű modellt alkotni, hanem megelégszünk egy bizonyos terhelési szakasz közelítésével és megadjuk az érvényességi határokat.

## 5. ÖSSZEFOGLALÁS

A szecskezott silókukorica és hasonló megmunkált növényi halmazok mechanikai jellemzőinek definíciója több szempontból eltér a szokványos szerkezeti anyagokétól. Csak durvaszemcsés leírásban tekinthető homogénnek, feldolgozása során véges deformációt szenved, és így arra kell az identifikációt is elvégezni. Viszkoelaszticitása miatt memóriával rendelkezik, amely alatt azt értjük, hogy belső energiája nem csak az állapothatározók pillanatnyi értékétől, hanem teljes állapot történetüktől függ. Nyilvánvaló tehát, hogy a halmaz termo-mechanikai leírásához vagy belső változókat, vagy a funkcionál formalizmust célszerű alkalmazni. Ebből a feltevésekből kiindulva értekezésem célkitűzéseit az alábbiak szerint valósítottam meg:

- A termodinamika főtételeiből kiindulva, az Onsager-féle nem egyensúlyi termodinamika anyagi egyenletekre vonatkozó összefüggéseit alkalmaztam, majd kihasználva, hogy a szecskezott halmaz nem folytonos folyadékként viselkedik, a szecskezott anyag halmazát három anyagi viselkedést kifejező skalár függvényekkel jellemeztem, amelyeket alkalmasan választott kísérleti berendezéssel határoztam meg.
- Relaxáció kísérletekben az időbeli viselkedést leíró anyagfüggvények ( $\lambda$ ,  $\mu$ ) és a szabadenergia függvény ( $F$ ) is a Cauchy-Green-tenzor skalár invariánsaitól függ. Ez nagymértékben megkönnyíti a kísérleti munkát, hiszen tenzor-tenzor függvények helyett skalár-skalár függvényeket kell meghatározni. Henger-dugattyú elven működő plasztométert alkalmazva további egyszerűsítésre nyílik lehetőség, hiszen az  $x$  és  $y$  irányú deformáció gátolva van. Ez egyben azt is jelenti, hogy az általam alkalmazott elmélet és mérési metodika nem követeli meg a mérő berendezés és a feldolgozási technológia hasonlóságát.
- Kimutattam, hogy az egyensúlyi feszültségek ( $T_{xx}=T_{yy}$  és  $T_{zz}$ ) között arányosság áll fenn, ahol az arányossági tényező felírható  $a$ ,  $b$  és  $c$  paraméterek lineáris kombinációjával. A paraméterek fizikai tartalmának meghatározásától eltekinthetünk, mert a második főtétele második részének értelmében az irreverzibilis állapotváltozás a térfogati és nyírási viszkózus feszültségek függvénye.
- A kúszás jelenség a relaxációval analóg módon tárgyalható, ha a deformációs tenzorról, mint állapothatározóról áttérünk a Piola-Kirchoff-féle feszültségtenzorra, mint állapothatározóra.
- Az elvégzett kísérletek is azt bizonyítják, hogy a feszültség és a belső energia állapotfüggvények a deformáció történetének és ezzel azt is, hogy a belső munka nélkülözhetetlen fogalom, amely azonban természetes módon vezethető be.

## **A TÉMAKÖRBE ÖNÁLLÓAN ÉS SZERZŐTÁRSKÉNT MEGJELENTETETT SAJÁT PUBLIKÁCIÓK**

1. SZENDRŐ P, BENSE L, NAGY J, PETRÓCZKI K. The Interrelationship between the Size Range and the Rheological Properties of Alfalfa Chop. *Hungarian Agricultural Engineering*, 1989. 2: 14–16.
2. SZENDRŐ P, PETRÓCZKI K, NAGY J, BENSE L. Lucernaszecskés méretösszetételének és reológiai tulajdonságainak összefüggései. MTA-MÉM Műszaki Bizottság Kutatási és Fejlesztési Tanácskozása, Gödöllő, MÉMMI, 1989. 1. kötet, p. 282–289.
3. SZENDRŐ P, BENSE L. A silóérés során végbemenő biológiai és kémiai folyamatok hatása a halmaz reológiai jellemzőire. MTA Agrárműszaki Bizottság Kutatási és Fejlesztési Tanácskozása, Gödöllő, FM Műszaki Intézet, 1991. 2. kötet, p. 354–358.
4. SZENDRŐ P, BENSE L. Szecskázással nyert aprított növényi halmazokra kidolgozott kúszási modell. MTA Agrárműszaki Bizottság Kutatási és Fejlesztési Tanácskozása, Gödöllő, FM Műszaki Intézet, 1991. 2. kötet, p. 359–363.
5. SZENDRŐ P, BENSE L. Szecskázással nyert aprított növényi halmazokra kidolgozott relaxációs modell. MTA-MÉM AMB Kutatási és Fejlesztési Tanácskozás, Gödöllő, 1992, p. 38.
6. BENSE LÁSZLÓ. Aprított növényi részekből álló halmazok reológiai tulajdonságainak vizsgálata. Aktualni zadaci mehanizacije poljopivrede, Opatija, 1995. p. 161-169.
7. BENSE L, SZENDRŐ P. Energetic and work quality investigation of maize stalk capping with along-stalk digesting. *Hungarian Agricultural Engineering*, Gödöllő, 1996. 9: 12-16.
8. SZENDRŐ P, BENSE L, KISS T. Silókukorica szecskázás előtti roncsolásának hatása a szilázsanyag minőségére. *Járművek, Építőipari és Mezőgazdasági Gépek*, 43. évfolyam, 1996. 4: 140-143.
9. SZABÓ I, KÁTAI L, BENSE L. A digitális képfeldolgozás alkalmazási lehetőségei a mezőgazdaságban. MTA-Agrárműszaki Bizottság Kutatási és Fejlesztési Tanácskozása Gödöllő, 1996. 3: 126-131.
10. SZENDRŐ P, BENSE L, KISS T. A zöldtakarmányok aprítás előtti mechanikai kezelésének hatása a szecskahalmaz minőségi mutatóira. MTA-Agrárműszaki Bizottság Kutatási és Fejlesztési Tanácskozása Gödöllő, 1996. 1. kötet, p. 256-261.



11. SZENDRŐ P, BENSE L. Szecskahalmazok reológiája. XXVI. Óvári Tudományos Napok, Mosonmagyaróvár, 1996. IV. kötet, p. 962-968.
12. SZENDRŐ P, BENSE L. Measuring of rheological properties of silage. *Agricultural Engineering*, 1997. 10: 56-59.
13. SZENDRŐ P, BENSE L. A szecskahalmaz belső struktúrája és reológiája közötti összefüggések vizsgálata. *Járművek, Építőipari és Mezőgazdasági Gépek*, 44/1997. 12: 431-434.
14. SZENDRŐ P, BENSE L. Újabb eredmények a szecskahalmaz belső struktúrája és reológiája közötti összefüggések vizsgálatában. MTA-Agrárműszaki Bizottság Kutatási és Fejlesztési Tanácskozása Gödöllő, 1997. 1. kötet, p. 192-197.
15. SZENDRŐ P, KIS P, BENSE L.: Analysing chopped green maize forages by the fractions. *Agricultural Engineering*, 1998. 11: 33-35.
16. SZENDRŐ P, KIS P, BENSE L.: Silókukorica-szecska frakcionált struktúra vizsgálata. *Járművek, Építőipari és Mezőgazdasági Gépek*, 1998. 12: 447-450.
17. SZENDRŐ P, BENSE L. Szecskahalmazok mechanikai tulajdonságainak mérése többfunkciós reométerrel. *Mezőgazdasági Technika*, 1998. 9: 2-4.
18. SZENDRŐ P, BENSE L.: Szecskahalmazok mechanikai tulajdonságainak vizsgálata többfunkciós reométerrel. MTA-Agrárműszaki Bizottság Kutatási és Fejlesztési Tanácskozása 1998, Gödöllő. FVMMI, 1998; 3. kötet, p. 133-138.
19. SZENDRŐ P, KIS P, BENSE L.: Kukoricaszecska morfológiailag frakcionált eloszlásfüggvényei. MTA-Agrárműszaki Bizottság Kutatási és Fejlesztési Tanácskozása, 1998, Gödöllő. FVMMI, 1998, 3. kötet, p. 139-144.
20. SZENDRŐ P, BENSE L. A kukoricaszecska reológiai tulajdonságainak közelítése lineáris anyagmodellekkel. XXVII. Óvári Tudományos Napok, 1998, Mosonmagyaróvár. Pannon Agrártudományi Egyetem, 1998; V. kötet, p. 1034-1038.
21. SZENDRŐ P, KIS P, BENSE L. A corn-cracker alkalmazásának hatása a silókukorica-szecska struktúrájára. XXVII. Óvári Tudományos Napok, 1998, Mosonmagyaróvár. Pannon Agrártudományi Egyetem, 1998; V. kötet, p. 1039-1043.
22. SZENDRŐ P, BENSE L, KIS P. Megmunkált növényi struktúrák modellezése. Kutatási jelentés, MTA TKI – GATE . Gödöllő, 1998. (Hozzáférhető: GATE Géptani Intézet, Gödöllő)

23. SZENDRŐ P, BENSE L. A kukoricaszecska reológiai tulajdonságainak közelítése lineáris anyagmodellekkel. MTA-Agrárműszaki Bizottság Kutatási és Fejlesztési Tanácskozása, 1999. Gödöllő. FVMMI, 1999, 5 p.
24. SZABÓ I, BENSE L. Napraforgó kaszat reológiai vizsgálata MTA-Agrárműszaki Bizottság Kutatási és Fejlesztési Tanácskozása, 1999. Gödöllő. FVMMI, 1999, 5 p.
25. SZENDRŐ P, KIS P, BENSE L. Szemroppantó szerkezet üzemeltetési paramétereinek meghatározása modellkísérletekkel. MTA-Agrárműszaki Bizottság Kutatási és Fejlesztési Tanácskozása, 2000. Gödöllő. FVMMI, 2000, 5 p.
26. BENSE L, SZENDRŐ P, VINCZE GY. Silókukorica-szecska tömörítése korlátozott feltételek között. MTA-Agrárműszaki Bizottság Kutatási és Fejlesztési Tanácskozása, 2000. Gödöllő. FVMMI, 2000, 5 p.
27. BENSE L, DR. SZENDRŐ P, VINCZE GY. Silókukorica-szecska tömörítése korlátozott feltételek között. Jarművek, 2000. 10: 27-29.
28. BENSE L, DR. SZENDRŐ P, VINCZE GY. Thermodynamocs of rheological models. Hungarian Agricultural Engineering, 2000, 13: 12-14.